



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DETERMINACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO DE SEGMENTOS DE PLAYA QUE POSEEN OBSTÁCULOS SUMERGIDOS Y EMERGIDOS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA
PRESENTA:

GABRIEL RUIZ MARTÍNEZ

TUTOR:
DR. RODOLFO SILVA CASARIN



MÉXICO D. F.

NOVIEMBRE, 2009

A mis Padres, Juventino y Cristina
mi hermano Juventino y al pequeñín Jorge.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer y hacer un reconocimiento muy especial a mi Padre y Madre que a lo largo de todo mi desenvolvimiento académico, siempre estuvieron conmigo y se convirtieron en mis piedras angulares. A mi Padre por enseñarme entre otras cosas el ejemplo intelectual a seguir; a mi Madre por el apoyo y el ejemplo que siempre he tenido de ella. A mi hermano y Jorge, el nuevo sol de ellos. A mis padres, les dedico todo el trabajo que se encuentra plasmado en estas páginas y que gracias a Dios han podido observar la etapa final de mi formación, que ellos iniciaron.

Le quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología *CONACYT* el apoyo económico que recibí de su parte y a partir del cual fue posible la manutención de mis estudios de doctorado.

Por otro lado, me gustaría agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México, todos los conocimientos que adquirí en ésta institución educativa y con ello, sentirme lo bastante orgulloso de haber adquirido mis conocimientos profesionales, en las dos máximas instituciones educativas de nuestro país, la UNAM y el IPN.

Mi agradecimiento al Dr. Rodolfo Silva Casarín por aceptar ser mi tutor y darme su total apoyo para el desarrollo y culminación del presente trabajo, así como todos sus comentarios, opiniones, sugerencias e ideas que me hizo a lo largo de mi doctorado. Adicionalmente, mis más sinceros agradecimientos a su esposa la Sra. Jill Taylor por las ocasiones que recibí su ayuda y por permitirme conocer a su familia y su gran hospitalidad. Muchas gracias.

Al Dr. Paulo Salles le agradezco todos sus comentarios y sugerencias que realizó a mi trabajo de investigación.

Al Dr. Fuentes, Dr. Gracia y al Dr. Palacio mi gratitud por las aportaciones que efectuaron al trabajo, a lo largo de mis estudios de doctorado y especialmente por sus valiosos comentarios en la etapa final de este trabajo.

Mil gracias a mis amigos del cubículo con los que compartí muchas horas de mi vida en discusiones, pláticas, fiestas, viajes, congresos y que me soportaron a lo largo de mi doctorado: Gregorio, Germán, Marisol, Sébastien, Brayan, Dalila, Angie, Diego, Alexander, Ana Laura. A mis amigos y compañeros: Claudia, Isela, Jorge, Guillermo, Paco, Mara, Roger, Mónica, Javier, Ana, Ruben, Elena, Haydee, K. Alexa, Rosa María, José Luis, Erick, Ian, Noe, Gustavo, Maritza. Mil gracias al Dr. Edgar Mendoza por sus comentarios, sugerencias y la revisión que realizó en la etapa final de la redacción de este trabajo. Finalmente, a todas aquellas personas que conocí y me apoyaron de una u otra manera a lo largo de mis estudios de doctorado, mi eterno agradecimiento.

Jurado Asignado:

Presidente: Dr. Óscar Fuentes Mariles.

Secretario: Dr. Jesús Gracia Sánchez.

Vocal: Dr. Rodolfo Silva Casarín.

1er. Suplente: Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida.

2do. Suplente: Dr. Arturo Palacio Pérez.

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE LA TESIS
Dr. Rodolfo Silva Casarín

Resumen

En este trabajo se presenta de manera cuantitativa y cualitativa, el análisis de la influencia que ejercen obstáculos naturales, tales como los sistemas de arrecifes, en los estados morfodinámicos de las playas del noreste de Quintana Roo; dependiendo de la protección que los arrecifes de coral proporcionan a las playas, la costa estudiada fue dividida en cinco regiones, de las cuales dos de ellas fueron utilizadas para realizar comparaciones entre playas que se considerarán protegidas o expuestas al oleaje. Dos de esas regiones, Puerto Morelos y Cancún consideradas como playas protegidas y expuestas al oleaje, respectivamente, fueron utilizadas para comparar el comportamiento morfodinámico de la costa ante tales condiciones. Una revisión de la historia geológica de la región, así como la comprensión de las formas geomorfológicas costeras de la zona de estudio fueron realizadas para evaluar y determinar los estados morfológicos de las playas. Además, se presenta una caracterización de los principales parámetros de los sedimentos que se depositan a lo largo de las playas y se determinó el clima marítimo que se observa en las costas del Estado de Quintana Roo. Mediante simulaciones numéricas se conoció el patrón de comportamiento que tiene el oleaje en las playas. El transporte de sedimentos longitudinal fue caracterizado con la información del oleaje y los sedimentos y los patrones de erosión y depositación de la costa determinados.

La comprensión de las repercusiones que los arrecifes de coral tienen en los estados morfodinámicos de las playas, pueden ser empleados en proyectos que permitan una mejor planeación, manejo y explotación sustentable de los elementos que integran los distintos sistemas naturales que convergen y coexisten en la zona litoral.

Abstract

In this study the analysis of the influence of natural barriers, such as reefs, on the morphodynamics of the beaches of north east Quintana Roo is presented in quantitative and qualitative terms. For the purpose of the study and in order to identify the type of protection the coral reefs provide to the beaches the shoreline studied was separated into 5 different regions. From these five sections, the areas of Puerto Morelos and Cancun were selected in order to compare their morphodynamic behaviour under two different “barrier” conditions. These conditions were: an area sheltered from the waves (*i.e.* Puerto Morelos) and an area freely exposed to the wave action (*i.e.* Cancún). In order to perform this comparison and determine the morphodynamic state of the beaches, an overview of the geological history of the area as well as the understanding of the geomorphological forms in the study region was required. In addition, a characterization of the main sediment parameters, for the deposits found on the beaches and the determination of the wave climate for the Quintana Roo coast are also presented. By means of numerical simulation the wave patterns for the beaches were obtained. With the obtained wave and sediment characteristics the longshore sediment transport and the erosion and accretation patterns on the shoreline were described.

The understanding of the repercussions that coral reefs have on the morphodynamic state of beaches is essential for project analysis; allowing sustainable planning, handling and exploitation of the elements which make up the different natural systems that converge and coexist in the littoral zone.

Índice general

Resumen	IX
1. Introducción	1
1.1. Objetivo del estudio	7
1.2. Organización del trabajo presentado	8
2. Aspectos geológicos y su relación con la morfología de las playas en el noreste de Quintana Roo	11
2.1. Introducción	11
2.2. Definición de la zona de estudio	12
2.3. Geomorfología	13
2.4. Aspectos geológicos de la costa Noreste del Estado de Quintana Roo y la Península de Yucatán	21
2.4.1. Características geológicas de Punta Maromas a Cancún	26
2.5. Caracterización geomorfológica de la zona de estudio	32
3. Valoración de las propiedades físicas de los sedimentos de la costa noreste de Quintana Roo	41
3.1. Introducción	41
3.2. Metodología para la caracterización de los sedimentos	42
3.2.1. Recolección de muestras	42
3.2.2. Determinación de los parámetros estadísticos de la muestra	43
3.2.3. Obtención de las propiedades físicas básicas de la muestra	47
3.2.4. Determinación de las propiedades del mezclado agua-sedimento	48
3.2.5. Obtención de los umbrales de movimiento de la partícula en el fondo marino	50
3.2.6. Tamaño y forma de los granos del sedimento	56
3.3. Clasificación y agrupación de resultados	56

4. Análisis de las condiciones del clima marítimo en la línea de costa del noreste de Quintana Roo	65
4.1. Introducción	65
4.2. Modelación del clima marítimo	66
4.2.1. Modelo de predicción de oleaje de tercera generación	68
4.2.2. Modelo de predicción de oleaje con viento ciclostrófico	69
4.2.3. Metodología y resultados de la modelación numérica del oleaje WAM-Hurac	72
4.3. Estadística del clima marítimo	74
4.3.1. Análisis extremal y medio	75
4.3.2. Análisis de tormentas	81
4.3.3. Altura de ola que excede las 12 horas por año	90
5. Influencia de los sistemas coralinos en la hidro-morfodinámica de las playas del noreste de Quintana Roo	93
5.1. Introducción	93
5.2. Trabajo de campo	94
5.3. Modelo numérico de propagación del oleaje	96
5.4. Escenarios de simulación numérica	102
5.5. Delimitación de las áreas de estudio	102
5.6. Condiciones hidrodinámicas en la costa noreste del Estado de Quintana Roo	111
5.6.1. Zona 1, Cancún	111
5.6.2. Zona 2, Punta Nizuc - Punta Caracol	120
5.6.3. Zona 3, Punta Caracol - Punta Pentempich	121
5.6.4. Zona 4, Punta Pentempich - Punta Brava	124
5.6.5. Zona 5, Punta Brava - Punta Maromas	129
6. Evaluación del estado morfodinámico y potencial de erosión de las playas	137
6.1. Introducción	137
6.2. Parámetros físicos requeridos para la definición de los estados morfodinámicos de las playas	138
6.3. Parámetros morfodinámicos de las playas expuestas y no expuestas	141
6.4. Cuantificación del potencial de erosión	152
7. Aportaciones, Conclusiones, Recomendaciones y futuras líneas de investigación	171
7.1. Aportaciones	171
7.2. Conclusiones	171
7.3. Recomendaciones	172
7.4. Futuras líneas de investigación	173
Bibliografía	175
Apéndice A.	184
Apéndice B. Información contenida en el CD	198

Apéndice C. Información contenida en el CD	479
Apéndice D. Información contenida en el CD	601

Índice de figuras

1.1. Corrientes marinas que influyen en el acarreo litoral	2
1.2. Arrastre costero de sedimentos	3
1.3. Caracterización del perfil de una playa	5
1.4. Perfil de invierno y verano de una playa	6
2.1. Zona de Estudio	12
2.2. Variables y procesos que estudia la geomorfología costera	13
2.3. Estados de equilibrio morfológico de un sistema litoral	16
2.4. Formas costeras	17
2.5. Ciclos glaciales	19
2.6. Desarrollo de etapa glacial reciente	20
2.7. Península de Yucatán	22
2.8. Escala de tiempo geológico	23
2.9. Paleogeología de la Península de Yucatán	24
2.10. Mapa geológico de la Península de Yucatán	26
2.11. Niveles del mar registrados en los últimos 20 millones de años	26
2.12. Configuración de las áreas costeras en el periodo del Pleistoceno	30
2.13. Configuración de las áreas costeras en el periodo del Pleistoceno y Holoceno	31
2.14. Fotomosaicos elaborados para la caracterización geomorfológica	33
2.15. Celdas litorales de Cancún	36
3.1. Localización de los sitios de extracción de las muestras de arena	44
3.2. Umbral de movimiento del sedimento	51
3.3. Inicio de movimiento del sedimento	51
3.4. Imágenes de las muestras de arena	57
3.5. Zonificación de los valores promedios del D_{50} y la densidad relativa	59
3.6. Zonificación de los valores promedios del ángulo de reposo y el factor de forma del sedimento	60
3.7. Zonificación de los valores promedios del parámetro de escala y velocidad de caída del sedimento	62
3.8. Comportamiento del D_{50} , la densidad específica y ángulo de reposo en los sitios de extracción	63
4.1. Metodología WAM-HURAC	73

4.2. Estados de mar en aguas profundas de Cancún	74
4.3. Gráficas de probabilidad conjunta del oleaje	75
4.4. Rosa de dirección del oleaje en aguas profundas para Cancún	76
4.5. Gráfica de probabilidad de excedencia del oleaje para la celda Cancún	77
4.6. Distribución de Weibull a largo plazo para la altura de ola significativa	79
4.7. Mapa de periodo de retorno de 50 años para alturas de ola	81
4.8. Gráfico de duración de las tormentas que se presentaron en la celda Cancún de 1948 al 2007	83
4.9. Mapas de duración media de tormentas (hrs) para la zona del Golfo de México y Mar Caribe	84
4.10. Mapas de duración máxima de tormentas (hrs) para la zona del Golfo de México y Mar Caribe	84
4.11. Rosa de altura de ola máxima de tormenta para la celda Cancún	85
4.12. Altura de ola significativa agrupada por meses del año 1948 al 2007 para la celda Cancún	86
4.13. Representación mensual del número medio de tormentas de oleaje	87
4.14. Mapa de altura de ola significativa máxima histórica para la vertiente Atlántica Mexicana	88
4.15. Energía de los eventos metereológicos, agrupada por meses del año 1948 al 2007 para la celda Cancún	89
4.16. Rosa de Energía correspondiente a la celda Cancún	90
4.17. Mapa de energía normalizada máxima histórica para la vertiente Atlántica Mexicana	91
5.1. Definición de zonas de estudio, zona 1,2,3	107
5.2. Definición de zonas de estudio, zona 4,5	108
5.3. Batimetrías de las zonas de estudio	109
5.4. Batimetrías de las zonas de estudio, continuación	110
5.5. Comportamiento del oleaje para la zona 1, $\theta = NE, \theta = ENE$	112
5.6. Comportamiento del oleaje para la zona 1, $\theta = E, \theta = ESE$	113
5.7. Comportamiento del oleaje para la zona 1, $\theta = SE$	114
5.8. Comportamiento de la energía del oleaje para la zona 1, $\theta = NE, T=12s$	115
5.9. Comportamiento del oleaje para la zona 2, $\theta = NE$	117
5.10. Comportamiento del oleaje para la zona 2, $\theta = ENE, \theta = E$	118
5.11. Comportamiento del oleaje para la zona 2, $\theta = ESE, \theta = SE$	119
5.12. Comportamiento del oleaje para la zona 3, $\theta = NE$	121
5.13. Comportamiento del oleaje para la zona 3, $\theta = ENE, \theta = E$	122
5.14. Comportamiento del oleaje para la zona 3, $\theta = ESE, \theta = SE$	123
5.15. Comportamiento del oleaje para la zona 4, $\theta = NE$	125
5.16. Comportamiento del oleaje para la zona 4, $\theta = ENE, \theta = E$	126
5.17. Comportamiento del oleaje para la zona 4, $\theta = ESE, \theta = SE$	127
5.18. Comportamiento del oleaje para la zona 5, $\theta = NE$	129
5.19. Comportamiento del oleaje para la zona 5, $\theta = ENE, \theta = E$	130
5.20. Comportamiento del oleaje para la zona 5, $\theta = ESE, \theta = SE$	131
5.21. Comportamiento del oleaje con rebase para las zona 1 y 4, $\theta = NE$	134

5.22. Comportamiento de la energía del oleaje para las zona 1 y 4, $\theta = \text{NE}$	135
6.1. Procedimiento de filtrado de olas que rompen en la zona litoral	140
6.2. Zonas de la playa, según los procesos que se observan en ellas	141
6.3. Tipos de rompientes y clasificación de las playas según la rompiente que se presenta en ellas	143
6.4. Clasificación de las playas, según criterio de oleaje y marea	148
6.5. Clasificación de las playas, según la rompiente y la pendiente	150
6.6. Clasificación de las playas, según parámetro de estabilidad de la playa	151
6.7. Patrón de comportamiento del transporte de sedimentos longitudinal en zona 1, con $\theta = \text{NE}$	166
6.8. Patrón de comportamiento del transporte de sedimentos longitudinal en zona 4, con $\theta = \text{NE}$	167
6.9. Patrón de comportamiento del transporte de sedimentos longitudinal en zona 1, con $\theta = \text{SE}$	168
6.10. Patrón de comportamiento del transporte de sedimentos longitudinal en zona 4, con $\theta = \text{SE}$	169
7.1. Proceso de desestabilización de un sistema litoral	187
7.2. Mapa de variación de superficie libre y campo de velocidades por marea de tormenta de Cancún	189
7.3. Mapa de variación de superficie libre por marea de tormenta de Cancún	190
7.4. Propuesta de ubicación de estructuras sumergidas (mamparas).	193
7.5. Perfil medido con relleno reconstruido para tormenta intensa con sobre elevación de mayor magnitud.	195
7.6. Perfil medido para el relleno propuesto con la sobre elevación de mayor magnitud.	196

Índice de tablas

2.1. Columna geológica de la Península de Yucatán	25
3.1. Ubicación geográfica de los sitios de extracción de la arena	45
3.2. Distribución de rangos para la desviación estándar, el sesgo y la curtosis de la distribución de tamaños de las muestras de arenas	46
3.3. Clasificación de los sedimentos	47
3.4. Configuración teórica del fondo	52
3.5. Clasificación del flujo, en función del índice de flotación de Arquímedes	52
3.6. Modos de transporte de la partícula	53
3.7. Ecuaciones para la determinación de la velocidad de caída	53
3.8. Categorías para la caracterización de los sedimentos	57
5.1. Condiciones del oleaje para simulaciones numericas (H_s , Altura de ola; T, periodo del oleaje)	103
6.1. Parámetros físicos para la definición de los estados morfodinámicos de las playas	139
6.2. Tipos de estados morfológicos de las playas, considerando Ω y RTR	146
6.3. Tipos de estados morfológicos de las playas, considerando K_* , ξ_b y β	147
6.4. Potencial de erosión en las playas de la región de Cancún	159
6.5. Potencial de erosión en las playas de la región de Puerto Morelos	161
6.6. Variación de la ecuación de Bayram et al. (2007) según sus parámetros	162
7.1. Ubicación de las mamparas	194

1

Introducción

A través de la historia por motivos navales y comerciales, la humanidad ha desarrollado una interacción relevante con las costas; aunque dicha relación, recientemente, ha sido más estrecha debido al incremento de actividades turísticas y de recreo en ellas.

Principalmente, el sistema litoral se conduce por las actividades humanas en términos de demandas sociales que buscan aprovechar los recursos naturales de la región costera con fines de explotación económica, conservación natural o de recreo. Sin embargo los ambientes costeros constituyen ecosistemas que se consideran como frágiles y complejos, por lo que se requiere un adecuado conocimiento de cada uno de los elementos que conforman y actúan en la costa, así como la interdependencia que existe entre ellos.

Una rama de la ciencia que permitió al hombre empezar a desentrañar los misterios y preguntas de cómo se generaron las diferentes formas costeras, así como todo lo que tiene que ver con ellas es la geomorfología que es una disciplina de la geología. Con la geomorfología costera, se pueden identificar los diferentes rasgos costeros que existen, su evolución y los procesos que se presentan en ellos, como por ejemplo la erosión y la depositación, que son generados principalmente por el oleaje, el viento y las mareas.

Cuando se mencionan los procesos costeros que afectan el sistema litoral, se hace alusión a los principales factores que influyen en la costa y que, de una u otra manera, la estabilizarán; éstos generalmente se relacionan con los sedimentos y los fenómenos que pueden afectarlos.

Agrupando los procesos costeros mediante los agentes que los producen, éstos se pueden clasificar en:

1. Geológicos. Donde se toman en consideración la estructura geológica, la litología, la resistencia de las rocas y la composición mineralógica de los sedimentos.
2. Climáticos. El clima influye para que existan los fenómenos de intemperismo y meteorización que están íntimamente ligados a otros procesos físicos, químicos y biológicos.
3. Bióticos. En este tipo de agente, ciertos organismos pueden producir efectos de erosión o destrucción en las rocas que forman la costa. Generalmente, pueden presentar condiciones favorables para la formación de arrecifes en las zonas tropicales.

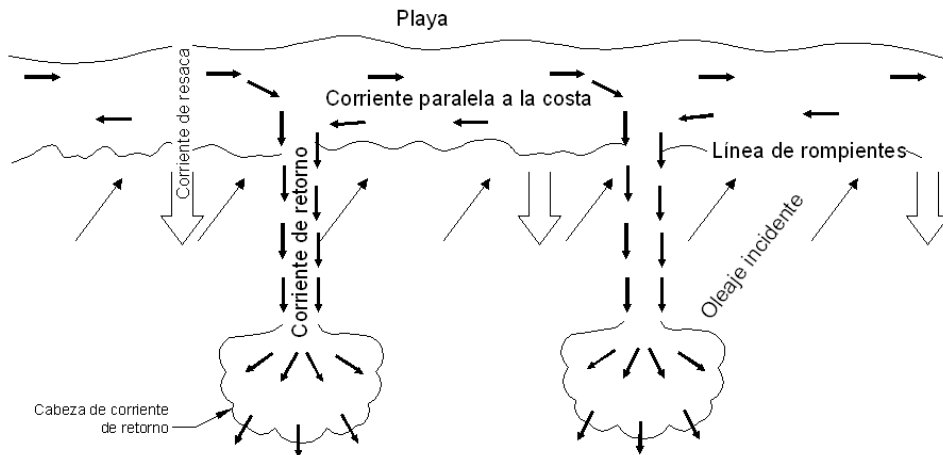


Figura 1.1. Corrientes marinas que influyen en el acarreo litoral

4. Oceanográficos o marinos, también conocidos como efectos morfogenéticos mecánicos, siendo éstos los que más influyen en la forma y comportamiento de la costa; esto como resultado de las mareas, las corrientes y el oleaje.
5. Atmosféricos. Debido a la influencia que tiene sobre los efectos marinos oceanográficos, se considera al viento como el principal efecto.

El contorno de una costa sufrirá modificaciones debido a la erosión y a la depositación, formando una gran variedad de rasgos litorales y paisajes costeros. La erosión, debida principalmente a los agentes costeros marinos, puede entenderse de la siguiente manera: por medio del efecto de las olas, éstas rompen sobre las rocas o socavan la playa para hacer retroceder los relieves terrestres que se encuentran a su paso; debido a esta acción el océano o el mar se va abriendo camino en el continente. Los fragmentos de rocas que son liberados por el oleaje, su forma y tamaño se van modificando debido a los numerosos movimientos continuos que recibe. Una vez que el material producto de las rocas ha modificado sus características físicas; éste puede ir avanzando o retrocediendo, dependiendo de la energía del oleaje. Los sedimentos de la zona costera y los provenientes del desgaste, erosión e intemperización continental que son acarreados por ríos, glaciares y el viento, son recogidos por las corrientes litorales (paralelas a la costa, de resaca y de retorno, figura 1.1). Un volumen de los sedimentos es transportado al fondo del mar y otro es arrastrado y depositado a lo largo de la costa por las corrientes y olas, donde pueden establecer bancos de arena, playas, y a su vez, construir barras y flechas en las zonas donde se reduce la capacidad de transporte litoral. Definiéndose así que las principales regiones de acumulación son las playas, las bahías, las llanuras de marea y las marismas. Por otra parte, las configuraciones costeras donde la erosión se presenta con mayor relevancia, son las puntas (o salientes rocosas), los acantilados y los barrancos.

Los sedimentos pueden desplazarse por medios hidráulicos, eólicos y marinos, resultando de ellos una erosión o un depositación sobre la costa o bahía. El medio hidráulico proporciona los materiales hasta el límite de la zona litoral; región en la cual, la dinámica marina es

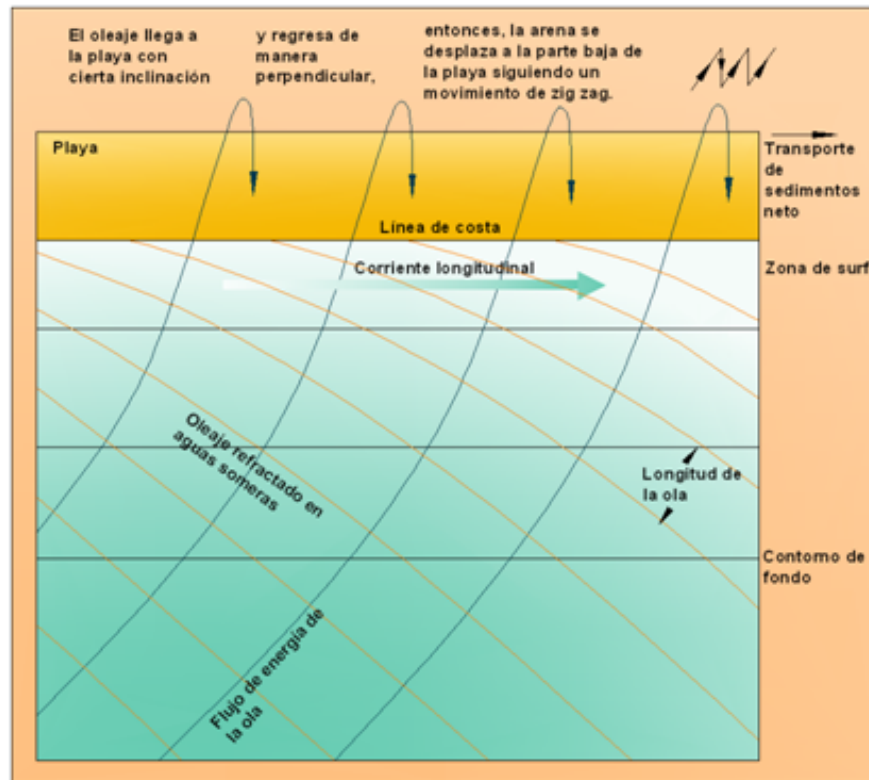


Figura 1.2. Arrastre costero de sedimentos

la encargada de distribuir el material a lo largo de la costa. El medio eólico también suele considerarse por el volumen de sedimentos que aporta y por el papel de agente estabilizador del litoral en ciertas ocasiones. El medio marino es el más importante, ya que generalmente tiene dos funciones principales: la primera es distribuir los sedimentos a través de la costa y la segunda, por la influencia que tiene en los procesos costeros. El oleaje es el fenómeno que se considera como el más importante en el transporte litoral; cuando el oleaje alcanza la costa y rompe sobre la playa, éste genera corrientes litorales las cuales se combinan directamente para transportar el sedimento.

El proceso sedimentario en la playa se inicia cuando las olas arriban con cierta oblicuidad con respecto a la costa, los sedimentos son arrastrados sobre la playa siguiendo una trayectoria curva. Debido a la acción de retroceso de la ola por la oscilación del agua en su retorno al mar, el material se desplaza por las pendientes de la cara de la playa, hasta que es alcanzado por la próxima ola, con lo cual se repite el proceso. Mediante la continua repetición del proceso en zigzag, los sedimentos son arrastrados a lo largo de la costa (figura 1.2); la dirección del arrastre puede variar a lo largo del tiempo.

Por la erosión, debida a los fenómenos marinos, hay costas a las que se les van agregando áreas de playa recientes y que generalmente éstas se depositan sobre antiguas zonas costeras. Algunos ejemplos de este tipo de formas costeras, debidas a la depositación y el ambiente eólico son: abanicos aluviales, deltas, dunas, arrecifes coralinos, etc.

También se pueden identificar formas costeras que son el producto de procesos que alteran las rocas de la costa y por consiguiente modifican el entorno alrededor de ellas de una manera singular, es decir, reconfigurando las estructuras rocosas. Algunos de los ejemplos de formas costeras que fueron originados por procesos relacionados a la fragmentación de las rocas son: las planicies de abrasión o de plataforma, costas acantiladas, rasas, estuarios, fiordos, lenguas glaciares, costas de falla, costas de escarpe de falla, costas de hielo, etc.

Los contornos de las costas se pueden clasificar de acuerdo a la depositación de material que se observa en ellas. La depositación es causada principalmente por la energía del oleaje y las corrientes litorales de las costas. Básicamente las formas costeras relacionadas a la depositación son: las playas, flechas, barreras, tómbolos, barras y bancos.

Debido a la relevancia que poseen las playas para el ser humano, estas formas costeras son unas de las más estudiadas por la ingeniería costera. En la actualidad no existe una definición única que pueda definir lo que es una playa, debido a los múltiples enfoques con los que es posible abordar y clasificar este rasgo costero, característico del proceso de la depositación. Una playa podría definirse de diferentes maneras, como por ejemplo:

- ▷ una zona que se encuentra junto a un río o el mar, donde hay arena;
- ▷ ribera del mar o de un río grande, formada de arenales en su superficie casi plana;
- ▷ son regiones con pendientes costeras relativamente bajas; que requieren un aporte continuo de sedimentos que es suministrado por los ríos y es movido después a lo largo de la costa por las corrientes marinas;
- ▷ es la zona donde el mar y la tierra se encuentran;
- ▷ es una geoforma dinámica que está en permanente cambio, sujeta en todo momento a los ciclos de erosión-depositación relacionados con el tipo de olas, mareas y temporales que le provoquen importantes transportes del propio sedimento que la componen.

A partir de las múltiples definiciones de una playa y las similitudes que existen entre ellas, para el presente trabajo se define la playa como una zona de depósito o acumulación de sedimento no consolidado, que se extienden hacia la tierra desde la línea de marea baja hasta un cambio topográfico, como un acantilado, una línea de dunas o punto donde existe una vegetación permanente.

Debido a que las playas son formadas con materiales resultantes del intemperismo, se considera que éstas son el mejor rasgo costero que existe para disipar la energía del oleaje. Determinar exclusivamente una clasificación de playas suele ser una tarea no tan trivial, debido a los diversos ámbitos que pueden llegar a considerarse para agrupar las playas en ciertas categorías. El perfil de la playa se compone de diferentes regiones que se pueden muestran en la figura 1.3.

Existen playas que son rectas o tienen una tendencia longitudinal; hay playas que presentan

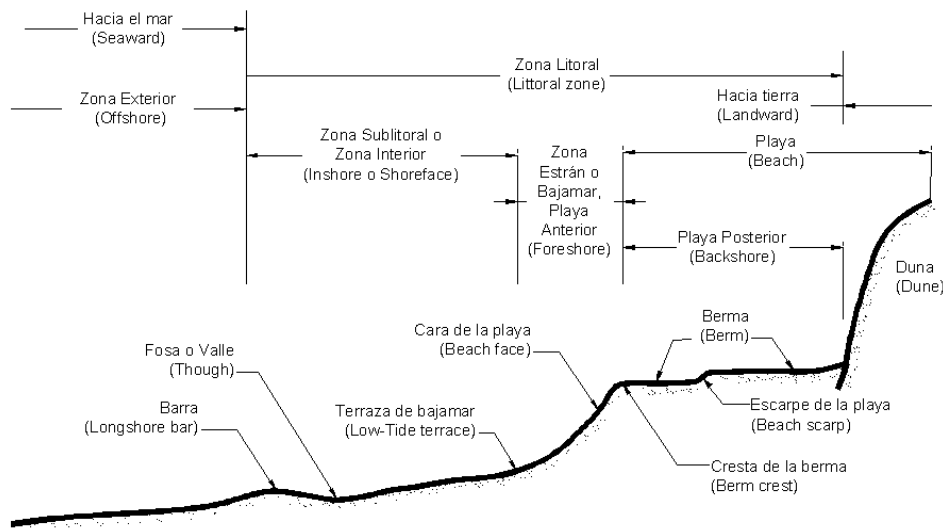


Figura 1.3. Caracterización del perfil de una playa

una curvatura cóncava generalmente hacia el mar, siguiendo la forma de la bahía; a las primeras se les considera como continuas y a las segundas, como discontinuas. Otra manera de llamar a estas playas es: playas longitudinales externas y playas de ensenada o bahía.

Una de las clasificaciones de las playas se basa en el comportamiento del perfil transversal de éstas, es decir, que existen playas de verano (perfil de calmas) y de invierno (perfil de tormenta) (figura 1.4). Las playas de verano tienen una pendiente que se considera cuasi-continua, o con pequeños cambios y se presenta en periodos de tiempo donde el oleaje tiene poca altura; a causa del transporte de masa, se acumulan los sedimentos ensanchando la playa y debido a ello, la línea de playa se mueve hacia el mar. Las playas de invierno se desarrollan a partir de oleajes con gran altura; este tipo de playas se forman en un periodo de tiempo muy corto debido a la gran energía del oleaje que se disipa en ellas.

Existen playas que alcanzan un cierto grado de erosión, poniendo en peligro diversos factores económicos, sociales y de esparcimiento que se dan en ellas; la ingeniería costera mediante rellenos de arena trata de restaurar o equilibrar este tipo de playas, denominándose a éstas como alimentadas o restauradas.

Cuando se construye en una playa un espigón o una escollera, se tendrán dos tipos de playas alrededor de la estructura marina. Dependiendo de la dirección del transporte de sedimentos en la playa, se identifican: una playa apoyada y una abrigada. La playa apoyada se origina debido a interrupción de la dirección del transporte litoral, depositándose el material que antes se movía sin ninguna restricción en la periferia del arranque de la obra marina. Debido a que la estructura interrumpe el desplazamiento de los sedimentos, se formará una playa abrigada que generalmente tiende a erosionar la zona opuesta a la playa apoyada.

Las playas abrigadas a su vez se pueden dividir en protegidas a barlomar y a sotamar; la diferencia radica en que las playas abrigadas a barlomar están ubicadas en la dirección de

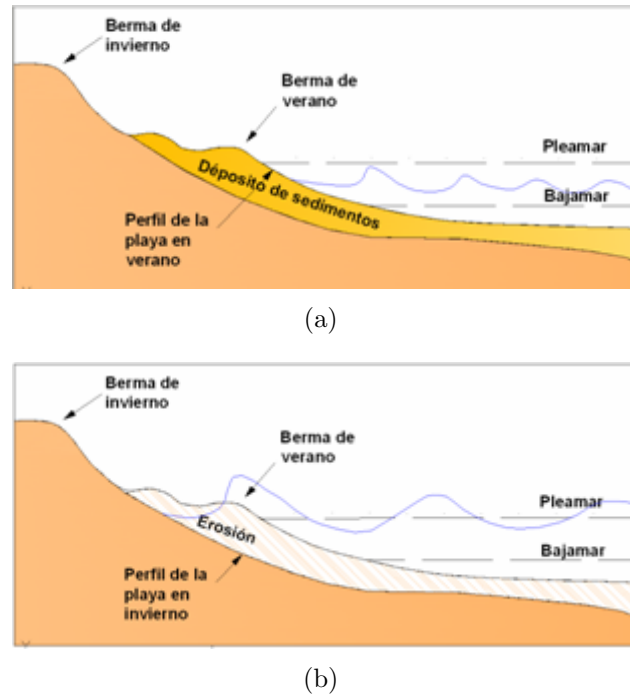


Figura 1.4. Perfil de playa de: (a) verano y (b) invierno

la cual proviene el desplazamiento o movimiento principal del transporte litoral, y las playas abrigadas a sotamar se localizan en el lado contrario de donde procede el acarreo litoral. Por otra parte, tomando en consideración la protección al oleaje que pueden ofrecer otros rasgos costeros a una playa, es posible definir playas protegidas por sistemas arrecifales, tombólos, puntas rocosas o flechas (playas encajadas), etc.

Una playa derivada existe cuando en la proximidad de ésta se ubica un cañón submarino, el cual tiene la función de recibir todo el sedimento que fluye a través de la zona litoral. En una playa donde no existe el estrán, se denomina playa submarina y una playa sustentada existirá cuando parte de la playa se encuentre sumergida.

Si se toma en consideración el rango de mareas que se registran en una playa, es posible identificar playas micromareales (cuando la marea es menor a dos metros), mesomareales (rango de mareas entre 2 y 4 metros) y macromareales (mareas superiores a los 4 metros).

Las playas también se pueden clasificar como disipativas, intermedias y reflejantes. Este tipo de playas serán tratadas con mayor detalle, posteriormente (capítulo seis).

Frecuentemente, las playas se pueden agrupar según los procesos físicos dominantes que se observen en ellas, siendo las principales categorías de playas:

- dominadas por el oleaje,
- dominadas por la marea,

- modificadas por la marea,
- dominadas por terrazas rocosas y
- controladas por arrecifes coralinos.

La costa noreste del Estado de Quintana Roo es considerada como uno de los principales polos turísticos de México, ya que las aguas de color turquesa del Mar Caribe, los sistemas arrecifales que se localizan en la zona, así como la arena clara y fina de sus playas, la convierten en un punto de interés tanto para los turistas nacionales como internacionales. Debido al gradual incremento de personas que visitan la región, el crecimiento del sector turístico en el Estado ha sido exponencial en los últimos 20 años; lo que a su vez, ha generado una gran presión sobre los sistemas litorales de esa área. En buena medida es por estos efectos antrópicos que las playas han incrementado su vulnerabilidad ante la presencia de eventos meteorológicos extraordinarios, que frecuentemente se registran en la zona.

Ante el paso de un evento meteorológico de consideración, las playas tienden a sufrir una serie de cambios en su comportamiento hidro-morfodinámico que provocan que éstas se erosionen o se depositen sedimentos en ellas; dichos procesos marinos en múltiples ocasiones manifiestan un efecto adverso a la zona costera, ya que los mecanismos naturales son modificados o mermados por los cambios impuestos por el ser humano en el litoral a través de la construcción de infraestructura sobre las playas. En este sentido, la ingeniería costera debe predecir las potenciales modificaciones y las consecuencias que prevalecerán en la zona litoral ante cualquier evento natural o cambio antropogénico que transformen el comportamiento de la costa, con base en una serie de conocimientos que permitan entender la conducta de las playas bajo ciertas condiciones que prevalecen en ellas.

Algunas de las playas de Quintana Roo son protegidas por arrecifes de coral, las estructuras coralinas generalmente tienden a disipar la energía del oleaje, sin embargo el papel que tienen los corales respecto al abastecimiento de sedimentos, así como el efecto que tienen sobre el acarreo litoral y el estado morfológico se desconoce en estas playas y por ello, cuando se presenta un evento extraordinario que afecta la costa, no se tiene el conocimiento de la magnitud, tanto en tiempo como en espacio, del papel que juegan los arrecifes para la recuperación del estado de equilibrio de la playa.

El trabajo que se presenta tiene como finalidad reconocer de una manera cualitativa y cuantitativa las incertidumbres relacionadas al rol de los obstáculos naturales en el estado morfofodinámico de las playas, a través de una serie de comparaciones realizadas a diferentes líneas de costa de la Riviera Maya y de Cancún. El conocimiento generado permitirá una mejor comprensión del actuar de las playas y por consiguiente disponer de un manejo y explotación sustentables de todos los recursos naturales de la playa.

1.1. Objetivo del estudio

El objetivo principal es integrar una metodología con la cual sea posible analizar y determinar el estado morfofodinámico de una playa, con y sin la influencia de obstáculos naturales

sumergidos o emergidos, como lo son los arrecifes de coral.

Para alcanzar dicho objetivo se realiza una comparación entre los mecanismos hidrodinámicos y los aspectos morfológicos que existen entre una playa que se encuentra abrigada por el sistema arrecifal con respecto a una playa que se encuentra expuesta al embate de las olas y a partir de ello, corroborar si los parámetros que son similares pueden llegar a influir en el estado de equilibrio que guardan estas playas.

Como objetivos particulares se plantea estudiar:

- los aspectos geológicos y geomorfológicos de la línea de costa de interés;
- hacer una caracterización del clima marítimo y las propiedades del sedimento que permitan generar una base de datos que sirva para realizar una clasificación de los parámetros calculados y elaborar una zonificación de éstos;
- calcular el transporte de sedimentos longitudinal, mediante diferentes formulaciones y sugerir cual de ellas, sería la más apropiada a usar en la playas del noreste de Quintana Roo.

1.2. Organización del trabajo presentado

El trabajo se ha sido organizado en siete capítulos, siendo el primero de ellos la introducción. A continuación se describe brevemente la descripción de cada uno de ellos:

- En el **capítulo 2** se presenta la información recopilada respecto a los aspectos geológicos de la Península de Yucatán y la línea de costa del noreste del Estado de Quintana Roo. A su vez, se describen los principales rasgos geomorfológicos de la costa analizada y se postula el posible efecto que pudiera tener el cambio climático en la zona estudiada.
- La determinación de las principales características de los sedimentos que se depositan en una playa suele ser un factor muy representativo para el análisis del comportamiento y configuración de los sistemas litorales; en el **capítulo 3** se ofrece la valoración de las propiedades físicas de los sedimentos que se depositan en las playas del noreste de Quintana Roo y se realiza una zonificación de éstos a través de la costa.
- La caracterización del clima marítimo en la zona de estudio se realizó a partir del empleo de un modelo de predicción del oleaje de tercera generación y uno paramétrico. Un resumen de los parámetros del régimen medio y extremal del oleaje se presentan en el **capítulo 4**.
- El **capítulo 5** versa sobre la simulación numérica del comportamiento del oleaje en las playas de Cancún y en algunas zonas de la Riviera Maya, donde se identifican obstáculos naturales, como los sistemas arrecifales que protegen las zonas costeras en las cuales ellos se localizan.

- En el **capítulo 6** se determinan los estados morfodinámicos de las playas que se encuentran abrigadas por los arrecifes coralinos, así como líneas de costas expuestas al oleaje. Adicionalmente, se evalúa el transporte de sedimentos longitudinal, con el objeto de obtener patrones de erosión y depositación en las playas analizadas.
- Las conclusiones finales y las futuras líneas de investigación, se exponen en el **capítulo 7**.

Finalmente, los apéndices correspondientes a los capítulos 3, 5 y 6 pueden ser consultados en el disco compacto (CD) que acompaña este trabajo.

2

Aspectos geológicos y su relación con la morfología de las playas en el noreste de Quintana Roo

2.1. Introducción

Para el ser humano los sistemas litorales atesoran una basta riqueza desde una perspectiva ambiental, social y económica; la línea de playa se rige y regula por todas las modificaciones que son ocasionadas por los procesos y fenómenos que se derivan de los distintos agentes físicos, químicos, meteorológicos, biológicos y marinos que se presentan en ella.

Los principales procesos que se relacionan con la génesis de los sedimentos en las playas son: el intemperismo, la meteorización, abrasión, cavitación, etc.; dichos procesos son el resultado de la interacción que existe entre los agentes naturales con los materiales que se encuentran en la parte continental del litoral. Las características y propiedades físicas de los sedimentos que se identifican en una playa dependerán de la litología del material y de la forma en cómo la composición química y física de la roca se ven modificadas por los agentes y procesos que las afectan, así como la manera en que los sedimentos se transportan y depositan sobre las playas. Es por ello trascendental que para analizar el comportamiento y la susceptibilidad que tiene un sistema litoral, costa o playa, se reconozcan las características geológicas, geomorfológicas y la historia geológica de la zona de interés para comprender el comportamiento de los mecanismos a los cuales se ve sometida la costa y la línea de playa.

Con el objeto de proporcionar un marco global de la geología y geomorfología, que posee la zona de estudio que abarca desde Punta Sam hasta Tulum, este capítulo ha sido dividido en diferentes secciones. En la primera de ellas se presentan algunos de los conceptos de la geomorfología costera que son necesarios para realizar la caracterización geomorfológica de la zona, la cual se incluye en esta sección y adicionalmente se trata la posible influencia del cambio climático en la zona. Posteriormente, se expone la información relacionada a la geología de la Península de Yucatán, para servir de preámbulo a la exposición de las características geológicas y morfológicas particulares de los sistemas litorales que presentan protección arrecifal (corredor turístico Tulum-Cancún), así como de los sistemas que no poseen esta protección (Cancún).

La información que se presenta en este capítulo han sido publicada en:

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

§ Ruiz, G., Silva, R., Mendoza, G. (2006). Caracterización geomorfológica de la línea de costa del Estado de Quintana Roo, México (Caso Cancún). En *Memorias del XIX Congreso Nacional de Hidráulica* (CD). Berezowsky, V., Arganis, J., Rivera, T., Jiménez, A., Mendoza, A. editores. Asociación Mexicana de Hidráulica. Cuernavaca, Morelos.

2.2. Definición de la zona de estudio

La extensión longitudinal que cubren las cinco zonas, en las cuales se segmentó la línea de costa del noreste del Estado de Quintana Roo, es de 150 kilómetros, aproximadamente.

El Estado de Quintana Roo se ubica en la parte oriental de la Península de Yucatán y se sitúa entre las coordenadas 17°48' y 21°10' de latitud Norte y los 86°48' y 89°10' de longitud Oeste (con respecto al meridiano de Greenwich). La extensión territorial del estado es delimitada por el Estado de Yucatán al noroeste, al norte por el Golfo de México, al oeste por el Estado de Campeche, al sur por Belice y al este por el Mar Caribe.

La franja costera que se analiza, se delimita al norte por Punta Sam (Bahía Mujeres) y al sur por Tulum; al este, las aguas del Mar Caribe bordean la zona de estudio (figura 2.1).

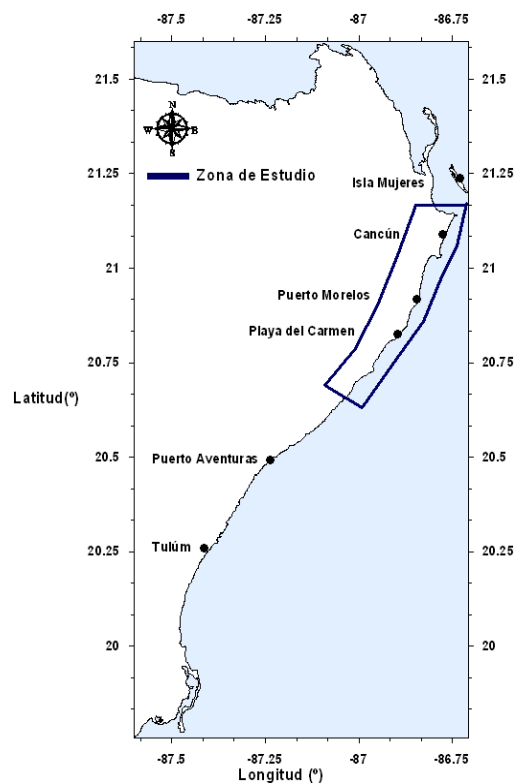


Figura 2.1. Zona de Estudio

Las márgenes litorales del Estado de Quintana Roo en su totalidad miden 1,176 kilómetros

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

de longitud, las cuales representan el 10.57% del total del litoral mexicano (INEGI, 2007). La zona de estudio se encuentra inmersa en una de las áreas más relevantes a nivel estatal y nacional, en lo que se refiere al rubro turístico; considerando en el Producto Interno Bruto Nacional (PIB), el ámbito de comercio, restaurantes y hoteles, Quintana Roo se sitúa en el primer lugar con relación al resto de los estados del país (INEGI, 2008). El sector turístico en el Estado de Quintana Roo para el año del 2007 generó una derrama económica de 5,452.27 millones de dólares, de los cuales el 89.71%, fueron producidos en la región de Cancún, Isla Mujeres y la Riviera Maya (SEDETURQR, 2008). En este estudio no se toman en cuenta las playas de la Isla de Cozumel.

2.3. Geomorfología

La geomorfología es la ciencia que tiene por objeto estudiar las distintas formas del relieve terrestre y marino que existen en el planeta; es por ello, que la geomorfología costera analiza las formas de las costas, las variables que influyen en la configuración de la línea de playa (*v.gr.* acarreo de sedimentos, clima, nivel del mar, factores antropogénicos, agentes naturales) (figura 2.2) y los procesos actuantes a los cuales está sometido el medio costero.



Figura 2.2. Variables y procesos que estudia la geomorfología costera

Al estudiar una forma o configuración costera, desde el punto de vista geomorfológico, deberá considerarse que los procesos y fenómenos físicos que se manifiestan en la actualidad,

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

se han presentado a lo largo de distintos periodos de tiempo, pero no necesariamente éstos han o tuvieron la misma intensidad con la que se observan hoy en día. Además, se debe reflexionar que las estructuras geológicas de cualquier configuración en la costa son los factores de control dominante en la evolución de los rasgos morfológicos en la línea de costa. Cada proceso geomorfológico deja impreso una característica distintiva en la forma que modifica y a su vez, cada proceso desarrolla sus propios mecanismos de génesis en esa forma y esto se ve reflejado en ellas. Finalmente, es más común encontrar evoluciones geomorfológicas que se consideran complejas, que aquéllas que se perciben como simples.

La línea de costa y costa, son términos que frecuentemente suelen ser utilizados para describir la zona donde coinciden tanto el medio marino, como el terrestre; dichos términos generalmente se usan en el rango de escalas espaciales y temporales globales. La costa es una franja de tierra (de ancho variable) que se extiende desde un cuerpo de agua (*v.g.* océano, mar o golfo, etc.) hacia tierra adentro y finaliza en el sitio donde se localiza una característica relevante en el relieve terrestre. La cuantificación de la extensión aproximada de las diferentes líneas de costa alrededor del mundo, es de 312,000 kilómetros (Britannica Inc., 1995). Sin embargo, para este trabajo se hace la distinción que los términos de playa y línea de playa también se consideran como zonas donde se delimita la tierra y las aguas marinas; pero el uso de dichos términos comprenden un rango de escalas de tiempo y espacio, solamente locales.

Según los geólogos, la superficie terrestre se divide según sus características estructurales y topográficas, en márgenes continentales y cuencas oceánicas. Precisamente la zona donde los continentes y los océanos convergen, se conoce como la zona precontinental; dicha área, a su vez, está conformada por dos fronteras: una considerada interna y la otra, como externa. La plataforma, borde y talud continentales integran la frontera externa de la región precontinental, que se enlaza con los fondos oceánicos. Por otro lado, en el dominio continental se encuentra la frontera interna en la cual, se localizan las costas del mundo y donde es posible identificar los diferentes rasgos de la morfología costera.

Debido a la dependencia recíproca que tienen los continentes y los océanos, la línea de costa se modifica en función de la evolución de éstos. Como resultado de las distintas oscilaciones del nivel del mar en el Pleistoceno y, considerando que las configuraciones costeras que se observan hoy en día se determinaron por el ascenso postglacial del nivel del mar, no ha sido posible generar una clasificación general de los diferentes tipos de costas que existen alrededor del mundo. En la actualidad, las clasificaciones de las costas de Davis (1909), Johnson (1919), Shepard (1948), Valentin (1952), Per Brunn (1953), Cotton (1954), Laval (1962), Inman y Nordstrom (1971) y Carranza, Gutiérrez y Rodríguez (1975) (*cf.* Ruiz (2004)) son las más aceptadas entre los geólogos y los ingenieros costeros de nuestro país. Las clasificaciones anteriores se fundamentan en los principios básicos de los movimientos relativos de la tierra y el mar; cuando los continentes se elevan con respecto al nivel medio del mar, ya sea por la tectónica de placas o la depositación de sedimentos, el ascenso de continente provoca que el nivel del mar descienda del nivel de referencia que se tenía antes de la emersión de la tierra, generándose con ello, costas de emersión. De manera opuesta, las costas de sumersión se originan cuando las zonas litorales se desplazan hacia el interior del continente por acción de la erosión o de movimientos tectónicos.

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

Por ejemplo, la línea de costa de Cancún e Isla Mujeres se clasifican como costas de isla barrera y con acantilados marinos, respectivamente. Las costas de las islas barreras se forman a partir de cordones de médanos; donde sus dimensiones dependen de la longitud y altura de las olas, de la amplitud de las mareas y de las dimensiones de los componentes sólidos que depositan las olas. Entre los cordones de médanos, en la planicie costera se pueden encontrar lagunas litorales. La línea de costa de Isla Mujeres que queda expuesta hacia el Mar Caribe se considera como una costa con acantilados, ya que la planicie costera está formada por elevaciones que terminan en cortes rectos de pequeños acantilados. La planicie costera es muy corta, por lo tanto la playa es pequeña o no existe y el corte del cantil puede ser la línea de costa o estar muy cerca de ella. En la orilla de la playa se produce el mayor intercambio de energía entre el océano y la isla (Cifuentes et al., 2002).

Los sistemas costeros son considerados como los más dinámicos en toda la superficie de la Tierra, puesto que no es muy frecuente que el medio marino y terrestre coincidan en una frontera que sea inalterada y constante; frecuentemente, la línea de playa se modifica debido a los fenómenos que ocurren en un lapso de tiempo, ya sea corto, mediano o de largo plazo; por ejemplo, se consideran como modificaciones de corto plazo los cambios producidos por la migración de la extensión de una playa ocasionada por el fenómeno de las mareas; mientras que las variaciones que sufre una playa en su perfil transversal debidas al transcurso de las estaciones del año, son ubicados en la categoría del mediano plazo. Sin embargo, las alteraciones inducidas por los cambios del nivel medio del mar, se apreciarían en una escala de tiempo de largo plazo. Debido a que las costas son modificadas y reconfiguradas por la acción de las olas y las corrientes marinas en determinados periodos de tiempo, la geomorfología costera permite observar la manera en la cual, los cambios en la morfología de la costa pueden analizarse en términos de la dinámica del tiempo presente y a su vez, la evolución de ésta, a través de grandes periodos de tiempo.

La capacidad de autoregeneración de una playa se puede ponderar a partir de la inspección de los mecanismos de retroalimentación que la naturaleza le proporciona al sistema litoral, a través de los diferentes rasgos morfológicos de éste. Un sistema costero posee dos procesos de retroalimentación: uno positivo y el otro, negativo. La retroalimentación positiva es aquella en la cual una línea de playa desarrolla la capacidad de controlar cualquier cambio que exista en ella, sin que el comportamiento de ésta se modifique de una manera sustancial; dicha retroalimentación deja de actuar cuando un determinado umbral se alcanza en el cual, la playa no tiene el suficiente control sobre las actores naturales que desestabilizan al sistema. Por otro lado, la retroalimentación negativa es el mecanismo que tiende a mantener un balance de los múltiples elementos y respuestas que se presentan en un sistema litoral. Cuando existe cierto balance entre la cantidad de material que pierde o gana una costa o una playa, se dice que existe un equilibrio; una playa se encuentra en equilibrio estático cuando el comportamiento de ésta a lo largo de un lapso de tiempo es continuo y no se presentan modificaciones apreciables a través del tiempo; cuando una playa exhibe una serie de cambios en su forma y actuar en un determinado tiempo, el equilibrio de la playa es dinámico. Finalmente, cuando una playa sufre cambios en ella, el sistema litoral se adapta a esos cambios en un cierto periodo de tiempo; no obstante que el sistema se ha estabilizado en ese lapso de tiempo,

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

puede surgir un evento que altere de nuevo el actuar de la playa y que ocasionará que los distintos elementos de la línea de playa conduzcan un nuevo estado de equilibrio ya sea estático o dinámico, pero diferente al que se tenía antes del evento extremo; así pues, a este tipo de equilibrio se le denomina metaestable o hiperestático (Woodroffe, 2003). Por ejemplo, los estados de equilibrio que una playa puede alcanzar pueden ser observados en la línea de costa del Estado de Quintana Roo; en la figura 2.3 se muestra de manera gráfica el comportamiento de la playa a través del tiempo, así como ejemplos de playas que se considera, posee el equilibrio señalado.

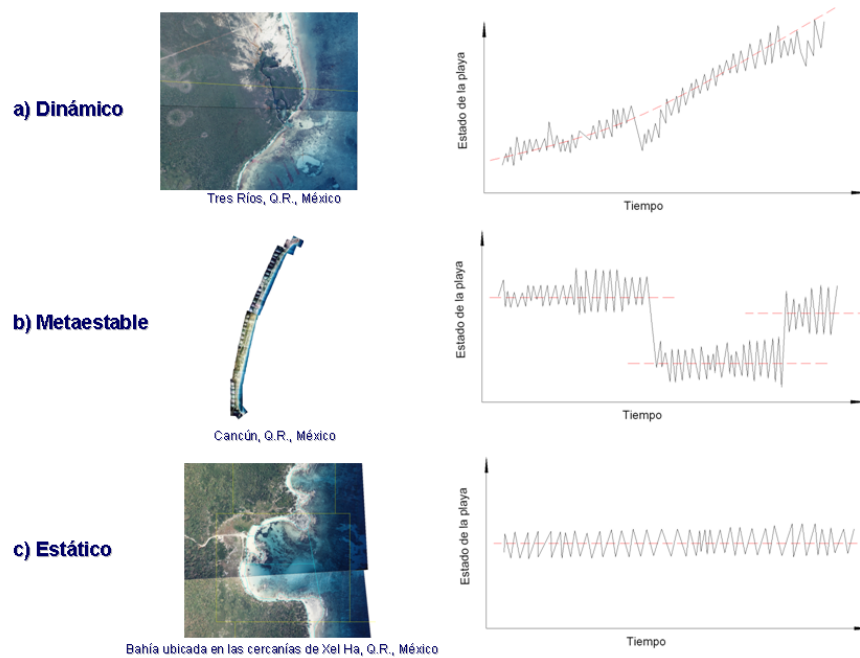


Figura 2.3. Estados de equilibrio morfológico de un sistema litoral

La configuración de las distintas formaciones terrestres que se presentan en la línea de costa puede interpretarse como una respuesta de los sedimentos y rocas disponibles en las costas a los procesos que actúan en ellas. Las formas costeras pueden ser analizadas desde dos ámbitos diferentes, ya sea estudiando la forma en planta o el perfil transversal de éstas. El análisis de la forma en planta de la configuración costera requiere que la costa sea dividida en los distintos rasgos que han sido generados por factores tales como: la topografía, la litología, la textura y la resistencia del sedimento. Los fenómenos que moldean la costa principalmente suelen ser la erosión y la acumulación o depositación de sedimentos.

Dentro de los agentes físicos que erosionan las líneas de costa, las olas son consideradas como el principal agente marino que modela la costa. A pesar de la fortaleza que tienen las olas para cambiar la zona costera, también existen factores que condicionan el grado de erosión que el oleaje puede producir (*e.g.* el tipo y durabilidad de las rocas, el rango de marea,

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

la profundidad del agua en la costa afuera, la configuración de la línea de costa, estabilidad del nivel del mar, etc.). De manera conjunta a la acción hidráulica de las olas, los procesos que contribuyen significativamente a la erosión marina son: la corrosión, abrasión y desgaste de los materiales depositados en la costa; además la presión de choque que se genera cuando la ola rompe sobre la playa. Los rasgos morfológicos más evidentes causados por la erosión en la zona costera suelen ser los acantilados, las terrazas marinas, arcos marinos, cuevas, pilas o columnas marinas, farallones, bahías o ensenadas, salientes o promontorios (puntas rocosas) y plataformas de abrasión (figura 2.4) (Thornbury, 1969).

De manera similar a la erosión costera, los contornos de las costas pueden ser moldeados de acuerdo a la depositación del material que se da en ellas. La depositación es causada principalmente por la energía del oleaje y las corrientes marinas que se desarrollan de manera paralela a la costa. Los rasgos costeros que se forman por la depositación se encuentran compuestos por los sedimentos que las olas erosionan de los promontorios y acantilados o también, de los sedimentos que son acarreados por los ríos y que son producto de los procesos de intemperismo y erosión de las masas continentales. Las formas costeras relacionadas al depósito de sedimentos son, principalmente las playas, las flechas, tómbolos, barras costeras y bancos de material (figura 2.4).

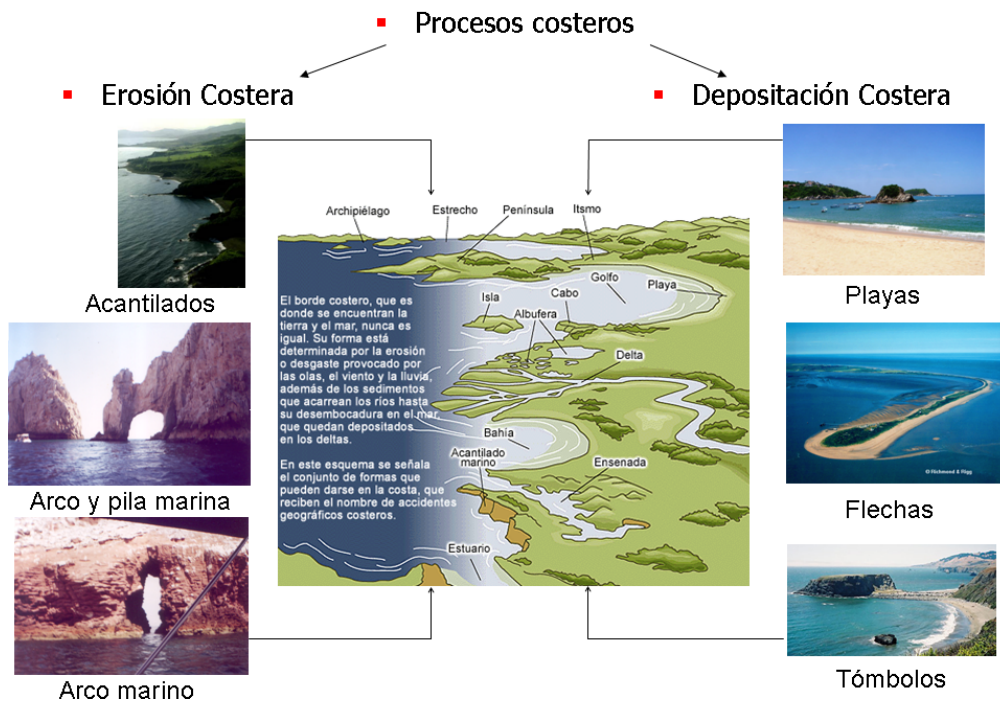


Figura 2.4. Formas costeras

Muchos de los procesos que se observan en las costas dependen tanto del clima, como de la variación del nivel del mar o ambos. A lo largo de la evolución de la Tierra, el clima siempre ha fluctuado (figura 2.8), lo que ha provocado un cambio en el nivel del mar (figura 2.11).

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

Sin embargo en este siglo se espera que los cambios climáticos se presenten de una manera inusualmente rápida, debido al incremento de gases tales como dióxido de carbono (CO_2), metano y óxido nitroso (gases de invernadero) en la atmósfera, compuestos químicos que absorben la radiación infrarroja del Sol, produciendo un aumento en la temperatura de la Tierra.

El incremento de los gases de invernadero en la atmósfera, en gran medida, se le atribuye al aumento de la contaminación atmosférica, que es una consecuencia de las actividades industriales y agrícolas, así como de las emisiones de humo de los vehículos automotores. La quema de combustibles fósiles (*i.e.* petróleo, gas natural y carbón) libera dióxido de carbono a la atmósfera; donde una parte de éste gas es absorbida por los océanos o por la fotosíntesis de las plantas (*e.g.* bosques, pantanos, etc.).

Cuando la atmósfera intercepta la radiación solar, la superficie de la Tierra refleja una cantidad de esa radiación hacia el espacio, mientras que la otra cantidad que no es reflejada, queda atrapada entre la capa sólida y gaseosa del planeta; por otra parte, la superficie terrestre es mucho más fría que la atmósfera, lo que provoca que ésta se opaque. Se dice que existe un calentamiento global de la superficie terrestre cuando la Tierra está expuesta a una mayor cantidad de radiación solar, la cual se retiene en la atmósfera por el efecto de opacidad que producen los gases de invernadero. En las predicciones realizadas por IPCC (2001) acerca de la temperatura que tendrá el planeta, se pronostica que la acumulación de los gases de invernadero en el presente siglo será el doble del que se tenía en el siglo XX, lo que conducirá a cambios climáticos que se asociarán a un incremento de $1.5^{\circ}C$ a $4.5^{\circ}C$ en la temperatura media de la atmósfera. Entre las múltiples modificaciones climáticas que tal calentamiento causará en el planeta, se encuentra el derretimiento parcial de los casquetes polares y el retroceso de los glaciares o de los “hielos eternos”, lo cual liberará grandes volúmenes de agua al océano, expandiendo con ello, la superficie de éste; adicionalmente, la disminución de salinidad en los mares y océanos, debida a la aportación de agua dulce de los cuerpos congelados que se derriten, será otro factor que implicará un aumento en el nivel medio del mar. Ante tales circunstancias, el conocimiento de la geomorfología climática y costera puede emplearse para vaticinar las secuelas que tendrá tal incremento del nivel del mar en las costas y zonas litorales.

A pesar de que hoy en día, el proceso de deshielo que sufren los cuerpos gélidos del planeta comienza a relacionarse directamente como una consecuencia de los efectos del cambio climático global, existen incertidumbres que ponen entre dicho si el efecto de invernadero puede considerarse como un elemento crucial para el incremento del nivel del mar. Varios de los gases de invernadero que se relacionan a actividades industriales y agrícolas han sido acumulados en la atmósfera a lo largo de varios siglos; se ha notado que a través de comparaciones entre las concentraciones de dióxido de carbono que existen hoy en día con las cantidades de dicho gas que han sido preservadas en la burbujas de las distintas capas de hielo de la Antártica (que datan desde la era pre-industrial), hubo incremento aproximado del 30% del CO_2 durante los últimos 200 años y esto debería de haber tenido un efecto cuantificable en la temperatura de la atmósfera. Algunos climatólogos afirman que han detectado un ascenso de $0.4^{\circ}C$ en las temperaturas atmosféricas desde el inicio

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

del siglo pasado, sin embargo otros científicos han sido más cautos al notar, por ejemplo, la influencia de los efectos de “islas de calor” en las temperaturas que se registran en áreas urbanas e industriales, donde muchas de las estaciones meteorológicas se localizan. Incluso un aumento en la temperatura de 0.4°C es menor que el esperado, de acuerdo con los modelos climatológicos que muestran que los incrementos observados de los gases de invernadero deberían haber elevado las temperaturas entre 1°C y 2°C en la actualidad. Otros de los posibles factores que podrían influir en el incremento de la temperatura son los efectos de retroalimentación del aumento de la nubosidad y la disminución de las corrientes marinas en las zonas profundas de los océanos. Las temperaturas globales también responden a las variaciones de la radiación solar, especialmente al ciclo de las manchas solares (de 8-14 años) y las reducciones de éstas ocasionadas por la era del hielo registrada en el Pleistoceno (1.64 millones de años antes, *MA*). Durante el último millón de años, en la Tierra han existido diferentes ciclos glaciares, dichos ciclos oscilan entre un periodo frío (periodo glacial) y otro cálido (periodo interglacial) (figura 2.5).

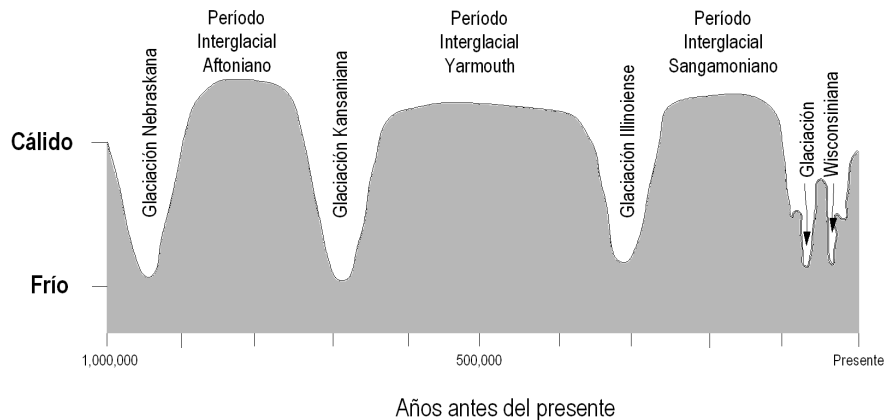


Figura 2.5. Ciclos glaciares (de Don y Sheldon. Fundamentos de Geología Física. 1968)

En el periodo glacial las condiciones promedio que se presentan son de climas gélidos, que provocan sequías o lluvias escasas, crecimiento de los hielos polares y glaciares y un descenso del nivel del mar; mientras que en el periodo interglacial las condiciones ambientales medias son de una precipitación intensa, con gran humedad, calor persistente, ausencia o presencia escasa de hielo polar y glacial y un ascenso en el nivel del mar. Es por ello, una posibilidad que en la actualidad, la atmósfera de la Tierra se encuentre dentro de alguno de estos periodos, debido al oscurecimiento de la capa gaseosa del planeta, por la opacidad que genera el efecto invernadero y con ello el aumento de la temperatura (figura 2.6). A pesar de que muchos de los climatólogos suponen que el calentamiento global es producto del efecto invernadero, algunos han vaticinado que el incremento de la nubosidad impediría un aumento de la temperatura en la superficie terrestre, produciéndose un clima global húmedo y hasta cierto punto la atmósfera sería más opaca, sin un calentamiento significativo (Bird, 1993; Gallegos, 2006).

La afirmación que el nivel del mar se está incrementando de manera global, únicamente por el cambio climático, debe ser tratada con mucha cautela, ya que se omiten los efectos de

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

la tectónica de placas y la eustasia¹, así como las variaciones geográficas mostradas por las fluctuaciones del Holoceno (0.64 MA) de los niveles de los océanos.

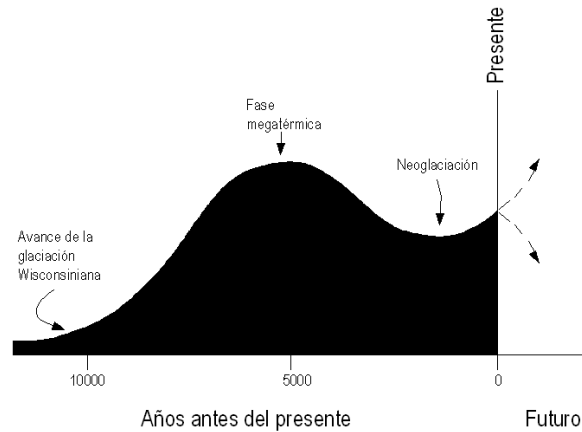


Figura 2.6. Desarrollo de etapa glaciaria reciente (de Don y Sheldon. Fundamentos de Geología Física. 1968)

En la costa noreste del Estado de Quintana Roo, muchas de las playas han sido modificadas por las actividades humanas de manera directa, con la implementación de estructuras marinas o rellenos de arena, así como uso y explotación de esquemas sociales y económicos sobre las playas; e indirectamente a través de los impactos en la hidrología y ecología de los ambientes costeros. La construcción de edificaciones sobre las dunas de las playas y los rompeolas sobre la zona litoral han limitado el comportamiento natural del sedimento en el sistema litoral, muchos de los humedales o zonas de manglar, así como lagunas costeras han sido modificados alterando la relación natural con las costas; estos cambios debilitan la capacidad de respuesta natural de la costa ante los efectos adversos que provocan las tormentas tropicales y huracanes. Precisamente, la frecuencia y la magnitud de los eventos meteorológicos extremos sí se podrían considerar como una de las consecuencias que se relaciona al cambio climático global. La variación de la temperatura en la atmósfera ha incrementado el número de huracanes que se presentan en la zona y a su vez, la alteración climática ha conducido que la intensidad de estos eventos extremos se amplifique de una manera nunca antes vista (Druryan y Lonergan, 1997).

En cuanto al posible efecto que tendría un incremento del nivel del mar en la Península de Yucatán, no existen predicciones particulares acerca de las consecuencias que se observarían en la costa. Existe la posibilidad que el aumento de salinidad en el mar tendría repercusiones negativas en la zona de manglares, ya que debido a las características geológicas de la península, así como los cenotes que existen en ella, el agua salada ingresaría a los humedales, modificando las propiedades del agua que son necesarias para el crecimiento del mangle. Por otro lado, es innegable el impacto negativo que tendría el incremento de la temperatura del mar en las estructuras coralinas del arrecife Mesoamericano; los corales que se componen

¹Proceso geológico de ascensión o hundimiento de la corteza terrestre.

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

de diversos organismos marinos, se desarrollan bajo condiciones específicas de temperatura y salinidad del agua, al modificarse estas condiciones ya sea por el incremento de la temperatura global o el deshielo de los glaciares, los organismos inevitablemente morirían, socavando en gran medida la capacidad que exhiben los arrecifes para disipar la energía del oleaje en condiciones normales y eventos extraordinarios. Mediante modelaciones numéricas se ha demostrado la eficacia que proporcionan las estructuras arrecifales para proteger las playas, en un escenario totalmente adverso para la línea de costa de Quintana Roo, el cambio climático originará la degradación del sistema arrecifal, las playas del corredor turístico Tulum-Cancún sufrirían grandes problemas de erosión, ya que la playa disiparía en su totalidad la energía del oleaje, la alteración en los sistemas de retroalimentación entre el sistema litoral y el sistema terrestre, no permitiría el restablecimiento del estado natural de las playas, lo que provocaría gradualmente la pérdida de las playas; dadas estas condiciones y ante un eventual incremento en el nivel del mar, la línea de costa avanzaría hacia el continente, eliminando la zona de humedal.

Las secuelas que podrían presentarse de manera global en la Península de Yucatán, debidas al incremento del nivel del mar, sería un posible avance del mar hacia el continente; considerando las leyes de la conservación de la materia y termodinámica, el deshielo de los polos originaría que el cambio de las densidades de agua dulce y salada modificarán la corriente del Golfo produciendo que ésta fueran más lenta, no obstante lo anterior y debido a las rasgos geológicos como el Canal de Yucatán y el Estrecho de Florida, la corriente de Yucatán podría ser más intensa en esta zona, lo que traería como consecuencia la conducción de más caudal en las secciones de los rasgos antes señalados. Al existir más caudal marino, posiblemente habría un ensanchamiento de la sección hidráulica, lo que produciría que la Península de Yucatán y Florida, así como algunas partes de la costa de Cuba sufrieran erosión. Sin embargo, este planteamiento debería considerar, los posibles efectos que tendrían la sumergencia o emersión de las cuencas oceánicas en la zona.

2.4. Aspectos geológicos de la costa Noreste del Estado de Quintana Roo y la Península de Yucatán

De manera regional, la zona de estudio se localiza en la Península de Yucatán (figura 2.7); ésta península colinda al norte y al oeste por las aguas del Golfo de México, mientras que al este por el Mar Caribe. Políticamente, la extensión territorial de la península se encuentra dividida en tres estados: Yucatán ($39,288.55 \text{ km}^2$), Campeche ($56,033.96 \text{ km}^2$) y Quintana Roo ($43,869.49 \text{ km}^2$) (INEGI, 2007).

Los rasgos morfológicos que exhibe una costa son una función de los distintos agentes, fenómenos y procesos que actúan en ella, por otra parte la respuesta que muestran los materiales de la playa ante el embate del oleaje, las corrientes marinas, el viento y el acarreo litoral depende de las características físicas de las arenas de la línea de playa; en la línea de costa del noreste de Quintana Roo es posible identificar que el material de depósito predominante en las playas, proviene de afloramientos de roca sedimentaria consistente en

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

calcita o residuos calcáreos de organismos marinos, lo que origina que sea común encontrar pequeños cantiles y salientes que dividen la línea de costa en múltiples celdas litorales. La identificación de calizas² en la plataforma continental de las playas del noreste de la Península de Yucatán, provoca que éstas se diferencien con respecto al resto de las playas de la península. La forma que esboza la línea de costa del estado de Quintana Roo fue originada por procesos tectónicos ya que existe una falla geológica con dirección nor-noreste-suroeste; como una consecuencia de la falla que se localiza en la zona, las playas del sur de la península se consideran extremadamente confinadas en comparación a las playas del norte y noreste de la Península de Yucatán. Debido a la actividad tectónica que se registró en el pasado en esta región (las costas del estado de Quintana Roo han sido tectónicamente estables desde el último período interglaciario, hace 4000-5000 años antes), se cree que la isla de Cozumel surgió a partir de un encallamiento tectónico. Siendo precisamente, la isla de Cozumel la que interrumpe la barrera arrecifal Mesoamericana que se localiza de manera intermitente y paralela a la línea de costa de Quintana Roo, a lo largo de 650 kilómetros. A causa de la naturaleza geológica de la costa del noreste de la península, es posible encontrar cientos de cayos o islotes en la parte posterior del arrecife. Una peculiaridad que se observa en la margen este de la península, es la presencia de lagunas someras que se encuentran delimitadas con manglares que crecen sobre terrenos de lodo calcáreo o de los mismos arrecifes de coral (West, 1962).

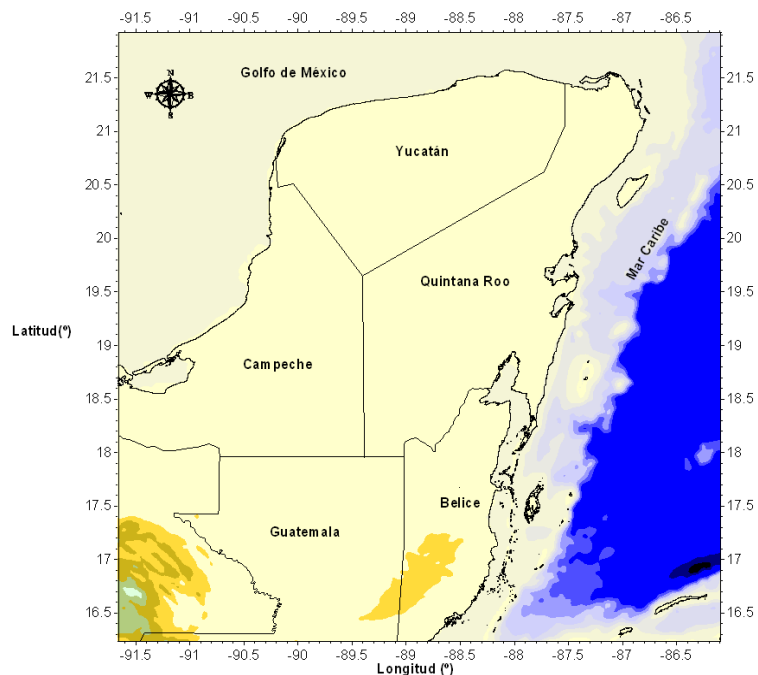


Figura 2.7. Península de Yucatán

²Sedimento consistente de calcita o de residuos calcáreos de organismos. Con frecuencia contiene minerales de dolomita, partículas arcillosas y arenosas. A la caliza se le llama además según el componente o textura de la misma (oolítica, compacta, cristalina, detrítica, etc.)

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

Para tratar de comprender el comportamiento de los sistemas litorales, es necesario analizar la evolución de éste, pero desde una perspectiva global que permita realizar conjeturas acerca de la respuesta que tendrá el sistema en un futuro; el estudio del marco global debe iniciar desde la composición geológica de la región en la cual, se encuentra inmerso el sistema. Los sistemas litorales de la Riviera Maya y Cancún se localizan, en una península donde básicamente su composición geológica consiste de carbonatos autigénicos y anhidritas, que se originaron en el Cretácico Medio-Aptiano (124.5 MA) hasta el Mioceno (23.3 MA); siendo ésta, la principal razón geológica por la cual, se relacionan la Península de Yucatán con la Plataforma de Florida. El análisis de sedimentos cretácicos ha demostrado un hundimiento continuo del estrato marino que se presentó del Cretácico (145.6 MA) hasta parte del Eoceno (56.5 MA); siendo en el Cretácico donde prevalecieron las condiciones necesarias para la formación de material evaporítico. Debido a la gran cantidad de rocas evaporíticas localizadas en la península y a su amplia extensión geográfica, desde el norte de Guatemala, sureste de Chiapas y norte de la península, se reconocen a todas las "evaporitas de Yucatán" como una combinación de anhidritas, yesos, dolomías y calizas del Cretácico Medio (97 MA). La Península de Yucatán se encuentra cubierta casi en su totalidad de sedimentos del Terciario³ (López, 1973).

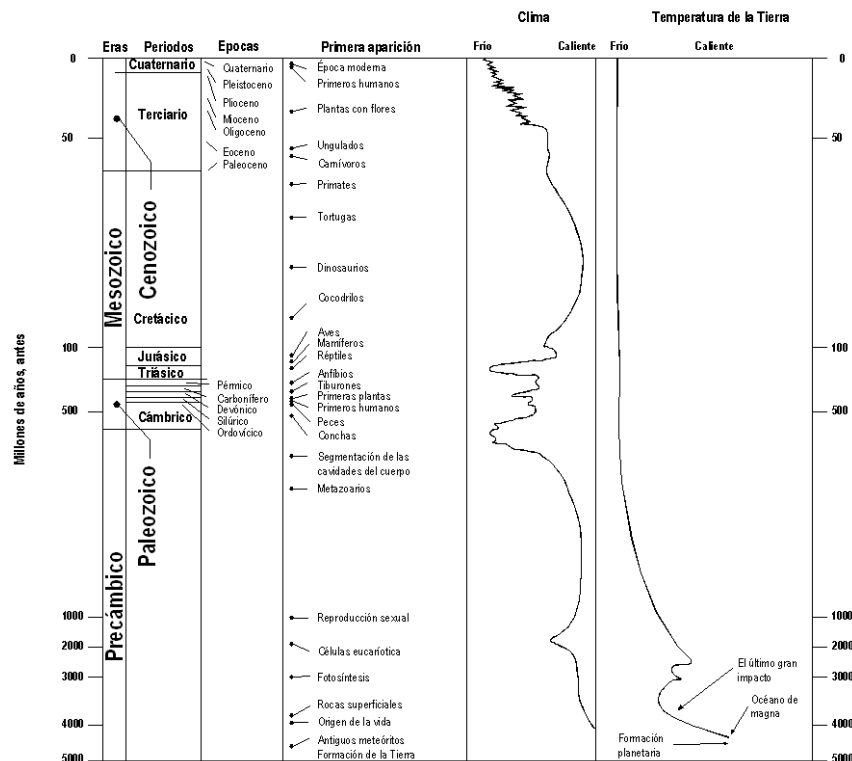


Figura 2.8. Escala de tiempo geológico y variación del clima (de Drake, F. Global Warming. 2000)

La Península de Yucatán es una porción de tierra que emergió en el Cretácico; durante la Era Paleozoica (570 MA), la península permaneció bajo el nivel del mar (figura 2.9a) mientras que

³cfr. figura 2.8 para referencia de las escalas geológicas.

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

el territorio de México se identificaba como un archipiélago de islas de diferentes tamaños; esta condición prevaleció durante los periodos del Triásico (245 MA) y Jurásico (208 MA) (figura 2.9b y figura 2.9c). A partir del Cretácico Inferior (145.6 MA) se presentaron las condiciones necesarias para el depósito de grandes masas de evaporitas (figura 2.9d). Sin embargo, la inexistencia de sal en la tierra que emergió, provocó que la sedimentación de las evaporitas (calizas, dolomías y anhidritas) se iniciara a partir del Albaniano-Cenomaniano (112-97 MA).

En el Cretácico Superior (65 MA), un lado de la porción central comenzó a emerger hasta quedar expuesta. En el Terciario y Cuaternario (figura 2.9e y figura 2.9f) se presentaron facies⁴ de plataforma somera en ambientes de supramarea⁵, que fueron generados por la continua oscilación del nivel del mar. Al final del Plioceno (2.48 MA) y ya en el Cuaternario (1.64 MA), la península adquiere la forma actual, observándose alineamientos de arrecifes al Norte del Banco de Campeche, los cuales se encuentran formados esencialmente de material calcáreo; ya que la carencia de ríos en la masa de tierra peninsular limita de una manera importante la presencia de sedimentos del tipo terrígeno. En la tabla 2.1 se presenta la columna geológica de la Península de Yucatán (Butterlin y Bonet, 1963; López, 1973).

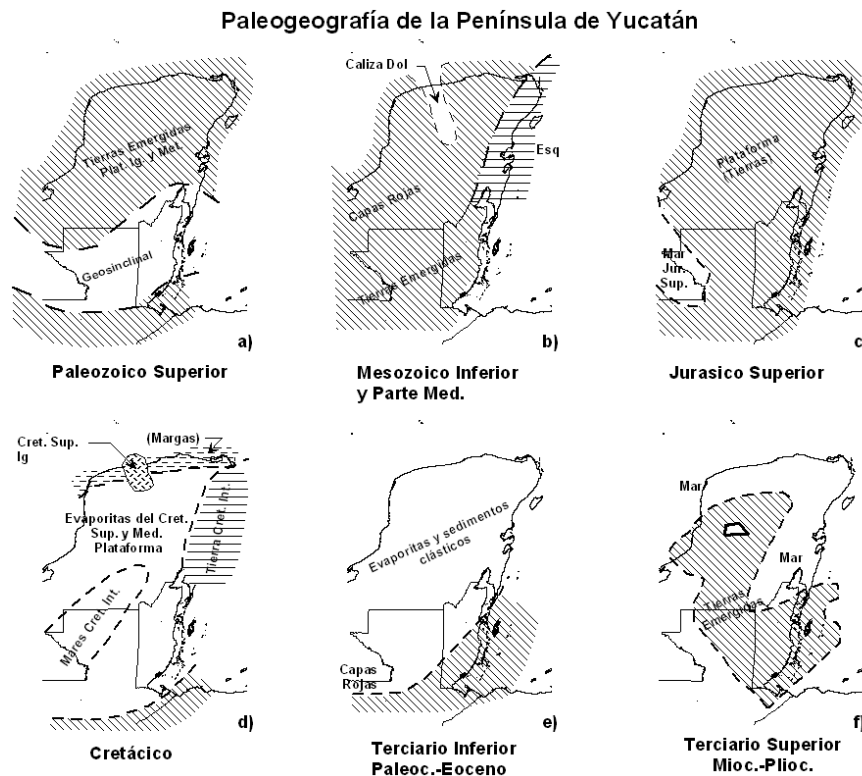


Figura 2.9. Paleogeología de la Península de Yucatán (de López Ramos, E. Estudio Geológico de la Península de Yucatán. 1973)

⁴Conjunto de rocas con determinadas características.

⁵Zona de la costa que se encuentra delimitada por el nivel de pleamar de la marea.

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

Así pues, desde el punto de vista morfo-tectónico se concluye que la Península de Yucatán se originó a partir de la emersión de la plataforma continental; en la mayor parte de ella se identifica una llanura de relieve moderado y suave, mientras que en la parte oriental se profundiza rápidamente por erosión. Esta porción de tierra se considera como una zona tectónicamente estable, en la que se observan rasgos casi planos por la ausencia de relieves positivos de importancia; que facilitan la libre precipitación de carbonatos que más tarde darán lugar a la formación de rocas carbonatadas. Una de las características de la porción central y norte de la Península de Yucatán es que al no existir ríos superficiales a través de cuales, fluya el agua de las precipitaciones atmosféricas o de la condensación, el líquido se percola hacia el subsuelo, formando mantos freáticos; ésta agua subterránea tiende a disolver las calizas superficiales (fenómeno conocido como karst), originando cenotes. Otra consecuencia de la falta de drenaje superficial es que no existe aporte de sedimentos terrígenos al mar.

Tabla 2.1. Columna geológica de la Península de Yucatán (de CNA (1991))

Edad	Espesor (m)	Litología
Reciente y Pleistoceno (del presente a 1-5 millones de años)	100	Calizas coquiníferas color crema con abundantes huellas de moluscos
Plioceno y Mioceno (1.5 a 23 millones de años)	200	Formación Carrillo Puerto, calizas fosilíferas blancas a amarillentas, duras y masivas, con calizas arenosas interestratificadas
Oligoceno (23 a 36 millones de años)	260	Calizas blancas a cremas, con capas de margas arcillosas blancas y bandas silíceas
Eoceno Superior (36 a 42 millones de años)	100	Formación Chichen Iztá (miembro Chumbec), calizas blancas, cristalinas y masivas
Eoceno Medio (43 a 52 millones de años)	185	Formación Chichen Iztá (miembro Pisté), calizas microcristalinas color blanco, de grano fino con horizontes arcillosos, las calizas presentan textura sacaroide
Paleoceno-Eoceno Inferior (52 a 66 millones de años)	100-350	Formación Chichen Iztá (miembro Abacal). Formación Eoceno Inferior Indiferenciado. Formación Icaiché. Calizas blancas cristalinas y dolomitas silicificadas, con yesos hacia la parte inferior
Cretácico (66 a 144 millones de años)		Margas, lutitas, calizas, dolomías y evaporitas

En la figura 2.10, se muestra el mapa geológico de la Península de Yucatán (Butterlin, 1958; López, 1973; Nolasco, 1986; CNA, 1991). Los sedimentos carbonatados del Pleistoceno (1.64 MA) y del Holoceno (0.61 MA) fueron ampliamente distribuidos en las márgenes litorales de la plataforma de la península, en una etapa transgresiva, donde el nivel del mar alcanzó de 3 a 6 metros por encima del nivel actual (figura 2.11). Los sedimentos calcáreos depositados son característicos de ambiente eólico-costero y de playa (Szabo et al., 1978).

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

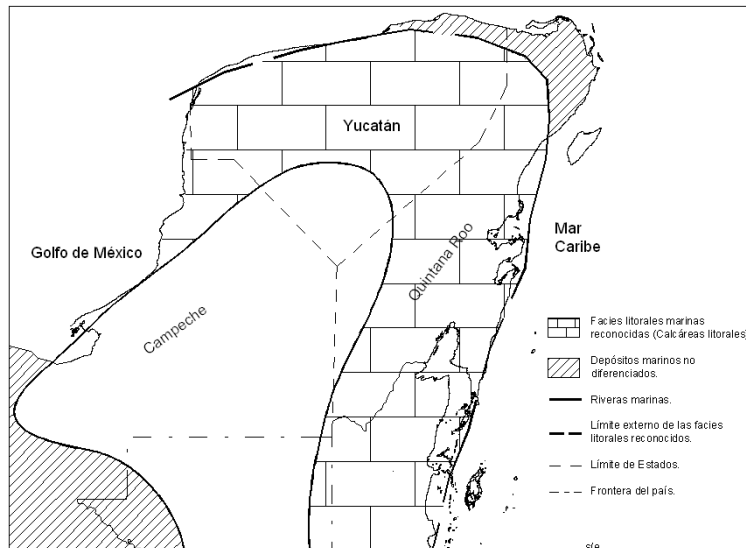


Figura 2.10. Mapa geológico de la Península de Yucatán (modificada de Butterlin y Bonet. Mapas geológicos de la Península de Yucatán, 1963)

2.4.1. Características geológicas de Punta Maromas a Cancún

Una vez que ha sido establecido el marco geológico global en el cual los sistemas litorales del noreste de la Península de Yucatán han evolucionado a través de los diversos periodos y épocas geológicas, es necesario especificar las características geológicas, desde una perspectiva más particular; es por ello que el análisis de los sedimentos que se encuentran en la zona de estudio, puede abordarse a partir dos peculiaridades importantes que se observan en la región de Tulum-Punta Maromas-Puerto Morelos-Cancún.

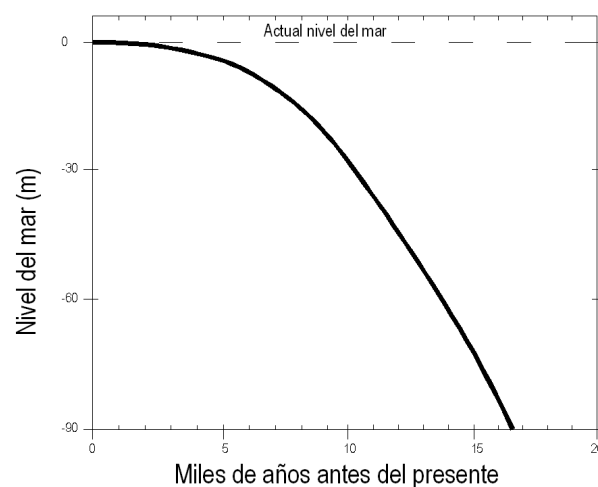


Figura 2.11. Niveles del mar registrados en los últimos 20 millones de años (de Don y Sheldon. Fundamentos de Geología Física. 1968)

La zona de estudio presenta dos características relevantes: 1) el sedimento que se deposita en

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

las playas es una acumulación de calcarenitas⁶ y 2) las planicies costeras se generaron a partir del incremento del nivel de mar en el Pleistoceno Tardío (0.1 MA). Las rocas carbonatadas que se identifican en las playas, se componen de material oolítico⁷ que se genera por la acción de las olas y corrientes paralelas a la costa. La sedimentación en la línea de costa del noreste del Estado de Quintana Roo es diferente a la que se plantea en las costas del Mar Caribe, ya que en dicho modelo se centra la depositación de material carbonatado en bancos de material, dominados por mareas.

En la región de la línea de costa que se analiza es posible identificar una planicie de paleodunas, la cual se eleva por encima del nivel del mar de 5 a 50 metros y tiene una longitud de 150 kilómetros, con un espesor que varía de 0.5 a 4 kilómetros; dicha estructura geológica reposa sobre un estrato de material carbonatado. La planicie de paleodunas formada en el Pleistoceno Tardío se delimita a partir del Cabo Noroeste de la península y termina en la frontera sur de Xel Ha. En su parte más ancha, la planicie tiene alrededor de 20 paleodunas que son paralelas a la actual línea de costa. Las crestas de las paleodunas son de 1 a 5 metros, sobre el nivel del valle de las mismas y la separación que existe entre paleodunas es de 50 a 200 metros. En el continente y en la zona donde se identifican las paleodunas, se considera un bajo relieve kárstico con una elevación de 8 a 10 m sobre el nivel del mar. Por otra parte, la fisiografía de las paleodunas suele ser la típica que se observa a partir de la depositación de arenas provenientes de ambientes costeros. Al noroeste de Cancún se localizan 2 cinturones diferentes de paleodunas y valles del Pleistoceno (1.64 MA). La superficie costera data del Pleistoceno Tardío (0.126 MA) y se encuentra compuesta por calizas micriticas⁸ o calizas provenientes de arrecifes y de las partes frontales de los mismos (Ward, 1979, 1985).

Por otro lado, la línea de costa que se ubica entre Cancún y Xel Ha muestra tres estratos de sedimentos:

1. El estrato inferior se compone de facies inferiores, que son una característica de granos bioclásticos⁹ finos a granos medios de calcarenitas con pequeñas láminas de calciruditas¹⁰. Los componentes dominantes de los detritos¹¹ de arena son: algas verdes de la especie "Halimeda", moluscos y granos microcristalinos de material aglomerado; los conglomerados de lentejuelas son compuestos de conchas de moluscos, cabezas de coral y litoclastos¹² de caliche negro y gris.
2. El estrato intermedio se encuentra compuesto de materiales que van de bioclastos y oolitas bien graduadas a calcarenitas gruesas con numerosas capas de conchas y lentejuelas de calciruditas.
3. Para el estrato superior de calcarenitas, las facies más importantes se consideran como:

⁶Sedimentos calcáreos con diámetros aprox. de 1/16 milímetros, en este caso de origen bioclástico.

⁷Esferas calcáreas con diámetros inferiores a 2 milímetros.

⁸Granos de carbonato que se disuelven en el medio.

⁹ Sedimentos de origen animal o vegetal.

¹⁰Sedimentos calcáreos constituidos por pequeños guijarros, intraclastos y bioclastos.

¹¹Fragmentos de rocas o minerales procedentes de rocas preexistentes.

¹²Pequeños fragmentos de roca.

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

bien clasificadas a clasificadas, de material oolítico con granos finos a gruesos; así como, calcarenitas biogénicas con inclusiones de capas de conchas.

Al norte de Puerto Morelos, la planicie costera del calcarenitas reposa sobre una corteza subáerea (caliche) donde el material que se identifica en la parte superior son calizas de coral sin datar o registro; mientras que al sur, bajo la planicie de paleodunas, las calcarenitas reposan sobre unas micritas no estratificadas y calcarenitas que se pasan sobre la misma corteza subáerea. Las calcarenitas que se encuentran debajo de la planicie costera entre Cancún y Puerto Morelos, se depositan sobre una superficie ondulada de caliches de una antigua caliza.

Debido a la evidencia que presenta la configuración del fondo marino en la parte interna de la zona litoral, en muchas de las playas es posible afirmar que las olas y las corrientes longitudinales son los principales agentes que ocasionan la depositación de arena en las costas del noreste de la Península de Yucatán; ya que el fondo emigra predominantemente de manera paralela a la costa y hacia la zona oceánica del sistema litoral. Cabe señalar que en la zona no se posible identificar depósitos de canales regidos por la marea.

Por otro lado, la abundancia de interclastos y corales que alcanzan el tamaño de las gravas en la planicie costera, demuestra que éstos fueron depositados por fuertes oleajes y corrientes litorales, que generalmente se asocian con las tormentas. Las conchas y cabezas de coral que se identifican, aparentemente son depositadas a partir de las secciones de los arrecifes; suele ser frecuente encontrar en las facies de los asentamientos transversales mezclas de vestigios de corales y moluscos que fueron modificados por la abrasión así como, conchas, caliche, calcarenitas intraclásticas.

A partir de la comparación con otras costas, tales como las de Florida, Bermudas y Carolina del Norte, el patrón de los eventos eustáticos del nivel del mar durante el Pleistoceno y el Holoceno se pueden resumir de la siguiente forma¹³ (Ward, 1974):

1. A fines del Pleistoceno, en el Sangamoniano, el nivel del mar subió 5 metros (tomando como referencia el nivel actual) originando un depósito de sedimentos de playa, lo cual se puede evidenciar hacia el sur y hacia el noroeste de Puerto Juárez (hoy en día, zona metropolitana de la ciudad de Cancún).
2. En el Wisconsiniano, el nivel del mar bajo 2 ó 3 metros con respecto al nivel actual, por lo que la línea de costa se retiro mar adentro. Al estabilizarse el nivel, se formaron varias terrazas de sedimentos de forma paralela a la línea costera actual. El nivel del mar siguió descendiendo lentamente y dejó como testigos de este hecho, una serie de terrazas escalonadas que fluctúan entre los 10 y los 140 metros por debajo del nivel actual.
3. Durante el período post-glacial, hace 18,000 años, el nivel del mar osciló con franca tendencia transgresiva, formándose varias terrazas que se encuentran entre los 60 y 70 metros ó los 30 y 40 metros bajo el nivel del mar actual.

¹³ *vid.* figura 2.5, figura 2.8 y figura 2.11

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

4. Hace 5,000 ó 6,000 años, el nivel del mar estaba 4 ó 5 metros por debajo del nivel actual, el cual ha ido ascendiendo gradualmente hasta alcanzar la cota actual .

En la línea de costa que se localiza desde Tulúm hasta Punta Sam, se observan principalmente los sedimentos eolianíticos del Pleistoceno, dunas y arenas de playa del Holoceno (figura 2.12). En la costa de la zona de Tulúm se observan sedimentos de playa del Holoceno y eolianitas del Pleistoceno. En Playa Paraíso, los sedimentos recientes están constituidos por arena fina, moderadamente bien clasificada, formada principalmente por corales y en menor proporción, por microforaminíferos bentónicos, espículas de alcionarios, etc. Esta arena procede en su mayor parte de la destrucción de la barrera arrecifal, localizada aproximadamente a 0.5 km de la costa. La barrera arrecifal finaliza hacia el norte en Punta Nizuc, extremo sur de Cancún, a unos 100 m de la orilla de la playa. Aparentemente, el arrecife termina en este lugar por dos razones: a) la disminución de la profundidad del agua hacia el norte y b) debido a la competencia que existe entre el desarrollo de arrecifes y los bancos de oolitas, las cuales son más abundantes al norte de Punta Nizuc, haciendo que el fondo se encuentre en constante movimiento. En Tulúm, afloran eolianitas del Pleistoceno formando los acantilados del Mar Caribe y cuya composición litológica varía de un sitio a otro, de acuerdo a las condiciones locales de depósito.

En la zona de playa que corresponde a Puerto Morelos y su periferia, el material sedimentario está constituido por calizas coquinoides formadas en ambiente somero de playa, en la que se observan buenos ejemplos de bioespátita, bioesparrudita y ooespátita. Esta coquina se compone esencialmente de fragmentos de conchas y moluscos, así como de corales mal clasificados (Formación Carrillo Puerto).

En las playas de Cancún e Isla Mujeres, los agentes que controlan la movilidad del sedimento son: las corrientes litorales, la acción del oleaje, las mareas y el viento; antes de las modificaciones antropogénica en la zona, dichos agentes distribuían el material calcáreo en cinco ambientes sedimentarios (Ward, 1979; Aguayo et al., 1980):

1. complejos arrecifales, que se desarrollan desde el extremo sur de Cancún hacia el Sur de Tulúm,
2. playas disipadoras de alta energía en mar abierto, generando gran cantidad de oolitas que son depositadas a lo largo de la Isla de Cancún,
3. megarrizaduras de fondo, entre el continente e Isla Mujeres (Bahía Mujeres),
4. dunas eolíticas y litorales, las cuales conforman a las dos islas, Cancún y Mujeres, y
5. lagunas restringidas que se desarrollaron durante el Pleistoceno Tardío y el Holoceno a causa del depósito de tómbolos en los extremos sur y norte Isla Cancún .

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO



Figura 2.12. Configuración de las áreas costeras en el periodo del Pleistoceno (de Google Earth y de Ward (1979))

Debido a la relevancia que posee Cancún en el sector turístico del país y a los grandes problemas costeros que afronta es necesario detallar de manera particular las características de esta isla barrera. Cancún mide aproximadamente 13 kilómetros de largo por 0.5 kilómetros de ancho. La isla barrera se encuentra unida a la península por medio de unos tómbolos situados en los extremos norte y sur. Las partes principales de Cancún corresponden a remanentes de crestas de dunas pleistocénicas (figura 2.13a), las cuales se depositaron cerca del borde externo de una terraza situada actualmente a 10 metros de profundidad; la cual se formó durante un descenso del nivel del mar, que ocurrió probablemente en la etapa temprana de la regresión Wisconsiana ($\pm 3,0000$ años). Posteriormente, durante la transgresión holocénica se formaron tómbolos en ambos extremos de la isla, acumulándose además dunas en el extremo oriental del cinturón eolianítico del Pleistoceno (figura 2.13b) (Ward, 1974). La plataforma continental es estrecha al sur de la isla y está controlada por una serie de bloques fallados normalmente; los sedimentos se depositan actualmente en un ambiente lagunar, protegidos por una barrera arrecifal. Al norte, los sedimentos se acumulan en dunas y bermas en la zona litoral a lo largo del estrecho.

En la isla barrera de Cancún se detectan 3 tipos de ambientes depositacionales:

1. ambiente de playa,
2. ambiente de laguna abierta o estrecha y
3. ambiente de laguna restringida y protegida.

El ambiente de playa se presenta a todo lo largo de la costa oriental de la isla, donde el impacto del oleaje del Mar Caribe es casi normal a la línea de costa. El material que era posible

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

identificar antes que se establecieran los desarrollos turísticos era arena muy fina y muy bien clasificada, formada casi en su totalidad de oolitas y en menor proporción fragmentos de corales.

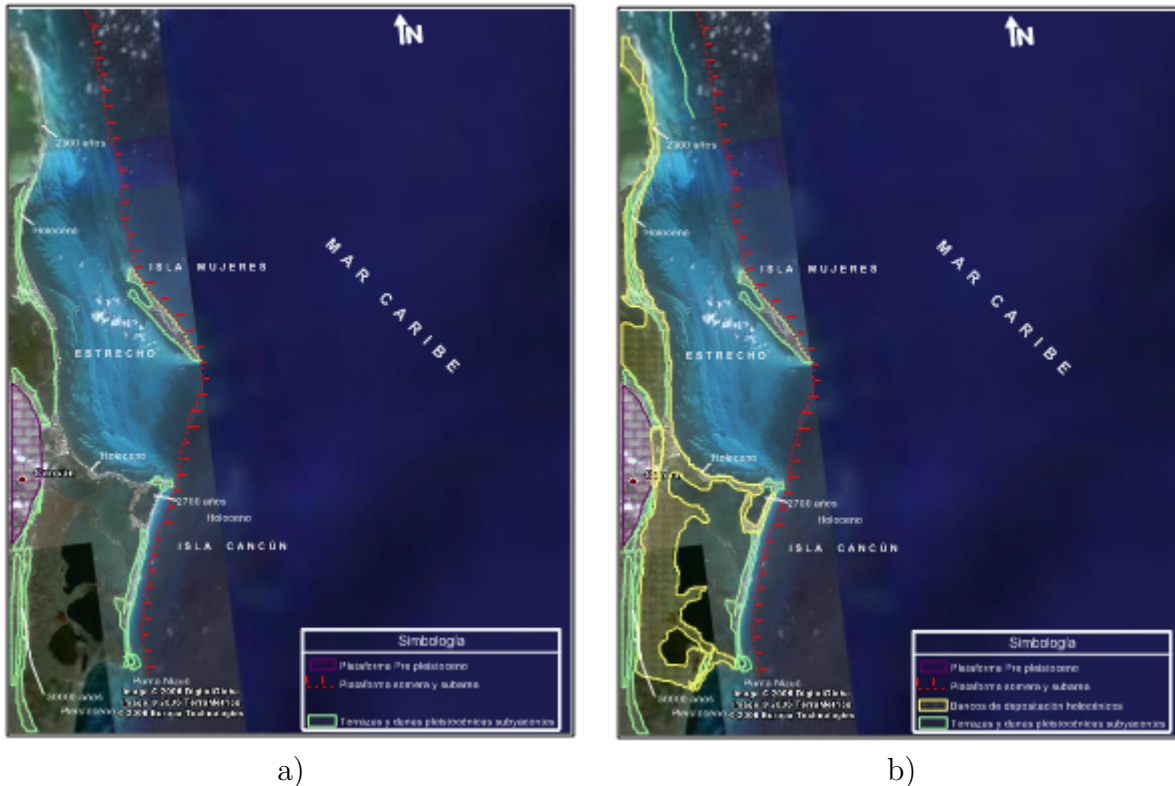


Figura 2.13. Configuración de las áreas costeras en el periodo del a)Pleistoceno (1.64 MA) y b)Holoceno (0.61 MA) (de Google Earth y de Ward (1979))

La línea de playa forma parte de un cinturón de sedimentos oolíticos que corre paralelamente a la costa del Mar Caribe, desde Cancún hasta Isla Blanca; la isla se cataloga como una formación morfológica que disipa grandes cantidades de energía del oleaje, dado que el área es barrida por un oleaje permanentemente e intenso; es por ello, que en las playas se presenta una buena clasificación del sedimento. En la actualidad, se carece de dunas naturales, pero en el pasado las dunas holocénicas consistían de oolitas bien clasificadas. La arena que se extrae de la zona de rompientes de Punta Cancún, está constituida por material arenoso muy grueso y moderadamente bien clasificados; contiene en su totalidad fragmentos biogénos. El origen de estas arenas surge debido a la destrucción de material depositado mecánicamente por el hombre en la zona de rompientes, con la finalidad de evitar la erosión de las eolianitas pleistocénicas que forman la punta. Los sedimentos de playa de Punta Nizuc están formados por arena mal clasificada que está constituida por fragmentos de corales y menor cantidad de moluscos, briozoarios, espículas de esponjas, alcionarios y equinodermos, micro foraminíferos bentónicos y escasas oolitas. Este material proviene de la barrera arrecifal que se encuentra al sur-suroeste de Punta Nizuc así como de los corales que se localizan en las cercanías de dicho lugar (Aguayo et al., 1980).

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

Las rizaduras y megarrizaduras del fondo marino han sido usadas para describir el ambiente de laguna abierta. Se advierte que los depósitos sedimentarios están influenciados por la corriente del Caribe que pasa a través del estrecho que existe entre Isla Mujeres y la península. Las rizaduras del piso marino consisten de arena fina, muy bien clasificada, formadas principalmente por corales y microforaminíferos bentónicos. Gran parte de los sedimentos probablemente provienen de la barrera arrecifal que se encuentra al sur de Cancún y son transportados por la corriente del Caribe y depositados en el estrecho. La megarrizadura en la costa del estrecho adyacente al tómbolo norte, consiste de arena fina, moderadamente bien clasificada; se compone en su totalidad de oolitas, con menores cantidades de fragmentos biógenos. El material parece provenir principalmente del cinturón oolítico holocénico de la costa oriental de la isla, y de las eolianitas pleistocénicas. El sedimento resultante es transportado hacia el noroeste por la corriente del Caribe.

En el ambiente de laguna protegida y restringida, entre Cancún y la Península de Yucatán se encuentran una serie de lagunas, siendo la mayor de ellas la Laguna Nichupté; dicha laguna se encuentra protegida del Mar Caribe por la isla barrera y su circulación es restringida debido a los dos tómbolos situados en los extremos norte y sur de la barrera. La única comunicación directa que existe entre la laguna y el mar son unos canales de marea angostos que atraviesan a los tómbolos. La laguna principal contiene bancos calcáreos de forma alongada, los cuales la dividen en tres lagunas menores interiores, casi aisladas una de la otra. Estos bancos se forman a expensas del crecimiento de manglares, y su localización está controlada por las terrazas y dunas pleistocénicas subyacentes. Dichos bancos aíslan a las pequeñas lagunas del Inglés y Bojórquez de la parte principal de la de Nichupté. La superficie rocosa que se origina de la península tiene una inclinación hacia el Oriente, encontrándose ésta en la parte central de la laguna, a una profundidad de 12 metros; esta profundidad se mantiene más o menos constante hacia el Oriente, hasta que abruptamente disminuye, aflorando nuevamente en la porción Occidental de la Isla Cancún.

2.5. Caracterización geomorfológica de la zona de estudio

La caracterización geomorfológica de la zona que abarca el corredor turístico Tulúm-Cancún (Riviera Maya), Cancún e Isla Mujeres, fue realizada a partir de la construcción de fotomosaicos georeferenciados de imágenes aéreas de escala 1:5000 (figura 2.14); para la zona de la Riviera Maya, las fotografías con las cuales se trabajó, fueron obtenidas en el año 1999. Para la isla barrera de Cancún, la caracterización se desarrolló utilizando diferentes series de imágenes, correspondientes a los años de 1985, 1990 y 1999. Debido a la importancia económica que representa Cancún para el sector turístico del país (derrama económica basada en 28,000 habitaciones de hoteles), se analizaron los compartimientos litorales que se desarrollaron antes y después del huracán Gilberto, así como la configuración costera que existía en este sitio, antes del huracán Wilma.

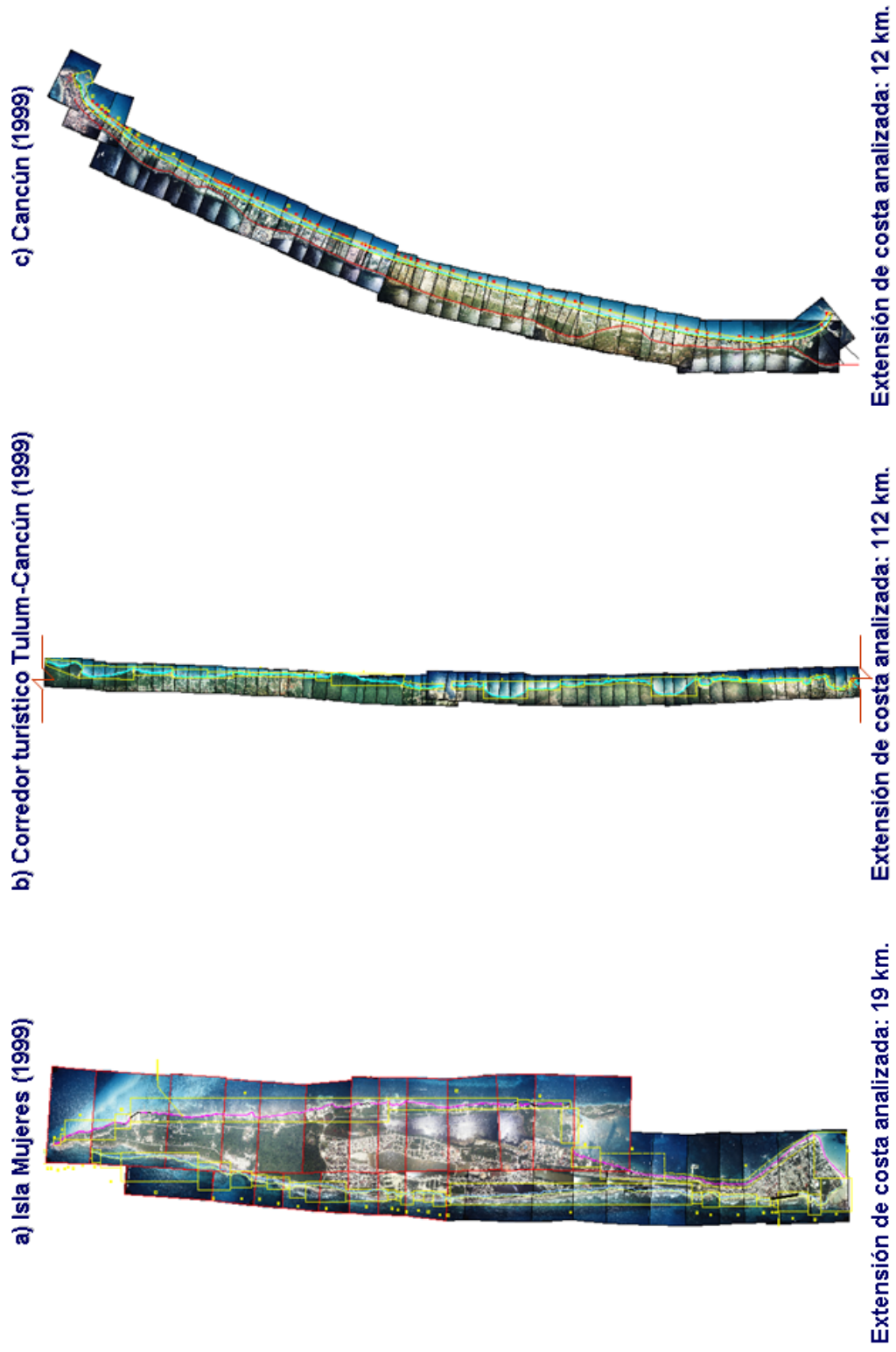


Figura 2.14. Fotomosaicos elaborados para la caracterización geomorfológica

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

Para efectuar el reconocimiento de las diversas formas morfológicas que existían en las áreas de estudio, los sistemas litorales fueron conformados por otros subsistemas y microceldas (celdas y compartimientos litorales). El origen de valorar a la costa como un sistema que se encuentra integrado por diferentes subsistemas, permite identificar las interrelaciones que coexisten entre las variables que conforman a éste; es precisamente, la complejidad de la interacción entre los distintos elementos del sistema, lo que faculta a que éstos lleguen a ser comprendidos mediante el uso de niveles de generalización. El detalle en el cual los sistemas litorales se definen, puede variar de acuerdo al enfoque de generalización que se elija; existen tres maneras con las cuales, es posible identificar la correlación que existe entre los elementos que participan en un sistema litoral: el enfoque de una caja negra, es utilizado para identificar solamente las principales partes de un sistema; por el contrario, un enfoque de caja blanca se relaciona al estudio cuantitativo de la relación de todos los agentes, procesos y fenómenos que se reconocen en las celdas litorales; y finalmente, en el enfoque de caja gris se identifican los elementos que conforman sistemas y subsistemas, pero de manera cualitativa donde se establecen las relaciones que existen entre las variables de los sistemas litorales. Para la caracterización que fue desarrollada en este trabajo, en el estudio de las celdas litorales se hizo uso del análisis de caja gris, con la cual fueron identificados los componentes del sistema, tales como: salientes, bajos, afloramientos de rocas, ríos, barras, bocas litorales, arrecifes, etc.

Para generar una base de datos que almacenará el inventario geomorfológico se obtuvieron: las coordenadas geográficas de las fronteras que delimitaban las celdas litorales fueron obtenidas; las dimensiones físicas de la playa (ancho y longitud de la playa), el material predominante que se observaba sobre la playa (arena, grava, rocas o una combinación de ellas); la forma en planta que presentaba la línea de playa (recta, semirectilínea o la forma de una playa que se encuentra entre dos salientes, ya sean naturales o edificadas por el ser humano). Si forma de la playa de la celda presentaba una forma de curva (playa encajada), las dimensiones de las líneas de control que se proyectan en este tipo de playas eran medidas de manera aproximada.

Los rasgos morfológicos relevantes que se identificaron para la caracterización fueron: tómbolos, bajos, barras, semitómbolos, arrecifes, deltas, fuentes (pequeñas desembocaduras de escurrimientos superficiales), drenes naturales (cañones submarinos), afloramientos de agua y rocas, etc. Solamente se consideraron los rasgos antes mencionados, debido a que éstos influyen más sobre las formas que las playas tienden a desarrollar, particularmente, en la costa de Quintana Roo. Para delimitar las celdas litorales, se utilizaron como fronteras las salientes naturales; adicionalmente, si se observaban estructuras marinas construidas sobre la playa, dichos obstáculos se consideraban de igual manera, como fronteras de las celdas litorales.

Con el objeto de realizar un inventario más detallado de las características de las playas, al analizar las celdas, se identificaron las estructuras marinas, edificadas por el hombre, que se encontraban sobre la orilla de la playa (escolleras, rompeolas emergidos y sumergidos); además se determinó si éstas provocaban o tenían algún tipo de influencia positiva o negativa sobre la forma de las playas aledañas a ellas. Finalmente, tratando de asociar el impacto antropogénico en las playas, se clasificaban las construcciones (de uso turístico o residencial) que existían sobre alguna de las secciones de la playa. Una vez que era obtenida la información referente

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

a la morfología de las celdas litorales, el análisis concluía con un diagnóstico o comentario acerca de los rasgos morfodinámicos o morfológicos que se observaban en cada una de las celdas analizadas.

En lo que respecta a la caracterización que se realizó a la línea de playa de Cancún del año 1985 (figura 2.15a), solamente se encontró una celda litoral, la cual tenía como fronteras físicas Punta Nizuc y Punta Cancún. En toda la línea de playa no se apreciaron características morfológicas que influyeran de una manera drástica en la forma que tenía la playa; de igual manera no se identificaron obstáculos naturales que llegaran a alterar la configuración de la playa, así como el acarreo litoral. El rasgo más relevante desde el punto de vista geomorfológico fue el relacionado a la formación de barras paralelas a la línea de playa; en algunas zonas, las barras podían considerarse como del tipo ondulatorio. Otro aspecto interesante en la caracterización de la línea de playa de Cancún fue observar el ancho de la playa, puesto que se registró un promedio de 20 a 23 metros. Es importante resaltar que el fotomosaico se integraba con fotografías de 1985, tres años antes del paso del huracán Gilberto por la Península de Yucatán y al cual, se le atribuyó como el agente meteorológico que provocó una gran erosión de las playas y elemento desestabilizador del equilibrio del sistema litoral de Cancún. En 1985, a través de las imágenes, ya era posible percibir que las playas de Cancún ya sufrían de problemas graves de erosión, con la reducción del ancho de playa de 40 metros a 20 metros.

Para la caracterización de la línea de playa de Cancún del año 1990 (figura 2.15b), dos años después del huracán Gilberto, se identificaron siete celdas litorales; los aspectos que resaltaron del análisis de este fotomosaico fueron los relacionados a la aparición de elementos rocosos en las playas. A partir de los afloramientos rocosos, algunas celdas se dividieron en microsistemas. En ciertas celdas se reconocieron la formación de barras perpendiculares a la playa; la erosión que presentaban algunas celdas con respecto a otras era evidente, por ejemplo, la celda que tenía como una de sus fronteras a Punta Nizuc, era inobjetable el grado de erosión que sufrían las playas, ya que en algunos de los sectores de la línea de la playa se encontraban completamente erosionados, conservando tan sólo una franja de 3 metros. La aparición de los estratos rocosos demostró la inestabilidad del equilibrio que tenía la playa. Para el año 1999 (figura 2.15c), se observó que la línea de playa de Cancún, se encontraba compuesta de 10 celdas litorales. A partir de la delimitación de la playa, se registró que antes del huracán Gilberto (1988), el estado morfológico de la playa, no podía considerarse como estable; posteriormente al huracán, el sistema litoral trata de restaurar su estado anterior al huracán Gilberto, pero al ser alterados los mecanismos de retroalimentación a lo largo de veinte años, el sistema no posee la capacidad de autoregenerarse y continuamente se erosiona (Delgado, 2007), por lo que tienden a desarrollar continuamente un estado de equilibrio metaestable. El equilibrio de una playa es un concepto que depende del tiempo y éste puede inferirse a partir de la morfología que se identifica en una escala de tiempo particular; el prescribir el equilibrio de una sistema costero debe considerarse como una componente de gran trascendencia en la morfodinámica costera, ya que las distintas formas costeras tratan de ajustarse u oscilar hacia cierto estado de equilibrio, particularmente por la retroalimentación negativa entre las variables que se ven implicadas en los sistemas costeros. El concepto de equilibrio morfológico es una generalización que es muy útil, puesto que éste nos proporciona

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

una visión de los posibles cambios que sufrirá la playa o la costa.

Para la Riviera Maya se reconocieron 67 celdas litorales, lo que mostró de una manera clara, los distintos tipos de playas que pueden formarse a partir del acarreo litoral y la influencia que ejercen el oleaje, las corrientes litorales y las tormentas en la erosión de las playas; a través de la morfología se estudió la gran dependencia que existe entre los arrecifes litorales y la zona de manglar con el sistema litoral. Al distinguir las formas de la línea de playa de Tulum a Playa del Carmen, se reconoció que éstas conformaban una línea de costa “dentada”, es decir, una costa compuesta con playas de formas rectas, encajadas o semiencajadas.

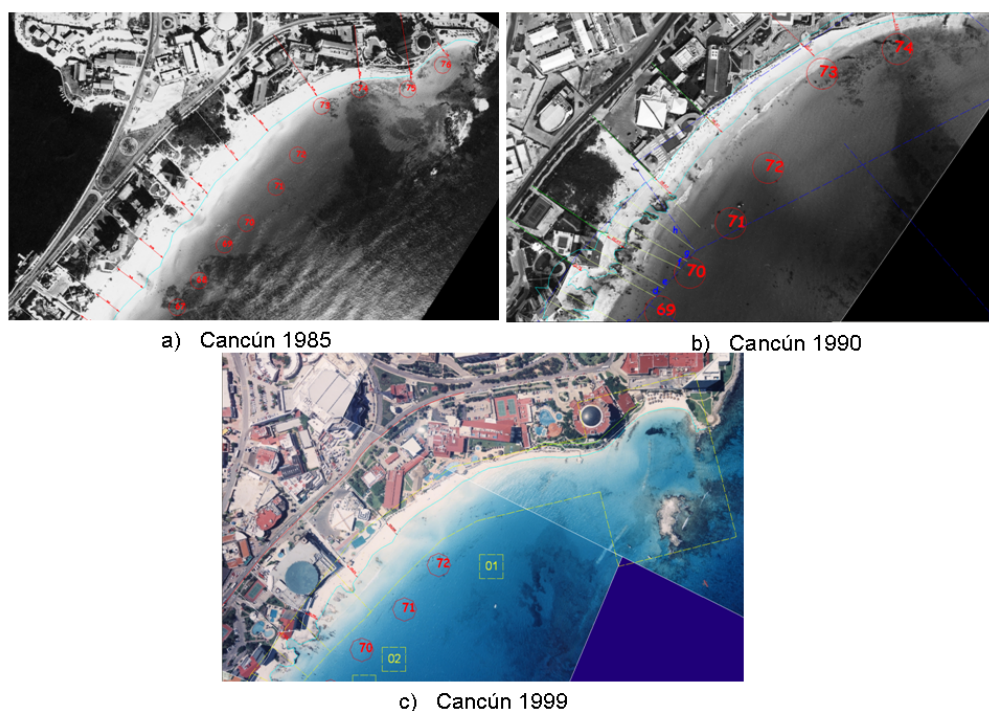


Figura 2.15. Celdas litorales de Cancún

En la costa que se encuentra localizada entre Tulum y Xel-Ha, se encontraron estructuras de rocas, que en la mayoría de los casos delimitaban playas con formas encajadas o semiencajadas; en algunas de estas playas se logró identificar cómo la arena que se depositaba sobre la playa, había sido removida, dejando al descubierto estratos de roca. En una longitud aproximada de 40 kilómetros se registraron veinticinco playas encajadas, en otros segmentos de las celdas litorales, se identificaron semitómbolos que según su configuración permitían suponer la dirección predominante del acarreo longitudinal de los sedimentos. En esta zona también fue posible observar que ciertas dársenas descargaban sedimentos y que de igual manera que los semitómbolos, a partir de la pluma de sedimentos era posible corroborar la dirección del acarreo litoral dominante. En catorce de las veinticinco playas expuestas, fue posible encontrar segmentos del arrecife coralino Mesoamericano; en dichas playas, se podía verificar que no se presentaban problemas de erosión severa, inclusive fue evidente

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

relacionar al arrecife con la forma de las playas; a partir del reconocimiento de los patrones de dirección de los frentes de ola, era posible ver el efecto de la estructura arrecifal sobre el oleaje, ya que dichas estructuras actuaban como rompeolas sumergidos, que provocan la disipación de energía del oleaje. Por otro lado, en la mayoría de las playas encajadas se identificaron vestigios de posibles cordones litorales, que provocaban que la energía del oleaje que pasaba a través del arrecife, al encontrar en su paso hacia la playa a este cordón, la energía se disipara de nuevo, ocasionando con ello, que el oleaje que llegaba a la costa fuera considerablemente menor al oleaje que rompía en el arrecife. Debido a las características de las playas, muchas de ellas se consideraron como disipativas.

Para la línea de playa que existe entre Playa del Carmen y Punta Nizuc se detectaron cuatro playas semiencajadas, exceptuando dichas playas, se encontró que la forma que proyectaban las playas era de líneas semirectas. Precisamente en esta zona fue posible constatar la influencia que tienen el arrecife coralino y la zona de manglar en las costas, por ejemplo en la periferia de Punta Maromas, es posible reconocer una punta de arena, en la cual su comportamiento se rige por el arrecife de coral que se encuentra en la zona exterior de la playa y las corrientes litorales. En la celda correspondiente a esta punta, se observó que las playas presentan problemas de erosión principalmente, por el desplante de estructuras marinas que interrumpen el acarreo litoral que existe sobre la costa. Por medio de las fotografías, fue posible identificar cómo el sedimento se movía a través de la laguna arrecifal, donde una cantidad del volumen de sedimentos oscila entre las playas de la celda y otra cantidad de arena sale del sistema por la ruptura del cordón arrecifal. En la celda correspondiente a Punta Bete, se encontraron evidencias de canales entre el mangle y la playa, que posiblemente tienen la función de desalojar tanto el agua como el sedimento que son depositados por algún evento meteorológico extremo en la zona del humedal. En este sitio se podía observar perfectamente, la interacción que debe de existir entre los elementos de retroalimentación de la playa.

En Isla Mujeres se identificaron 52 celdas litorales, del número total de celdas determinadas en 44 de ellas, se identificó algún elemento rocoso (acantilados, plataformas, salientes, etc.) en la playa. Las playas donde la arena era el material predominante se ubican en la parte noroccidental de la isla; mientras que en la parte suroriental y toda línea de costa de Isla Mujeres que se delimita con el Mar Caribe, se consideraron como playas de acantilados. Como se ha mencionado, existen múltiples parámetros que se ven implicados en la determinación de la forma de la playa, sin embargo al acarreo litoral se le reconoce como la principal variable que configura un sistema costero; a partir de la caracterización morfológica, en la costa noreste del Estado de Quintana Roo se identificaron sistemas litorales donde su forma fue originada por el acarreo y lavado de los sedimentos. Las formas de las líneas de playa entre Tulum y Playa del Carmen son moldeadas, en su mayoría por el movimiento de sedimentos por lavado; mientras que los contornos de las playas de Playa del Carmen a Cancún son generados por el acarreo.

No obstante que todas las playas del mundo presentan cierto grado de erosión y depositación, la naturaleza siempre tratará de reestablecer un balance entre ambos procesos. Cuando el sistema litoral es modificado por la intervención humana sin comprender las relaciones y las interacciones que existen entre los diferentes componentes del sistema, el proceso de

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

regeneración natural se complica. Precisamente, los problemas de erosión que experimenta Cancún y algunas de las playas del corredor turístico Tulum-Cancún, se agravan por el efecto adverso que han ocasionado los efectos antropogénicos de la zona, puesto que éstos, generalmente, no consideran las respuestas morfológicas que pueden producirse al alterar con sus edificaciones el sistema natural. Entre las principales efectos negativos que producen las acciones antropogénicas en las celdas litorales que se revisaron, se encontró la interrupción del flujo de sedimentos por la implementación de estructuras perpendiculares a la costa, observándose los problemas de erosión que producen dichas estructuras; también se detectó que la infraestructura hotelera, generalmente se edifica en la zona de mangle; las secciones de las playas se alteran al construir muros perimetrales. En algunas celdas se detectaba la presencia de rompeolas paralelos a la costa, que en tan sólo algunos casos, solucionaban parcialmente problemas de erosión, pero éstas estructuras modificaban la hidrodinámica y con ello, el comportamiento morfodinámico de toda la celda.

El análisis de morfología costera muestra que los huracanes pueden considerarse como uno de los medios a los que recurre la naturaleza para restaurar las condiciones de equilibrio que un sistema litoral puede presentar. Desafortunadamente en muchos de los casos, el comportamiento de los sistemas costeros se concibe como un sistema lineal; sin embargo, éstos son sistemas complejos y dinámicos que exhiben mecanismos de retroalimentación, ya sean positivos o negativos. En el caso de Cancún se identificó que los elementos de retroalimentación negativos, como pudieran ser las bocas litorales intermitentes que existían entre el sistema lagunal y el sistema litoral (Pedrozo, 2008) han sido obstruidas, debidas a causas antropogénicas; ocasionando con ello, que la línea de playa no tenga la capacidad de autoregenerarse de manera natural. Por otro lado, los mecanismos positivos, i.e. las barras y las dunas de las playas de Cancún, en especial éstas últimas, han sido completamente alteradas a tal grado que las edificaciones han sido desplantadas en esta sección de la playa, provocando con ello, una gran vulnerabilidad del sistema litoral; las dunas y las barras representan los conductos por los cuales la playa tiende a tener la capacidad de mantener cierto balance, hasta el momento que el sistema se modifica por los distintos procesos, agentes y fenómenos que se presentan en las líneas de playas.

El equilibrio morfológico que poseen algunas de las playas de la costa de Quintana Roo, se considera como dinámico, exceptuando la línea de playa de Cancún que bien, podría llegar a afirmarse que ésta posee un equilibrio metaestable. Las playas de la Riviera Maya, especialmente las que se encuentran protegidas por arrecifes, guardan un estado de equilibrio estable de manera temporal, pero de manera contraria, si el equilibrio de dichas playas se estudia a mediano y largo plazo, se consideraría dinámico. Desde la perspectiva de la morfología costera, la costa noreste de Quintana Roo es un caso excepcional para estudiar, ya que en ella se presentan sistemas costeros que son estables, dinámicos o hiperestables; las playas de Puerto Morelos y Tulum representan las playas que poseen un equilibrio estático, mientras que las playas de Playa de Carmen, Xcaret y Tres Ríos (entre otras) se consideran con un equilibrio dinámico. La mejor ejemplificación de playas con equilibrio hiperestático en nuestro país, se tiene en toda la isla barrera de Cancún.

Como resultado de la caracterización que se realizó, todas aquellas playas que exhiben la

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

interacción entre los dos mecanismos de retroalimentación, son capaces de regresar a un estado de equilibrio previo a cualquier evento que modifique dicho estado de manera temporal. Los arrecifes coralinos además de desempeñar un papel como disipadores de la energía del oleaje, tienden a consolidar los mecanismos de retroalimentación positiva y negativa.

La comprensión y el conocimiento de la geología de la Península de Yucatán, así como el reconocimiento de las características geológicas particulares de la zona de interés, permiten concebir la problemática que experimentan las líneas de playas al carecer de fuentes naturales de abastecimiento de sedimentos una vez, que las playas pierden arena.

El contexto que proporciona reconocer las formas morfológicas que brindan la retroalimentación (positiva o negativa) de los sistemas litorales y cómo dichos rasgos interactúan en ciertos periodos de tiempo, permitirá un manejo y/o explotación sustentables de los recursos naturales del sistema litoral, cuando éstos sean requeridos para satisfacer los diferentes usos (ambientales, protección o recreación) de un costa o playa.

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS PLAYAS EN EL NORESTE DE QUINTANA ROO

3

Valoración de las propiedades físicas de los sedimentos de la costa noreste de Quintana Roo

3.1. Introducción

Uno de los propósitos más relevantes de la ingeniería costera se relaciona con el estudio y análisis del comportamiento natural que una playa o línea de costa presentan ante los cambios producidos por la naturaleza o modificaciones antropogénicas. Ante tal premisa, es necesario determinar la relevancia y los órdenes de magnitud de cada uno de los procesos, agentes y fenómenos que se identifican en la zona litoral.

En las playas se reconoce la influencia y la gran trascendencia de agentes físicos como el oleaje, las corrientes y las mareas, así como el transporte de sedimentos; siendo éste último, uno de los aspectos que configura la forma geométrica en planta de la playa, los perfiles longitudinales y transversales de ésta. El transporte de sedimentos es un fenómeno físico, que generalmente se relaciona, con procesos de erosión o depositamiento de sedimentos en las playas de un litoral.

Para el análisis del acarreo litoral y transporte de sedimentos es importante reconocer que el movimiento que exhiben los sedimentos en una playa puede considerarse como intrincado; no obstante lo anterior, al analizar el sentido de aproximación o alejamiento de la costa, tanto en la dirección transversal o longitudinal de la zona litoral, es posible efectuar conclusiones acerca del estado de equilibrio que guarda la línea de costa; por ello, es de relevancia comprender los movimientos y las características del sedimento en las diferentes zonas que forman el perfil transversal de la playa.

En el presente capítulo se muestran los resultados más relevantes y la metodología que se realizó para el análisis de 110 muestras de arena que se extrajeron de diferentes playas del Estado de Quintana Roo. A partir de los resultados obtenidos, se elaboró una zonificación espacial de los principales parámetros físicos de la arena, que son requeridos en los modelos de transporte de sedimento que se utilizan en la escala de tiempo de los procesos costeros de corto a mediano plazo para el análisis de las playas. Los resultados de la caracterización de las muestras pueden ser consultados en el Apéndice A del presente trabajo.

La información que se presenta en este capítulo han sido publicada en:

- § Ruiz, G., Silva, R., Mendoza, G. y Rivillas, D. (2008). Caracterización del sedimento de las playas del corredor turístico Tulum-Cancún. En *Memorias del XX Congreso Nacional de Hidráulica* (CD). Berezowsky, V., Arganis, J., Rivera, T., Jiménez, A., Mendoza, A. editores. Asociación Mexicana de Hidráulica. Toluca, Estado de México.

3.2. Metodología para la caracterización de los sedimentos

Se recolectaron aproximadamente 100 diferentes muestras de campo en 36 sitios de la línea de costa del Estado de Quintana Roo. Básicamente se identificaron Tres lugares de ellos, corresponden a la localidad de Puerto Morelos, Q.R.; se eligieron 11 sitios que se ubican sobre la isla barrera de Cancún (de Punta Nizuc a Punta Cancún); en 6 lugares distintos, ubicados entre Punta Cancún - Punta Sam así como, de un par de sitios localizados en las cercanías de las bocas litorales de la Laguna Nichupté se obtuvieron muestras de arena. En la playa de Isla Mujeres se extrajo una muestra de arena; en 2 dos zonas de la reserva ecológica de Sian Ka'an se recolectó arena; tanto en Akumal como en Bahía Príncipe, Tulum, Playa del Carmen, Punta Brava y Holbox se extrajeron muestras de material sedimentario de la playa.

La determinación de las características de los sedimentos que se realizó a cada muestra de arena se dividió principalmente en 7 etapas:

- Recolección del material.
- Realización del análisis granulométrico.
- Obtención de las propiedades físicas básicas de la muestra.
- Conocimiento del valor del ángulo de reposo natural del material.
- Determinación de las propiedades del mezclado agua - sedimento.
- Obtención de los umbrales de movimiento de la partícula en el fondo marino.
- Tamaño y forma de los granos del sedimento.

3.2.1. Recolección de muestras

Como una etapa previa a la obtención de las muestras fue necesario planear y organizar los sitios en los cuales se extraería el material; la caracterización geomorfológica que se menciona en el capítulo 1 sirvió para identificar aquellas playas que pudieran tener similitudes entre ellas, con respecto a sus características geométricas, físicas y de equilibrio. El movimiento que exhibe el material sedimentario en una playa puede considerarse como intrincado, no obstante, al analizar el sentido de aproximación o alejamiento de la costa con respecto a las zonas en que se produce y la dirección transversal o longitudinal del litoral, es posible efectuar conclusiones acerca del estado de equilibrio que guarda la línea de costa; por ello, es

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

de relevancia comprender los movimientos del sedimento en las diferentes zonas que forman el perfil transversal de una playa. Las muestras fueron extraídas: a) de la zona de la playa seca o berma (Pb); b) de la zona del estrán de la playa (Pl) y c) en la área o playa sumergida (Pr o Ps), aproximadamente a una profundidad de -1.5 m a -2 m.

La elección de considerar distintos tipos de arena en éstas zonas, se enfocó principalmente en estudiar las características del sedimento que se ve sometido a la asimetría del oleaje. Respecto a la zona del estrán de la playa, se estableció que se deseaba conocer los parámetros del sedimento producto del mezclado de material, que se genera cuando la ola rompe sobre la pendiente de la playa y disipa su energía potencial, transformándose en una onda solitaria; en la elección de la zona de la playa seca o berma, se optó conocer que tan diferente podía llegar a ser el material de la playa seca con respecto a las otras dos zonas.

En cada sitio de muestreo, se extrajeron aproximadamente dos kilogramos de material granular, el material fue obtenido de manera superficial, sin realizar pozos de sondeo. Un elemento primordial en las campañas de recolección de las muestras, fue registrar las coordenadas reales de los sitios de muestreo. En la Tabla 3.1 se presentan las coordenadas tanto geográficas, como en el sistema de referencia UTM de los lugares de extracción y en la Figura 3.1 se muestran estos sitios.

3.2.2. Determinación de los parámetros estadísticos de la muestra

A partir de la metodología de Folk (1957) se obtuvieron los parámetros estadísticos de las muestras analizadas. De la curva granulométrica, se convirtieron los diámetros nominales de interés (en este caso, $d_5, d_{10}, d_{16}, d_{25}, d_{30}, d_{50}, d_{60}, d_{75}, d_{84}, d_{90}$ y d_{95}) con unidades en milímetros a unidades Phi. Las ecuaciones utilizadas para realizar dicha transformación fueron:

$$\phi = -\log_2 d \quad (3.1)$$

$$d = 2^{-\phi} \quad (3.2)$$

donde d es el diámetro de la arena o sedimento en milímetros y ϕ son las unidades Phi.

Para conocer el valor del diámetro medio, la desviación estándar, el sesgo y la curtosis de la muestra, se utilizaron las ecuaciones:

$$\text{Diámetro medio} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{86}}{3} \quad (3.3)$$

$$\text{Desviación estándar} = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{4} \quad (3.4)$$

$$\text{Sesgo} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (3.5)$$

La estadística y distribución de tamaños fueron calculados principalmente para obtener el

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

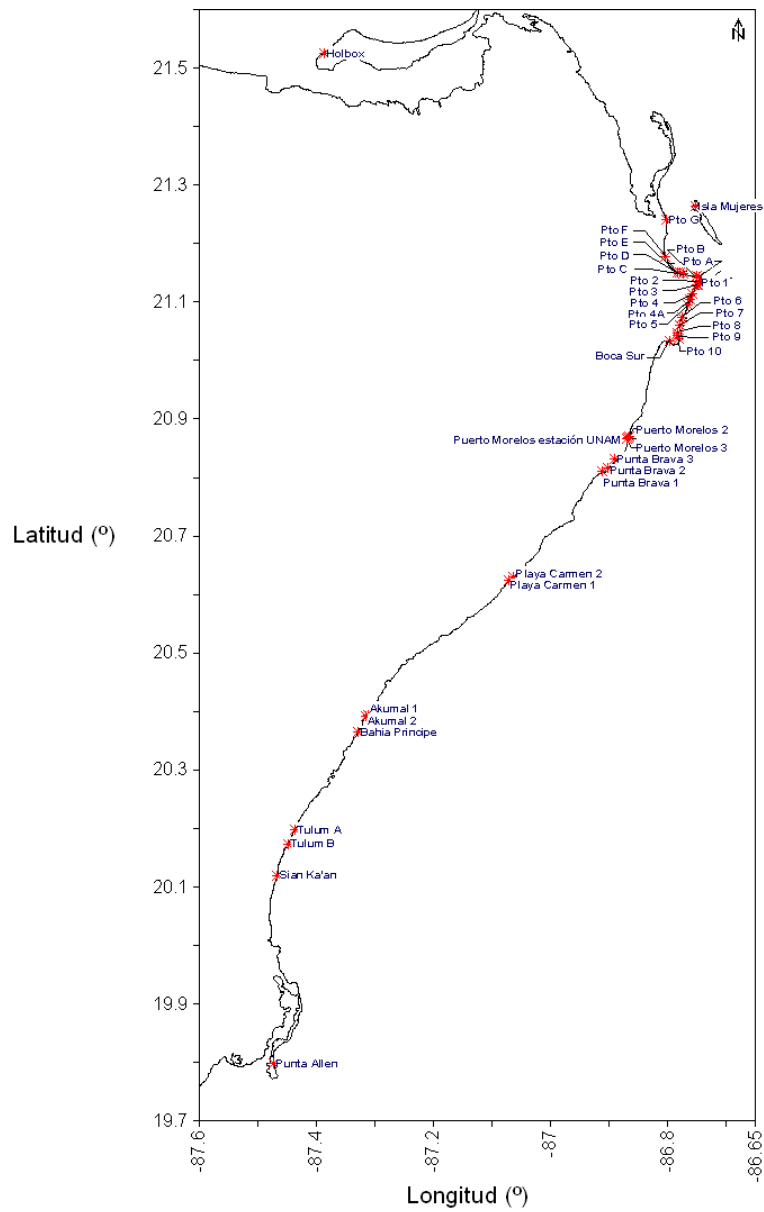


Figura 3.1. Localización de los sitios de extracción de la muestras de arena

**CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS
SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO**

Tabla 3.1. Ubicación geográfica de los sitios de extracción de la arena

Lugar	Coordenadas				
	Geográficas		UTM		
	Longitud:	Latitud:	X:	Y:	Zona:
Boca Sur	-86.7954	21.0358	521,259.9992	2,326,122.1175	16
Puerto Morelos UNAM	-86.8673	20.8680	513,801.1374	2,307,548.0139	16
Puerto Morelos 2	-86.8659	20.8708	513,943.9119	2,307,851.8631	16
Puerto Morelos 3	-86.8686	20.8660	513,664.9397	2,307,322.5620	16
P1	-86.7452	21.1335	526,453.7885	2,336,940.7871	16
P2	-86.7482	21.1304	526,150.4047	2,336,595.8547	16
P3	-86.7494	21.1287	526,017.6126	2,336,409.6325	16
P4	-86.7578	21.1146	525,154.7245	2,334,853.4970	16
P4A	-86.7631	21.1036	524,605.0000	2,333,629.0000	16
P5	-86.7668	21.0945	524,218.9638	2,332,622.0587	16
P6	-86.7742	21.0746	523,456.9477	2,330,419.6613	16
P7	-86.7791	21.0604	522,951.5196	2,328,850.9625	16
P8	-86.7820	21.0472	522,652.5128	2,327,388.3438	16
P9	-86.7819	21.0423	522,664.9844	2,326,847.3934	16
P10	-86.7800	21.0369	522,860.8821	2,326,243.7693	16
Punto A	-86.7511	21.1396	525,843.9993	2,337,619.1441	16
Punto B	-86.7487	21.1392	526,088.0000	2,337,574.0283	16
Punto C	-86.7742	21.1439	523,442.0098	2,338,090.0004	16
Punto D	-86.7870	21.1440	522,114.0006	2,338,094.0011	16
Punto E	-86.7854	21.1447	522,285.0002	2,338,171.9409	16
Punto F	-86.8060	21.1767	520,133.9994	2,341,716.0157	16
Punto G	-86.8021	21.2411	520,531.1592	2,348,845.8938	16
Isla Mujeres	-86.7512	21.2602	528,811.6114	2,350,961.7478	16
Tulum A	-87.4364	20.1980	454,407.2903	2,233,452.1741	16
Tulum B	-87.4477	20.1737	453,219.4584	2,230,766.1613	16
Sian Ka'an	-87.4664	20.1197	451,248.6926	2,224,795.6454	16
Bahía Príncipe (DIF)	-87.3321	20.3643	465,345.1279	2,251,828.3644	16
Akumal 1	-87.3153	20.3947	467,099.6641	2,255,187.0240	16
Akumal 2	-87.3191	20.3916	466,699.8858	2,254,845.0361	16
Playa del Carmen 1	-87.0717	20.6252	492,529.0000	2,280,672.0000	16
Playa del Carmen 2	-87.0657	20.6298	493,155.0000	2,281,174.0000	16
Punta Brava 1	-86.9110	20.8121	509,260.0000	2,301,352.0000	16
Punta Brava 2	-86.9023	20.8156	510,163.0000	2,301,745.0000	16
Punta Brava 3	-86.8981	20.8321	510,531.2032	2,413,250.2892	16
Punta Allen	-87.4743	19.7976	450,321.0340	2,189,154.5370	16
Holbox	-87.3829	21.5232	460,346.3500	2,380,104.7742	16

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

Tabla 3.2. Distribución de rangos para la desviación estándar, el sesgo y la curtosis de la distribución de tamaños de las muestras de arenas (de King y Galvin (2002))

Rango Phi	Descripción:
	Desviación estándar:
< 0.35	Muy buena clasificación
0.35 – 0.50	Buena clasificación
0.50 – 0.71	Moderadamente bien clasificada
0.71 – 1.00	Clasificación moderada
1.00 – 2.00	Clasificación pobre
2.00 – 4.00	Clasificación muy pobre
> 4.00	Clasificación extremadamente pobre
	Sesgo:
< -0.3	Sesgo muy grueso
-0.3 a -0.1	Sesgo grueso
-0.1 a 0.1	Cercanamente simétrico
0.1 a 0.3	Sesgo fino
> 0.3	Sesgo muy fino
	Curtosis:
< 0.65	Muy platicúrtico (plano)
0.65 – 0.90	Platicúrtico
0.90 – 1.11	Mesocúrtico
1.11 – 1.50	Leptocúrtico
1.50 – 3.00	Muy leptocúrtico
> 3.00	Extremadamente leptocúrtico

grado de clasificación y el posible mecanismo de depósito del material; por ejemplo, para una muestra que adopta una forma leptocúrtica, el posible agente de depositación es el oleaje; si sedimento analizado llegará a mostrar una distribución mesocúrtica o platicúrtica, la estadística indicaría un clasificación media o baja, con un posible mecanismo de sedimentación variable con escasa selectividad (Serra, 1992). La Tabla 3.2 muestra los rangos de la distribución de sedimentos para la desviación estándar, el sesgo y la curtosis.

Adicionalmente, se determinaron los coeficientes de uniformidad C_c y de curvatura C_u de la muestra, ambos coeficientes fueron calculados, utilizando las expresiones:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (3.6)$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.7)$$

donde d_n representa el n percentil en milímetros.

Con los valores proporcionados del análisis granulométrico, así como de la estadística y distribución de tamaños, las muestras de arena se clasificaron usando los tres principales criterios que se recomiendan: la clasificación del A.S.T.M. (*American Section of the International Association for the Testing Materials*), la clasificación de Wentworth y el sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (*S.U.C.S.*). En la Tabla 3.3 se muestran los

**CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS
SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO**

Tabla 3.3. Clasificación de los sedimentos (de: Badillo (1995) y King y Galvin (2002))

Clasificación	Tamaño en mm
ASTM:	
Grava Fina	4.76 – 19.03
Arena Gruesa	2.00 – 4.76
Arena Media	0.420 – 2.00
Arena Fina	0.074 – 0.420
Wentworth:	
Cantos medios	9.51 – 19.03
Cantos pequeños	4.00 – 9.51
Gránulos	2.00 – 4.00
Arena muy gruesa	1.00 – 2.00
Arena gruesa	0.50 – 1.00
Arena media	0.25 – 0.50
Arena fina	0.125 – 0.25
Arena muy fina	0.074 – 0.125
S.U.C.S.:	
Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos (SW)	Si $C_u > 6$ y $1 < C_c < 6$
Arenas mal graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos (SP)	Si $C_u < 6$ y $1 > C_c > 6$

tamaños de sedimento entre las distintas clasificaciones que se consideraron para el análisis sedimentológico de la arena.

3.2.3. Obtención de las propiedades físicas básicas de la muestra

La expresión que se uso para determinar la densidad relativa del material (S_s) de la muestra a partir de datos de laboratorio fue:

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}} \quad (3.8)$$

donde W_s es el peso del material seco (g), W_{fw} representa el peso del matraz con agua (g) y W_{fsw} es el peso del material inmerso en el agua del matraz (g).

La relación de vacíos fue otra de las propiedades físicas de las muestras de arena que se determinó; para ello, se utilizó la expresión 3.9 para determinar la relación de vacíos de la muestra:

$$V_r = \frac{V_s S_s \gamma_o}{W_s} - 1 \quad (3.9)$$

donde V_r es la relación de vacíos (adimensional), V_m es el volumen que ocupa el material seco en un recipiente (m^3) y γ_o es el peso específico del agua destilada a 4°C de temperatura

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

(kg/m^3).

A partir de los datos obtenidos del cálculo de la densidad relativa del material y su relación de vacíos, la densidad relativa del material dentro del agua se conoció utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta = S_s - 1 \quad (3.10)$$

donde S_s es la densidad relativa del material (adimensional) y Δ es la densidad relativa del material dentro del agua (adimensional). El peso específico de las partículas de la muestra se obtuvo de la ecuación:

$$\gamma_s = S_s \gamma_o \quad (3.11)$$

donde γ_s es el peso específico de las partículas en kg/m^3 . Para la conocer la densidad de las partículas de la muestra ς se utilizó la relación:

$$\varsigma = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (3.12)$$

en la cual, ρ_s es la densidad de las partículas en kg/m^3 y ρ es la densidad del agua, que tiene el valor de $1027 \text{ kg}/\text{m}^3$ (agua salada) (Badillo, 1995; CNA, 1996; Bunte, 2001; King y Galvin, 2002).

3.2.4. Determinación de las propiedades del mezclado agua-sedimento

Las propiedades que se calcularon en este inciso, fueron las siguientes: volumen de la concentración, concentración de la masa, porosidad, densidad de suspensión, permeabilidad específica, coeficiente de permeabilidad, gradiente de presión para la licuefacción y la velocidad mínima del flujo de agua para alcanzar el estado de licuefacción.

Generalmente, el volumen de la concentración se obtiene de la relación del volumen del material sedimentario y del volumen de la mezcla agua-sedimento, pero en este caso, dicho valor se obtuvo en función de la relación de vacíos, utilizando la siguiente ecuación:

$$C = \frac{1}{1 + V_r} \quad (3.13)$$

donde C representa el volumen de concentración (adimensional) y V_r es el valor de la relación de vacíos (adimensional). Dicho dato, frecuentemente se utiliza en la determinación del transporte de suspensión de los modelos de cuantificación de sedimentos. La masa de la concentración, relaciona el peso las partículas con el volumen de la mezcla y se conoció con la ecuación:

$$\rho_{cas} = \frac{\rho}{1 + V_r} \quad (3.14)$$

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

en la cual, es la masa de la concentración en kg/m^3 .

La porosidad, en función de la relación de vacíos, se calculó con la siguiente expresión:

$$P_{or} = \frac{V_r}{1 + V_r} \quad (3.15)$$

donde P_{or} es el valor de la porosidad (adimensional). La densidad de la suspensión es posible conocerla, utilizando la ecuación:

$$\rho_{sus} = \frac{\rho(V_r) + \rho_s}{1 + V_r} \quad (3.16)$$

donde ρ_{sus} representa la densidad de la suspensión, con unidades de kg/m^3 . La permeabilidad específica del material fue determinada a partir de la expresión:

$$kp = 0.011(d_{50})^2 \quad (3.17)$$

donde kp es la permeabilidad específica en m^2 y d_{50} es el valor del 50 percentil de la distribución de sedimentos en m. El gradiente de presión necesario para que la arena comience a comportarse como un fluido se calculó usando la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{wf} = g(\rho_s - \rho)(1 - P_{or}) \quad (3.18)$$

en la cual $\left(\frac{dp}{dz}\right)_{wf}$ es el valor del gradiente de presión, en N/m^3 , g es la aceleración de la gravedad dada en m/s^2 . Para determinar la velocidad mínima del flujo para alcanzar la licuefacción, así como la velocidad de caída del sedimento, fue necesario llegar a conocer en primera instancia, el factor de Yalin o parámetro adimensional de la partícula; dicho factor se representa de la siguiente manera:

$$D_* = \left[\frac{g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} d_{50} \quad (3.19)$$

donde D_* es el factor de Yalin (adim), ν representa la viscosidad cinemática del agua en m^2/s . La velocidad mínima del flujo para alcanzar la licuefacción (W_{mf}) se conoció, aplicando la siguiente ecuación:

$$W_{mf} = \frac{\nu}{d_{50}} \left[(10.36^2 + 1.049P_{or}^{4.7} D_*^3)^{0.5} - 10.36 \right] \quad (3.20)$$

donde W_{mf} en m/s .

3.2.5. Obtención de los umbrales de movimiento de la partícula en el fondo marino

Para determinar los umbrales de movimiento de las partículas en el fondo marino se aplicó la siguiente metodología: se calculó el parámetro de sedimento - fluido (S_*), a partir de esta variable, se obtuvo el factor de Shields crítico (Ψ_{cr}); para el proceso de cálculo de los umbrales de movimiento de la partícula, se determinó la magnitud de la velocidad del esfuerzo cortante crítico (u_{*cr}) como una función del parámetro de Shields crítico; conocida la magnitud anterior y tomando el valor de la densidad del agua, se obtuvo el esfuerzo cortante crítico (τ_{cr}) al que se ven sujetas las partículas. Posteriormente, se evaluó el número de Reynolds y Rouse. Determinado el número de Reynolds se determinó el tipo de fondo teórico que se podría formar con las características de la arena que se estaba analizando; adicionalmente, el índice de flotación se calculó, ya que conociendo dicho valor es posible inferir qué tipo de flujo influirá sobre el comportamiento de la movilidad del sedimento; el valor del número de Rouse indica el tipo de movimiento básico que puede llegar a tener el sedimento, tomando en consideración las propiedades físicas de la partícula. Finalmente, se evaluó la velocidad de caída de las partículas, utilizando 12 diferentes criterios diferentes para determinar dicho parámetro.

Para la determinación del parámetro de sedimento - fluido (adim) se utilizó la siguiente ecuación:

$$S_* = \frac{d_{50}}{4\nu} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d_{50}} \quad (3.21)$$

Para cuantificar el parámetro de Shields crítico (adim) se aplicaron las expresiones:

$$x = \log_{10} S_* \quad (3.22)$$

$$\Psi = 0.02235x^5 - 0.06043x^4 + 0.20307x^3 + 0.54252x^2 - 0.636397x - 1.03167 \quad (3.23)$$

$$\Psi_{cr} = 10^\Psi \quad (3.24)$$

Evaluado el parámetro de Shields crítico, con los correspondientes datos de la muestra del parámetro de sedimento - fluido y el diámetro adimensional del sedimento se graficaron los umbrales de movimiento (Figura 3.2) e inicio de movimiento (Figura 3.3) dicho valor.

La determinación de la velocidad del esfuerzo cortante crítico (m/s) se obtuvo con:

$$u_{*cr} = \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d_{50} \Psi_{cr}} \quad (3.25)$$

A partir de la ecuación 3.25 y con densidad del agua se calculó la magnitud del esfuerzo cortante crítico (N/m^2):

$$\tau_{cr} = \rho u_{*cr} \quad (3.26)$$

Utilizando los valores de las expresiones 3.25 y 3.26, se encontró el número de Reynolds,

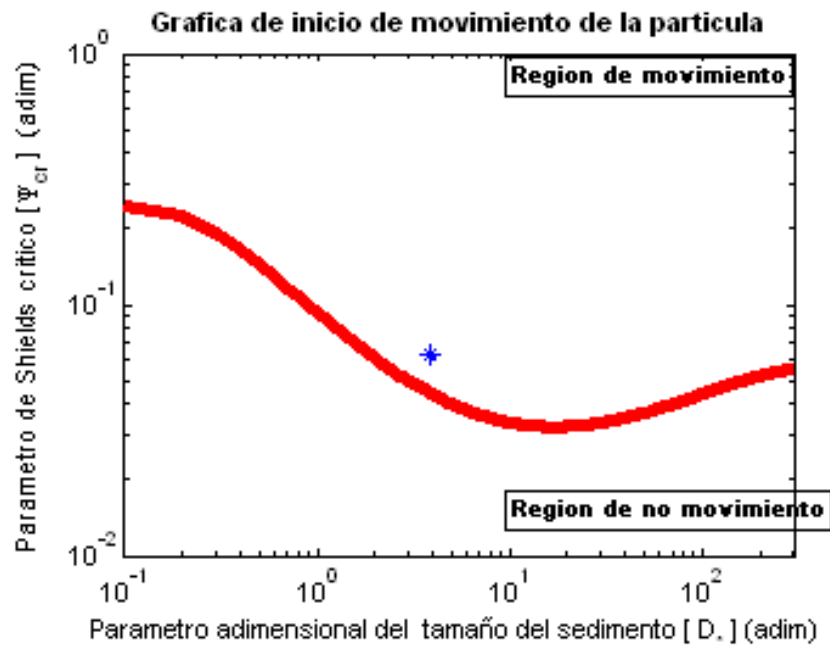


Figura 3.2. Umbral de movimiento del sedimento, correspondiente a la muestra de la zona de lavado de Akumal, Q.R.

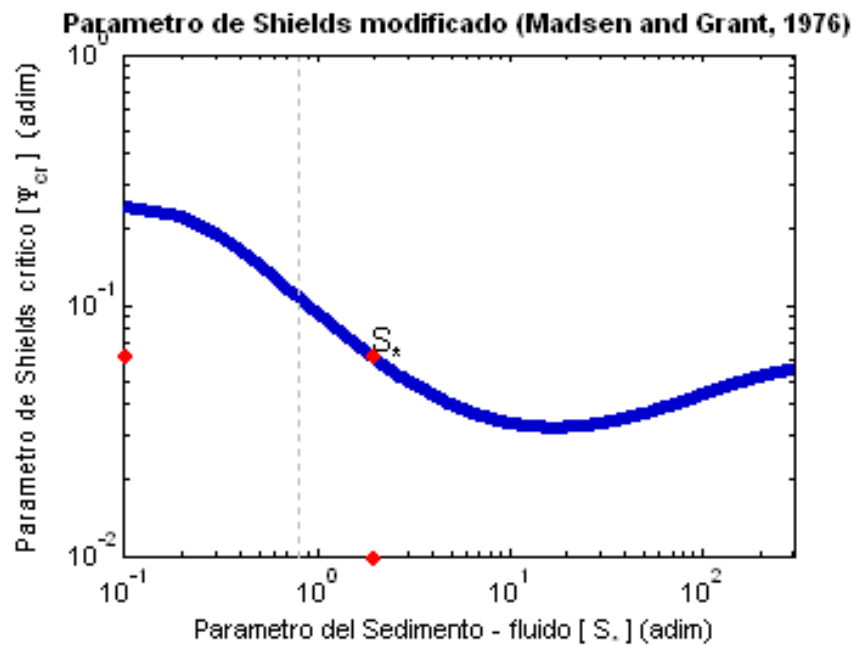


Figura 3.3. Inicio de movimiento del sedimento, correspondiente a la muestra de la zona de lavado de Akumal, Q.R.

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

Tabla 3.4. Configuración teórica del fondo (de King y Galvin (2002))

Rango	Configuración del fondo
$R_e < 10$	Fondo con rizos
$10 \leq R_e \leq 100$	Fondo con dunas
$R_e > 100$	Fondo plano

necesario para conocer de una manera teórica la configuración del fondo (Tabla 3.4) correspondiente a las características de la muestra de arena:

$$R_e = \frac{u_{*cr} d_{50}}{\nu} \quad (3.27)$$

Para realizar una clasificación del tipo de flujo, tomando en cuenta el coeficiente de arrastre del sedimento, se utilizó la ecuación 3.28 para conocer el índice de flotación de Arquímedes A_{rq} :

$$A_{rq} = (D_*)^3 \quad (3.28)$$

donde A_{rq} es adimensional. En la Tabla 3.5 se muestran los rangos correspondientes al tipo de flujo que influye sobre el inicio de movimiento del sedimento.

Tabla 3.5. Clasificación del flujo, en función del índice de flotación de Arquímedes (de Ahrens (2000))

Rango	Tipo de flujo
$A_{rq} < 39$	Flujo laminar
$39 \leq A_{rq} \leq 10^4$	Flujo de transición
$A_{rq} > 10^4$	Flujo turbulento

Uno de los parámetros adimensionales que se llegó a considerar como importante para la estimación del transporte de sedimentos, fue el parámetro de Rouse. Esta relación proporcionó el modo de transporte teórico de los sedimentos (arrastre, rodamiento, reptación saltación y suspensión). El número de Rouse se determinó usando la ecuación 3.29, en la Tabla 3.6 se detallan los rangos de los movimientos de la arena o partículas:

$$Rouse = \frac{W_f}{\gamma_d u_{*cr} \mathbf{k}} \quad (3.29)$$

donde γ_d (kg/m^3) es un factor que describe la diferencia entre la difusión del fluido en el cual, se encuentra la partícula o sedimento, generalmente $\gamma_d \approx 1$, \mathbf{k} es la constante de Von Karman (adim) y W_f es la velocidad de caída del sedimento (m/s).

**CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS
SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO**

Tabla 3.6. Modos de transporte de la partícula según Rouse (de Dean y Dalrymple (2001))

Rango	Tipo de flujo
$Rouse > 7.5$	Arrastre o rodamiento
$2.5 \leq Rouse \leq 7.5$	Saltación o reptación
$0.8 \leq Rouse \leq 2.5$	Suspensión
$Rouse < 0.8$	Suspensión sin transporte

Otro de los parámetros que se obtuvo a partir del índice de flotación de Arquímedes, fue el parámetro de escala del sedimento (A); este valor, se emplea para conocer el perfil de equilibrio que una playa puede llegar a alcanzar. La cuantificación del parámetro se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$A = 2.23 \left[\exp \left(\frac{-1.24}{Ap^{1/3}} \right) \right] d_{50}^{1/3} \quad (3.30)$$

donde A se encuentra en $m^{1/3}$. Generalmente, el criterio de suspensión adimensional de Bagnold determina cuando los sedimentos pueden llegar a considerarse como transporte en suspensión; para conocer dicho criterio, se aplicó la siguiente expresión:

$$P_{bagnold} = \frac{u_{*cr}}{W_f} \quad (3.31)$$

Para estimar la velocidad de caída de las partículas de las múltiples muestras que fueron tomados de los distintos sitios de la línea de costa de Quintana Roo, se usaron 12 expresiones para calcular dicho parámetro; las formulaciones que se utilizaron fueron: Chang y Liou (Jiménez y Madsen, 2003), Cheng (1997), Hallermeier (Jiménez y Madsen, 2003), Van Rijn (1993), Soulsby (1997), Ahrens (2000), Jiménez-Madsen (2003), Rubey (Ahrens, 2003), Julien (1998), Swamee y Ohja (1991), Camenen (2007) y Zanke (Jiménez y Madsen, 2003). En la Tabla 3.7 se muestran las ecuaciones de velocidad de caída pertenecientes a cada autor, previamente citado.

Tabla 3.7. Ecuaciones para la determinación de la velocidad de caída

Ecuación:	Autor:
$W_f = \left(\frac{\nu A_{rq}}{18d_{50}} \right) \quad \text{Si } A_{rq} < 39$ $W_f = \nu \left(\frac{D_*^{2.1}}{6d_{50}} \right) \quad \text{Si } 39 \leq A_{rq} \leq 10000$ $W_f = \frac{1.05\nu D_*^{1.5}}{d_{50}} \quad \text{Si } A_{rq} > 10000$	1) Hallermeier
Continua ...	

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

Tabla 3.7. Ecuaciones para la determinación de la velocidad de caída (cont.)

Ecuación:	Autor:
$W_f = \frac{\nu A_{rq}}{18d_{50}} \quad \text{Si } A_{rq} < 16.187$ $W_f = \left(\frac{10\nu}{d_{50}}\right) (\sqrt{1 + 0.01A_{rq}} - 1) \quad \text{Si } 16.187 \leq A_{rq} \leq 16187$ $W_f = \frac{1.1\nu_*^{1.1}}{d_{50}} \quad \text{Si } A_{rq} > 16187$	2) Van Rijn
$W_f = \frac{\nu}{d_{50}} (\sqrt{10.36^2 + 1.049A_{rq}} - 10.36)$	3) Soulsby
$CL = 0.055 \tanh \{ [12A_{rp}^{-0.59}] \exp(-0.0004A_{rq}) \}$ $CT = 1.06 \tanh \left\{ [0.016A_{rp}^{0.5}] \exp\left(\frac{-120}{A_{rq}}\right) \right\}$ $W_f = \frac{CL(\frac{\rho_s - \rho}{\rho})gd_{50}^2}{\nu} + CT \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)gd_{50}}$	4) Ahrens
$z = \frac{2.5}{S_*} \left\{ [1 + (0.16S_*^2)]^{0.5} - 1 \right\}$ $W_f = z \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)gd_{50}}$	5) Zanke
$W_f = \frac{8\nu}{d_{50}} (\sqrt{1 + 0.0139A_{rq}} - 1)$	6) Julien
$Re = \left(\sqrt{3.61^2 + 1.18A_{rq}^{1/1.53}} \right)^{1.53}$ $C_D = \frac{4A_{rq}}{3Re^2}$ $W_f = \sqrt{\left(\frac{4}{3C_D}\right) \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)gd_{50}}$	7) Cheng
$Re = \frac{24.6A_{rq}^{0.477}}{17.9(1+24.6^{-0.528})}$ $W_f = \sqrt{\left[\frac{4}{3Re^2}\right] \left[\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)gd_{50}}\right]}$	8) Chang y Liou
$d_{nw} = \frac{d_{50}}{0.9}$ $s_{*w} = \frac{d_{nw}}{4\nu} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)gd_{50}}$ $W_f = \left(0.954 + \frac{5.12}{s_{*w}}\right) \left(\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)gd_{50}}\right)$	9) Jiménez y Madsen
Continua ...	

**CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS
SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO**

Tabla 3.7. Ecuaciones para la determinación de la velocidad de caída (cont.)

Ecuación:	Autor:
$Re = \frac{A_{rq}}{17.9} \quad \text{Si } A_{rq} < 39$ $Re = \frac{24.6A_{rq}^{0.477}}{17.9[1+24.6A_{rq}^{0.477}]} \quad \text{Si } 39 \leq A_{rq} \leq 10^4$ $Re = \frac{24.6A_{rq}^{0.477}}{17.9} \quad \text{Si } A_{rq} > 10^4$ $W_f = \sqrt{\left[\frac{A_{rq}}{3 \frac{4A_{rq}}{3Re^2}} \right] \left[\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) gd_{50}} \right]}$	10) Rubey
$a_1 = 24$ $a_2 = 100$ $a_3 = 2.1 + 0.06P_{rou}$ $b_1 = 0.39 + 0.22(6 - P_{rou})$ $b_2 = 20$ $b_3 = 1.75 + 0.35P_{rou}$ $m_1 = 1.2 + 0.12P_{rou}$ $m_2 = 0.47$ $A_{ca} = a_1 + \left\{ a_2 \left[1 - \text{sen}\left(\frac{CSF\pi}{2}\right) \right]^{a_3} \right\}$ $B_{ca} = b_1 + \left\{ b_2 \left[1 - \text{sen}\left(\frac{CSF\pi}{2}\right) \right]^{b_3} \right\}$ $m_{ca} = m_1 + \left[\text{sen}\left(\frac{CSF\pi}{2}\right) \right]^{m_2}$ $W_f = \frac{\nu}{d_{50}} \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A_{ca}}{B_{ca}} \right)^{2/m_{ca}} + \left(\frac{4}{3} \frac{A_{rq}}{B_{ca}} \right)^{1/m_{ca}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A_{ca}}{B_{ca}} \right)^{1/m_{ca}}} \right]^{m_{ca}}$ $\text{Si } CSF = 0.7 \Rightarrow P_{rou} = 3.5$ $\text{Si } CSF = 0.4 \Rightarrow P_{rou} = 5$	11) Camenen
Continua ...	

Tabla 3.7. Ecuaciones para la determinación de la velocidad de caída (cont.)

Ecuación:	Autor:
$\nu_* = \frac{\nu}{d_{50}} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d_{50}}$ $\text{Si } \geq 1.8 \times 10^{-4} \sqrt{CSF} \Rightarrow$ $\omega_* = \left\{ \frac{44.84 \nu_*^{0.667}}{1 + 4.5 CSF^{0.34}} \right. \left. \frac{0.833}{CSF^4 + 20 CSF^2 + \nu_*^{2.4} \exp 18.6 CSF^{0.4}} + \frac{0.794}{\nu_*^{2.4} \exp 18.6 CSF^{0.4}} \right\}^{-1}$ $W_f = \omega_* \left(\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d_{50}} \right)$	<p>12) Swamee y Ohja</p>

3.2.6. Tamaño y forma de los granos del sedimento

El factor de forma del sedimento (CSF) es relevante, ya que principalmente influye en el contorno del fondo marino donde se deposita el sedimento, el ángulo de reposo se encuentra en función de la forma del sedimento (Soulsby (1997)), la velocidad de caída depende directamente del coeficiente de arrastre de la partícula y este en último, se considera el efecto de la forma y redondez del sedimento en el fluido (Gibbs et al. (1971) y Dietrich (1982)). A pesar que existen diferentes ecuaciones para evaluar esta relación adimensional de forma del sedimento (cf. Briggs et al. (1962)), la expresión de Corey es la que usualmente se utiliza para conocer este valor (Janke (1966)). Para determinar el factor de forma de las partículas de la muestra o sedimento que se presenta en este análisis, se tomaron fotografías de las partículas de arena (Figura 3.4) y se extrajeron las dimensiones correspondientes al largo (a), ancho (b) y espesor del sedimento (c). La expresión de forma del sedimento de Corey es:

$$CSF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \tag{3.32}$$

3.3. Clasificación y agrupación de resultados

Una vez que se obtuvieron las características de los sedimentos de todas las muestras de los diferentes sitios, la siguiente etapa de este análisis fue clasificar los sitios de muestreo en diferentes categorías; en tres clases se agruparon los datos correspondientes a la zona de zona del estrán de la playa, la zona de lavado y la zona antes de la rompiente; en cinco grupos se agruparon las muestras según las características geomorfológicas de los sitios de donde se extrajeron. En la Tabla 3.8 se describen las categorías que se tomaron en cuenta para la

**CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS
SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO**

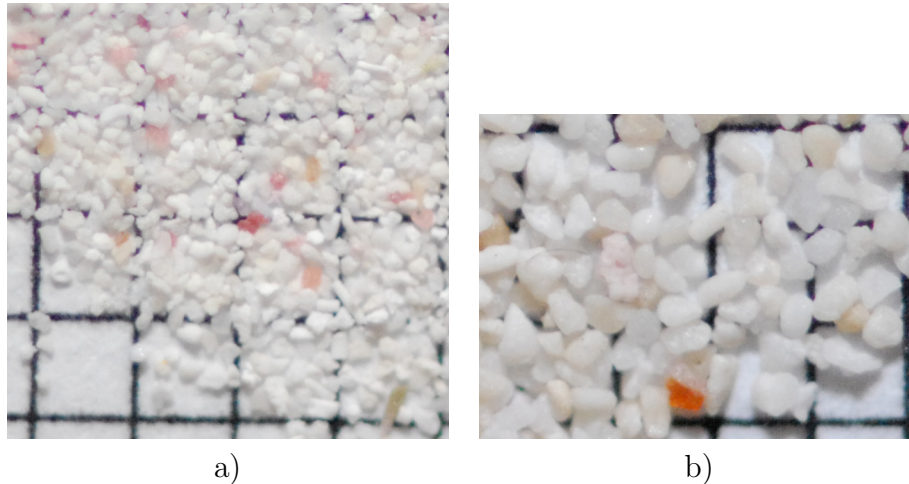


Figura 3.4. Imágenes de las muestras de arena tomadas para la determinación del tamaño y forma de sedimentos: a) Muestra de Akumal del Pb, b) Muestra de Bahía Príncipe del Pb. La retícula que se muestra en la fotografías es de un milímetro

clasificación.

A partir de la información de la caracterización geomorfológica que se realizó (capítulo I), se analizaron las celdas litorales correspondientes a los sitios de muestreo para encontrar similitudes de forma geométrica, fenómenos de transformación de oleaje y estado de equilibrio que tienen las playas donde se extrajo el material. Por tanto, las muestras se clasificaron de acuerdo a la categoría que les correspondía según sus sitios de extracción; para el primer caso que se muestran en la Tabla 3.8 todas las muestras se ordenaron según la zona de la playa donde fueron tomadas, sin tomar en consideración las características geomorfológicas de sus playas.

Tabla 3.8. Categorías para la caracterización de los sedimentos

Caso	Descripción	Lugar de extracción
	(Pb) Zona de la playa seca	Tulum-Punta Sam
	(Pl) Zona del estrán	Tulum-Punta Sam
	(Ps) Zona antes de la rompiente	Tulum-Punta Sam
Caso 1	Línea de playa con forma recto y arrecife coralino al frente de la playa	SianKaan, Puerto Morelos
Caso 2	Playas afectadas por los efectos de refracción y difracción causadas por discontinuidades del arrecife coralino	Tulum
Caso 3	Líneas de playa con forma recta y posible equilibrio dinámico, expuestas al oleaje sin protección del arrecife	Playa del Carmen y Punta Brava (dentro de playa encajada)
Caso 4	Playas hiperestables o metaestables	Cancún, Bahía Mujeres
Caso 5	Playas en posible equilibrio, protegidas por el arrecife	Akumal, Bahía Príncipe, Punta Brava

Posteriormente, en cada categoría se ordenó y agrupó la información con respecto a los parámetros característicos de la arena previamente determinados. Para los casos 1 al 5, las

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

muestras de las tres zonas de la playa correspondientes a cada sitio, se promediaron para obtener una serie de valores característicos del material de sitio del cual, los sedimentos se tomaron. Con el objeto de obtener valores representativos de cada categoría, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los parámetros de las arenas, donde se calcularon: el valor promedio, la mediana, la media geométrica, la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación, la media absoluta de la desviación, el valor máximo y mínimo, el rango, el sesgo y la curtosis.

Mediante los histogramas que fueron generados a partir de los datos obtenidos del análisis estadístico para cada caso, se trato de determinar las características globales de las diferentes categorías que representaban un tipo o zona de playa.

Por ejemplo, en la Figura 3.5a se muestran los valores promedio del diámetro del 50vo. percentil (D_{50}) del material sedimentario, en los casos de las zonas de la playa se puede comprobar el proceso de selección de los tamaños del sedimento que el acarreo litoral realiza, ya que la arena fina se coloca en la zona de estrán de la playa, mientras que en las zonas donde el oleaje disipa su energía y las corrientes litorales, son relevantes para el transporte litoral, los tamaños se encuentran en la transición de arenas finas a arenas medias; por otro lado, se observa que las playas que reciben directamente la energía del oleaje, puesto que no se encuentran protegidas por el arrecife coralino, presentan el mayor diámetro de sedimento de todo el universo de muestras que se analizaron. El menor tamaño de las arenas se identificó en las playas que se ven afectadas por las discontinuidades del arrecife coralino, que son afectadas por fenómenos de refracción y difracción; es decir, que las playas de Playa de Carmen y Punta Brava (muestras de la playa encajada) mostraron el mayor diámetro de material de todos los sitios de extracción y las playas que mostraron poseer la arena más finas del muestreo que se hizo, fueron las de Tulum. Tanto las playas de Sian' Kaan y Puerto Morelos (caso 1), así como las de Akumal y las cercanas a Punta Brava (caso 5), tienen un diámetro similar de aproximadamente 0.30 mm. Las playas de Cancún y Bahía Mujeres tienen un tamaño promedio de 0.44 mm.

En la comparación de los valores promedio de la densidad relativa de las arenas que se analizaron (Figura 3.5b), se observó que la magnitud de este parámetro en las tres zonas de las de las playas es de 2.6. Las arenas que mostraron el menor valor en cuanto a la densidad relativa fueron las que se obtuvieron de Akumal, Bahía Príncipe y Punta Brava. Es posible afirmar que el rango de densidades relativas para arenas de las playas en el corredor turístico Tulum-Cancún varía de 2.498 a 2.701. Debido a la relevancia que tiene la determinación de las características en la cuantificación del acarreo litoral, se generaron mapas en los cuales es posible identificar las magnitudes de los parámetros como el D_{50} , la densidad relativa, el ángulo de reposo, el factor de forma, etc.; en ellos, es posible observar la variación que tienen los parámetros a lo largo de la costa y deducir el posible comportamiento que tiene la arena en las playas. En los incisos c) y d) de la Figura 3.5 se identifica la distribución espacial del tamaño del sedimento y la densidad relativa de la zona de estudio; para la isla barrera de Cancún, se observó la variación del tamaño D_{50} del sedimento a lo largo de la barra; a partir de este tipo de este tipo de análisis es posible inferir el comportamiento de los sedimentos, el sedimento de mayor tamaño tiende a desplazarse en una dirección norte-sur en Cancún. En

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

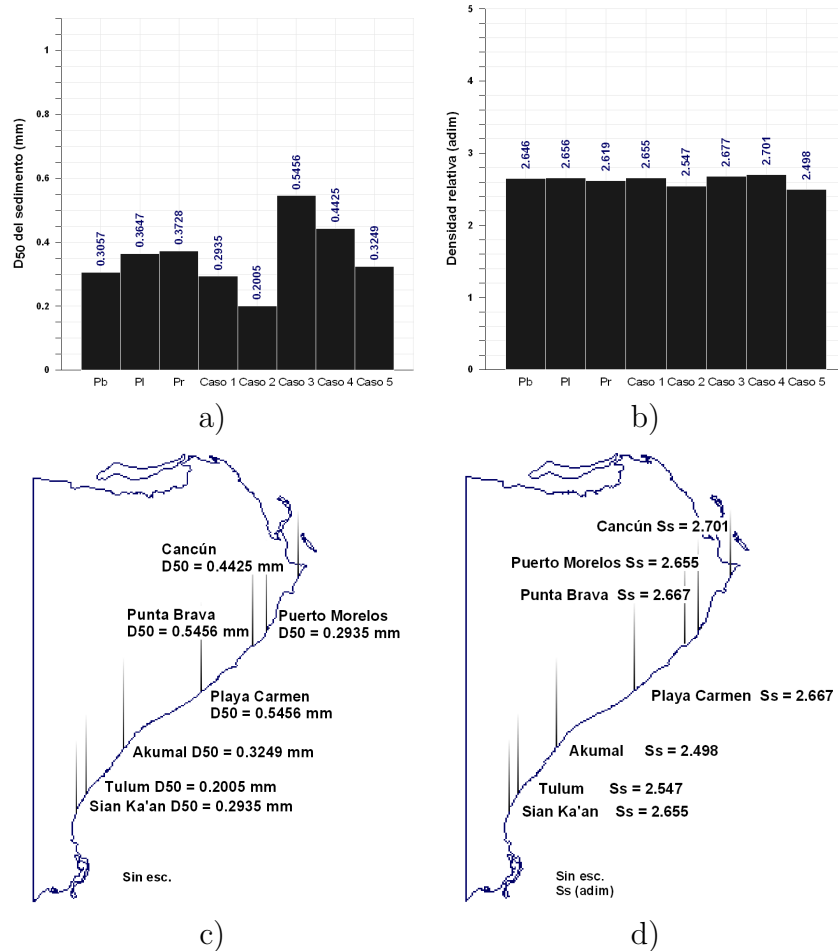


Figura 3.5. Comparación de los resultados del análisis estadístico de las diferentes categorías en las cuales se agruparon las muestras a) D_{50} y b) densidad relativa de las muestras, c) y d) Zonificación de los valores promedios del D_{50} y la densidad relativa, respectivamente

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

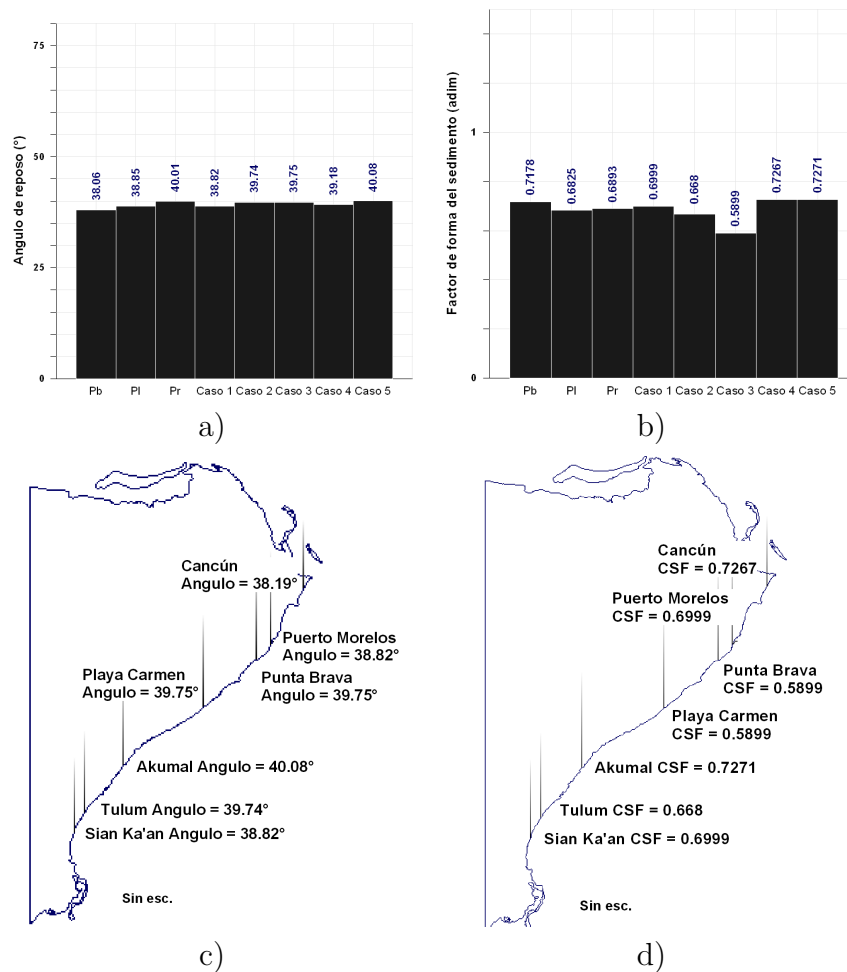


Figura 3.6. Comparación de los resultados del análisis estadístico de las diferentes categorías en las cuales se agruparon las muestras a) ángulo de reposo y b) el factor de forma de las muestras (CSF), en c) y d) se identifica la Zonificación de los valores promedio de los parámetros antes señalados, respectivamente

algunas zonas de la barra se identifica que el sedimento decrecer de una manera importante con respecto al tamaño de arena, dicho cambio podría identificarse como una zona de erosión, mientras que en las zonas donde se detecta un mayor tamaño de grano podrían considerarse como zonas de depositación.

Es relevante mencionar que los valores de los ángulos de reposo del sedimento que se encontraron para los diferentes casos y zonas de las playas (Figura 3.6a, c) se encuentran dentro de los rangos que se mencionan en la literatura (Van Rijn, 1993; Chieng y Wan, 1998) de 31° a 40°. Con respecto al coeficiente de forma de la arena se observó que en las playas correspondientes al caso 3 (Figura 3.6b, d), este coeficiente es menor al que se recomienda para las arenas que es de 0.7 (Dietrich, 1982).

Las magnitudes promedio de los dos principales parámetros que se requieren para analizar el comportamiento del transporte de sedimentos en la zona de estudio, se muestran en la

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

figura 3.7. En los incisos a y c de esta figura se podrá observar que los mayores valores del parámetro de escala del sedimento se localiza en aquellas playas que se encuentran expuestas al oleaje sin protección del arrecife de coral. En los incisos b y d de la figura, se muestran las velocidades de caída promedio que se obtuvieron para cada caso; es relevante mencionar que después de un análisis de los valores de la velocidad de caída que se obtuvieron con las diferentes expresiones que se muestran en la tabla 3.7, se realizó un promedio de aquellas ecuaciones que tomaran de manera implícita el factor de forma del sedimento. Se puede observar que las playas en las que se presentó la menor velocidad de caída fueron las que se localizaron en la parte sur de la zona de estudio, mientras que las mayores velocidades calculadas se obtuvieron en la zona norte del área de muestreo.

A manera de resumen, en los diferentes incisos de la figura 3.8 se muestran los resultados correspondientes al D_{50} , la densidad específica de las muestras y en ángulo de reposo de todas las muestras que se extrajeron.

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

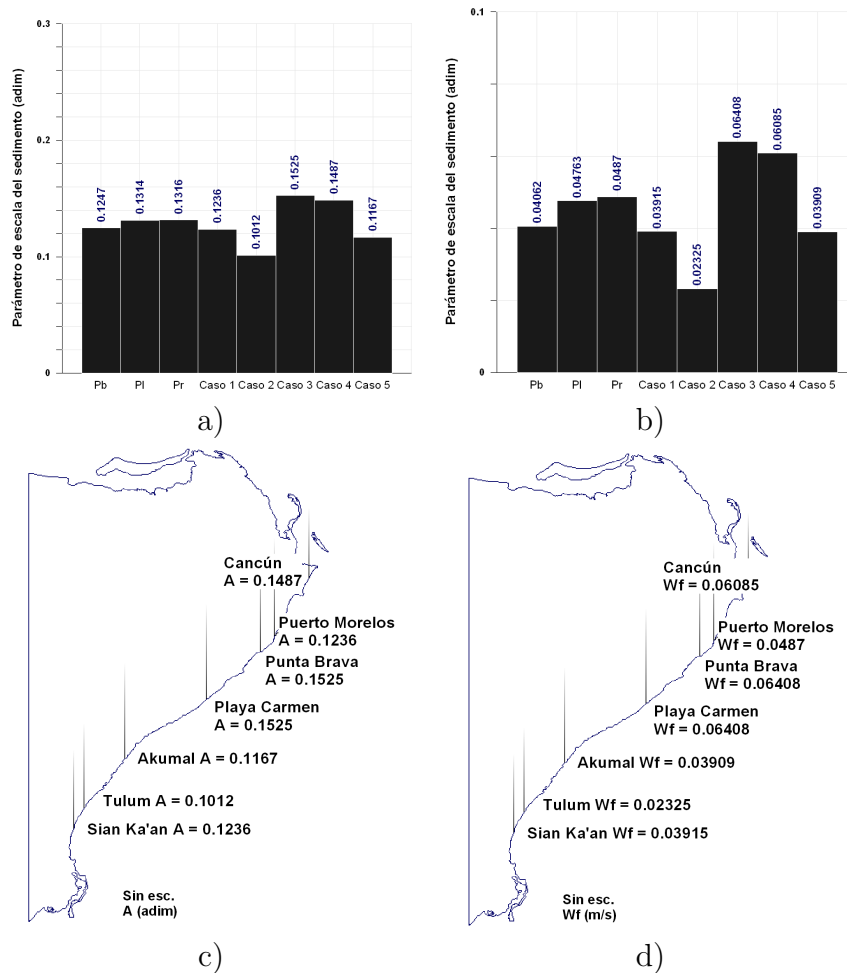


Figura 3.7. Comparación y zonificación de los resultados del análisis estadístico de las diferentes categorías en las cuales se agruparon las muestras a) del parámetro de escala y b) la velocidad de caída, en c) y d) se identifica la Zonificación de los valores promedios de los parámetros antes señalados, respectivamente

CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO

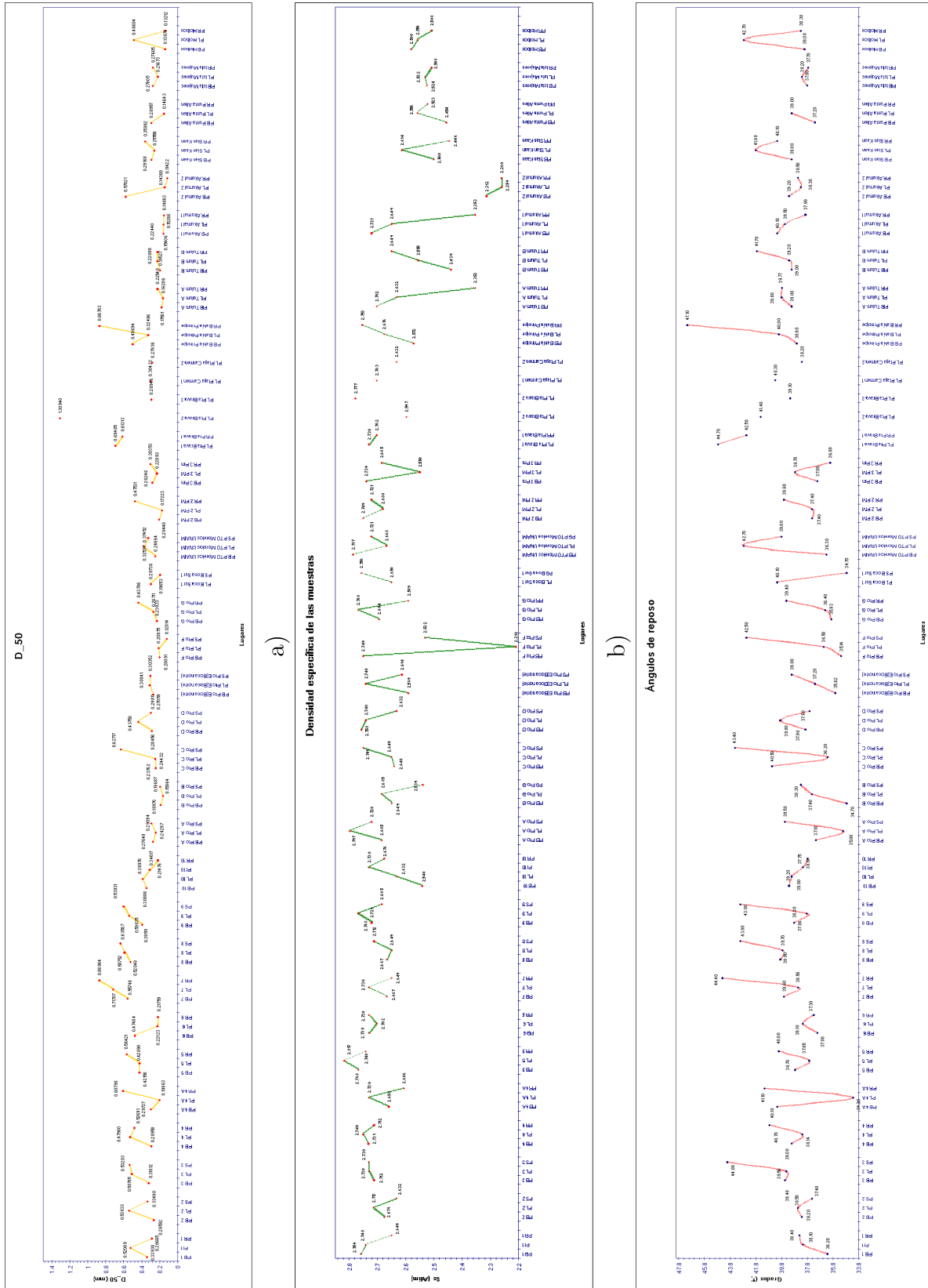


Figura 3.8. Comportamiento del D₅₀, la densidad específica y ángulo de reposo en los sitios de extracción

***CAPÍTULO 3. VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS
SEDIMENTOS DE LA COSTA NORESTE DE QUINTANA ROO***

4

Análisis de las condiciones del clima marítimo en la línea de costa del noreste de Quintana Roo

4.1. Introducción

La determinación de las magnitudes de agentes marinos como el oleaje y el viento es trascendental en cualquier estudio o análisis de la costa, debido a que éstos controlan, regulan y manipulan los procesos de erosión y de la depositación de material sedimentario en las playas, que rigen el comportamiento natural de los sistemas litorales. La caracterización del oleaje debe entenderse como una descripción de la variación de los diferentes estados del mar que se presentan en un lapso de tiempo, ya sea corto o extenso; el cual, permite conocer la modificación de los parámetros del oleaje y viento, a través del estudio de los patrones extremos y medios del oleaje.

Las características del oleaje pueden ser obtenidas, principalmente de tres fuentes de información: 1) a partir de datos medidos por aparatos de medición en el océano; 2) almanaques o manuales, derivados de observaciones visuales del mar y 3) datos de oleaje obtenidos por medio de modelaciones numéricas. Los datos instrumentales del oleaje, generalmente son medidos por boyas de oleaje; estos dispositivos de medición pueden llegar a cuantificar la aceleración vertical de la boya o registrar la superficie libre de elevación del agua, usando medidores de presión o de ultrasonido (Kraus y Horikawa, 1990). Sin embargo en la mayoría de las ocasiones, no es sencillo disponer de los datos por diversos motivos, entre los cuales resaltaría no poseer los equipos adecuados para realizar las mediciones, puesto que estos instrumentos son altamente costosos.

Para realizar una caracterización del clima marítimo en nuestro país, frecuentemente se utilizan fuentes de información del tipo estadístico (por ejemplo, el Ocean Wave Statistics, Global Wave Statistics, World Wave Atlas, etc.) y éstas se encuentran basadas en observaciones visuales del comportamiento del oleaje que se efectúan por barcos que circunnavegan las rutas marinas a través de los océanos y mares de todo el mundo. Una de las ventajas que proporciona el consultar este tipo de fuente de información, es la gran cantidad de registros observados de alturas, periodos y direcciones del oleaje; no obstante de las ventajas que presentan los datos visuales, la información tiende a ser sesgada debido a que las observaciones de oleajes extremos, generados por tormentas, no son lo suficientemente bien registrados; ya que los buques suelen evitar eventos meteorológicos que pongan en riesgo a la nave y tripulación (Frias y Moreno, 1992).

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Cuando se presentan incertidumbres acerca de los datos observados o existe una escasez de registros de las características de las olas, usualmente, para cubrir esa carencia de información se utilizan los modelos numéricos de predicción de oleaje; debido a que el oleaje local y distante, que se observa en océanos, mares, golfos, etc., puede ser generado por fuerzas meteorológicas como el viento, las características de los estados de mar que dicta dicho agente meteorológico pueden ser modificadas conforme cambie su magnitud; es por ello, que los modelos numéricos que se utilizan para realizar una estimación del clima marítimo, se encuentren basados en la recopilación de información histórica de vientos.

Los datos de la caracterización del clima marítimo que se utilizan en el presente trabajo, fueron obtenidos a partir de la modelación numérica que se realizó para generar los estados de mar de la zona de estudio. La simulación numérica se llevó a cabo mediante el uso de dos modelos de predicción de oleaje, siendo éstos, considerados como de tercer y segundo orden. Obtenidos los diferentes estados de mar se efectuó un análisis extremal y medio, así como de tormentas, con el objetivo de conocer las características del oleaje que influye sobre el comportamiento de la playa.

La información del presente capítulo ha sido publicada en:

- § Ruiz, G., Silva, R., Pérez, D., Posada, G., Bautista, G. (2009). Modelo híbrido para la caracterización del oleaje. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIV(3). pp.5-22.
- § Ruiz, G., Mendoza, G., Silva, R., Posada, G., Rivillas, G., Escalante, G., Ruiz, F. (2009). Caracterización del régimen de oleaje y viento de 1948-2007 en el litoral mexicano. *Revista Ingeniería del Agua*. Vol. 16(1).
- § Ruiz, G., Silva, R., Rivillas, G., Posada, G., Pérez, D., Mendoza, G. (2008). Atlas de clima marítimo para las vertientes atlántica y pacífica del litoral mexicano. En *Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Tomo 1. IAHR-Universidad Nacional de Colombia. Cartagena de Indias, Colombia.

4.2. Modelación del clima marítimo

El modelo de predicción de oleaje de tercer orden, que se utilizó para caracterizar el régimen medio del clima marítimo, resuelve la ecuación bidimensional del transporte de energía del espectro del oleaje; en la cual, la función de densidad espectral depende de la frecuencia y dirección del oleaje, así como de las coordenadas de ubicación de un grupo de olas que se encuentran dentro de una malla de cálculo, para un determinado lapso de tiempo; en dicha ecuación se consideran los acciones del viento, la resonancia sobre el oleaje y la disipación de energía. El conjunto de los efectos, antes mencionados, se encuentran representados en una variable que se denomina, variable o término fuente de la ecuación de transporte de energía del espectro del oleaje.

La distinción que existe entre los modelos de la primera y segunda generación, con respecto

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

a los de tercer orden, radica en el análisis de los efectos del término fuente de la ecuación de transporte de energía; ya que esta variable permite realizar un desarrollo teórico en el cual, se tenga un mismo número de grados de libertad del espectro del oleaje con los términos no lineales. Otra de las características que proporciona el término fuente es el tratamiento o manejo de la disipación de energía, ya que dicha variable puede ser ajustada para reproducir el crecimiento del oleaje que proporciona el espectro de Pierson-Moskowitz.

Debido a que el viento toma un papel fundamental en la generación del oleaje en los océanos, es imaginable que en un modelo de predicción, el campo de viento, así como la batimetría del sitio (de donde se desea realizar la predicción), sean considerados como la información que debe proporcionarse al modelo numérico para tratar de simular en lo más posible, el oleaje que se observa en la naturaleza; es por ello necesario, que se debe suministrar al modelo un banco de datos de viento que sea confiable en cuanto el registro de información que tenga. Pérez et al. (2008) señaló que la base de datos de viento que el proyecto de reanálisis del *National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), se puede llegar a considerar como el banco de información de vientos de acceso libre (en Internet) más completo en la actualidad. La base de datos que se tiene en este proyecto, se genera a partir de los datos históricos (de 1948 a la fecha) que se obtuvieron por instrumentos de medición que fueron colocados en tierra, boyas, barcos y satélites, localizados alrededor del mundo. Sin embargo, una de las principales desventajas que caracteriza dicho banco de información, radica en que sus registros proporcionan una baja resolución tanto espacial como temporal; la magnitud del viento se proporciona en un lapso de tiempo de seis horas, siendo espaciados a dos grados tanto en latitud, como en longitud. A pesar de esta inconveniencia, existen estudios (Cox et al., 1999; Swail et al., 1999), en los cuales se definió que la información de vientos que posee el NCEP/NCAR puede utilizarse para realizar predicciones de oleaje.

No obstante, que la base de datos de vientos proporcionada por el NCEP/NCAR es considerada como una fuente de información confiable para datos de viento, esta información subestima el valor de los vientos que se presentan cuando ocurre un huracán. Por esta razón, es necesario corregir los resultados de la caracterización del clima marítimo que se generan a partir del modelo de predicción de tercera generación del oleaje.

La estimación de las magnitudes del oleaje en condiciones extremas fueron obtenidas usando un modelo paramétrico o de segundo orden de predicción de oleaje; el cual, en función del radio ciclotrónico del evento extraordinario calcula los campos de vientos y presiones atmosféricas, siendo éstos necesarios para determinar los valores de la altura y periodo de las olas en depresiones, tormentas tropicales y huracanes.

El marco teórico, bajo el cual se encuentran desarrollados los modelos de predicción que se utilizaron en la determinación del clima marítimo, se exponen a continuación.

4.2.1. Modelo de predicción de oleaje de tercera generación

El modelo numérico que se uso para conocer la altura, periodo y dirección de las olas significantes de los diferentes estados de mar en el Golfo de México y Mar Caribe, fue desarrollado bajo las recomendaciones sugeridas por varios investigadores de diferentes institutos de investigación que formaron el grupo “Wave Model Development and Implementation Group” (WAMDI, 1988).

El modelo *Wave Model* (WAM) fue codificado para resolver el método numérico que soluciona de manera implícita, la ecuación de transporte de energía:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\cos \theta)^{-1} \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} \cos \phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} F) = 0 \quad (4.1)$$

en la cual, $F(f^*, \theta, \phi, \lambda, \theta, t)$ describe la función de densidad espectral del oleaje, con respecto a cuatro variables espaciales: f^* y θ_w , son las magnitudes correspondientes a la frecuencia y dirección del espectro del oleaje; ϕ_w y λ_w representan los valores de latitud y longitud, respectivamente del punto espacial de la malla de cálculo y t , el tiempo.

El término fuente que se identifica en el lado derecho de la ecuación 4.34, reproduce: a) el proceso de la generación del oleaje por viento (S_{in}), b) el proceso de la interacción no lineal que se presenta entre las olas (S_{nl}) y c) la disipación de la energía del oleaje, por el efecto de la rompiente en aguas profundas (S_{ds}), (Sorensen, 1993):

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (4.2)$$

Para el análisis de la interacción viento-oleaje, el WAM considera la extensión teórica que hizo (Janssen, 1989) a la teoría de Miles de 1957, en la cual además de considerar que las olas modifican el flujo del aire que se encuentra sobre ellas, y por ello, la presión inducida por el viento en la superficie del agua produce un crecimiento en ellas, el efecto de las olas en una baja atmósfera afecta sus propias características. Janssen define que la energía del viento que se transmite al oleaje puede ser expresada como:

$$S_{in} = \beta F \quad (4.3)$$

donde F es la función de densidad espectral; β es un coeficiente que depende de la velocidad y dirección del viento, así como del mismo oleaje. Debe observarse que β relaciona el crecimiento exponencial de la energía del oleaje para un tiempo, en el cual el viento se constituye constante; dicho coeficiente se encuentra afectado por un factor de escalamiento de la velocidad de fricción del viento (Snyder et al., 1981).

Hasta el día de hoy, el fenómeno de la disipación de energía del oleaje, por rompiente en aguas profundas, aún no ha sido comprendido en su totalidad, debido a que éste involucra una hidrodinámica no lineal que se encuentra afectada por el esfuerzo que el viento produce sobre las olas. El término S_{ds} de la ecuación 4.2 se genera a partir del uso de la teoría que Hasselman

propuso en 1974, la cual describe que cada rompiente del oleaje en aguas profundas, actúa como un pulso de presión, sobre la cresta de la ola y en la dirección del viento, provocando que la altura de la rompiente no permita el incremento de la superficie del océano cuando se genera otra ola. La disipación de energía por rompiente de oleaje se encuentra en función de la densidad espectral (F), la frecuencia media, $\omega = E^{-1} \int \int F(f^*, \theta_w) \omega_w df^* d\theta_w$, la energía total del oleaje, $E = \int \int F(f^*, \theta_w) df^* d\theta_w$, así como de los parámetros de esbeltez de la ola, $\hat{\alpha} = E\hat{\omega}^4 g^{-2}$ y del espectro de Pierson-Moskowitz, $\hat{\alpha} = 3.01x10^{-3}$:

$$S_{ds} = -2.33x10^{-5} \hat{\omega} \left(\frac{2\pi f^*}{\hat{\omega}} \right)^2 \left(\frac{\hat{\alpha}}{\alpha_{pm}} \right)^2 F \quad (4.4)$$

Para establecer las interacciones no lineales de la ecuación del balance de energía del oleaje, el WAM integra la teoría expuesta por (Hasselmann, 1960), con la cual se estima la transferencia de energía entre las diferentes componentes del oleaje; esta teoría se sustenta bajo la hipótesis que dentro de un grupo de 4 olas (cuadruplets), existirá un intercambio de energía siempre y cuando se cumplan las condiciones de resonancia para el número de onda y frecuencia. La determinación de las interacciones entre todas las componentes del espectro, requiere de un gran periodo de tiempo de cálculo computacional; por lo que el WAM, para descartar esta inconveniencia, incorpora una parametrización discreta (di) de la interacción de los elementos del espectro, en la cual se dividen las cuatro componentes en expresiones que tienen la siguiente forma:

$$S_{nl}^{di} = (k_4) \sum_{\gamma=1,2} A_\gamma \omega_4 [n_1^\gamma n_2^\gamma (n_3^\gamma + n_4^\gamma) - n_3^\gamma n_4^\gamma (n_1^\gamma + n_2^\gamma)] \quad (4.5)$$

donde $n_i^\gamma = \frac{F(k_i^\gamma)}{\omega_i^\gamma}$, $i = 1, 2, 3, 4$, $\gamma = 1, 2$ y A_γ son coeficientes de acoplamiento.

Para que la ecuación de evolución o transporte de energía del oleaje, sea posible aplicarla en aguas poco profundas o someras, la función fuente de la expresión 4.2 debe incluir un término adicional que considere la pérdida de energía debida a la fricción del fondo y la percolación (S_{bf}):

$$S_{bf} = -\frac{0.038}{g^2} \frac{\sqrt{gk \tanh(kD)}}{\text{senh}^2(kD)} F \quad (4.6)$$

donde: k es el número de la ola; D la profundidad en m; g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

Además de incluir el parámetro anterior, es necesario que los otros términos de la ecuación de transporte de energía sean modificados para permitir una dependencia de la profundidad a partir de la relación de dispersión (*cfr.* (WAMDI, 1988)).

4.2.2. Modelo de predicción de oleaje con viento ciclostrófico

El modelo de predicción de oleaje con viento ciclostrófico (Hurac) que fue utilizado para corregir la caracterización del clima marítimo que se realizó con el WAM, es una adecuación

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

de los modelos del Hydromet-Rankin Vortex de Holland y (Bretschneider, 1990), realizada por Silva et al. (2002a). Silva (2005) describe que el Hurac se encuentra integrado por 3 submodelos, que realizan el cálculo de los campos de: presión, viento y oleaje.

En la simulación numérica, con la cual se obtienen las magnitudes de la presión atmosférica que requiere el modelo de predicción, se utiliza la siguiente expresión:

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0) \exp\left(\frac{R}{r}\right) \quad (4.7)$$

donde P_0 es la presión que se registra en el centro del huracán; P_r representa la presión que se evalúa a una distancia radial r ; P_N se identifica como la magnitud de la presión en condiciones no extremas y R es el valor del radio, en el cual se presentan los máximos vientos ciclstróficos. Las unidades de medida de las presiones de la expresión anterior se encuentran en milibares y las distancias en kilómetros.

Para conocer en un punto determinado, la velocidad del viento que se evalúa a diez metros sobre el nivel del mar (km/h) de un huracán que se desplaza por la superficie del océano y con una distancia r (que se mide desde el centro del huracán), el Hurac utiliza la siguiente formulación:

$$W = 0.886 [F_v U_R + 0.5 V_F \cos(\theta + \beta)] \quad (4.8)$$

donde, $(\theta + \beta)$ es el ángulo total que se encuentra entre el vector de la velocidad de traslación; V_F (km/h), y la velocidad del viento U_r (km/h), localizado a una distancia radial, r , que inicia desde del centro del huracán; dicha distancia puede considerarse como positiva, si se encuentra en el lado derecho del huracán o negativa si se localiza en el lado izquierdo; F_v es un coeficiente de amortiguamiento que se conoce a partir de la relación de la velocidad del viento en r , de U_r y U_R . El factor F_v se estima a través de las siguientes relaciones:

$$F_V = 1 - 0.971 \exp\left[-6.826 \left(\frac{r}{R}\right)^{4.798}\right]; \quad \frac{r}{R} < 1 \quad (4.9)$$

$$F_V = \exp\left\{A \ln^3\left(\frac{r}{R}\right) \exp\left[B \ln\left(\frac{r}{R}\right)\right]\right\}; \quad \frac{r}{R} \geq 1 \quad (4.10)$$

donde:

$$A = -0.99 [1.066 - \exp(-1.936N_c)] \quad (4.11)$$

$$B = -0.357 [1.4456 - \exp(-5.2388N_c)] \quad (4.12)$$

En la evaluación de la altura de ola significativa (H_s), para un huracán no estacionario, el módulo de oleaje aplica la siguiente ecuación:

$$H_s = 0.2887 F_h \left(1 - \frac{6.69 N_c}{1 + 10.3 N_c - 3.25 N_c^2}\right) \sqrt{R(P_N - P_0)} \left[1 + \frac{V_F \cos(\theta + \beta)}{2U_R F_V}\right]^2 \quad (4.13)$$

donde F_h se aproxima por medio de:

$$F_h = \frac{1 + 0.8974 \left(\frac{r}{R} - 1\right)}{1 + 0.742 \left(\frac{r}{R} - 1\right) + 0.07382 \left(\frac{r}{R} - 1\right)^2}; \quad \frac{r}{R} < 1 \quad (4.14)$$

$$F_h = \frac{1 + 0.8974 \left(\frac{r}{R} - 1\right)}{1 + 0.742 \left(\frac{r}{R} - 1\right) + 0.07382 \left(\frac{r}{R} - 1\right)^2} - \frac{N_c \left(\frac{r}{R} - 1\right)}{1 + C \left(\frac{r}{R} - 1\right) + \frac{N_c}{10} \left(\frac{r}{R} - 1\right)^2}; \quad \frac{r}{R} \geq 1 \quad (4.15)$$

donde:

$$C = \frac{0.37N_c^{2.55}}{0.13 + N_c^{2.55}} \quad (4.16)$$

donde N_c determinan el número de Coriolis ciclostrófico $N_c = \frac{fR}{U_r}$.

El periodo de ola (T_s) asociado a la altura de ola significativa puede llegar a calcularse de una manera aproximada utilizando:

$$T_s = 12.1 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (4.17)$$

donde el periodo se encuentra dado en segundos, la altura significativa en metros y la aceleración de la gravedad en metros sobre segundos cuadrados.

Generalmente, no todos los reportes meteorológicos proporcionan el valor de la presión central en un huracán, así como el radio ciclostrófico; el modelo paramétrico utiliza los criterios de (Silva et al., 2002a) para que estimar estos valores. La presión central del huracán se encuentra en función de la velocidad superficial máxima del viento, a continuación se presentan las relaciones para el océano Atlántico y el Pacífico, respectivamente:

$$P_0 = 1019.08 - 0.182V_v - 0.0007175V_v^2 \quad (4.18)$$

$$P_0 = 1017.45 - 0.1437V_v - 0.00088V_v^2 \quad (4.19)$$

donde V_v es la velocidad máxima del viento que se promedia en un minuto (kh/h); siendo ésta última magnitud, la velocidad que frecuentemente se reporta en los boletines meteorológicos. El radio ciclostrófico puede ser conocido a partir de la expresión:

$$R = 0.4785P_0 - 413.01 \quad (4.20)$$

donde el radio ciclostrófico, R , está dado en kilómetros y el rango en que éste puede variar de un valor máximo de 38 a un valor mínimo de 15 kilómetros, para presiones centrales superiores a 880 milibares.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Es importante resaltar, que las distancias radiales de las ecuaciones 4.7 a 4.20 se utilizan en un sistema de referencia métrico, mientras que la información meteorológica, así como los puntos de interés se proporcionan en coordenadas geográficas. El modelo utiliza la siguiente aproximación para mapear la magnitud del radio r de un sistema de referencia a otro:

$$r = |E_x \{a \cos [\text{sen}(\phi_i)\text{sen}(\phi_c) + \text{cos}(\phi_i)\text{cos}(\phi_c)\text{cos}(\lambda_c - \lambda_i)]\}| \quad (4.21)$$

donde λ y ϕ son la longitud y la latitud en grados, respectivamente; los subíndices i y c indican las posiciones del punto de interés y del centro del huracán, respectivamente. El radio de la Tierra, E_x , para cualquier latitud se obtiene de:

$$E_x = \frac{E_{ra}^2 E_{re}}{(E_{ra} \cos \phi)^2 + (E_{re} \text{sen} \phi)^2} \quad (4.22)$$

donde E_{ra} es la magnitud del radio de la Tierra en el ecuador (6,378,135 kilómetros.) y E_{re} es el radio polar de la Tierra (635,675 kilómetros.). El ángulo que se proyecta entre el centro del huracán y la velocidad del viento en el punto de interés, β , se calcula con:

$$\beta = \arctan(\lambda_i - \lambda_c, \phi_i - \phi_c) \quad (4.23)$$

Para determinar los ángulos de incidencia del viento y del oleaje se utiliza una formulación análoga a la ecuación 4.23, en la cual se sustituyen los valores de las latitudes y longitudes por las componentes del viento (u oleaje) evaluadas a una distancia $\Delta\phi$ y $\Delta\lambda$, respectivamente.

4.2.3. Metodología y resultados de la modelación numérica del oleaje WAM-Hurac

Para modelar el clima marítimo del corredor turístico Cancún-Tulum desde el año de 1948 al 2007; como una primera etapa, se implementó una malla de cálculo para el WAM; dicha malla cubrió en su totalidad la extensión que abarca el Golfo de México y Mar Caribe (malla de 817 celdas con una definición espacial de 0.25 x 0.25 grados). La información necesaria para ejecutar el modelo numérico de oleaje de tercera generación: la batimetría en aguas profundas y los campos de viento, fueron obtenidos a partir de la base de datos del *British Oceanographic Data Center* (BODC) y del proyecto de reanálisis del NCEP/NCAR respectivamente. Siguiendo la metodología que utilizó (Pérez et al., 2008), se ejecutó el modelo WAM y se obtuvieron los campos de oleaje medio para todos los años del periodo de tiempo antes señalado.

Posteriormente y mediante el uso de los boletines (“avisos”) meteorológicos del *National Hurricane Center* (NHC) de la *National Oceanographic and Atmosphere Agency* (NOAA), se identificaron todos aquellos eventos extraordinarios que incidieron en el Golfo de México y Mar Caribe; el siguiente punto que se procedió a realizar, fue interpolar la información de los avisos para determinar la ubicación geográfica y presión central, reportada a cada hora, de

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

los eventos extraordinarios de interés; generada la información necesaria para usar el Hurac, se ejecuto dicho modelo limitando su aplicación a un radio de 500 kilómetros, medidos a partir del centro de la fenómeno meteorológico.

Finalmente, en los resultados generados por el WAM, se identificaron las fechas correspondientes a cada uno de los ciclones o huracanes que se presentaron en la zona oceánica y a partir de ello, la información del oleaje respectiva a éstas fechas, fue sustituida por los datos que se obtuvieron del Hurac. En la figura 4.1 se esquematiza la metodología descrita: en A) se puede identificar el registro de oleaje obtenido con el modelo WAM; los resultados del modelo Hurac pueden observarse en B) y C) se muestra el registro de oleaje medio, que considera las condiciones de calma y tormenta de los estados de mar para el año 2005.

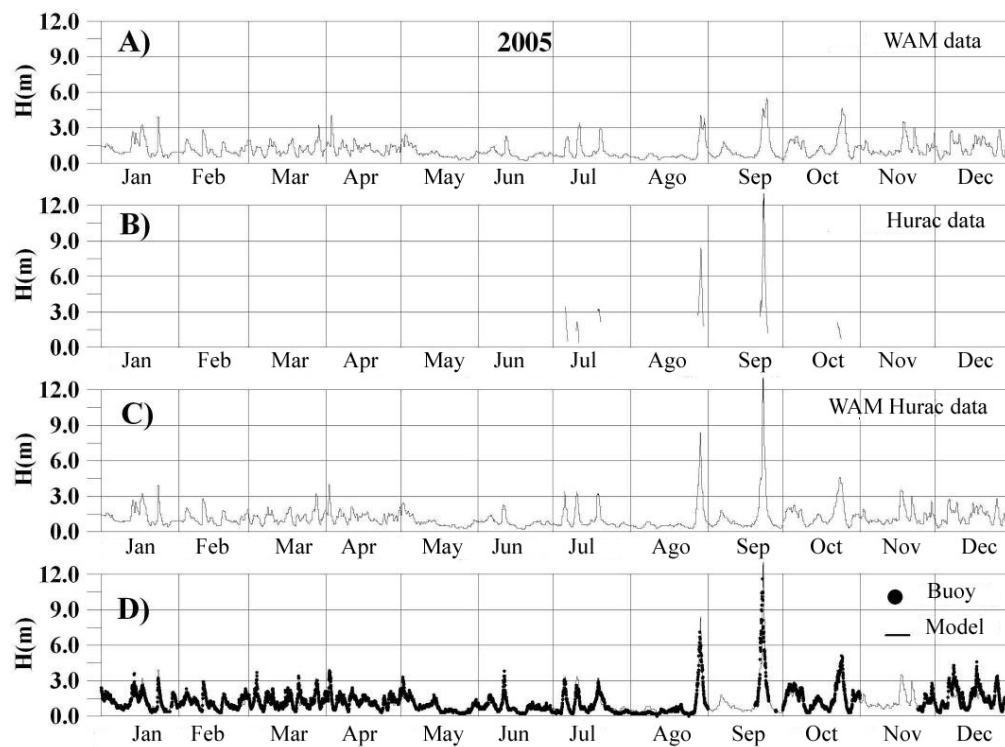


Figura 4.1. Metodología WAM-HURAC

Para conocer el clima marítimo de las playas que se encuentran en la zona litoral que se estudia, solamente se tomó en consideración una celda que era la correspondiente al área de análisis en la malla cálculo del Golfo de México y Mar Caribe; para la identificación de la información de cada celda, a ésta se le denominó Cancún.

En la figura 4.2a) y 4.2b) se pueden observar dos ejemplos de la caracterización de la altura de ola significativa (en aguas profundas) para la celda de Cancún que se obtuvieron a partir de la simulación numérica WAM-Hurac. En ambas figuras se muestran los estados de mar correspondientes a los años, en los cuales se presentaron los huracanes más intensos en la zona de estudio de los últimos sesenta años; en los registros se pueden identificar las

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

alturas de ola de los huracanes Gilberto (1988) (figura 4.2a)), Emily y Wilma (figura 4.2b)). Es relevante mencionar, que los datos de oleaje del modelo numérico que correspondían al año del 2005, fueron confrontados con la información que registraron las boyas de la NOAA en la zona para ese año; en esta comparación se comprobó una muy buena correlación entre los valores medidos y calculados (Ruiz et al., 2009). A partir de la validación de la información se identificó que una de las bondades que tenía la modelación numérica sobre los datos registrados de la boya, era la continuidad de los datos en el registro y que éstos podían llegar a usarse para solucionar problemas de intermitencia en la información de algún equipo de medición de oleaje; este hecho cobra importancia, ya que si bien es preferible tener datos de oleaje medidos en campo, no siempre es posible que los aparatos de medición trabajen de manera continua por fallas técnicas; ante tales casos, los datos que proporciona la simulación numérica pueden ser utilizados con una gran certidumbre.

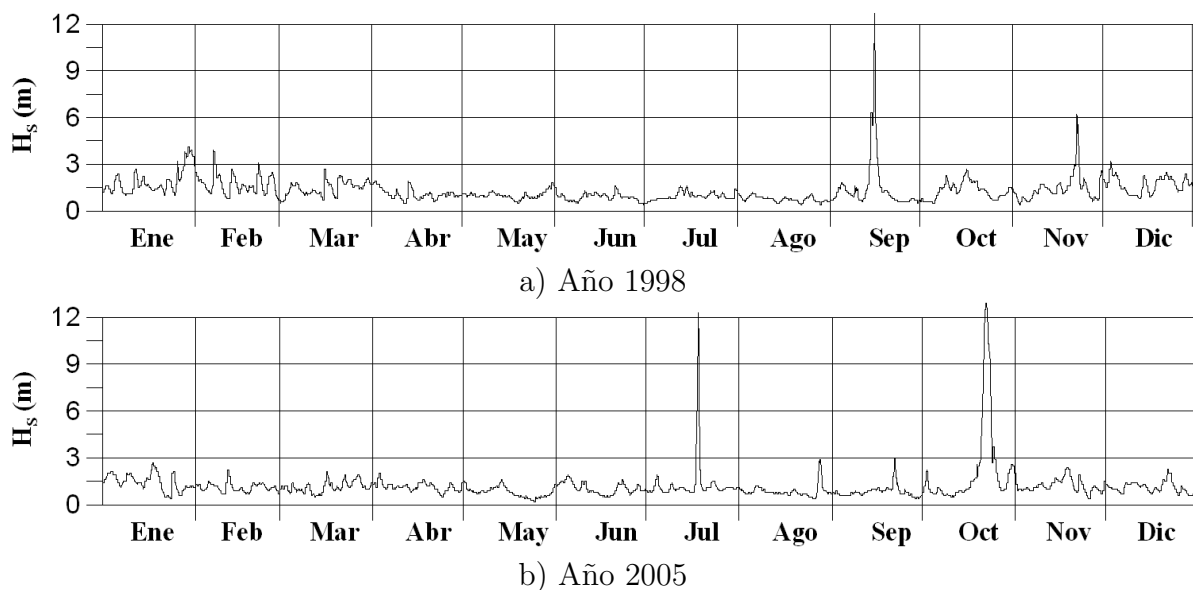


Figura 4.2. Estados de mar en aguas profundas de Cancún para los años de (a) 1988 y (b) 2005

4.3. Estadística del clima marítimo

Debido a la necesidad de describir las condiciones del mar a lo largo de sesenta años en la costa de Quintana Roo, se determinó realizar un análisis de largo plazo, en el cual se considerarían los parámetros del oleaje como: altura significativa (H_s), energía (E), periodo (T) y dirección media (θ_H) y del viento: velocidad (V_w) y dirección (θ_w); con ello, se omitió un análisis del oleaje donde se involucrará a éste como una variación que se presenta en un corto periodo y de proceso estacionario. El análisis de largo plazo, usualmente, se efectúa para encontrar el valor de la distribución de la altura de ola significativa y su respectivo periodo de retorno a largo de varios años. A pesar de que no existe un método universal que sea aceptado por todos para determinar las condiciones del mar, el análisis de largo plazo puede realizarse tomando: 1) los valores máximos de series anuales; 2) las magnitudes de los picos

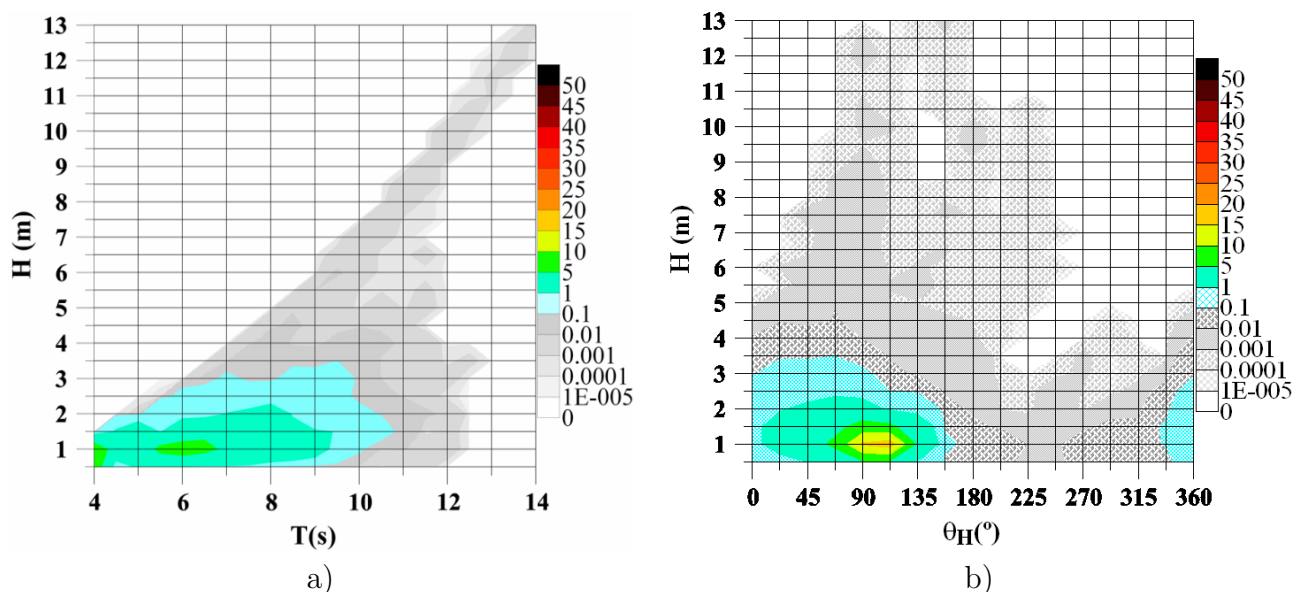


Figura 4.3. Gráficas de probabilidad conjunta: a) altura de ola significativa-periodo medio, b) altura de ola significativa-dirección de propagación para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007

de los temporales; 3) solamente considerando todos los datos registrados durante un periodo de observación (series completas) o 4) utilizar los valores que sobrepasan cierto umbral.

4.3.1. Análisis extremal y medio

Como lo mencionan (Bocconi, 2000), (Holgben, 1990), (Holthuijsen, 2007), (Silva, 2005) y (Sorensen, 1993), para determinar la estadística del clima marítimo a partir de una serie de datos de oleaje, se debe estimar la probabilidad de la función de densidad conjunta; lo anterior, usualmente, se realiza mediante la clasificación de los valores observados y los resultados se pueden exponer de manera gráfica utilizando histogramas de H_s y T en sus respectivos sectores de θ_H ; la información puede proporcionarse ya sea por año, temporada o de manera mensual (mostrando valores acumulados o promediados a lo largo de un número de años). Los histogramas se pueden llegar a modificar, agregando la cuantificación total de los valores observados en cada dirección de propagación, así como del periodo, y a partir de ello, obtener gráficas de probabilidad conjunta que relacionen la altura de ola significativa con el periodo de la ola o la dirección ($p(H_s, T)$ o $p(H_s, \theta_H)$). En la figura 4.3, se muestran las gráficas de probabilidad conjunta $p(H_s, T)$ y $p(H_s, \theta_H)$, correspondientes a la celda Cancún. Es interesante resaltar que a partir de la interpretación de estas gráficas, se identifica que las alturas de ola significativa que arriban a la costa, se encuentran en un rango de 0 a 4 metros y los valores del periodo medio van desde los 4 a los 10.5 segundos; la dirección de propagación del oleaje dominante se encuentra en 3 sectores, siendo la dirección este-sureste, la dirección a partir de la cual, la costa recibe más oleaje.

Una manera de presentar la magnitud y la frecuencia de la altura de ola con respecto a su

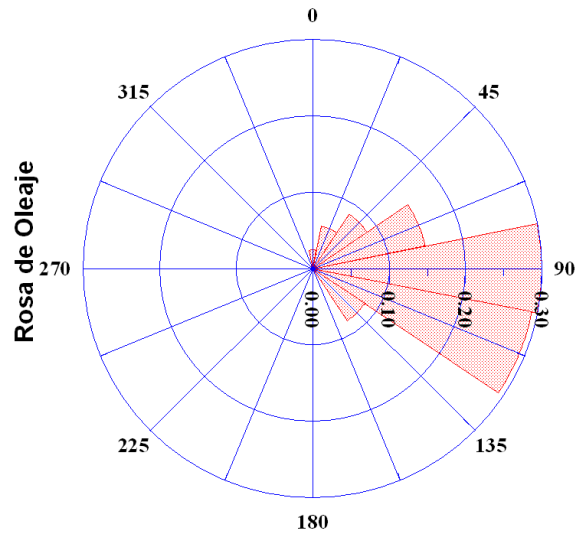


Figura 4.4. Rosa de dirección del oleaje en aguas profundas para Cancún

dirección es mediante el uso de rosas de oleaje, éstas permiten de una manera rápida y sencilla, identificar la frecuencia de incidencia y la dirección propagación del oleaje; dichas rosas de oleaje pueden ser presentadas de manera anual o estacional. Por ejemplo, en la figura 4.4 se identifica que en la zona de Cancún, el 28 % del oleaje que se presenta anualmente, proviene, de la dirección este-sureste; mientras que el oleaje que llega del este, representa el 30 % de las olas.

El análisis extremal se realiza ajustando alguna curva a partir de la información del histograma y extrapolando esa curva a una probabilidad de ocurrencia o excedencia (figura 4.5); debido a que no existe una teoría única que indique exactamente qué tipo de curva se debe de emplear para la extrapolación, la elección de ésta es totalmente empírica; por ello, se deben de elegir distribuciones diferentes (por ejemplo: normal, Log normal, Weibull, Rayleigh, Fisher-Tippet I o Gumbel, Fisher-Tippet II, Fisher-Tippet III) y calcular sus respectivos parámetros; los valores de esas variables se estiman ajustando las distribuciones elegidas a los datos. La distribución que ajusté los datos de la mejor manera, será entonces, la que se usará para la extrapolación.

Para facilitar la evaluación, acerca de qué tipo de ajuste “por revisión visual o a ojo” se recomienda utilizar la función de distribución acumulada ($P(H_s) = Pr R_s \leq H_s$) que la probabilidad de la función de densidad ($p(H_s)$); ya que cuando se representa gráficamente la distribución acumulada en las escalas propias de la distribución elegida, ésta aparecerá como un línea recta alrededor de las observaciones (alturas de ola).

La elección de las distribuciones para extrapolar las observaciones puede ser arbitraria, pero se ha identificado que las distribuciones que consideran dos o tres parámetros, son las más convenientes para realizar ajustes por revisión visual; las distribuciones con dos parámetros se recomiendan, puesto que línea del ajuste, solamente, tiene como variables la intercepción y pendiente de la recta.

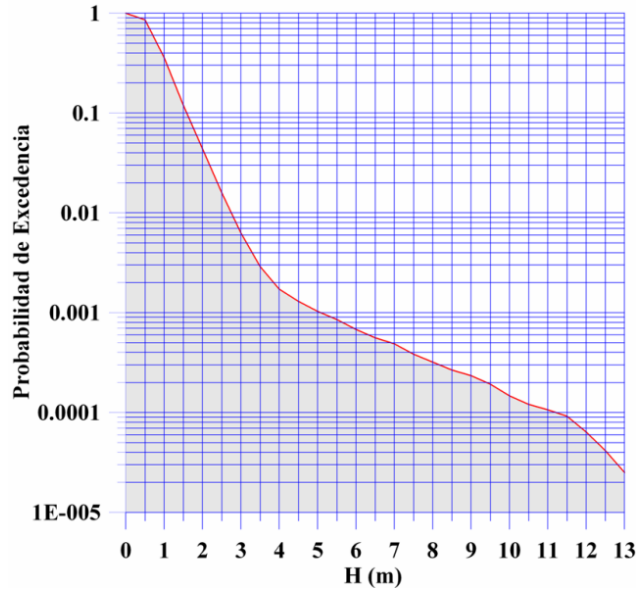


Figura 4.5. Gráfica de probabilidad de excedencia para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007. Se observa, por ejemplo, que las alturas de ola mayores de los dos metros durarán aprox. 1.2 horas al día y para un año, dicha altura será excedida aprox. 438 hrs.

Es evidente que una distribución con un número mayor de parámetros, producirá un mejor ajuste por poseer más de grados de libertad; por ello se recomiendan utilizar distribuciones que tengan 3 parámetros o variables. Todas las referencias consultadas, recomiendan usar la distribución de Weibull, ya que dicha distribución se encuentra dada por:

$$Pr \bar{H}_s \leq H_s = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{A-H_s}{B} \right)^C \right] & \text{para } -\infty < H_s \leq A \\ 1 - \exp \left[- \left(\frac{H_s-A}{B} \right)^C \right] & \text{para } H_s \geq A \end{cases} \quad (4.24)$$

donde A representa la posición de la distribución con respecto al eje H_s (parámetro umbral); B (> 0) es un parámetro de escala o normalización que determina el ancho de la distribución y C es un factor de forma. En la distribución de Weibull, A también representa el menor de los límites de la altura significativa y para encontrar su valor, se sugiere representar de manera gráfica los datos con algún valor límite que se haya propuesto para la expresión 4.24 y posteriormente, observar el ajuste de la recta de probabilidad dada; dicho procedimiento se repetirá de manera iterativa hasta que se encuentre un ajuste de la recta descrita por la ecuación 4.24), con el cual se esté conforme. Encontrado el valor de A , es posible determinar los parámetros de C y B con:

$$\begin{aligned} D &= -\log(B) \\ D &= \frac{1}{C} - \log(B) \end{aligned} \quad (4.25)$$

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

donde:

$$D = \begin{cases} -\log(A - H_s) & \text{para } -\infty < H_s \leq A \\ -\log(H_s - A) & \text{para } H_s \geq A \end{cases} \quad (4.26)$$

Si B tuviera el valor de 1, la distribución de Weibull se reduce a una distribución exponencial y si $B = 2$, la distribución es igual a la de Rayleigh.

Para ajustar las distribuciones de probabilidad a las observaciones, se requiere que se determine una probabilidad de no excedencia que tome en cuenta la frecuencia de las observaciones o los momentos estadísticos; dicha probabilidad puede definirse como:

$$F(H_s) = 1 - \chi_i \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.27)$$

donde $F(H_s)$ es la probabilidad de no excedencia de una altura de ola significativa dada, es decir $F(H_s) = Pr(\bar{H}_{s,j} \leq H_{s,i})$; χ es una expresión de punteo (probabilidad de excedencia de: Blom, Gringorten, Petruskas, Goda, Weibull, Bernard, Hanzen), i es la posición del valor en N observaciones. Debido a que la altura de ola se considera como una variable aleatoria con una función de distribución $F(H_s)$, se asume que el valor de $H_{s,i}$ puede también reconocerse como una variable aleatoria; por ende, su función de distribución o probabilidad de no excedencia es una variable aleatoria. Las técnicas de punteo se encuentran basadas en determinar la frecuencia de las observaciones correspondientes a $H_{s,i}$, ya sea por medio de la media, mediana o moda de la variable $F(H_s)$; dicha frecuencia de punteo es independiente de la función de distribución elegida. Weibull determinó la frecuencia de punteo (probabilidad de no excedencia) a partir de la media de $F(H_s)$ como:

$$F(H_s) = 1 - \frac{i}{N + 1}; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.28)$$

siendo ésta, la aproximación que se utilizó para la caracterización.

Cuando se establecen los valores de las probabilidades de las observaciones, es posible ajustar las distribuciones de una manera subjetiva (por revisión visual) u objetiva con un procedimiento teórico-formal, como por ejemplo, usando las técnicas: (a) de mínimos cuadrados, (b) el máximo valor de las observaciones o (c) de momentos. La técnica de mínimos cuadrados minimiza la suma de las diferencias cuadradas entre las observaciones y la distribución de probabilidad; por otro lado, la técnica del máximo valor observado maximiza la probabilidad en que las observaciones se toman a partir de la distribución y la técnica de los momentos calcula los parámetros de la distribución, de tal manera que los momentos de orden inferior y la distribución, tienen los mismos valores.

El ajuste por “revisión visual” se considera el procedimiento subjetivo más sencillo de aplicar, ya que solamente se representan gráficamente los valores en escalas adecuadas, tanto en el eje de las abscisas como en el de las ordenadas y si los datos pertenecen a la distribución que corresponden a las escalas, los valores mostrarán cierto ajuste a lo largo de la recta de

la distribución.

En la figura 4.6, se puede identificar que la recta de ajuste se origina de graficar $y = [-\ln(1 - Pr\bar{H}_s < H_s)]$ contra $x = C \ln[(H_s - A)/B]$. Por otro lado y desde una concepción más objetiva, el procedimiento de mínimos cuadrados se recomienda, sea el que se utilice como criterio para elegir la distribución de probabilidad; con esta técnica se calculan los coeficientes de correlación y el valor más alto de dichos coeficientes, sugerirá la mejor línea que ajusta los datos para extrapolar. Sin embargo se deberá considerar que el ajuste de la distribución con un procedimiento objetivo, no sería tan objetivo como este pareciera, ya que al no existir una base teórica para la elección de la técnica, ésta continua siendo subjetiva; en cualquier caso, un ajuste objetivo siempre deberá ser “revisado visualmente” para verificar si el ajuste es razonable; en particular los valores más altos observados, que son los que generalmente se consideran relevantes.

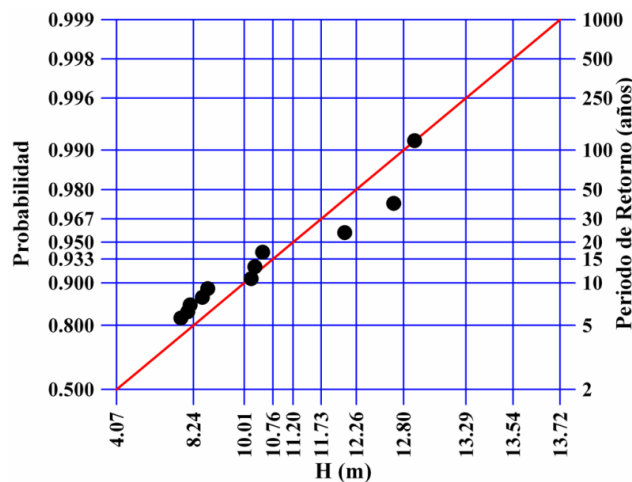


Figura 4.6. Distribución de Weibull a largo plazo para la altura de ola significativa para el periodo de tiempo de 1948 al 2007 para la celda Cancún. La línea recta representa el mejor ajuste de las observaciones (dicha gráfica puede también ser reconocida como la gráfica del régimen extremal anual de las alturas de ola significativa)

Si por ejemplo, se deseará conocer cuál sería la probabilidad de ocurrencia de un oleaje con alturas aproximadas de 12.9 metros. (altura aprox. de ola máxima, generada por el huracán Wilma en 2005) y 4 metros, de la gráfica de régimen extremal de alturas de ola significativa, se identifica que un oleaje de 12.9 metros tiene una probabilidad del 99.2 % que se presente de nuevo en un intervalo de tiempo de 125 años y que el periodo de tiempo en el que se observarían estos oleajes, serán de aproximadamente 24 horas al año; por otro lado, la probabilidad que existe de ocurrencia de oleajes con alturas promedio de 4 metros es del 50 % en dos años y la duración de éstos, no excederá las 12 horas al año.

La extrapolación de la distribución a largo plazo proporciona la probabilidad que un valor máximo no observado de la altura de ola significativa se exceda, pero no se indica cuando tal evento sucedería; no obstante lo señalado anteriormente, la posible eventualidad de que un

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

escenario se presente, puede ser determinada mediante el conocimiento del periodo de retorno.

El intervalo de recurrencia (o periodo de retorno) se define como el intervalo de tiempo promedio (en años) durante el cual, cierta altura de ola se espera será igualada o excedida y éste puede ser estimado a partir de la función de distribución acumulada de largo plazo, siempre y cuando se conozca la duración promedio por excedencia del escenario o evento.

Para estimar el intervalo de tiempo promedio durante el cual, se supera cierto valor de la altura significativa, es necesario interpretar la probabilidad de excedencia $Pr\{\bar{H}_s > H_s\}$ como la fracción de tiempo en el cual $\bar{H}_s > H_s$; posteriormente, la duración promedio por excedencia del evento se divide entre la duración total del evento y se obtiene el periodo de retorno:

$$Tr_{\bar{H}_s > H_s} = \left[\frac{\bar{d}_{\bar{H}_s > H_s}}{(Pr\{\bar{H}_s > H_s\}) (24)(365)} \right] * 100 \quad (4.29)$$

donde Tr es el periodo de retorno en años; $\bar{d}_{\bar{H}_s > H_s}$ es la duración promedio por evento en horas y $(Pr\{\bar{H}_s > H_s\})$ es la duración total del evento en horas. La probabilidad acumulada puede relacionarse al periodo de retorno, por:

$$Tr_{\bar{H}_s > H_s} = \frac{\bar{d}_{\bar{H}_s > H_s}}{(Pr\{\bar{H}_s > H_s\})} = \frac{\bar{d}_{\bar{H}_s > H_s}}{F(H_s)} = \frac{\bar{d}_{\bar{H}_s > H_s}}{1 - \chi_i} \quad (4.30)$$

donde χ es la función distribución acumulada, $P(H_s) = Pr\{\bar{H}_s < H_s\}$. Para esta estimación del periodo de retorno se requiere la información acerca de la duración promedio por evento, que sólo se puede obtener de series de tiempo simuladas u observadas de las alturas de ola.

En ciertas ocasiones, el periodo de retorno es calculado como $Tr_{\bar{H}_s > H_s} = \Delta t_H / [1 - P(H_s)]$, donde Δt_H es el intervalo de tiempo entre las observaciones de H_s o incluso $Tr_{\bar{H}_s > H_s} = 1/[1 - P(H_s)]$, que implica que tomará el valor de la unidad (la dimensión y unidad de magnitud de dicha estimación del periodo de retorno, no se encuentra definida porque tiene la misma dimensión y unidad de $\bar{d}_{\bar{H}_s > H_s}$, que ha sido reemplazada por la unidad). El periodo de retorno de calmas, intervalo de tiempo durante el cual $\bar{H}_s < H_s$, se estima de manera similar:

$$Tr_{\bar{H}_s < H_s} = \frac{\bar{d}_{\bar{H}_s > H_s}}{(Pr\{\bar{H}_s > H_s\})} = \frac{\bar{d}_{\bar{H}_s > H_s}}{P(H_s)} \quad (4.31)$$

Por ejemplo, en la figura 4.6 se pueden observar los periodos de retorno que se asocian a diferentes umbrales de la altura de ola; si se deseará conocer, cuál sería el intervalo de recurrencia de un oleaje con una altura similar a las que provocó el huracán Wilma en el 2005, se identificaría que una ola de 13 metros de altura se podría volver a registrar aproximadamente cada 150 años. En los proyectos que se desarrollan en la zona litoral y dependiendo de la magnitud de éste, el periodo de retorno que se desea conocer, generalmente, es de 50 años; basándose en los resultados del cálculo del periodo de retorno para todas las celdas que cubren el Golfo de México y Mar Caribe (la figura 4.6, solamente muestra los resultados de una celda), se generaron mapas de periodos de retorno de: 2, 5, 10, 15, 20, 30,

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

50, 100, 150, 250, 500 y 1000 años, en los cuales se muestra la distribución de las alturas de ola que se presentarán en el intervalo de recurrencia que se señala en el mapa. Se ha identificado con el uso de dichos mapas, por ejemplo, que en la zona de estudio, existe un 98 % que se registre alturas de olas de 12 metros cada 50 años (figura 4.7).

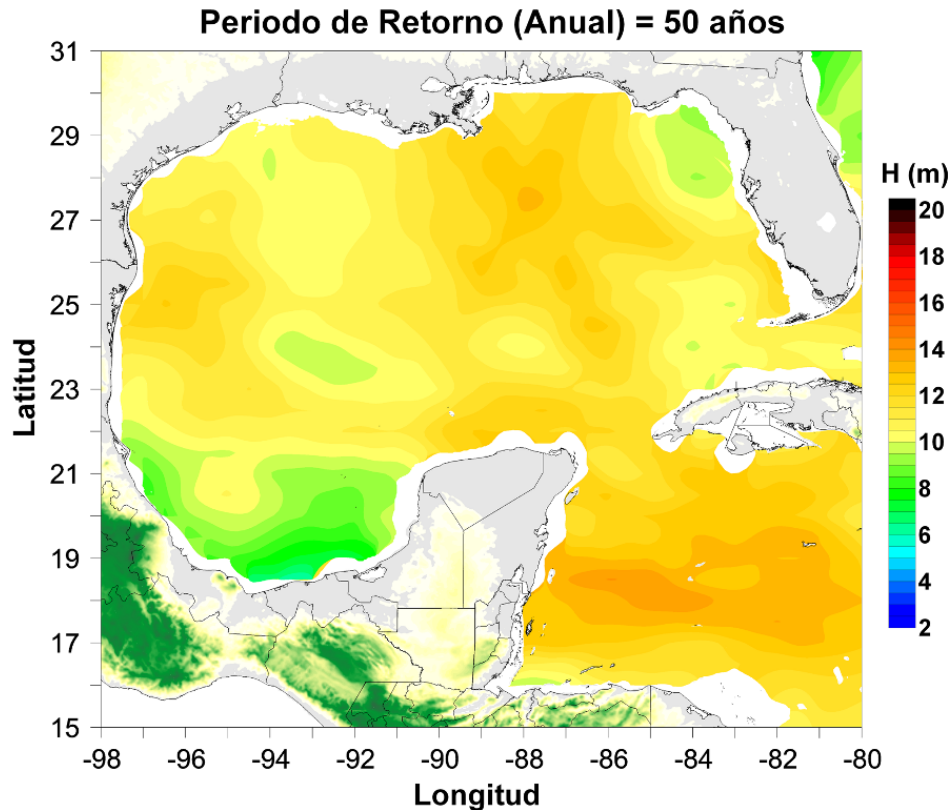


Figura 4.7. Mapa de periodo de retorno de 50 años para alturas de ola de la zona del Golfo de México y Mar Caribe

4.3.2. Análisis de tormentas

Con el análisis extremal y normal del clima marítimo es posible cuantificar las probabilidades de ocurrencia de los diferentes estados de mar; sin embargo también suele ser relevante, analizar las observaciones o datos que corresponden solamente a eventos extraordinarios o tormentas, puesto que éstos permiten conocer la evolución temporal de los distintos estados de mar en un estado crítico; con ello, es posible tener una mejor noción acerca de cómo el clima marítimo rige la zonas litorales.

Para realizar cualquier tipo de análisis de eventos extraordinarios, es fundamental definir el concepto de lo que se considerará como una tormenta; para el presente trabajo, un temporal se identificó como una serie ininterrumpida por más de 6 horas de valores de H_s que sobrepasan cierto umbral o valor límite de una altura de ola, que es precedida o seguida por otra serie de valores que se encuentran por debajo del umbral establecido (Holthuijsen, 2007). No existe

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

un criterio preestablecido para fijar la altura de ola que se considerará como una tormenta, ya que dicho umbral depende del sitio geográfico donde se desea analizar el oleaje. El criterio que se contempló para realizar el análisis de tormentas que se describe a continuación, fue considerar como eventos extraordinarios a todos aquellos estados de mar, en los que sus alturas de olas significantes fueran mayores o iguales a dos metros ($H_{s,umbral} = 2\text{metros}$), lo cual equivale a una vez y media de la altura cuadrática significativa media en la celda de Cancún.

La altura de ola significativa se define como el valor medio de un tercio de las alturas de ola más altas de un registro de oleaje y si dicho porcentaje puede ser identificado en la distribución de Rayleigh; en consecuencia, la altura significativa de cada estado de mar puede ser determinada por esta función. Si las alturas de ola que se encuentran involucradas en la definición anterior, se localizan en el tercio más grande de la curva de la distribución mencionada (Dean y Darlymple, 2000), se puede llegar a considerar que:

$$\sqrt{2}H_{rms} = \bar{H}_s \quad (4.32)$$

en donde \bar{H}_s es la altura de ola significativa media de las observaciones de largo plazo; con base en las consideraciones antes mencionadas, el umbral de la altura de ola para definir una tormenta se calculó con la expresión:

$$H_{s,umbral} \approx H_{rms} + (0.5H_{rms}) \quad (4.33)$$

La elección de la altura media cuadrática del registro de ola (H_{rms}) como parámetro fundamental para fijar el umbral de altura de ola de tormenta, se basó en el argumento que la H_{rms} es relevante para asociar la altura de ola con energía del oleaje, ya que éste último parámetro es proporcional al cuadrado del primer parámetro (H_s) (Wiegel, 1968).

El segundo término del lado izquierdo de la expresión 4.33, representa un porcentaje del valor de H_{rms} y dicho valor se agrega, con la finalidad de añadir una cantidad adicional de “energía” a la altura de ola obtenida, para simular un oleaje de tormenta.

Definido el umbral que seleccionaría las tormentas del registro de los valores observados a largo plazo, se excluyeron todas aquellas alturas de ola menores a umbral mencionado y posteriormente, se realizó la cuantificación total del número de tormentas, así como la duración de cada una de ellas; realizado lo anterior, los temporales fueron clasificados con respecto a un rango de alturas que abarcó olas de 2 a 13 metros.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

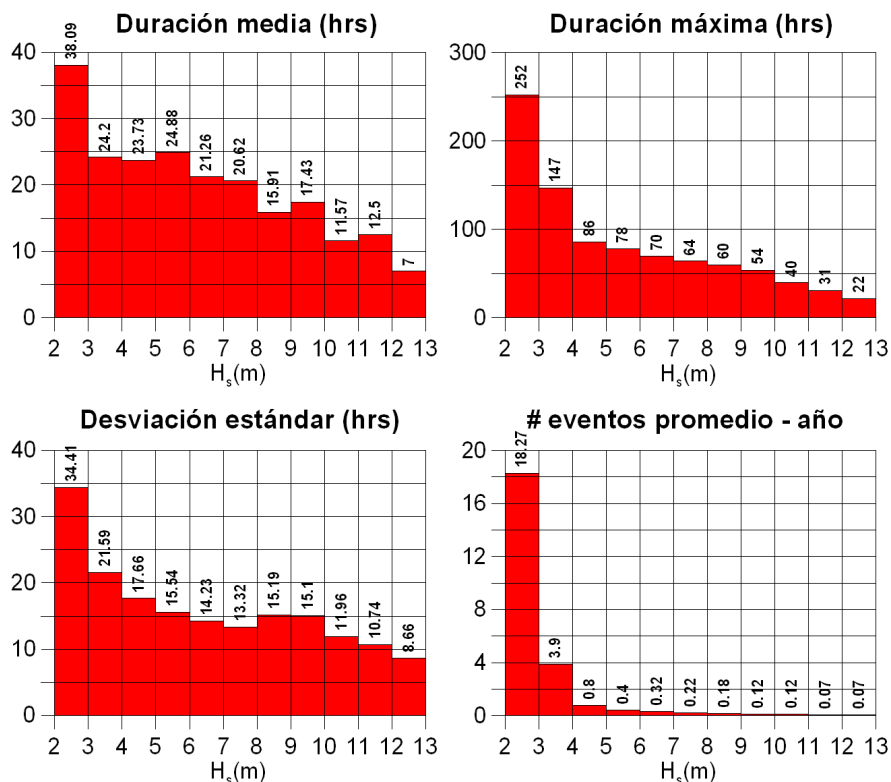


Figura 4.8. Gráfico de duración de las tormentas que se presentaron en la celda Cancún de 1948 al 2007

En la figura 4.8, en el gráfico de la duración media, se observa que una tormenta que desarrollaba oleajes de 2 a 3 metros de altura de ola (en la celda Cancún) tenía una duración media, de un poco más de un día y medio; mientras que los temporales que generaban alturas de ola de 3 a 5 metros duraban aproximadamente en un día. Analizando los valores máximos (gráfica de duración máxima de la figura 4.8) se identificó que una tormenta podía llegar a registrar alturas de olas de 2 a 3 metros durante dos semanas y un evento extraordinario duraría, aproximadamente, un día produciendo olas mayores a los 12 metros; a partir del gráfico de número de eventos promedio por año en la figura, se distinguió que las tormentas con oleajes de 2 a 3 metros. fueron las que se presentaron con mayor frecuencia (18 eventos); mediante la inspección de la desviación estándar se observó que el mayor valor que se obtuvo fue el correspondiente a los temporales que tuvieron alturas de olas dentro de la primera categoría del rango de alturas de olas que se propuso.

Por medio de la elaboración de mapas, en los cuales se muestra la duración media y máxima, así como del numero de tormentas de manera anual o mensual, se identificó que la línea de costa del Estado de Quintana Roo es la zona del litoral mexicano, en la vertiente Atlántica, en la cual se presenta la mayor duración de las tormentas (figuras 4.9 y 4.10).

De manera similar al análisis extremal y normal, los rangos de las alturas de las olas de los temporales se exhiben con respecto a su dirección media, utilizando una rosa de oleaje. Por medio de una comparación visual entre las direcciones de las olas que arriban a la costa

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

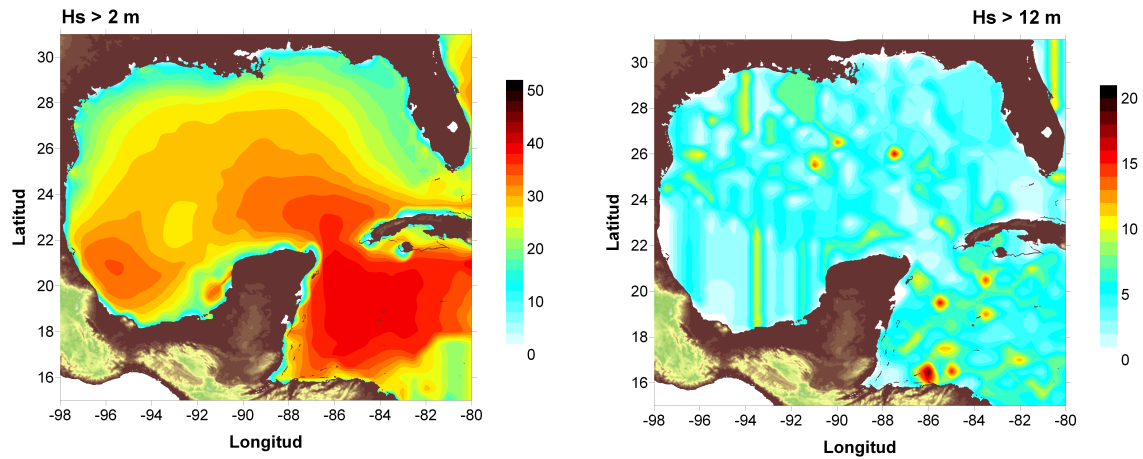


Figura 4.9. Mapas de duración media de tormentas (hrs) para la zona del Golfo de México y Mar Caribe

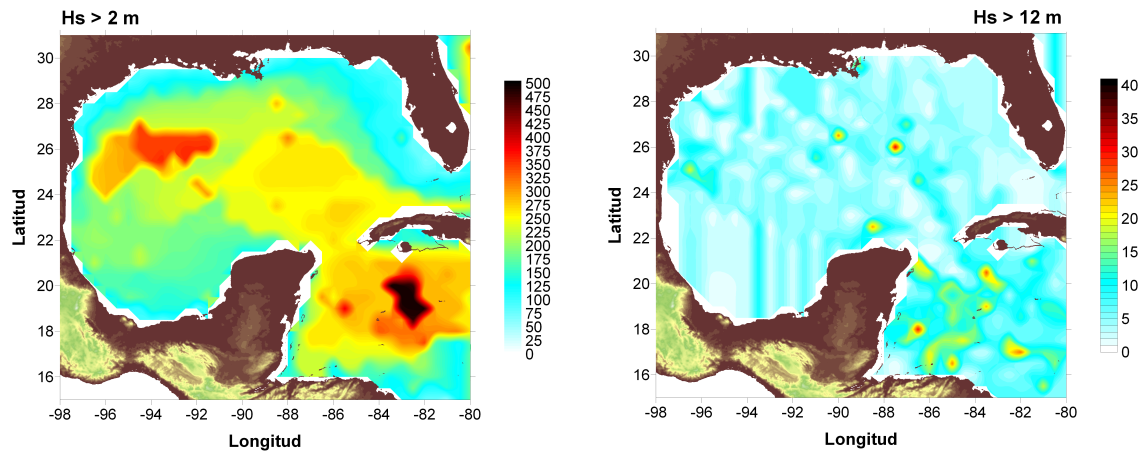


Figura 4.10. Mapas de duración máxima de tormentas (hrs) para la zona del Golfo de México y Mar Caribe

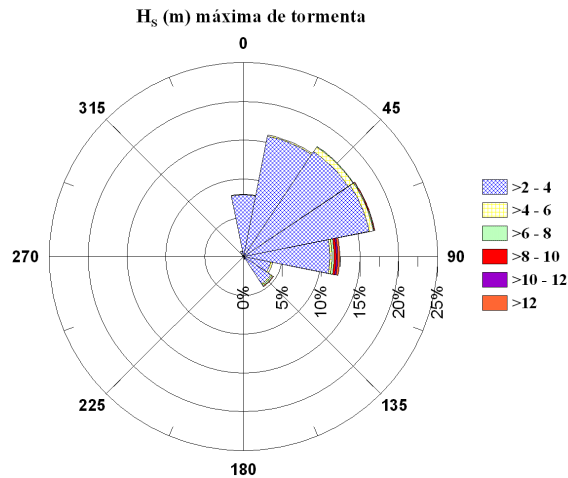


Figura 4.11. Rosa de altura de ola máxima de tormenta para la celda Cancún

(figura 4.4) y las alturas del oleaje de tormenta (figura 4.11) para la celda Cancún, se observa que la dirección de los mayores oleajes de tormenta observados coinciden con el sentido de propagación del oleaje incidente, por otra parte las tormentas que se presentan con mayor frecuencia, provienen de las direcciones: noreste, este-noreste y nor-noreste, notándose que el oleaje para la zona de estudio en condiciones normales o de calmas, proviene del Mar Caribe; mientras que, el oleaje generado por las tormentas se aproxima de la región del Canal de Yucatán y el Golfo de México.

Adicionalmente a la clasificación que se realizó de las alturas de ola de tormenta, con respecto a su frecuencia a lo largo de 60 años, se determinó de manera similar otra clasificación (altura de ola vs. número de eventos observados), en la cual los datos se agruparon de manera mensual. El objetivo de ambas clasificaciones fue conocer en la zona de estudio: cuál es el rango de la altura de ola, la duración y la frecuencia en que se presentan las tormentas, además de conocer durante que años o meses se registraban el mayor número de tempestades, conforme a la altura de ola registrada. En la figura 4.12, se puede identificar las distribuciones del número de eventos que se presentan agrupados de manera mensual a lo largo de 60 años para un rango de altura de ola específica; analizando los diferentes gráficos, es posible identificar que los oleajes mayores a 2 metros, se presentan en todas las estaciones del año, pero conforme la altura de ola se va incrementando, solamente en los meses que corresponden al otoño se presentan las tormentas; siendo el mes de septiembre el único, en el cual se presentarán oleajes de 2 a 12 metros. A partir de los datos mostrados y tomando en consideración los principios del equilibrio de un perfil de playa que señalan que la acción de las olas de tormenta, son el principal agente marino que provoca el desplazamiento del material de la playa hacia la zona barra de la zona litoral de la playa (Komar, 1998; Dean y Dalrymple, 2001), se observa que las playas que corresponden a la celda Cancún, estarían expuestas a un proceso continuo de erosión, principalmente de los meses de agosto a septiembre.

Con el uso de la información de las gráficas de distribución del número de eventos mensuales y anuales de los temporales con respecto a su altura de ola, se elaboraron mapas, en los

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

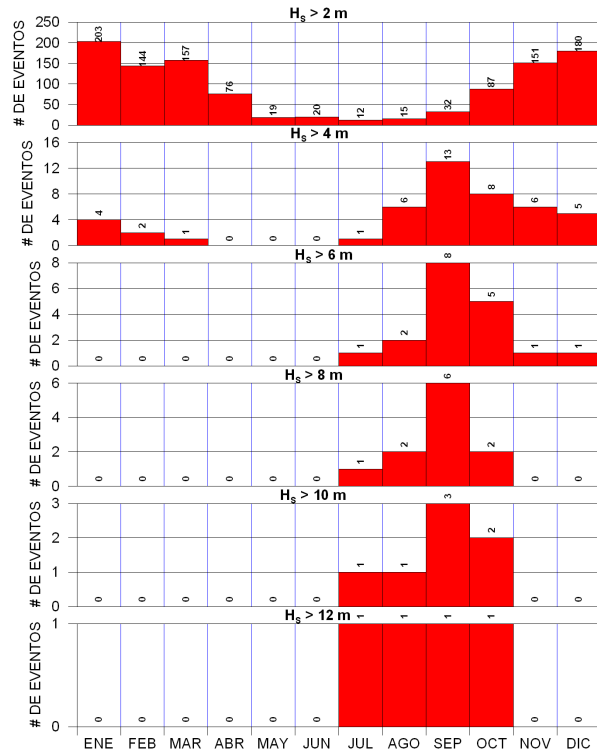


Figura 4.12. Altura de ola significativa agrupada por meses del año 1948 al 2007 para la celda Cancún

cuales se pudiera verificar dicha frecuencia media en toda la vertiente Atlántica Mexicana de las alturas significantes de 2, 4, 6, 8, 10 y 12 m. En la figura 4.13 se muestra la evolución de ocurrencia del número medio de tempestades para altura mayores de 2 metros; por medio de estos mapas se reconoce, que el mayor número de tormentas con la altura de ola antes señalada, se presentan en la costa de Quintana Roo.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

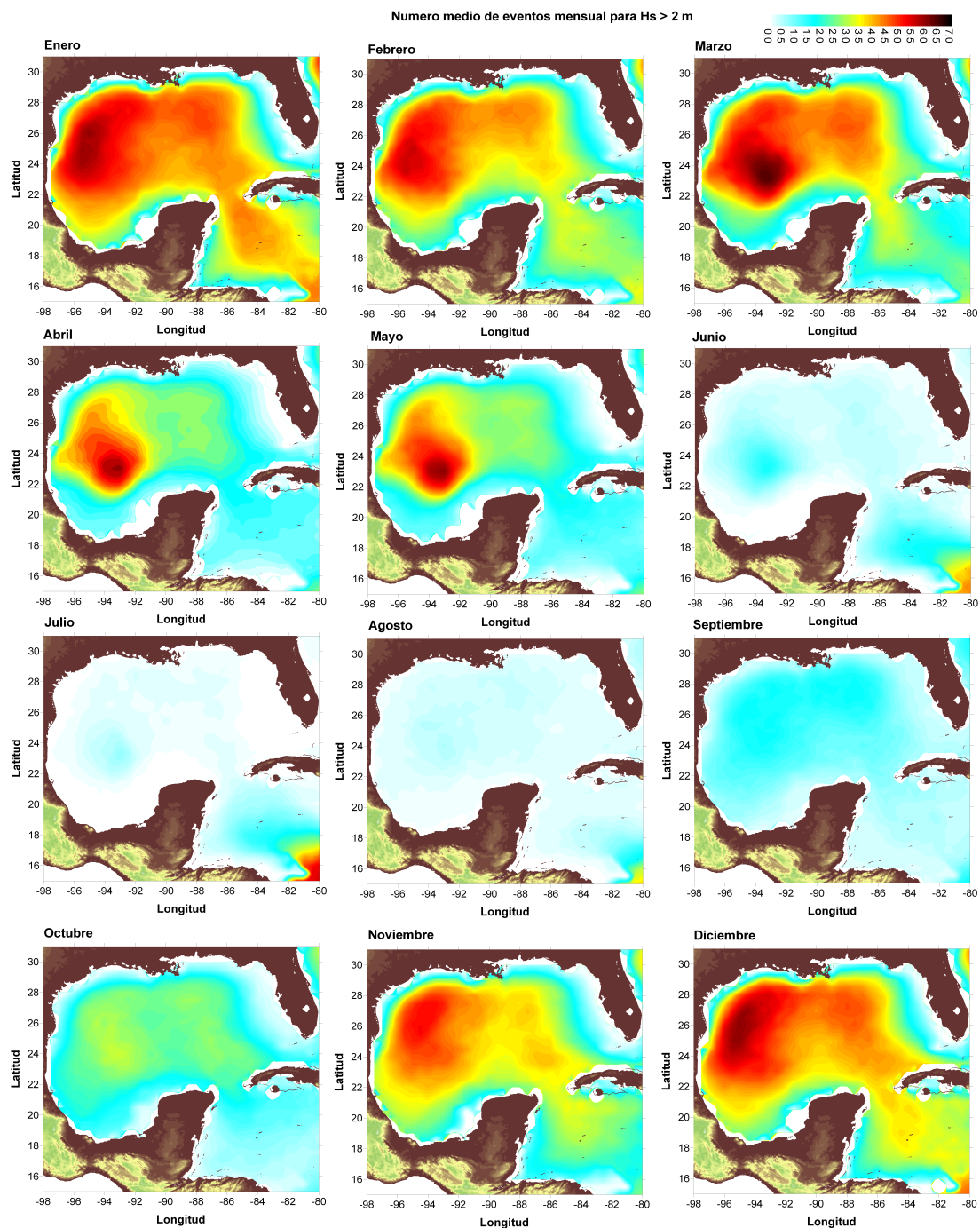


Figura 4.13. Representación mensual del número medio de tormentas con oleajes mayores de 2 m de la vertiente Atlántica Mexicana, del año de 1948 al 2007

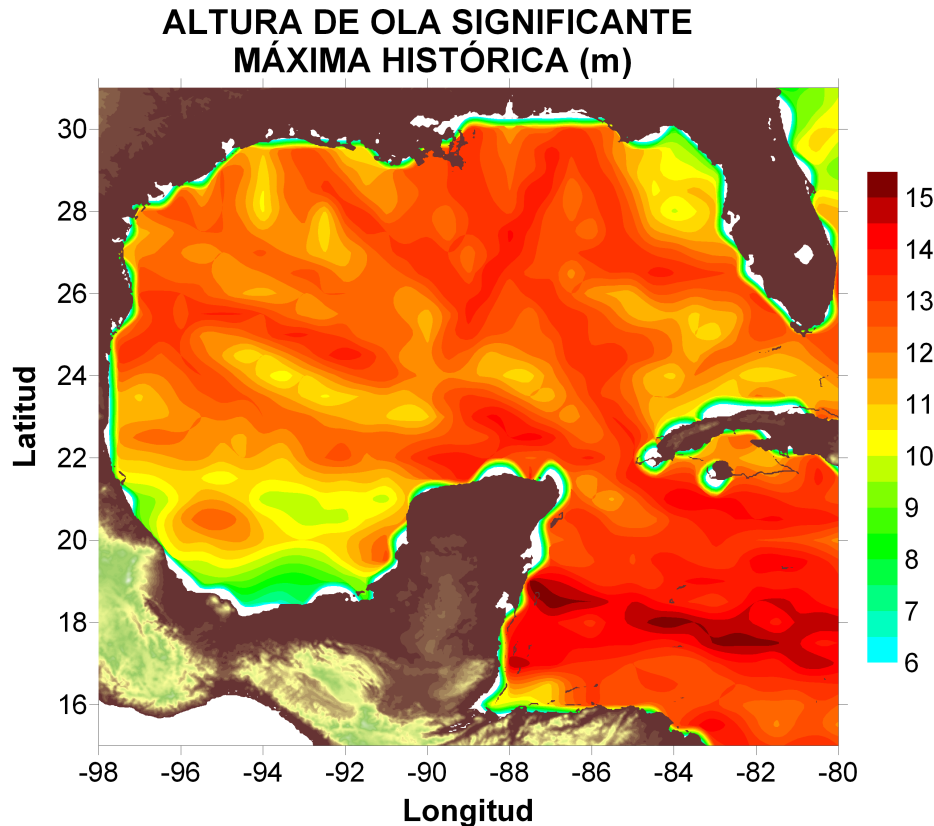


Figura 4.14. Mapa de altura de ola significativa máxima histórica para la vertiente Atlántica Mexicana

En la figura 4.14 se presentan las alturas de ola significativa máximas para el Golfo de México y Mar Caribe; en la figura se reconocen que las alturas máximas que pueden ser usadas para propagar el oleaje de aguas profundas a aguas someras.

Debido a la motivación de evaluar la energía del oleaje que se desarrolla cuando se presenta una tormenta y que incide en la costa, se determinó la energía potencial y cinética del oleaje, para cada estado de mar que correspondía a un temporal. A pesar que la energía del oleaje es proporcional al cuadrado de la altura media de la ola, ésta puede ser estimada mediante la ecuación de la densidad de energía por unidad de área, de la teoría lineal para ondas progresivas (LéMehuaté, 1976):

$$E_{sm} = \frac{1}{8} \rho g H_{sm}^2 \quad (4.34)$$

donde, E_{sm} es la densidad de energía del oleaje para cada estado de mar que formaba una tormenta (j/m^2); g es la aceleración de la gravedad (m/s^2); ρ es la densidad del agua (kg/m^3) y H_{sm} es la altura de ola significativa del estado de mar que corresponde a una tempestad (metros).

La magnitud total de la energía de cada evento se calculó, utilizando sumatorias de Riemman; posteriormente, fue necesario escalar o normalizar los valores totales obtenidos y para ello, se calculó la energía total de un evento “estándar” que tendría una duración de 24 horas y cada

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

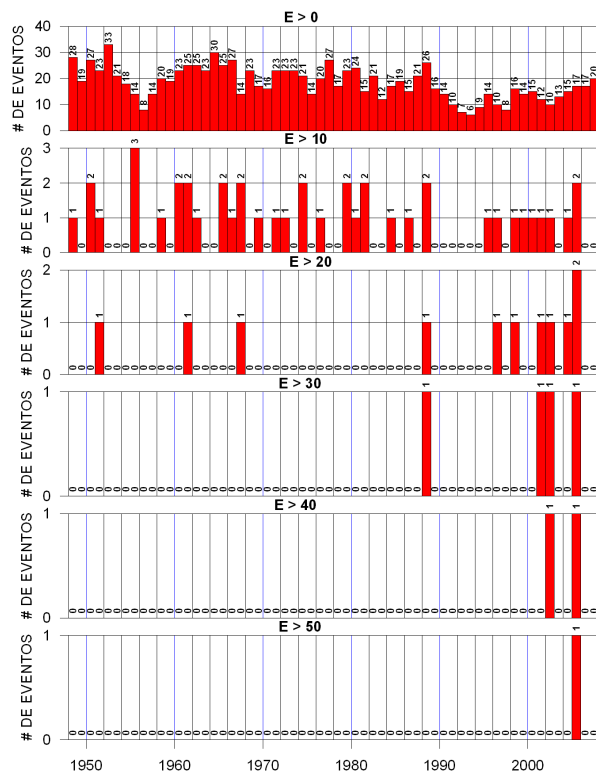


Figura 4.15. Energía de los eventos metereológicos, agrupada por meses del año 1948 al 2007 para la celda Cancún

estado de mar registraría una altura de ola promedio de 2 metros. Finalmente, la información correspondiente a cada tormenta fue agrupada en diferentes rangos de energía normalizada, alturas y periodos de ola, así como dirección de manera mensual y anual. Por ejemplo, en la figura 4.15 se encuentran las gráficas correspondientes a la clasificación que se realizó de la energía normalizada con respecto al número de eventos que se registraron desde 1948 al 2007. De dicha figura se identifica, que en el año 2005 se presentó el mayor evento desde un punto de vista energético, más sobresaliente en los últimos 60 años en el Golfo de México y Mar Caribe (Huracán Wilma).

De manera obvia, el sentido direccional de las tormentas (figura 4.11) coinciden con las direcciones energéticas del oleaje para la celda Cancún (figura 4.16); es relevante notar que la dirección en donde se registra el mayor número de tormentas, con alturas de ola que superan los 8 metros, es el cuadrante este y por ello, se esperaría que dicha dirección se considerará, la que mayormente aporta energía a la costa; sin embargo, a partir de la rosas de energía normalizada, se identifica que las tormentas que desarrollaron una mayor energía, se presentaron en los sectores noreste, este-noreste y este; y con ello se puede evidenciar que las direcciones que debería considerarse como las más energéticas son la eoreste y la este-noreste. En el proceso de análisis del comportamiento de las playas, es muy relevante determinar y reconocer la escala de tiempo, en la cual se desea estudiar la costa, ya que en un análisis de corto plazo, se deberán de considerar solamente las características del clima marítimo de aquellos oleajes que producen las alturas de olas más altas; por ejemplo, para el

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

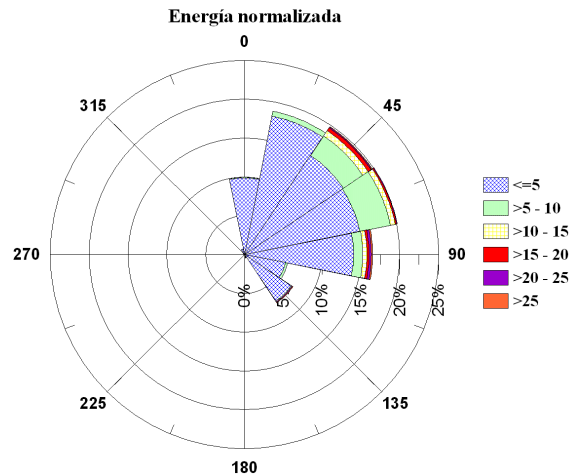


Figura 4.16. Rosa de Energía correspondiente a la celda Cancún

caso de la costa que abarca la celda Cancún, en el corto plazo se identifica que la dirección Este sería el sector que más influye en la dinámica litoral, debido a que en dicha dirección, se registran las mayores magnitudes en cuanto a altura, periodo y energía de ola. Por otro lado, si se desea analizar el comportamiento de la línea de costa a mediano y largo plazo, se deberán de considerar las direcciones y magnitudes del clima marítimo con base a la duración y el número de eventos que se presenten en la costa; ejemplificando lo anterior, se reconoce que el oleaje que tiene mayor repercusión en las condiciones hidro-morfodinámicas de las costa de la Cancún proviene de las dirección este-noreste.

En la figura 4.17 se puede identificar que la zona más importante en todo el litoral Mexicano de la vertiente Atlántica, en la que se ha presentado la mayor cantidad de energía, corresponde a la línea de costa de Quintana Roo, en la cual se localiza la zona de estudio de este trabajo. Esta información, se considera de gran relevancia, ya que a partir de ella será posible diseñar obras marinas que tengan un mejor desempeño para la protección de la costa y además brindará una mayor certidumbre en cuanto a la elección de las alturas de ola que generalmente se requieren para la modelación numérica del comportamiento de la zona litoral.

4.3.3. Altura de ola que excede las 12 horas por año

Debido a la naturaleza oscilatoria del oleaje y la manera en cómo éste influye sobre los sedimentos, generalmente, es necesario determinar un perfil de equilibrio transversal “teórico” de la playa que permita realizar suposiciones iniciales acerca del comportamiento de la línea de costa. Para calcular el perfil de equilibrio es necesario conocer la profundidad, en la cual el oleaje comenzará a modificar la pendiente de la playa. La profundidad máxima del agua en donde iniciaba la erosión de la zona litoral por condiciones de oleaje extremo se denominaría profundidad de cierre o clausura y que la altura de ola que debería ser considerada para determinar dicha profundidad, sería la que es solamente excedida 12 horas al año (H_{s12}) (Hallermeier, 1981) .

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Para determinar la altura de ola que se requiere para conocer la profundidad de cierre, Hallermeier determinó que dicha altura de ola, solamente ocurre 0.137% del tiempo y por ello, es posible relacionarla con la altura de ola media, mediante la expresión:

$$H_{s12} = \bar{H}_s + 5.6\sigma_H \quad (4.35)$$

donde, σ_H es la desviación estándar en las alturas de ola anuales (metros) y \bar{H}_s es la altura de ola media (metros). Para la determinación del periodo correspondiente, en la ecuación 4.35, se sustituyen los valores del periodo medio del oleaje. Las magnitudes de la altura y el periodo de ola que excede las 12 horas por año, para la celda Cancún, son: $H_{s12} = 4.26$ metros y $T_{s12} = 15.43$ segundos.

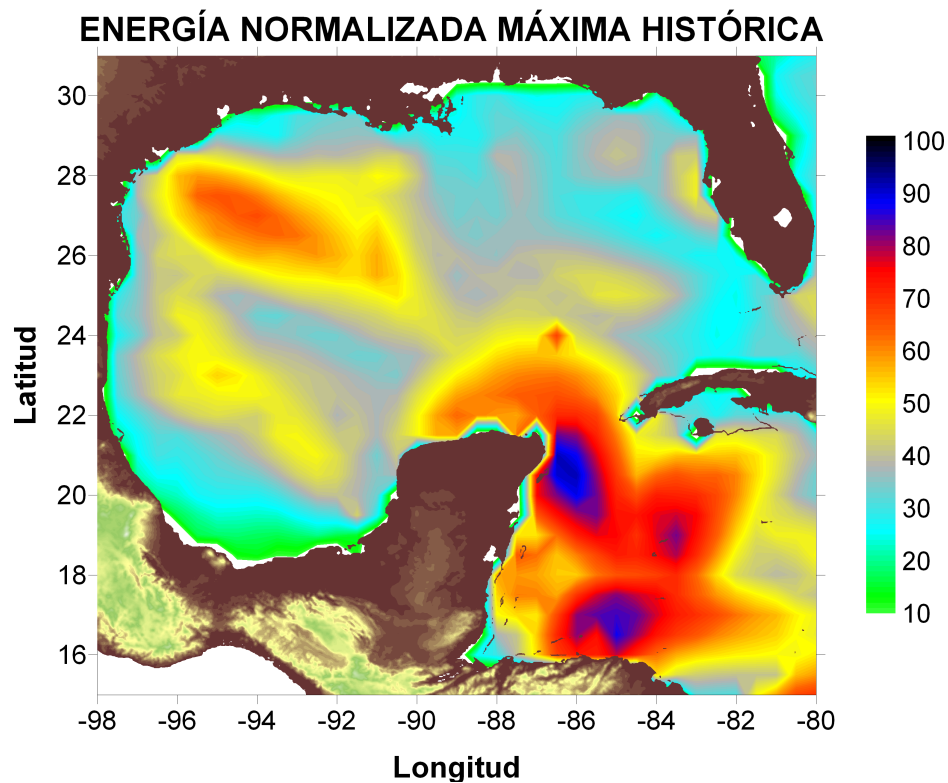


Figura 4.17. Mapa de energía normalizada máxima histórica para la vertiente Atlántica Mexicana

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA LÍNEA DE COSTA DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Influencia de los sistemas coralinos en la hidro-morfodinámica de las playas del noreste de Quintana Roo

5.1. Introducción

En la actualidad, tanto el sector económico como el ámbito social han ejercido una creciente coacción en el uso y aprovechamiento de los distintos recursos naturales que se encuentran en las costas y playas; a priori los sistemas litorales pueden exhibir niveles de degradación que ocasionan que éstos se modifiquen de tal manera que no sea posible un manejo o explotación sustentable de los múltiples elementos naturales que convergen en las costas. Como una consecuencia del manejo indiscriminado de los recursos en la zona litoral, surge como una premisa para todo análisis que se desarrolle en el área costera, la necesidad de realizar interpretaciones adecuadas del comportamiento del sistema y las conclusiones que se deriven de éstas deberán trascender desde una perspectiva que evalúe la sensibilidad y la capacidad de respuesta morfológica que tienen las playas, bajo las condiciones hidrodinámicas que prevalecen en ellas.

El hombre, con el uso principalmente de la física y las matemáticas, ha tratado de solventar las incertidumbres que se han manifestado a partir del interés que existe acerca de la interdependencia entre el medio marino y terrestre; es por ello que el estudio de los procesos y fenómenos que se presentan en una costa sea posible abordarse desde dos ópticas diferentes: a) una línea de costa o playa puede ser analizada a partir de estudios sedimentológicos y morfológicos; b) desde una perspectiva donde la condiciones hidro-morfodinámicas ponderen la respuesta del sistema litoral.

Ambas perspectivas hasta cierto punto difieren una de otra, ya que la primera de ellas suele ser cualitativa; mientras que la otra se considera cuantitativa. Por lo anterior, debe identificarse y tener siempre presente que dichos modos de análisis no son mutuamente excluyentes, lo que representa que cualquier estudio que se realice acerca de los sistemas litorales y que integre estas vertientes, proporcionará un mayor número de elementos de ponderación para un mejor entendimiento del funcionamiento de las playas o costas.

Una vez conocidas las características sedimentológicas y geomorfológicas de la costa del Estado de Quintana Roo, en el presente capítulo se exponen los resultados de las modelaciones numéricas de las condiciones hidrodinámicas por oleaje de la línea de costa del noreste de la

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

entidad. La relevancia del estudio del régimen hidrodinámico al que se encuentran sometidas las playas de dicha zona, se basa en el análisis de la interacción que existe entre el oleaje y el arrecife de coral que se localiza en la zona de Punta Maromas a Cancún; se presentan dos escenarios de propagación del oleaje: 1) cuando los arrecifes de coral se comportan como un obstáculo marino sumergido e impermeable, que no permite el rebase del oleaje sobre los corales y 2) cuando el oleaje sobrepasa las estructuras coralinas, suponiendo un cierto nivel de marea de tormenta. El propósito principal del capítulo se enfoca en el comportamiento del oleaje que se genera debido a la presencia de arrecifes en la zona litoral y al caso particular de la isla barrera de Cancún, donde no existen estructuras coralinas. En la primera parte del capítulo se describen los trabajos que se realizaron, con el objeto de obtener la información referente al fondo marino por el cual se propaga el oleaje; posteriormente se proporcionan los criterios que se consideraron para seleccionar el modelo numérico de oleaje que se usó. Antes de la discusión de los resultados, se exponen los criterios que se fijaron para dividir la zona de estudio en subzonas, en las cuales fuera posible observar los diferentes patrones de la propagación del oleaje por efecto de los arrecifes. Debido al número de simulaciones que se realizaron, solamente se presentarán y discutirán los casos donde se observaron los mayores umbrales del oleaje. La totalidad de los resultados de las simulaciones pueden ser consultados en uno de los anexos que acompañan este trabajo.

5.2. Trabajo de campo

Cuando se desea simular los fenómenos naturales que cotidianamente se observan en una playa o costa, como el oleaje que arriba a la zona litoral, es necesario proporcionar a los modelos numéricos el contorno marino a través del cual, las olas avanzan hacia la costa. Adicionalmente, el conocimiento de la configuración del fondo marino, suele cobrar mayor relevancia, cuando se analizan las corrientes marinas y el acarreo litoral. Es por ello primordial, que para realizar un estudio acerca del comportamiento que muestra el oleaje cuando éste se propaga en dirección hacia la costa, se disponga de la información correspondiente a las líneas batimétricas de la zona que se desea analizar.

Para el presente trabajo, un aspecto trascendental fue obtener las curvas batimétricas que se tienen en aguas profundas y someras de la zona de interés. La información referente al fondo marino en aguas profundas se obtuvo a partir de la consulta y digitalización de cartas marinas y mapas portulanos que publica la Secretaría de Marina-Armada de México (*SEMAR*). Por otro lado, se realizó una campaña de campo en el área de interés con la finalidad de determinar la configuración del fondo oceánico que existe entre una profundidad aproximada de 150 hasta 1.5 metros; en dicha campaña participaron y colaboraron de manera conjunta cuatro instituciones: (1) Instituto de Ingeniería (*II*), (2) Ciencias del Mar y Limnología (*ICMYL*) de la UNAM, (3) Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos y (4) la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (*CONABIO*). Los datos correspondientes a la batimetría de la isla barrera de Cancún fueron proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad (*CFE*).

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Cabe señalar que la información recabada en campo fue complementada por datos que fueron aportados por empresas privadas, interesadas en una explotación sustentable de los recursos naturales, que se encuentran en la zona de estudio.

La extensión longitudinal de la cual fue de cincuenta y dos kilómetros, aproximadamente; cubriendo con ello, la línea de costa noreste del Estado de Quintana Roo, que fue delimitada al norte, por Punta Cancún y al sur, por Punta Maromas.

Debido a la gran cantidad de datos que fueron obtenidos para determinar el contorno marino, se requirió realizar un proceso de revisión y corrección de los distintos puntos geográficos, así como sus profundidades correspondientes. Para verificar o modificar, según fuera el caso, la información referente a las profundidades del fondo del mar, se implementó la metodología siguiente: ya que los datos procedieron de distintos equipos de medición, la precisión de los valores registrados y los sistemas de georeferenciación eran diferentes unos con otros, por lo que fue necesario transformar todos las posiciones registradas con coordenadas geográficas (latitud y longitud) al sistema Universal de coordenadas Transversales de Mercator, (X,Y). Una vez realizada esta operación se formaron tríadas y se ajustó la precisión a todos los valores recopilados en campo; para que todas las coordenadas tuvieran una precisión de milímetros.

Después de obtener las tríadas, mediante la ejecución de una rutina de FORTRAN se revisaba que a cada coordenada X,Y, solamente le correspondiera un solo valor de Z (profundidad). Posteriormente, con el uso de un programa de dibujo asistido por computadora (CAD) se unían con una línea todos aquellos puntos que compartieran una misma profundidad, y con ello se obtenían las líneas o los contornos batimétricos.

Puesto que los datos que se recopilaron, no se encontraban uniformemente espaciados, se optó por realizar una interpolación matemática a los valores de las tríadas para crear una malla espacial en la cual, todos los puntos estuvieran distribuidos espacialmente y de una manera uniforme.

A partir de la premisa anterior, una vez que se tenían las curvas batimétricas y los valores correspondientes a éstas se guardaban en un archivo electrónico que permitiera exportar el dibujo CAD hacia cualquier software en el cual se pudiera hacer la interpolación de los valores X,Y,Z; para este caso, se utilizó un programa de cómputo para construcción de modelos digitales de terreno y representaciones topográficas.

Cuando se desean representar las condiciones que se presentan en la naturaleza, se recomienda que el comportamiento de los datos que permitirán realizar la simulación sea similar al comportamiento observado en el medio natural; es por ello, que para obtener una malla que representara lo mejor posible el contorno marino de la zona litoral que se estudia, el espaciamiento horizontal y vertical para la interpolación de los datos, se procuró que fuera menor a los 100 metros.

Generada la malla regular de tríadas, se dibujaban los contornos de las profundidades

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

resultantes de la interpolación con la finalidad de revisar que estas líneas sean similares a las que se tienen en la naturaleza. Para hacer la revisión de las curvas batimétricas, los valores de las coordenadas (X,Y,Z) se dibujaban, de nuevo en el programa de CAD. Las líneas que se obtenían, eran sobrepuestas en una imagen digital de satélite; mediante la comparación visual de los datos con la imagen, se corregían las curvas o líneas que mostraban tendencias diferentes a las observadas en la fotografía. Corregidos y revisados los datos, se repetía el ciclo de exportación de información al programa que interpolaba las tríadas, se realizaba la interpolación y de manera similar, los datos se dibujaban y exportaban de nuevo al software CAD, para iniciar otro ciclo de corrección de datos.

Cabe señalar que el proceso de corrección de datos se realizó aproximadamente en 12 ocasiones y que la cantidad de información que se procesó para obtener los contornos batimétricos que serían necesarios para la simulación numérica, fue de un millón de tríadas, aproximadamente.

Cuando se consideró que la calidad de la malla o de las tríadas era aceptable para la simulación hidrodinámica, se observó la necesidad de seccionar o dividir los cincuenta y dos kilómetros de longitud de la zona de estudio en cinco diferentes zonas, para entender y visualizar de una manera más detallada los fenómenos de propagación que actúan en la costa.

5.3. Modelo numérico de propagación del oleaje

El conocimiento del comportamiento que muestra el oleaje cuando se acerca a la costa es primordial en cualquier estudio o proyecto que se desarrolle en la zona litoral; al acercarse las olas a la playa, éstas son modificadas por el fondo marino a través de fenómenos, tales como la refracción, el someramiento, la fricción del fondo, la reflexión y difracción (presentándose estos dos últimos, si las olas interactúan con alguna estructura natural como arrecifes coralinos o también, con una obra marina edificada por el hombre *e.g.* rompeolas, espigones o escolleras), corrientes litorales y disipación de energía por turbulencia; las olas al verse afectadas por alguno de los fenómenos antes mencionados tienden a cambiar su altura y dirección.

Las modificaciones que sufre el oleaje, en cuanto a sus características y su dirección, debidas a los cambios en los contornos batimétricos, tienen una trascendencia sobre las playas por el papel fundamental que ejercen sobre los procesos litorales, tales como las corrientes marinas y el transporte de sedimentos que se presentan en ellas.

El uso de un modelo numérico de propagación de oleaje debe llegar a contemplarse cuando se desea estudiar el papel que desempeña el fondo marino con el oleaje o para transferir información instrumental o de predicción del campo del oleaje en aguas con profundidades indefinidas hacia aguas someras.

El comportamiento de las olas en la costa puede ser determinado basándose, tanto en los fundamentos de la teoría lineal como no lineal del oleaje. La elección de cuál teoría es la apropiada, dependerá de la zona litoral que se requiera analizar. Por ejemplo, los modelos

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

numéricos que se encuentran desarrollados bajo las hipótesis de la teoría lineal, llegan a simular de una manera aceptable el comportamiento de las olas en las playas (en aguas intermedias y profundas); sin embargo, en la zona de rompientes o la zona de lavado de la playa, donde se tiene profundidades someras, se recomienda utilizar modelos numéricos que se encuentren basados en la teoría no lineal del oleaje (los modelos con aproximaciones del tipo Boussinesq o Stokes de órdenes superiores).

Para la elección del modelo numérico de propagación del oleaje se consideraron los siguientes aspectos: el campo de oleaje es generado por el viento y la fuerza restauradora de las olas al romper es la gravedad; por otro lado, se estableció que los periodos de las olas que se simularían serían de ocho, diez y doce segundos, dichos periodos se determinaron a partir de la consulta de la rosa de periodos de tormenta del Atlas del Clima marítimo de la vertiente Atlántica y Mar Caribe (Silva et al., 2008a), siendo éstos, los que se presentan con mayor frecuencia en la zona de estudio, en cuanto a oleaje de tormenta se refiere. Analizando el tipo de oleaje que se deseaban simular, éste se ubicó dentro de la categoría de oleaje por gravedad, en las clasificaciones de las ondas oceánicas por su periodo (Johnson et al., 1978) o periodo-energía (Kinsman, 2002).

Debido a que uno de los objetivos primordiales de este trabajo es comprender cómo el sistema litoral responde cuando una tormenta se presenta en sus playas y cómo los obstáculos naturales (arrecifes coralinos) disipan la energía de las olas y a su vez, protegen a las playas, se decidió utilizar un modelo numérico que se desarrollará a partir del uso de los principios de conservación de la masa y el momento lineal. El modelo preferentemente, debía conceptualizar (1) al movimiento de las olas como oscilatorio; (2) el medio por el cual se desplazan las olas, se consideraría como continuo; (3) además, de no permitir la existencia de momentos angulares del fluido respecto a cualquier posible punto de referencia y finalmente, (4) que la densidad del flujo permaneciera constante a todo lo largo de éste.

Para entender los diferentes procesos que se observan en la morfología de la playa, se deben de analizar particularmente cada una de las áreas de la zona litoral, para posteriormente, proporcionar una posible explicación de los fenómenos que ahí suceden. Es por ello que para este estudio se considerará el analizar los fenómenos de la transformación del oleaje en la zona interior de la playa o en todas aquellas zonas donde existieran arrecifes de coral.

Después de ponderar y detallar los aspectos que se deseaban alcanzar con la propagación de oleaje, se estimó que se emplearía un modelo numérico que se basará en la teoría lineal, principalmente por la zona de la playa que se deseaba estudiar y por la información que se tenía disponible; ya que no se desea conocer con una gran precisión la transformación del oleaje y los efectos no lineales que inducen la transferencia de energía y que generan oscilaciones de baja frecuencia en la zona de rompientes y de lavado de la playa, se determinó no utilizar un modelo numérico del tipo Boussinesq o uno de Stokes de orden superior.

Para el trabajo que se expone, el *Wave Propagation On the coast*, versión 3 (MWAPO3) fue el modelo numérico que se utilizó para conocer el campo de oleaje en la zona de estudio; la

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

implementación del esquema numérico así como de la programación de la ecuación modificada de la pendiente suave, fue llevada a cabo por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos de la UNAM.

El modelo MWAPO3 fue concebido bajo los postulados de la teoría lineal de ondas, puesto que resuelve la ecuación modificada de la pendiente suave (Silva, 2008). Dicho modelo podría ubicarse dentro de la clasificación de los modelos numéricos, implementados para analizar el comportamiento del oleaje, como un modelo que resuelve la fase del oleaje y se fundamenta en las ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y cantidad de movimiento que se integran en la vertical.

Cuando el oleaje se aproxima a la costa experimenta transformaciones debido a procesos tales como la refracción, difracción, reflexión, someramiento, presencia de corrientes y disipación de energía por turbulencia, fricción de fondo y rotura. Una forma de representar estas transformaciones es asumiendo que el flujo es irrotacional, el fluido incompresible y que el proceso es lineal, donde las ondas se propagan sobre un fondo impermeable con una profundidad que varía lentamente en el espacio, menor a 1:3. El resultado de este procedimiento es la llamada ecuación de la pendiente suave (*MSE*), derivada por primera vez por Berkhoff (1972). Otros autores que han derivado esta ecuación son Smith y Spinks (1975), Lozano y Meyer (1976), Massel (1989) y Miles (1991). Por su parte Chamberlain y Porter (1995), Kirby y Dalrymple (1994) y Losada et al. (1996) desarrollaron la llamada ecuación modificada de la pendiente suave, la cual, al considerar los términos de segundo orden que despreciara (Berkhoff, 1972), representa con mayor precisión la propagación del oleaje en presencia de batimetrías complicadas y sin la restricción de “fondo suave”.

El desarrollo de esta ecuación (Silva et al., 2002b), supone flujo incompresible, homogéneo e irrotacional sobre un fondo $h(x, y)$, siendo x e y las coordenadas cartesianas horizontales. La coordenada vertical, z , es positiva hacia arriba y el nivel $z = 0$ se encuentra en el nivel medio del mar. En el desarrollo de la ecuación de la pendiente suave, una onda monocromática, que posee una frecuencia σ y una superficie libre η , el potencial de velocidades que le corresponde a un modo propagante (ϕ) es:

$$\nabla_h \cdot (I_1 \nabla_h \phi) + [(k^2 - i\sigma W) I_1 + r(h)] \phi = 0 \quad (5.1)$$

donde W es un término disipativo y T es el periodo del oleaje.

El desarrollo de la ecuación modificada de la pendiente suave está basado en la teoría lineal o de Stokes, por lo que el modelo está restringido a condiciones en las que dicha teoría es válida. La relación de dispersión general que ofrece la teoría lineal es:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (5.2)$$

Una forma de medir la no linealidad del fenómeno es el número de Ursell definido como:

$$U_r = \frac{H_L L^2}{h^3} \quad (5.3)$$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

donde: U_r es el número de Ursell, H_L es la altura de ola local, L es la longitud de onda y h es la profundidad. Cuando U_r es mayor de 40 la solución de Stokes deja de ser válida, lo cual ocurre en aguas poco profundas. Con la finalidad de extender la aplicación del modelo a zonas con muy poca profundidad (Hedges, 1976), propuso una modificación a la relación de dispersión lineal, la cual incluye la dispersión debida a la amplitud:

$$\sigma^2 = gk \tanh \left[kh \left(1 + \frac{A}{h} \right) \right] \quad (5.4)$$

siendo A la amplitud máxima local, calculada a partir de:

$$A = |\phi| \quad (5.5)$$

donde $|\phi|$ representa la norma del potencial de velocidades. Esta relación, en aguas poco profundas, tiende a la dispersión para una onda solitaria:

$$\sigma^2 = gk^2 (h + A) \quad (5.6)$$

mientras que en aguas profundas, dado que A/h tiende a cero, la ecuación 5.4 se aproxima asintóticamente a la relación lineal de dispersión, ecuación 5.2. Por lo que la aplicación de la ecuación 5.4 supone una transición de teoría de Stokes (válida en aguas profundas) a la expresión no lineal de Hedges (válida en aguas someras) conforme se propagan las ondas.

En función de las condiciones de cada caso en estudio, será necesario considerar o no los efectos de la disipación de energía. Físicamente, cuando en algún punto del dominio, en el fondo o a lo largo de la columna de agua, se presenta disipación, el oleaje sufrirá los procesos de difracción y/o atenuación. Dentro del término disipativo se pueden considerar los siguientes fenómenos:

- amortiguamiento del oleaje por presencia de capas laminares viscosas de fondo o de superficie,
- pérdida de energía por la presencia de capa límite turbulenta en el fondo,
- amortiguamiento por fricción de fondo,
- disipación de energía debida a la rotura del oleaje.

Así, el término disipativo, W , de la ecuación 5.1 está compuesto por una sumatoria de los coeficientes de disipación correspondientes a cada fenómeno. En este trabajo sólo se considera el efecto de los dos últimos, dado que son los que mas influencia tienen en el cálculo de la altura de ola. Las condiciones de oleaje en campo son tales que la capa límite en el fondo es turbulenta. Para este modelo, la disipación de la energía se realiza tal como lo hiciera (Kirby y Dalrymple, 1986), utilizando un factor de fricción tipo Darcy-Weisbach, C_f , el término de disipación de energía se puede escribir como:

$$f_B = \frac{4}{3\pi} \frac{C_f a \sigma^2}{ng \operatorname{senh}^3 kh} \quad (5.7)$$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

donde a es la amplitud de onda ($H/2$), σ es la frecuencia angular y n se calcula como:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (5.8)$$

La rompiente del oleaje es uno de los procesos que más influye en el comportamiento hidrodinámico cerca de la costa, ya que por un lado es una manifestación de disipación de energía y, por otro, condiciona en el transporte de sedimentos. Son principalmente dos los factores que pueden producir la rotura de oleaje: la disminución de la profundidad y el consecuente peraltamiento de las ondas al acercarse a la costa; rotura que se produce en la llamada zona de rompientes y la presencia de una pendiente muy pronunciada que obliga al oleaje a liberar energía. En modelos de propagación es importante realizar un adecuado análisis de la rotura, a fin de obtener datos como la altura y profundidad de rotura, delimitar la zona de rompientes, estimar la energía perdida y la capacidad de reconstitución de las ondas en el área de estudio. La rotura del oleaje, dentro de los modelos numéricos, puede tratarse de diferentes formas, siendo las siguientes tres las más comunes:

- modelos que limitan la altura de ola,
- modelos de propagación de ondas solitarias y
- modelos que determinan la variación espacial de la energía del oleaje

La rotura del oleaje se simula con un modelo del último tipo, ya que tienen la ventaja que pueden describir tanto la rotura como la eventual recomposición de las ondas. Esto es, en la naturaleza, una vez que una ola ha roto puede tener la suficiente energía como para volver a iniciar el movimiento oscilatorio e inclusive volver a romper. El modelo empleado, y que simula dicho fenómeno, es el desarrollado por (Dally et al., 1985), quienes consideraron un perfil, partiendo de aguas profundas, con una inclinación suave, el cual en algún punto, ya en aguas someras, cambia a horizontal. Sobre dicho perfil, se propaga una onda con características tales que la rotura inicia justo en el punto en que el perfil se vuelve horizontal. En tales condiciones la rotura continúa hasta que la ola alcanza una altura estable y reinicia el movimiento ondulatorio, es decir, se recompone. Con el fin de aplicar el mismo modelo de disipación en la ecuación modificada de la pendiente suave (Silva et al., 2005), tal que,

$$f_D = \frac{0.15k}{\sigma h} \left[1 - \left(\frac{0.4h}{H_B} \right)^2 \right] \quad (5.9)$$

Donde H_B es la altura de ola de rotura, $K = 0.15$ y $\Gamma = 0.4$. El modelo de propagación empleado en este trabajo considera que cuando $H < 0.78h$ no se presenta la rompiente, por tanto $f_D = 0$. Cuando $H \leq 0.78h$ inicia la rotura y f_D se calcula a partir de la ecuación 5.9. La rotura continua hasta que $H < 0.78h$, donde f_D vuelve a ser nulo, de modo que la ola reconstituida sigue propagándose hasta eventualmente volver a romper, es decir, el cálculo de la disipación de energía por rotura es iterativo.

La forma matemática de la ecuación de la pendiente suave, al ser elíptica requiere condiciones de frontera que delimiten el dominio computacional y la solución simultánea del campo

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

de oleaje en todos los puntos interiores del dominio, como consecuencia de lo anterior, desde el punto de vista computacional, el cálculo de la solución se vuelve muy demandante. Principalmente el problema radica en que se desconoce la localización de la línea de rompiente de manera exacta, desconociendo con ello la cantidad de energía que se disipa, refleja o se transmite en el contorno. Para solucionar el problema que plantea la ecuación elíptica de la pendiente suave, es necesario realizar una aproximación parabólica de dicha expresión. Para los casos, en los cuales se pretende llevar la condición de oleaje conocida, en aguas profundas, a la frontera de interés, aguas intermedias, es conveniente utilizar la aproximación parabólica de la ecuación de pendiente suave. Por lo tanto, los efectos de la difracción de manera débil y la reflexión se desprecia (Losada y Liu, 2000).

Desde una óptica computacional en la cual se integra el análisis numérico, la ecuación modificada de la pendiente suave puede llegar a resolverse, mediante el uso de técnicas empleadas para la solución de ecuaciones parciales, tales como diferencias o elemento finito; con cualquiera de estos dos métodos numéricos se obtendrá la longitud de la ola para cada punto de la malla de cálculo; es por ello, que cuando se modelan oleajes de corto periodo (como los que se presentan en la zonas costeras), dependerá del número de puntos de la malla para que se alcancen soluciones más precisas. Precisamente, debido a la naturaleza elíptica de la ecuación de la pendiente suave, un esquema estándar de solución, mediante elemento o diferencias finitas pueden implicar un gran coste computacional, tanto en recursos de la máquina, como en tiempo de cálculo. Es por ello, que frecuentemente la ecuación de la pendiente suave se aproxima de manera parabólica, puesto que permite que las técnicas de solución numérica sean más robustas y rápidas.

La rutina computacional MWAPO3 resuelve la ecuación modificada de la pendiente suave bajo ciertas condiciones de frontera; dicho programa de computo fue codificado bajo un lenguaje de programación de alto nivel, como lo es FORTRAN.

El MWAPO3 se encuentra integrado principalmente, por tres subprogramas que son: el BWAPO3, OLUCA-UNAM y WAPO3. El subprograma OLUCA-UNAM soluciona la ecuación modificada de la pendiente suave a través de una aproximación parabólica; es por ello, que esta subrutina no considera los efectos de reflexión del oleaje y presenta ciertas limitaciones para reproducir el fenómeno de la difracción. Sin embargo, la gran fortaleza del OLUCA-UNAM radica que éste resuelve de una manera substancialmente rápida la ecuación modificada de la pendiente suave cuando se desea propagar el oleaje de aguas profundas a aguas intermedias.

Para propagar el oleaje de aguas intermedias a aguas someras, se implementan los módulos WAPO3 y BWAPO3. El subprograma WAPO3, básicamente tiene la función de generar y resolver el sistema de ecuaciones que se genera para conocer los diferentes potenciales de la velocidad local, tanto a lo largo como a lo ancho de la malla computacional o de cálculo. La tarea fundamental que realiza BWAPO3 es construir la malla de cálculo, así como recolectar todos los parámetros que deben proporcionarse para ejecutar la rutina principal MWAPO3. El modelo numérico ha sido calibrado y validado con soluciones analíticas y con datos de laboratorio y campo (*cf.* Silva (2008)).

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

El uso de un modelo numérico que resuelve la ecuación de la pendiente suave permitirá simular de una manera aceptable los fenómenos de reflexión, difracción, refracción y rompiente del oleaje que se producen por la presencia de los arrecifes de coral en el sistema litoral y por las condiciones complejas de los contornos batimétricos que existen en la zona.

5.4. Escenarios de simulación numérica

El oleaje es la fuente de energía más relevante que se puede presentar en las zonas litorales, ya que a partir de éste se originan los distintos procesos morfológicos que configuran a dichas zonas; por esta razón, es imprescindible comprender el cómo las playas de la región noreste del Estado de Quintana Roo se comportan ante la acción del oleaje y cómo las olas llegan a interactuar con el medio marino-terrestre, cuando ante ellas se encuentran obstáculos naturales, ya sean emergidos o sumergidos.

Todas las costas del mundo sufren el embate de las olas, ya sea en condiciones normales o en situaciones donde se presentan ante la costa olas que son generadas por tormentas o eventos meteorológicos extraordinarios. Debido a que se considera, que los escenarios extremos generados por las perturbaciones meteorológicas son los factores que ponen en marcha los mecanismos de retroalimentación, que a su vez, determinan los estados de equilibrio que una playa puede tener, en el mediano y largo plazo; para este trabajo solamente se analiza el efecto del oleaje extremo en la línea de costa.

Para simular la propagación de oleaje en las costas de Quintana Roo, se eligieron tres condiciones de oleaje, con periodos de ocho, diez y doce segundos. A partir de la información del clima marítimo de la zona de Cancún-Punta Maromas, se definió que el oleaje de tormenta sería todo aquel, donde la altura de la ola exceda los dos metros; los periodos del oleaje son los que con mayor frecuencia se presentan con olas extremas en la línea de costa que se analiza. En cuanto a las direcciones de propagación, se consideró que el oleaje que arriba a la playa, principalmente proviene del: (1) noreste, (2) este-noreste, (3) este, (4) este-sureste y (5) sureste.

En la tabla 5.1, se muestran las condiciones de oleaje para los setenta y cinco casos a simular de la propagación del campo de oleaje en la franja costera en cuestión.

5.5. Delimitación de las áreas de estudio

Debido a la relevancia económica y social que emana de los sistemas litorales del noroeste del Estado de Quintana Roo, se ha planteado determinar las posibles implicaciones que tienen los arrecifes de coral, en el comportamiento de todas aquellas playas que los poseen en su frente costero y con ello, realizar una comparación con playas donde no es posible la protección que ofrece el arrecife. Por consiguiente, se decidió dividir la zona que se ubica desde Punta

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Tabla 5.1. Condiciones del oleaje para simulaciones numericas (H_s , Altura de ola; T, periodo del oleaje)

Zona	Dirección				
	NE 45°	ENE 22.5°	E 0°	ESE -22.5°	SE -45°
1	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12
	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10
	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8
2	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12
	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10
	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8
3	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12
	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10
	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8
4	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12
	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10
	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8
5	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12	T = 12
	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10	T = 10
	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8	T = 8
$H_s = 2$ metros					

Maromas hasta Punta Nizuc en diferentes áreas, tomándose a los arrecifes como factor para definir dichas zonas.

Desde una perspectiva geomorfológica, los sistemas de arrecifes se consideran entre los más dinámicos de todo el planeta; dicha valoración se debe en gran medida a la interacción tan estrecha que se observa entre los procesos físicos y biológicos que se desarrollan en ellos. Una de las características más significativas que presentan los arrecifes se basa en su capacidad de fragmentar y repartir el material calcáreo que ellos mismos generan; de hecho, se originan diferentes configuraciones geomorfológicas costeras a partir de la segmentación y distribución de los distintos tamaños de sedimento que el sistema realiza. Sin embargo, otro de los aspectos interesantes que se relaciona con los arrecifes, es su habilidad para construir estructuras biológicas rígidas que moderan la energía del oleaje que impacta sobre ellos, lo cual provoca que los corales tiendan a modificar el ambiente marino en el cual ellos viven. Los arrecifes coralinos albergan una variedad de subsistemas que interactúan y operan en un amplio rango de escalas de tiempo, lo que hace posible ver su formación, destrucción y las respuestas que éstos exhiben ante tormentas y huracanes.

El crecimiento y desarrollo de los arrecifes coralinos dependen de factores ambientales tal como la luz, la temperatura de la superficie del océano y el estado de saturación de los carbonatos. Generalmente, los arrecifes crecerán en aguas donde la temperatura sea mayor a los 17-18°C y menor 33-34°C, con una salinidad promedio del mar (35 ppm con un rango de tolerancia de 25-40 ppm). La sedimentación es otro elemento que limita el crecimiento y el establecimiento de arrecifes de coral, puesto que una gran turbidez en el agua provoca abrasión y un impedimento para que la luz solar llegue a los organismos vivos; por otro lado, los arrecifes no se desarrollarán en la cercanía de fuentes de aportación de sedimentos clásticos, agua dulce o nutrientes (Scoffin et al., 1997).

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Los arrecifes se integran principalmente de una estructura creada por corales, aunque también es posible encontrar que estos se erigen sobre sedimentos, producto de esqueletos o conchas de las distintas especies que se asocian a los mismos arrecifes. Los corales, básicamente son organismos que segregan carbonato de calcio, lo que les permite formar un exoesqueleto en el cual viven. Existe una amplia gama de formas posibles en las cuales los corales se pueden desarrollar, incluyendo extensas colonias que al crecer pueden ramificarse y alcanzar varios metros de longitud o de diámetro.

De manera general, los arrecifes se componen de una zona frontal, cresta y parte posterior. Usualmente, la zona frontal se encuentra orientada hacia el océano y por ello se considera como una zona escarpada que suele fusionarse con la pendiente del arrecife; por otra parte en la cresta del arrecife se presenta el fenómeno de rompimiento de las olas. La zona posterior del arrecife consiste en una región con ambientes más protegidos, que albergan llanuras¹ o lagunas arrecifales.

A pesar que los arrecifes aparentan ser robustos en términos geológicos por ser estructuras masivas que poseen un alto potencial para autopreservarse, también estos sistemas son considerados como frágiles ya que una alteración en factores tales como la luz, la sedimentación y la energía del oleaje influirán en su desarrollo y vulnerabilidad. De las variables antes mencionadas, la energía del oleaje es la que más influye en la evolución de las estructuras arrecifales; los arrecifes se desarrollan cuando la energía de las olas es alta en condiciones normales del oleaje, pero si los corales suelen ser elementos separados, su capacidad de resistencia y crecimiento disminuye por la susceptibilidad al daño que el oleaje les puede provocar (Chappel, 1980). En la actualidad, diversas compañías relacionadas a la protección y relleno de playas, han empleado en sus proyectos de recuperación o estabilidad de playas, soluciones que se encuentran basadas en la implementación de arrecifes artificiales; esta medida, generalmente, se elige para tratar de emular el efecto de disipación de la energía del oleaje que tienen los sistemas arrecifales (ya sea por reflexión o difracción), así como proporcionar zonas de refugio a la flora y fauna marina. Para crear arrecifes artificiales se han utilizado una gran variedad de materiales y técnicas, que van desde módulos especiales de concreto con diversas geometrías (rectangulares, trapezoidales, en forma de campana, etc.) hasta barcos, aviones, automóviles, neumáticos de carros; entre las técnicas utilizadas, la más empleada es la de electrodeposición² (Bohnsack y Sutherland, 1985).

El crecimiento del arrecife y la sedimentación se establecen conforme los términos de retroalimentación que dictan los múltiples procesos físicos y ecológicos que interactúan e influyen en la morfología del arrecife; sin embargo la estabilidad del arrecife, así como los procesos que le permiten alcanzar dicho estado, también se encuentran sujetos a los efectos adversos que producen agentes físicos y biológicos en el sistema. Los huracanes son los elementos físicos más energéticos, que de manera periódica impactan sobre los arrecifes. Las consecuencias que pueden acarrear los eventos extraordinarios en el sistema arrecifal

¹superficies ligeramente horizontales que se localizan en aguas someras.

²la técnica consiste en crear un circuito cerrado entre una malla y el agua, que genera un campo eléctrico que deposita carbonatos de calcio que son extraídos del agua del mar en la malla.

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

dependen de la intensidad y duración de éstos, así como la propia condición del sistema cuando se presentan los ciclones tropicales. Huracanes que desarrollan velocidades de viento de 120-150 km/h causarán que los efectos adversos puedan ser indetectables solo después de una década; eventos meteorológicos extremos que generen campos de viento con magnitudes de 200 km/h ocasionarán que los arrecifes que se vean afectados, recuperen la condición anterior al ciclón después de 50 años o más (Scoffin, 1993).

Los arrecifes de coral pueden ser clasificados tomando en consideración diferentes factores, tales como su morfología, tamaño, relación de rocas no calcáreas, por la comunidad biológica que forman y en algunos casos por la profundidad del agua, donde estos se desarrollan; principalmente, existen tres tipos o modelos morfodinámicos que se utilizan para clasificar los arrecifes de coral, estos son: (1) arrecife bordeante (de franja o marginal), (2) arrecife barrera y (3) arrecife de plataforma. A los arrecifes bordeantes se les considera como los sistemas más simples, puesto que se ubican muy cerca de la costa. Generalmente, el aporte del sedimento de la zona terrestre es mínimo en comparación con la producción del material calcáreo que proviene de los arrecifes; este tipo de arrecife es especialmente vulnerable al cambio de densidad y nutrientes del agua. Dentro de este modelo morfodinámico, Kennedy y Woodroffe (2002) realizaron una subclasificación con seis distintos tipos de arrecifes: a) de depositación y progradación, b) de progradación, c) sobre fango, d) de progradación episódica, e) de cresta y laguna, y f) cresta construida por tormenta. Para el presente trabajo, el modelo de arrecife de cresta y laguna cobra relevancia, ya que este tipo de forma arrecifal es el que se observa en la costa noreste del Estado de Quintana Roo. Este modelo se caracteriza por poseer una laguna somera en la zona posterior del arrecife; en lugar de una planicie que emerge, el sedimento que colmata la laguna, fue depositado después que la cresta del arrecife fue alcanzada por el nivel del mar. El aspecto fundamental que presentan los modelos morfodinámicos de Kennedy y Woodroffe es que estos, se aplican en sitios donde se reconoce un estado de estabilidad entre la playa y los arrecifes y en el cual, el nivel del mar tiene un control sobre el desarrollo de los arrecifes marginales.

Los sistemas arrecifales de tipo barrera difieren de los bordeantes, primordialmente porque los arrecifes bordeantes se encuentran separados de la tierra por una laguna de al menos 10 metros de profundidad. La forma que suelen proyectar estos arrecifes es de una línea semicontinua que protege la tierra del oleaje del mar abierto. En las crestas se pueden apreciar uno o más canales que atraviesan la estructura coralina; en este tipo modelo arrecifal se identifican cayos^{III} donde la refracción del oleaje, ocasiona concentraciones de sedimentos. Finalmente, los arrecifes de plataforma son todos aquellos sistemas que son más complejos que los arrecifes de barrera y que se localizan a través de las márgenes continentales.

En la vertiente atlántica del litoral Mexicano, el ambiente subtropical ha permitido el desarrollo de regiones donde es posible detectar los principales sistemas arrecifales del Golfo de México y Mar Caribe. En esta área se localizan los arrecifes coralinos del: Suroeste del Golfo de México, Banco de Campeche y Caribe. La costa de Quintana Roo ofrece la posibilidad de estudiar y analizar la interdependencia que existe entre las playas y los arrecifes de coral,

^{III}islotos de arena de tamaño reducido.

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

ya que en dicha línea de costa se ubica el arrecife de coral mexicano del Caribe, que forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (*SAM*). El *SAM* se extiende desde el noreste de la Península de Yucatán, continuando por Belice y Guatemala hasta las islas de la Bahía en Honduras; este sistema se considera como la segunda barrera arrecifal más larga del mundo con 1,000 kilómetros de largo, aproximadamente (García et al., 2006).

Los arrecifes coralinos del Caribe se sitúan dentro del rubro de bordeantes, de acuerdo a la clasificación de los sistemas arrecifales; sin embargo, en la región es más común encontrar sistemas de cresta y laguna.

El sistema arrecifal del Caribe se divide en tres sectores, el norte, central y sur (Jordan y Rodríguez, 2003); en la línea de costa que se analiza, se ubica la zona norte de dicho arrecife. A excepción de las zonas de Cancún y Punta Maromas, el tipo de estructuras arrecifales que predominan en este sector son los bordeantes de cresta y laguna; la cresta se encuentra ampliamente poblada de coral, mientras que en el frente del arrecife existen colonias de corales de terreno^{IV}.

Para estudiar de una manera global cómo los arrecifes influyen en la estabilidad de las playas del noreste del Estado Quintana Roo, la zona de interés se dividió en cinco sectores diferentes. Las zonas fueron definidas considerando la presencia y protección que proporcionan los arrecifes, en las playas. Se constituyó como una área de estudio, la costa que está comprendida entre Punta Cancún y Punta Nizuc, ya que en el sistema litoral de dicha zona no se identifican arrecifes bordeantes cresta-laguna; sin embargo, por los antecedentes geológicos de la isla barrena en el Pleistoceno podría considerarse que en la zona existiera un arrecife de plataforma que no ofrece ninguna protección a las playas (figura 5.1.1). Para la siguiente área de estudio, de Punta Nizuc a Punta Caracol, las playas se consideraron como parcialmente protegidas por arrecifes de coral semi-emergidos (figura 5.1.2); mientras que el área de Punta Caracol a Punta Petempich se consideró como una zona, en la cual se identifican arrecifes de coral sumergidos que protegen la playa (figura 5.1.3). Por otro lado, en la región cuatro existe estructuras arrecifales sumergidas que protegen la mayor parte del litoral (figura 5.2.4). Tanto la zona de Cancún como la existente entre Punta Brava y Punta Maromas (figura 5.2.5), no presentan arrecifes del tipo bordeante, sin embargo, esta zonas se delimitaron para observar el comportamiento que tienen la playa, debido el efecto que producen los contornos batimétricos. En la figuras (5.1, 5.2) se muestran en los incisos *a*) la delimitación de las zonas de estudio, según la clasificación por profundidad de los arrecifes; mientras que en los incisos *b*) se observa la tipología de las estructuras arrecifales según su morfología.

^{IV} corales duros, colonizados por un ensamblaje de múltiples especies y esponjas.

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

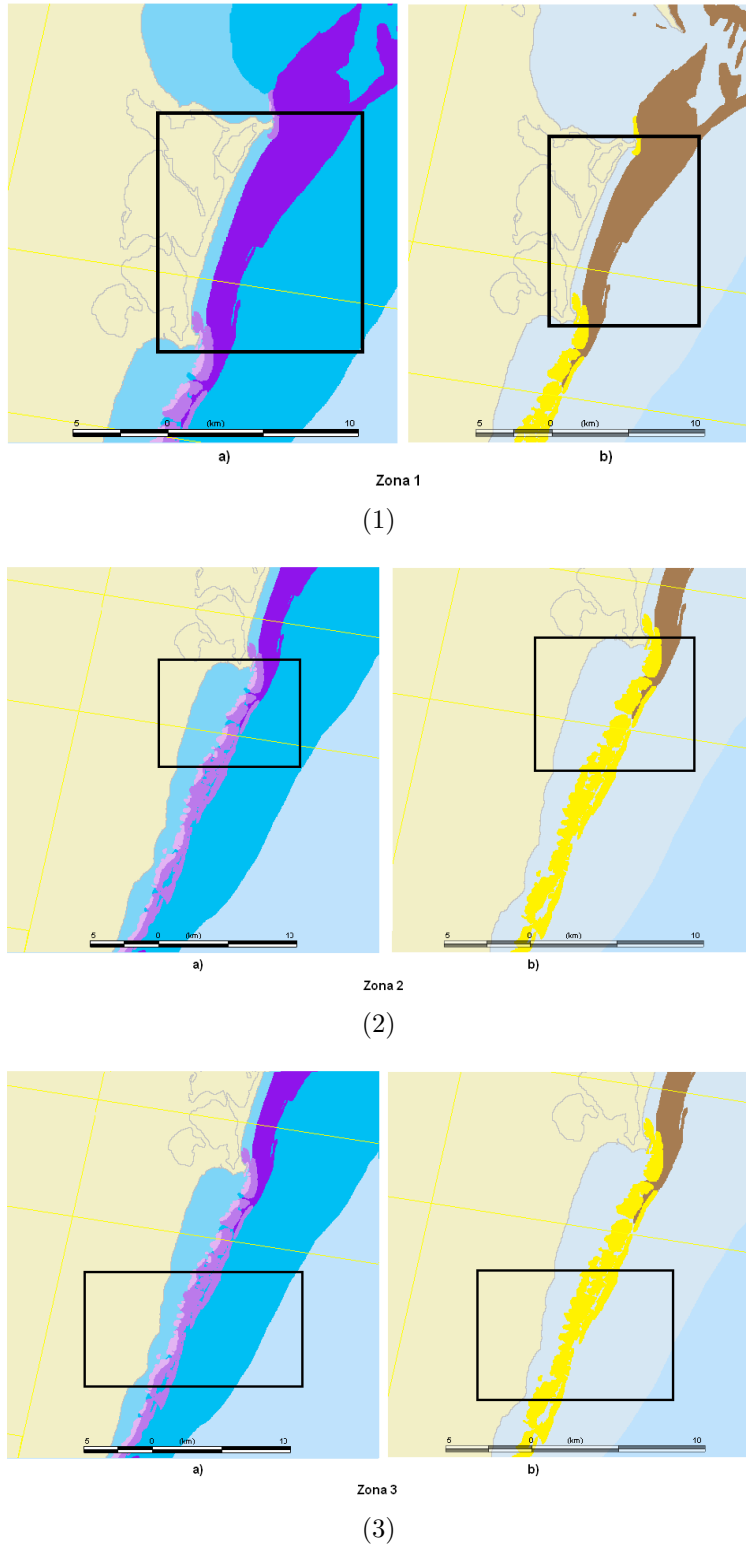
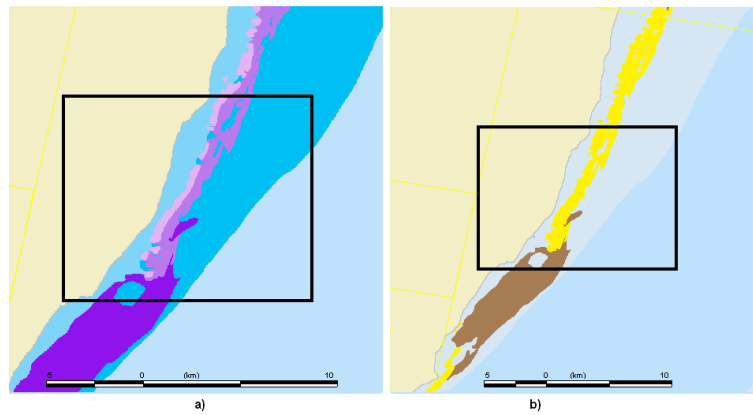


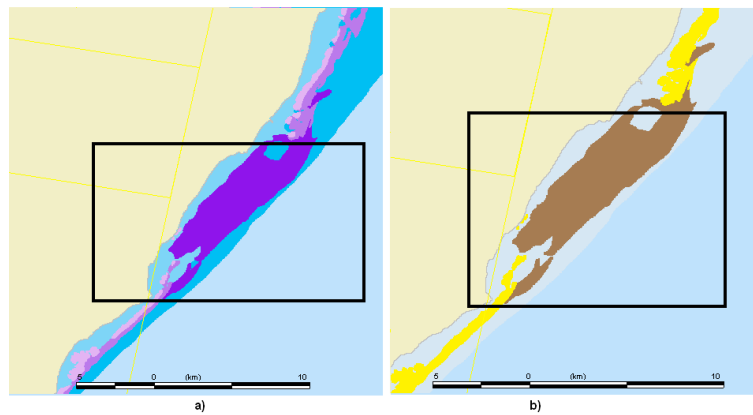
Figura 5.1. Definición de zonas de estudio: (1) Zona 1, (2) Zona 2, (3) Zona 3 (Modificado, UNEP-WCWC)

**CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA
HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO**



Zona 4

(4)



Zona 5

(5)

<ul style="list-style-type: none"> ■ Barrera ■ Bordeante Cresta-laguna ■ Parche ■ De plataforma o banco 	Tipo de arrecife
<ul style="list-style-type: none"> ■ Somero ■ Intermedias ■ Profundo 	Profundidad del arrecife
<ul style="list-style-type: none"> ■ Somero ■ Intermedias ■ Profundo 	Profundidad del agua

(6)

Figura 5.2. Definición de zonas de estudio: (4) Zona 4, (5) Zona 5, (6) Tabla de colores (Modificado, UNEP-WCWC)

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Delimitadas las zonas de estudio y con la información recopilada en el trabajo de campo, se definieron las batimetrías que alimentarían el modelo numérico.

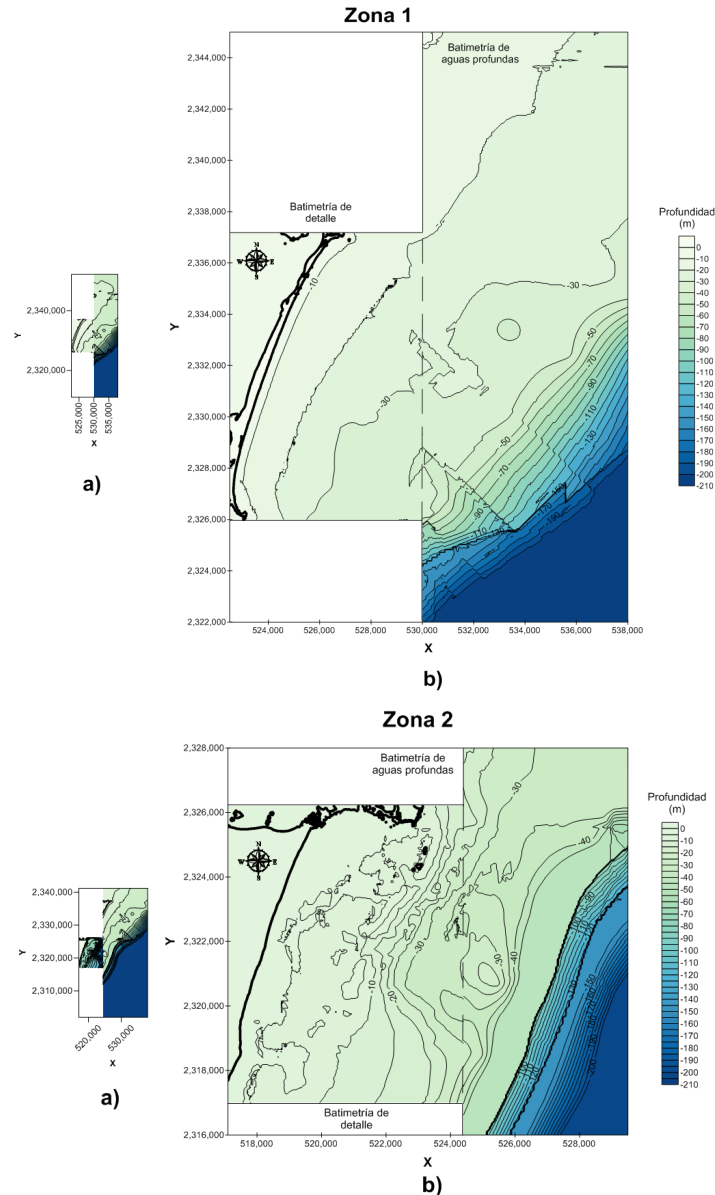


Figura 5.3. Batimetrías de las zonas de estudio

Con el objeto de simular lo mejor posible, los fenómenos producidos por la transformación del oleaje, se utilizaron los datos de las batimetrías en aguas profundas (batimetría de aproximación) y la información correspondiente a las contornos batimétricos en aguas someras (batimetría de detalle), en las figuras 5.3 y 5.4 se presentan en los incisos: a) las áreas de ambas batimetrías y en b) un detalle de dichas batimetrías.

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

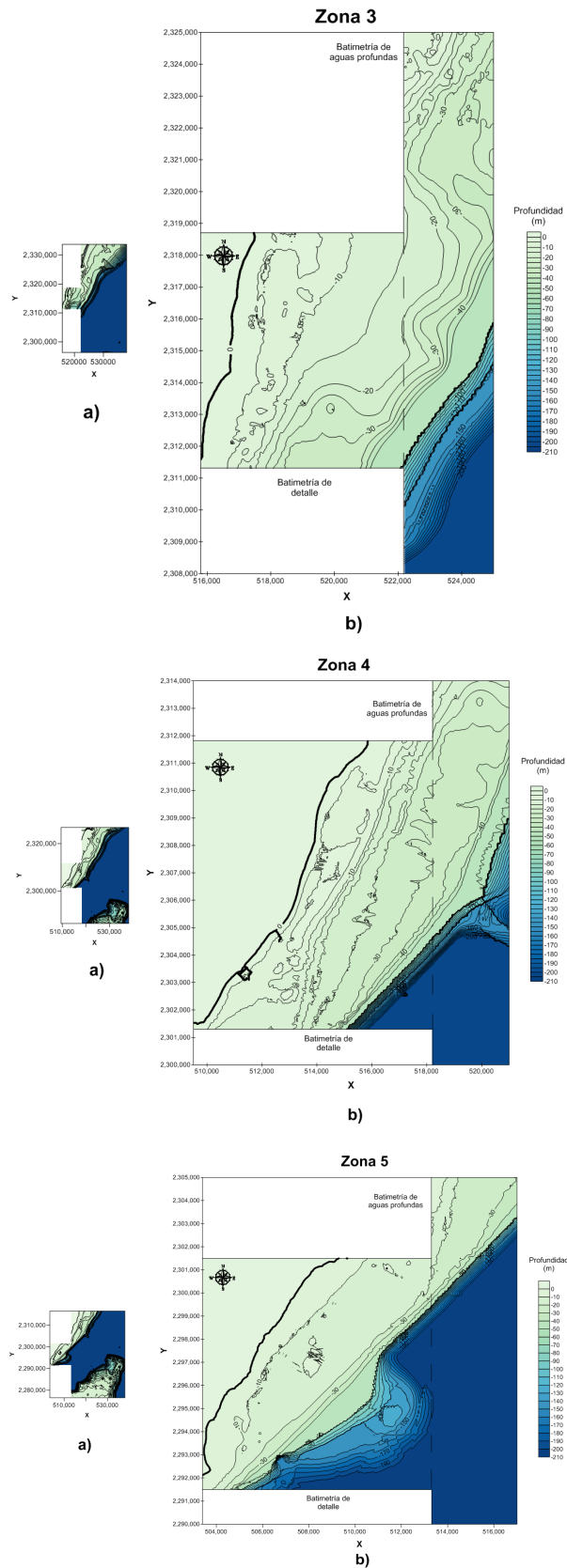


Figura 5.4. Batimetrías de las zonas de estudio, continuación

5.6. Condiciones hidrodinámicas en la costa noreste del Estado de Quintana Roo

5.6.1. Zona 1, Cancún

Los resultados de las simulaciones numéricas se exponen mediante el uso de mapas que reflejan el comportamiento de (1) la superficie libre del agua (frentes del oleaje), (2) altura de la ola y (3) energía del oleaje. En Cancún por las condiciones geológicas y geomorfológicas que prevalecen, los efectos antropogénicos, así como no tener una protección natural a lo largo de la línea de playa (como la que brinda un sistema arrecifal), los problemas de erosión son considerados como graves. Sobre el comportamiento morfodinámico de esta isla barrera se han desarrollado diversos estudios (*cf.* Diez et al. (2009)) y análisis (*e.g.* Morán et al. (2007); Silva (2008b)) que han aportado nuevos elementos con los cuales ha sido posible concebir cómo las playas interactúan con los distintos fenómenos y procesos que se presentan en ellas. Los resultados que se obtuvieron de las simulaciones numéricas que fueron realizadas para este trabajo, en el caso de la zona de Cancún, consolidan las conjeturas referentes a que la pérdida de sedimento de la playa, se debe en gran medida a la energía del oleaje que recibe la costa, así como las condiciones batimétricas, que son aprovechadas por las corrientes litorales y el transporte de sedimento para desalojar la arena del sistema. Para la zona de Cancún, de los múltiples escenarios que se plantearon, los casos con periodo del oleaje de 12 segundos fueron los más desfavorables para las playas de la región.

El campo de oleaje se modifica a medida que se propaga desde aguas profundas hacia la costa. Cuando las olas empiezan a interactuar directamente con el fondo del mar, tanto el efecto de fondo (someramiento) como la refracción ocasionan un incremento en las amplitudes del oleaje; conforme las olas se aproximan a las playas, se observará un aumento gradual en la altura del oleaje. Si un evento meteorológico genera vientos que provocan la formación de una tormenta que produce un oleaje con alturas aproximadas de dos metros y un periodo de 12 segundos en las aguas profundas, las alturas máximas de las olas que arriban a las playas de la isla barrera de Cancún oscilan en un rango de cuatro a seis metros. En las figuras 5.5, 5.6, 5.7 se muestran los mapas del comportamiento de las olas en la zona de Cancún; el tren del oleaje que se aproxima a la costa se presenta en los incisos a), mientras que en los incisos b) se exhiben los mapas de la distribución espacial de las diferentes alturas de ola que componen el campo de oleaje. Si la línea de playa se dividiera en una sección central (Playa Marlin ($x=524,787.3, y=2,334,004$) a San Miguelito ($x=523,201.6, y=2,329,910$)), norte (Playa Marlin a Punta Cancún ($x= 526,768.9, y=2,337,057$)) y sur (San Miguelito a Playa Nizuc ($x=522,979.3, y=2,326,112$))), de manera general se observaría que en todas las playas de éstas secciones, la energía del oleaje se disipaba sobre de ellas; dependiendo de la dirección del oleaje, el componente energético se presentaba en las playas con mayor o menor intensidad.

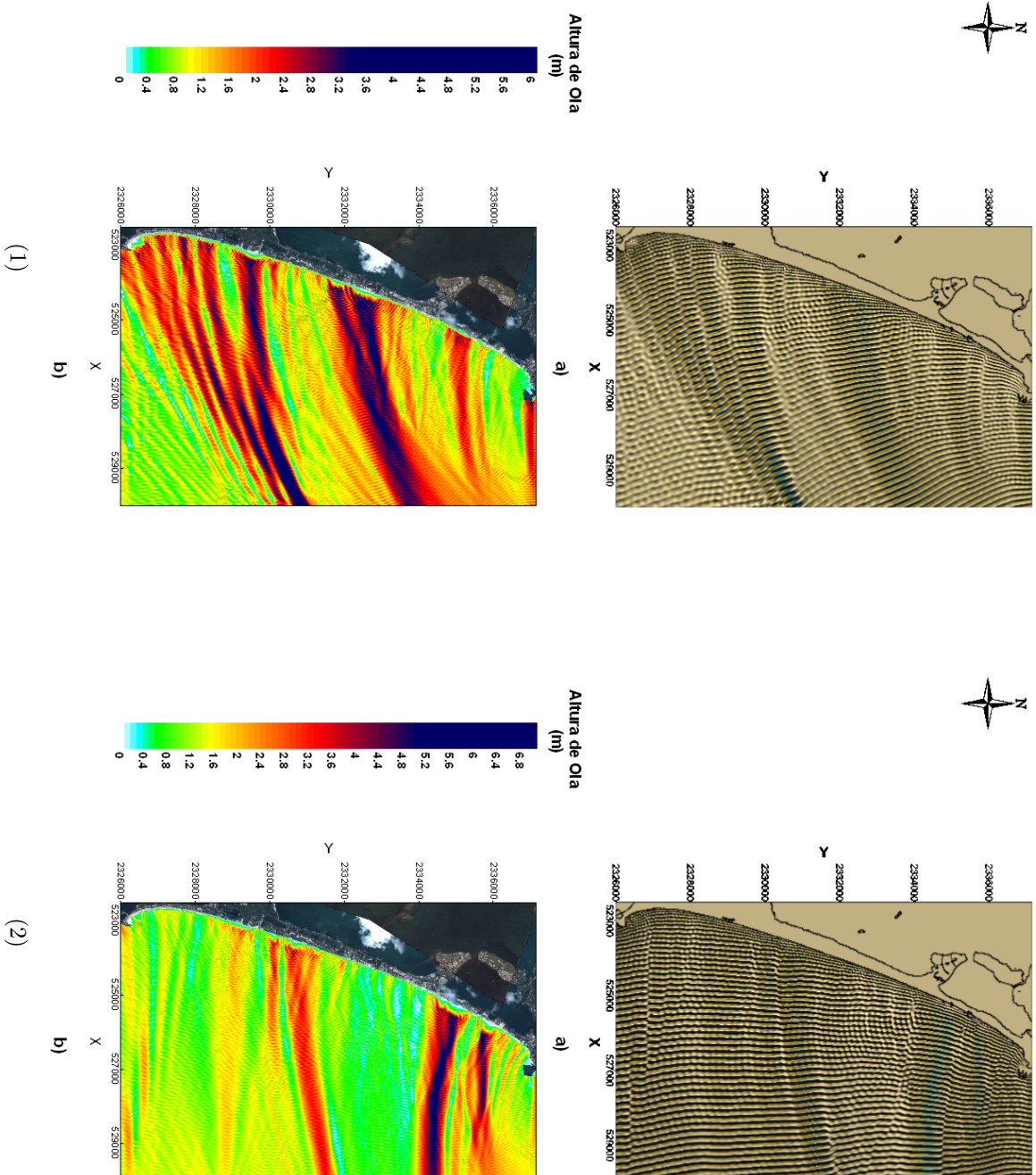


Figura 5.5. Comportamiento del oleaje para la zona 1: (1) $\theta = 45^\circ$ (NE), $T = 12s$, (2) $\theta = 22.5^\circ$ (ENE), $T = 12s$

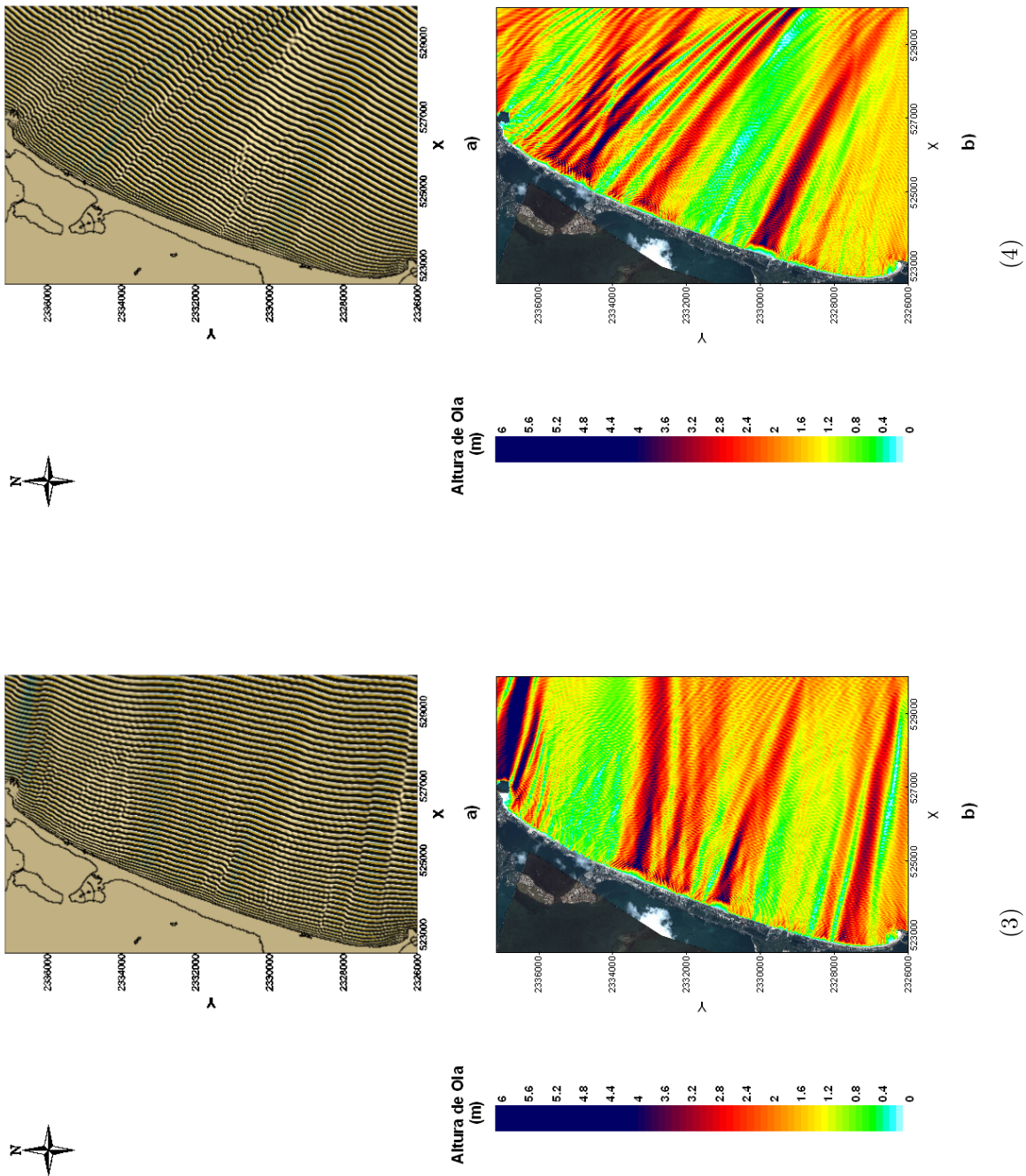
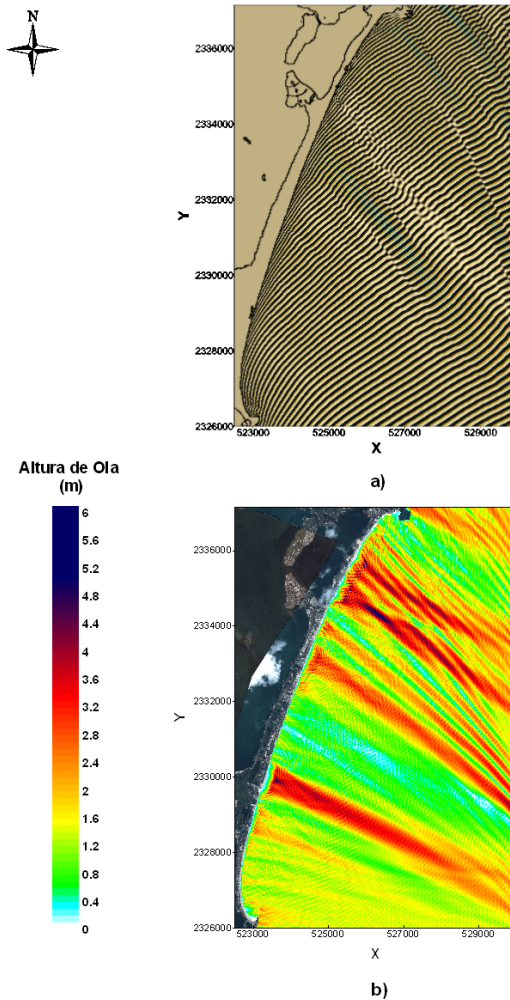


Figura 5.6. Comportamiento del oleaje para la zona 1: (3) $\theta = 0^\circ (E)$, $T = 12s$, (4) $\theta = -22.5^\circ (ESE)$, $T = 12s$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO



(5)

Figura 5.7. Comportamiento del oleaje para la zona 1: (5), $\theta = -45^\circ$ (SE), $T = 12s$

En la figura 5.5(1)b se aprecia como un 80 % de las playas de Cancún son impactadas en una tormenta, con olas mayores a los 2 metros; cuando el oleaje proviene de la dirección noreste, la región central de la isla barrera se identifica como la parte donde se registran olas mayores que fluctúan entre 3 y 6 metros de altura. Cuando el oleaje de tormenta impacta en la línea de playa de Cancún, la zona donde la ola rompe en condiciones de un régimen medio, se desplaza hacia otras zonas del perfil transversal de la playa, lo que provoca que una parte del sedimento se deposite en la duna o más allá de ella. Una vez que se disipa la tormenta, los mecanismos de retroalimentación de la playa tratarán de reestablecer las condiciones que existían antes del evento extraordinario.

Desafortunadamente, debido al estado de equilibrio metaestable o hiperestático que tienen las playas en Cancún (que ha sido provocado en gran medida por todas las edificaciones del ser humano sobre la duna de la playa) y las condiciones que dictan los contornos batimétricos,

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

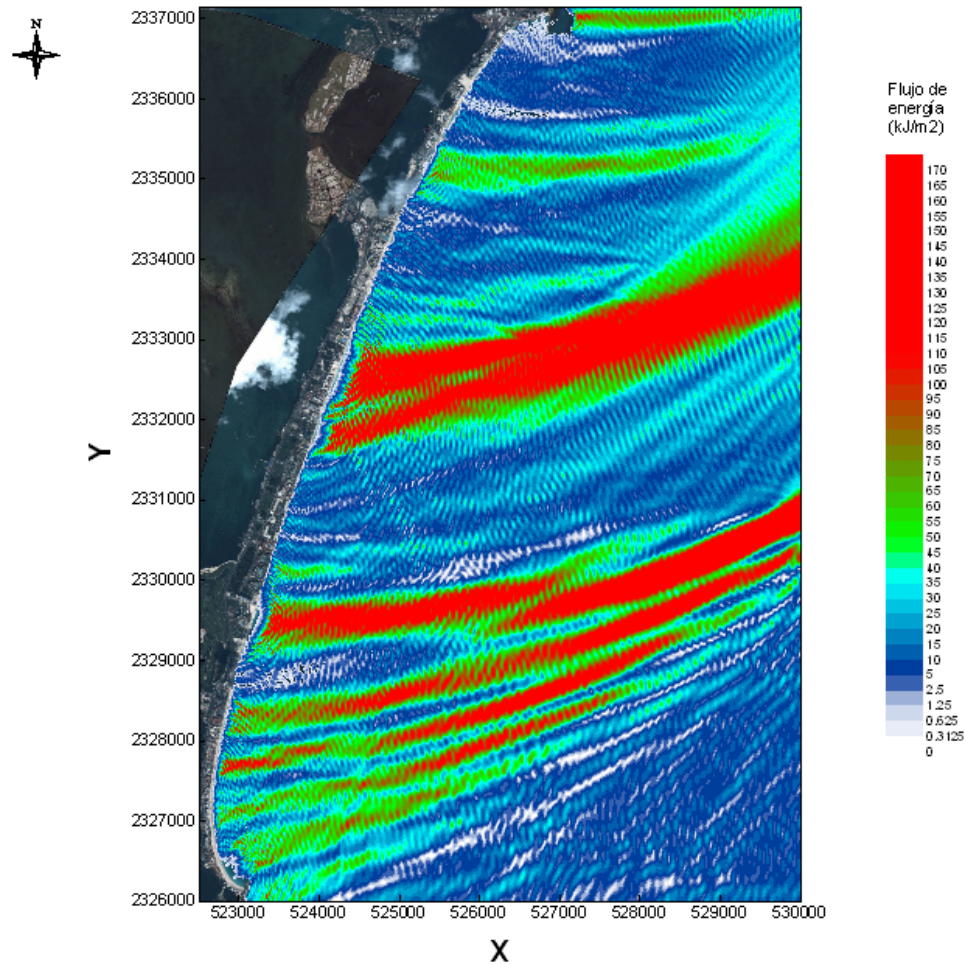


Figura 5.8. Comportamiento de la energía del oleaje para la zona 1, $\theta = \text{NE}$, $T=12\text{s}$

los procesos de retroalimentación no tienen la capacidad de reestablecer el estado inicial de la playa, antes que se iniciara la tormenta.

Como se ha mencionado, cuando el oleaje proviene del noreste, una gran cantidad de las playas de la isla barrera, resisten el embate de las olas de 2 a 6 metros de altura; en la figura 5.8 se pueden observar los múltiples canales de energía que se generan por el oleaje. La retroalimentación negativa, que proporcionan las bocas litorales intermitentes que se abren en condiciones de tormenta, puede considerarse nula; la retroalimentación positiva que proviene de las barras y de las dunas funciona parcialmente. Se postula que cierto volumen de la arena que acarrea el oleaje, tiende a depositarse en el fondo marino donde la profundidad del agua no sobrepasa los diez metros, pero posiblemente por la aparición de canales marinos, el sedimento depositado se mueve hacia la zona que se encuentra marcada como arrecife de plataforma (fig. 5.1); cuando la arena se encuentra en ese sector, la corriente costera que fluye de manera paralela al litoral en dirección norte-sur es la encargada de desalojar el

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

material fuera de la celda. La pendiente del lecho marino que existe hasta una profundidad de 10 metros puede considerarse suave, pero después de dicha profundidad, los contornos batimétricos forman una configuración similar a un escalón marino, que precisamente coincide con la zonificación del arrecife de plataforma; lo que permitiría explicar el por qué el oleaje no es capaz de transportar el volumen del sedimento que se deposita en el fondo marino durante la tormenta. Por otro lado, por efecto de la marea de la tormenta, la arena llega a sedimentarse sobre el sistema lagunar y sobre la isla barrera. La misma tormenta, antes del establecimiento de los complejos turísticos, abría bocas litorales intermitentes a través de las cuales parte de ese material granular era reintegrado directamente a la playa y junto con material depositado en las dunas y en las barras sumergidas, reestablecían el estado de equilibrio de la playa.

Cuando la dirección principal de la propagación del oleaje proviene del este-noreste (fig. 5.5(2)), en las playas del sector norte de Cancún es donde se observa que las alturas de ola pueden alcanzar valores superiores a los 4.8 metros, solamente una parte de la línea de playa del sector central recibirá olas con alturas de 2 a 3.6 metros; mientras que el rango de las alturas del campo de oleaje que se presenta en el sector sur varía de 0.6 a 2 metros. Este escenario se considera como el más favorable para Cancún, respecto al oleaje que llega a la playa; solamente el sector norte es donde se reconocen zonas donde el proceso de erosión pudiera generarse.

En la figura 5.6(3), correspondiente a la dirección este, se identifica que el sector donde se presentarán problemas de erosión es en el central, donde las alturas de la ola se encuentran en un rango de 3.2 a 6 metros. La peculiaridad que se identifica en este escenario se localiza en Punta Nizuc, en el cual se recibe más energía del oleaje. Cabe señalar que en Punta Nizuc, se ubican los vestigios de un sistema arrecifal bordeante y que aunado a la protección que ofrece la punta (originándose una playa encajada), esta área es la más protegida de todo el sistema litoral. Sin embargo dicha zona es una de las que presenta mayores problemas de erosión, puesto que la protección natural que posee solamente es efectiva bajo oleajes con dirección este-noreste.

Tanto en el sector central como en el norte de Cancún, para un oleaje de dirección este-sureste (fig. 5.6(4)) se detectan amplias zonas donde las alturas de las olas sobrepasan los cuatro metros. Cabe señalar, que el comportamiento que muestran los oleajes en las direcciones este-sureste y sureste, exhiben el mismo patrón de comportamiento, la diferencia entre ambas direcciones estriba en que las magnitudes de las olas, cuando provienen del sureste (fig. 5.7), suelen ser menores que las que llegan del este-sureste. Revisando los mapas de las alturas del oleaje referentes a las zonas este-noreste y este, no se observan patrones similares.

A partir del análisis del comportamiento de las alturas de las olas y la energía del oleaje, es posible determinar en cuáles zonas de la isla barrera, se tendrán problemas de erosión. Se espera que todos los hoteles que se encuentran ubicados entre Playa Marlin y San Miguelito, sean los más vulnerables al embate del oleaje de tormenta, así como a grandes problemas de erosión en sus playas. Con la información recopilada de las características de los sedimentos de Cancún y mediante el análisis del diámetro del percentil 50avo., se observó una tendencia en

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

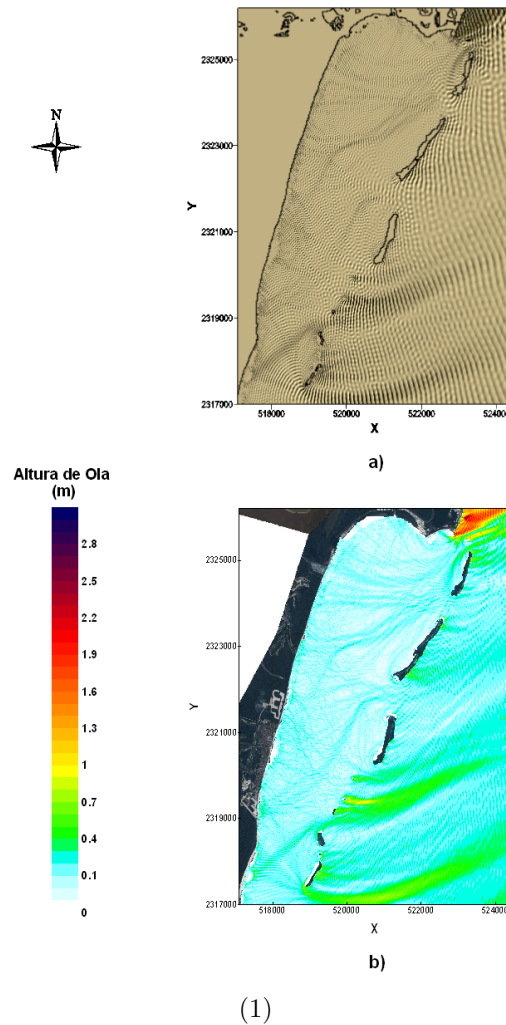


Figura 5.9. Comportamiento del oleaje para la zona 2: (1), $\theta = 45^\circ(NE)$, $T = 12s$

la cual los diámetros más finos (0.25 mm) que se localizaban en el sector norte, se desplazaban hacia la zona central de la isla barrera; mientras que los sedimentos de dicha zona que eran de 0.41 mm eran desplazados hacia Punta Nizuc, donde se encontraron arenas de 0.63 mm. Debido a que una parte de la arena que se desplaza de las zonas donde se presentan las mayores alturas de las olas, se traslada a zonas de menor energía a lo largo de la isla barrera, solamente el sedimento más grueso sería el que se mueve a través de las playas, hasta llegar un mínimo volumen de éste a la punta sur; mientras la mayor cantidad de sedimentos finos y medianos se irían perdiendo al desplazarse de manera paralela a la costa.

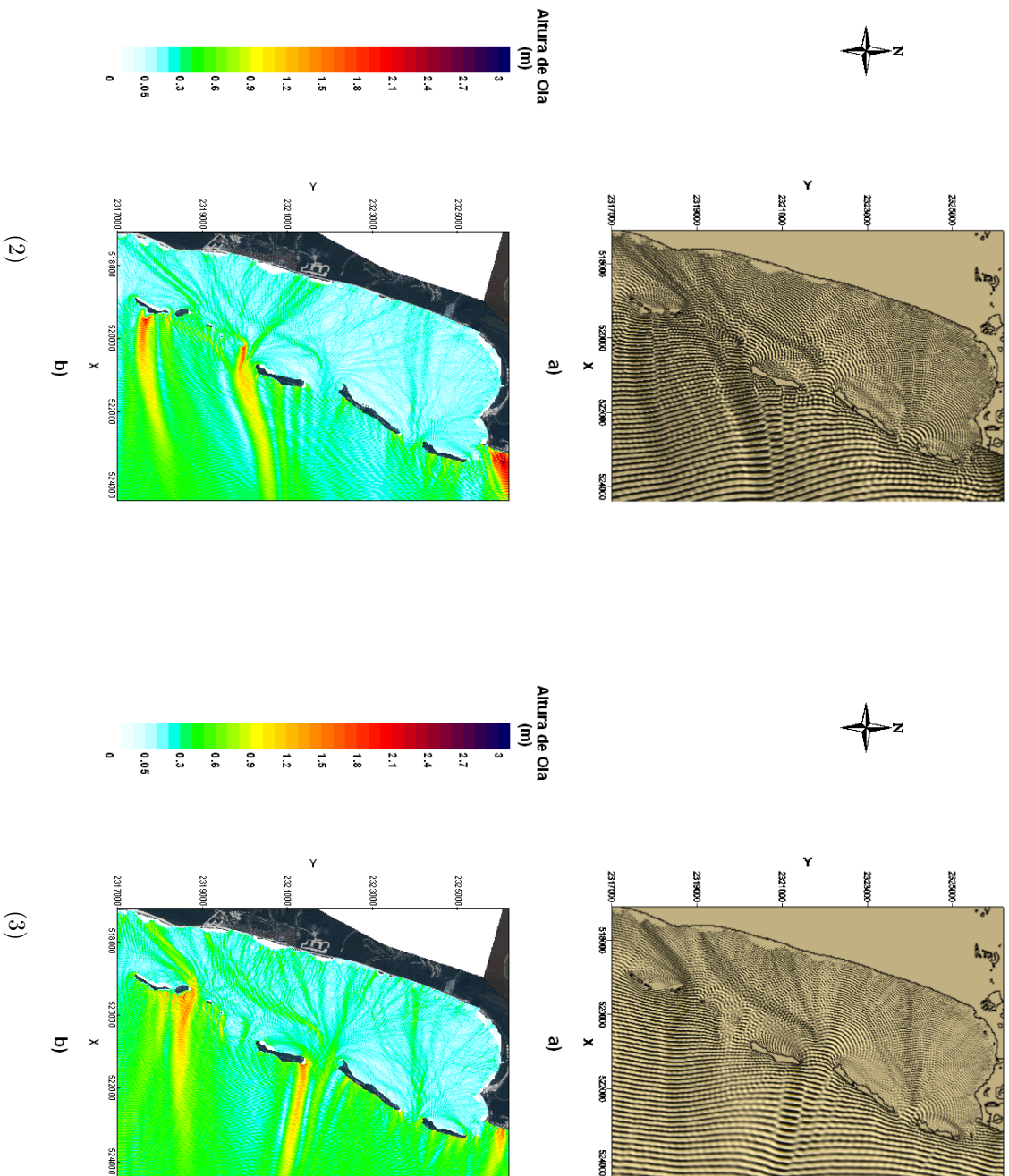


Figura 5.10. Comportamiento del oleaje para la zona 2: (2) $\theta = 22.5^\circ$ (ENE), $T = 12s$, (3) $\theta = 0^\circ$ (E), $T = 12s$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

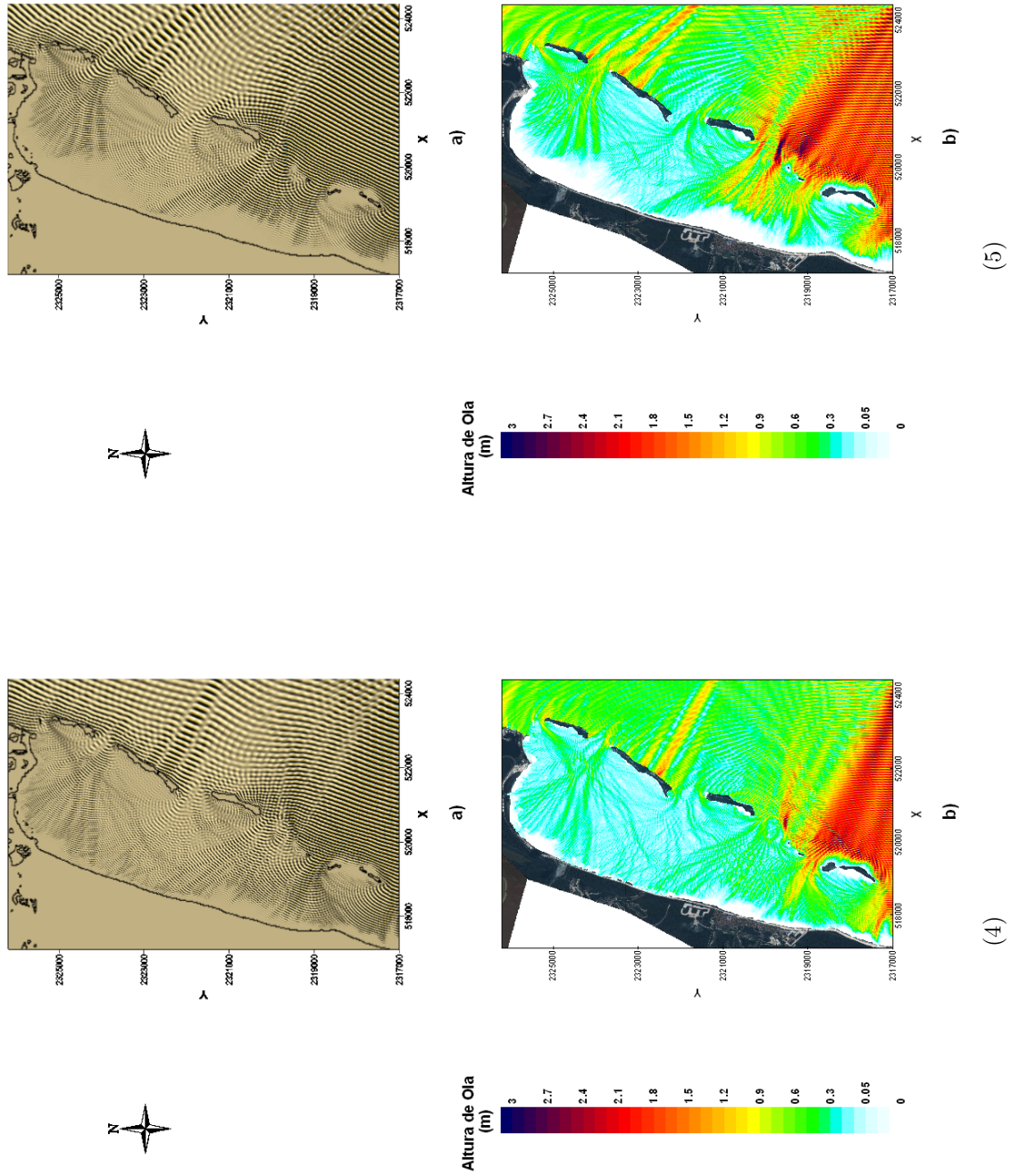


Figura 5.11. Comportamiento del oleaje para la zona 2: (4) $\theta = -22.5^\circ(ESE)$, $T = 12s$, (5) $\theta = -45^\circ(SE)$, $T = 12s$

5.6.2. Zona 2, Punta Nizuc - Punta Caracol

El resultado de los diversos escenarios que se han planteado para la propagación del oleaje en la zona que se encuentra delimitada por Punta Nizuc y Punta Caracol, se muestran en las figuras 5.9, 5.10, 5.11. Las playas que se ubican dentro de las márgenes de esta región se encuentran protegidas por una serie de arrecifes bordeantes que parcialmente emergen del agua. Para visualizar el comportamiento que tienen los arrecifes como estructuras que generan la difracción y la reflexión de la olas, así como analizar el fenómeno de la refracción dentro de la laguna arrecifal, no se permitió el rebase del oleaje sobre los arrecifes que sobresalen por encima de la superficie libre del agua.

De manera contraria al caso de Cancún, cuando las olas se aproximan a la costa desde una dirección noreste, la línea de playa recibe una menor cantidad de energía, ya que la altura del oleaje en las playas se encuentra en un rango de 0.1 a 1.2 metros (fig. 5.9(1)b); lo relevante de este escenario es observar la difracción y refracción del oleaje que ocurre en la laguna arrecifal; los arrecifes atenúan la altura de ola y por ende, la energía del oleaje en la parte posterior del arrecife. Los patrones de comportamiento de la superficie libre del agua (fig. 5.9(1)a) hacen suponer que se forman canales por los cuales ingresan las olas a la región y a su vez, posiblemente, alguna cantidad de sedimento, que conduce la corriente paralela a la línea de costa que va de norte a sur.

Para los escenarios donde las olas provienen de las direcciones este-noreste (fig. 5.10(2)b) y este (fig. 5.10(3)b) el comportamiento es muy similar al que se presenta en el caso noreste (fig. 5.9(1)b). Cuando el oleaje que llega a la playa con una dirección este-noreste, en la laguna arrecifal se presenta la mayor agitación del campo de oleaje, con respecto a los otros escenarios (fig. 5.10(2)a); los canales gradualmente comienzan a ser evidentes conforme las olas arriban del noreste al este.

En cualquiera de los cinco escenarios previstos para esta zona, las mayores alturas de ola registradas se presentarán en la región frontal del arrecife. Los valores extremos, en cuanto a la altura del oleaje, se observan cuando las olas que se aproximan a los arrecifes llegan de las direcciones este-sureste (fig. 5.11(4)) y sureste (fig. 5.11(5)), el rango de valores máximos varía de 1.5 a 2.6 metros. En cuanto a la relevancia de las transformaciones del oleaje que se observan en la laguna arrecifal, la difracción es el fenómeno que produce la agitación en dicha región del sistema coralino; en los mapas del comportamiento de la superficie libre del agua, se pueden notar como las características del oleaje decrecen de una manera importante, después que el oleaje traspasa el área de los corales. El hecho que los arrecifes se encuentren segmentados es relevante para la estabilidad de la playa, ya que se considera que el oleaje tiende a socavar de una manera superficial el fondo marino, creando conductos que son utilizados por las corrientes marinas para sacar sedimentos de la celda litoral. En condiciones normales, las corrientes que se forman dentro de la laguna litoral se desplazan en dirección norte-sur, éstas aprovechan las aperturas existentes en el cordón arrecifal para hacer fluir el agua y el sedimento a través de dichas interrupciones; el patrón de circulación puede cambiar al presentarse un huracán en la región, ya que dependiendo de la trayectoria del ojo del huracán los efectos que produce en el oleaje y en las corrientes, tanto la arena como el agua

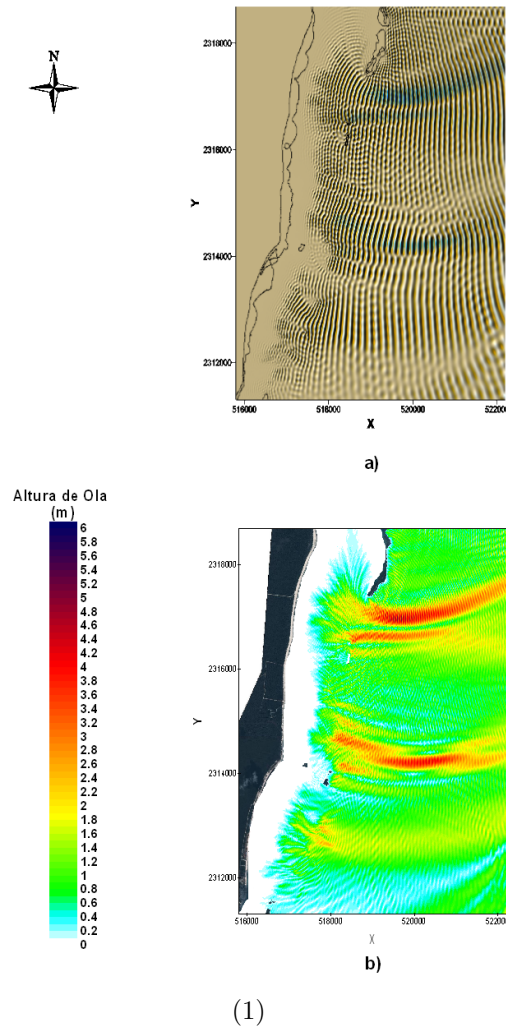


Figura 5.12. Comportamiento del oleaje para la zona 3: (1), $\theta = 45^\circ(NE)$, $T = 12s$

sea desalojados por la región norte de ésta zona a través de los canales que se forman entre los arrecifes.

5.6.3. Zona 3, Punta Caracol - Punta Pemtempich

Para la zona 3 que se encuentra entre Punta Caracol y Punta Pemtempich se muestran los resultados obtenidos de la propagación del oleaje en las figuras 5.12, 5.13, 5.14. En esta región predominantemente existen arrecifes del tipo bordeante sumergidos, solamente en la periferia de Punta Caracol existe un segmento de arrecife emergido. Prácticamente, el arrecife sumergido se puede localizar desde una profundidad de 3 hasta 7.5 metros, después de este último calado la pendiente de fondo se suaviza hasta un nivel 30 metros por encima del nivel medio del mar, lo que genera una gran planicie; a partir de esta profundidad se presenta una región donde existe una pendiente pronunciada y otra pequeña planicie, a la que le sigue una

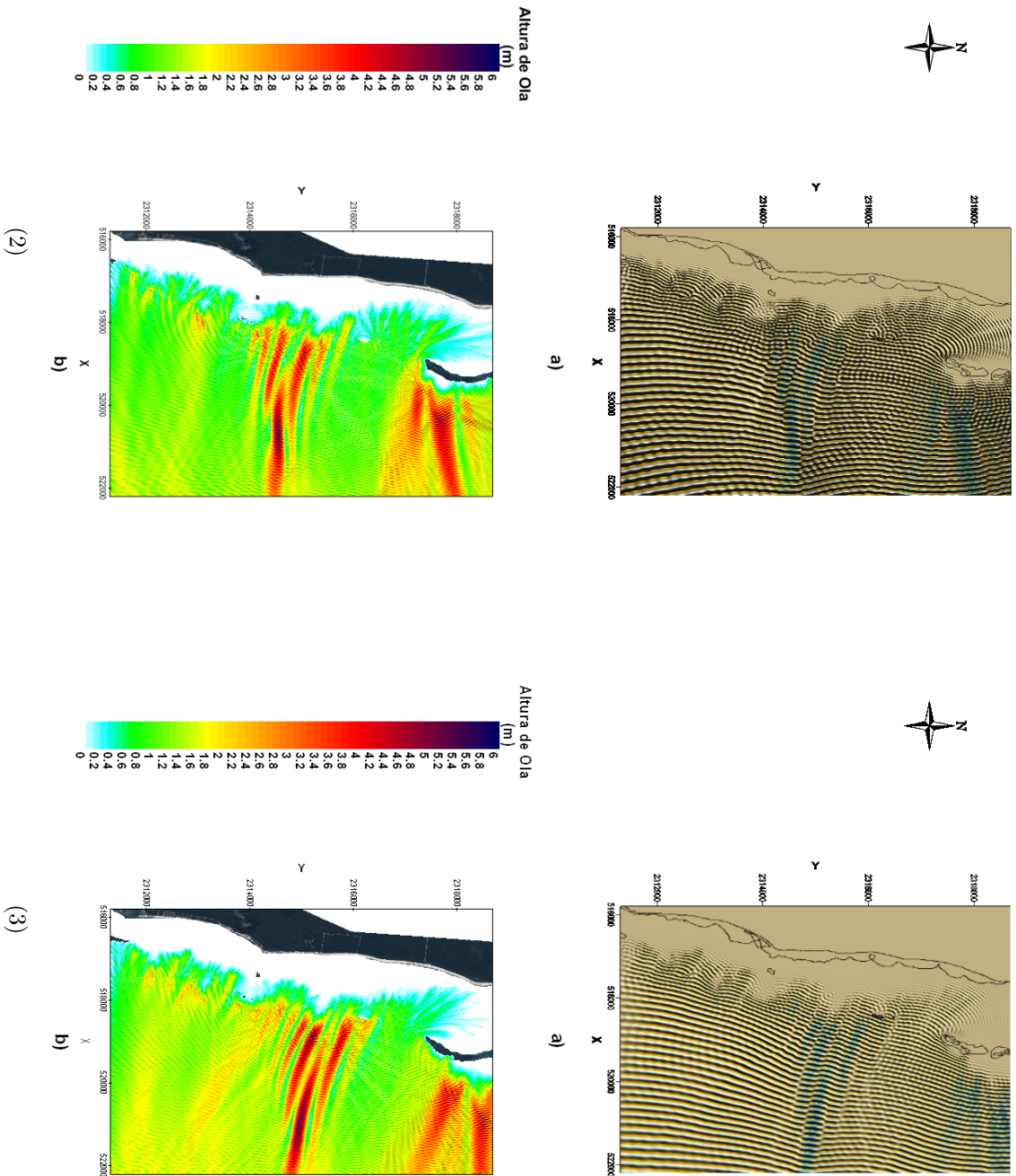
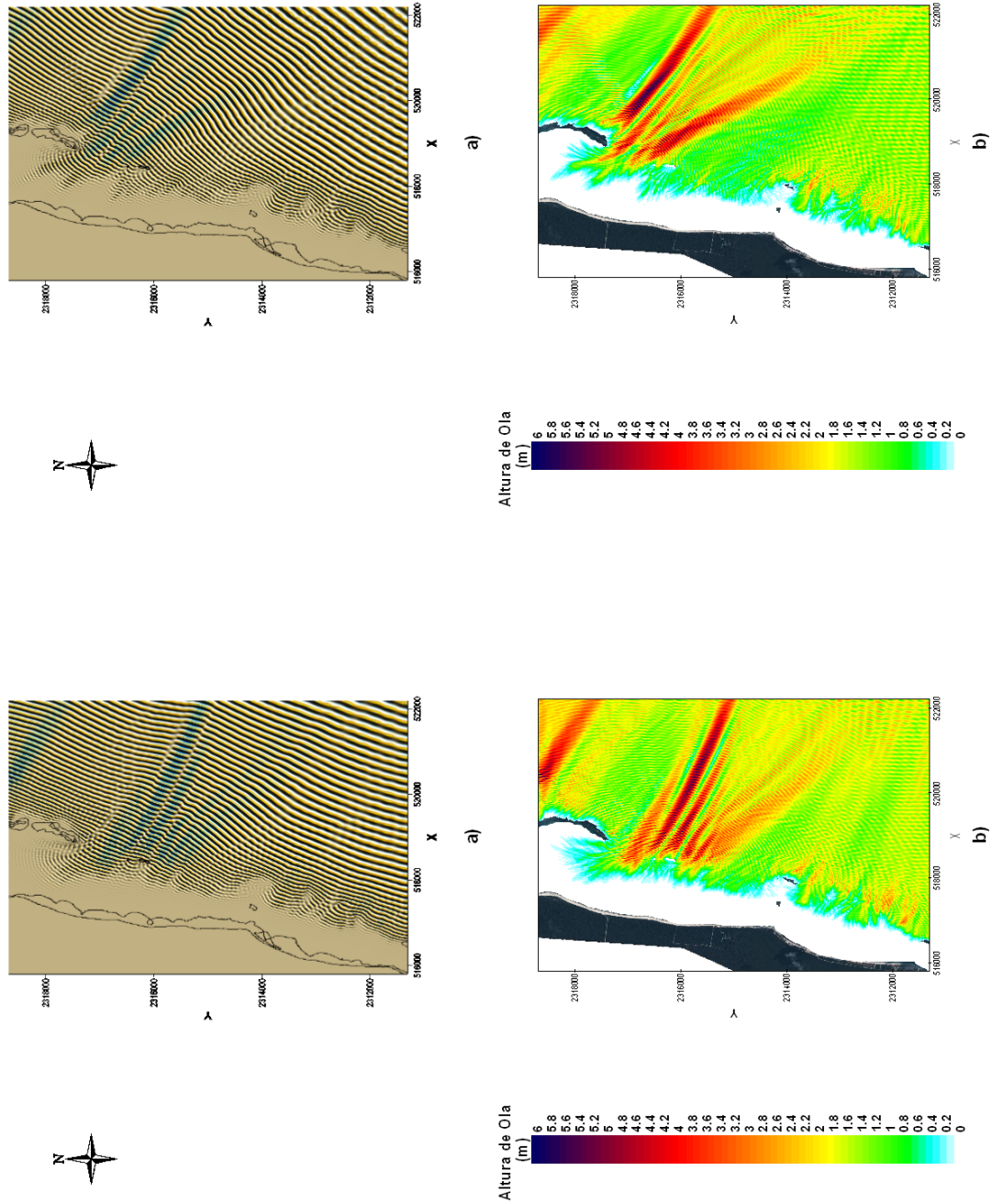


Figura 5.13. Comportamiento del oleaje para la zona 3: (2) $\theta = 22.5^\circ$ (ENE), $T = 12s$, (3) $\theta = 0^\circ$ (E), $T = 12s$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO



(4)

(5)

Figura 5.14. Comportamiento del oleaje para la zona 3: (4) $\theta = -22.5^\circ$ (ESE), $T = 12s$, (5) $\theta = -45^\circ$ (SE), $T = 12s$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

depresión submarina; dicha configuración se asemeja a la forma de dos escalones marinos. Es precisamente este efecto del fondo marino sobre el oleaje, lo que genera que las alturas de la ola en la parte frontal del arrecife sean del orden de 1 a 2 metros.

El comportamiento que exhiben los patrones de las olas confirman la presencia de los arrecifes, ya que éstos disipan solamente una parte de la energía del oleaje; por ejemplo, si la dirección de propagación proviene del este-sureste y sureste, es evidente el efecto que tienen los arrecifes sumergidos que se encuentra al frente de Punta Tanchaté, puesto que generan la difracción que se identifica en los mapas de las figuras 5.14(4)a y 5.14(5)a. Por otro lado, los frentes de las olas que ingresan a la laguna arrecifal entre la punta antes mencionada y Punta Caracol, tienen el mismo comportamiento que el oleaje muestra en la parte frontal del arrecife.

En el sitio donde se presenta la transición del arrecife emergido y el sumergido se encuentra un canal que separa ambos arrecifes, precisamente en esta región es donde se registran las máximas alturas de ola, que van desde los 2 a los 4 metros. La mayor agitación en la laguna arrecifal se manifiesta cuando el oleaje tiene una dirección este-noreste (fig. 5.13(2)a).

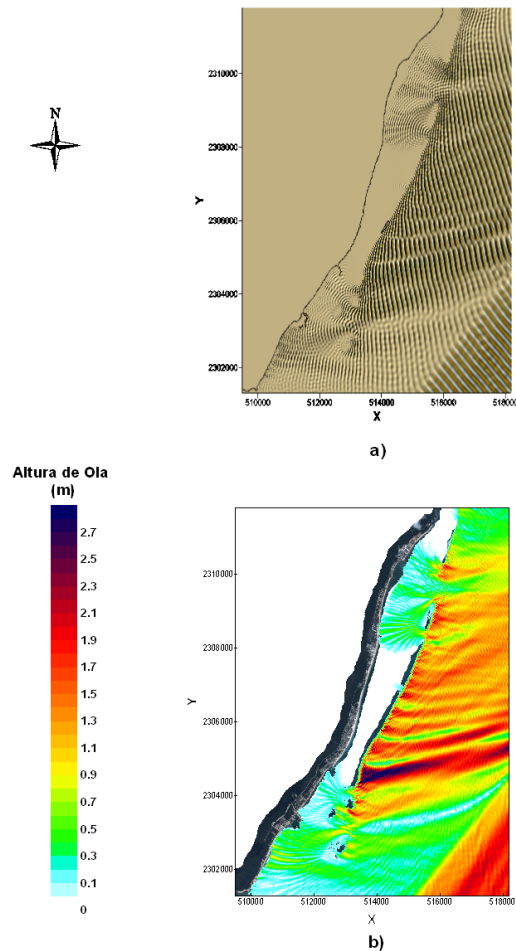
Las playas que se localizan dentro de esta zona, pueden considerarse como semiexpuestas ya que en comparación al caso de Cancún, los arrecifes sumergidos ofrecen cierta protección al sistema litoral. A través de los mapas que se han mostrado, es posible contemplar que este tipo de estructuras biológicas ofrecen el resguardo necesario para que las playas resistan los efectos de ciertas tormentas. Sin embargo, la defensa natural del sistema arrecifal puede ser vulnerada cuando se presenten las condiciones de un oleaje generado por un huracán de gran magnitud. Un análisis detallado del comportamiento de las playas en esta zona, puede servir como una ventana de observación que permita visualizar y entender cómo las playas actúan ante protecciones naturales sumergidas; en la actualidad, la zona se encuentra bajo un riesgo constante que el sistema litoral se convierta inestable y surjan de una manera similar, algunos de los problemas que se identifican en Cancún. Es por ello interesante, que se realicen estudios más detallados de la interrelación y dependencia de todos los elementos que conforman el sistema y a partir de las conclusiones alcanzadas, trasladar ese conocimiento, en la medida que sea posible, a la zona de la isla barrera de Cancún.

La existencia de los arrecifes en la zona también tiene una repercusión en las corrientes litorales, ya que estos generan otras corrientes que forman pequeños vórtices, los cuales producen que la corriente marina principal, modifique su dirección y parte de ella circule alrededor de los arrecifes. Lo anterior provoca que, si la corriente no es considerable, una parte del sedimento se deposite en la laguna litoral y otro volumen salga a través de las aperturas que existen entre los arrecifes.

5.6.4. Zona 4, Punta Pemtempich - Punta Brava

En la línea de playa que se halla ubicada entre Punta Pemtempich y Punta Brava, se localiza el poblado de Puerto Morelos; por esta razón a la mayoría de las playas que se identifican en la zona se les denomina “playas de Puerto Morelos”. Dichas playas se encuentran abrigadas

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO



(1)

Figura 5.15. Comportamiento del oleaje para la zona 4: (1), $\theta = 45^\circ(NE)$, $T = 12s$

por un cordón arrecifal que actúa como una estructura marina de protección, siendo ésta la principal característica que posee la zona.

Desde una perspectiva morfodinámica se considera que las playas de la región guardan un estado de equilibrio estable, que se genera debido a la protección que le propicia el sistema arrecifal que se ubica en la parte frontal de la playa. Como se ha mencionado, los arrecifes que se encuentran en esta zona son del tipo arrecife bordeante cresta-laguna, lo que origina que exista una amplia laguna arrecifal.

En las figuras 5.15, 5.16, 5.17 se exhiben los mapas correspondientes a la propagación del oleaje en la zona 4, es importante mencionar que debido a la condición que se le impuso al modelo computacional de no permitir el rebase de la superficie libre del agua (dado que los obstáculos serían considerados como impermeables) en los mapas es posible identificar sectores en blanco; la condición de rebase de los arrecifes será presentada en páginas

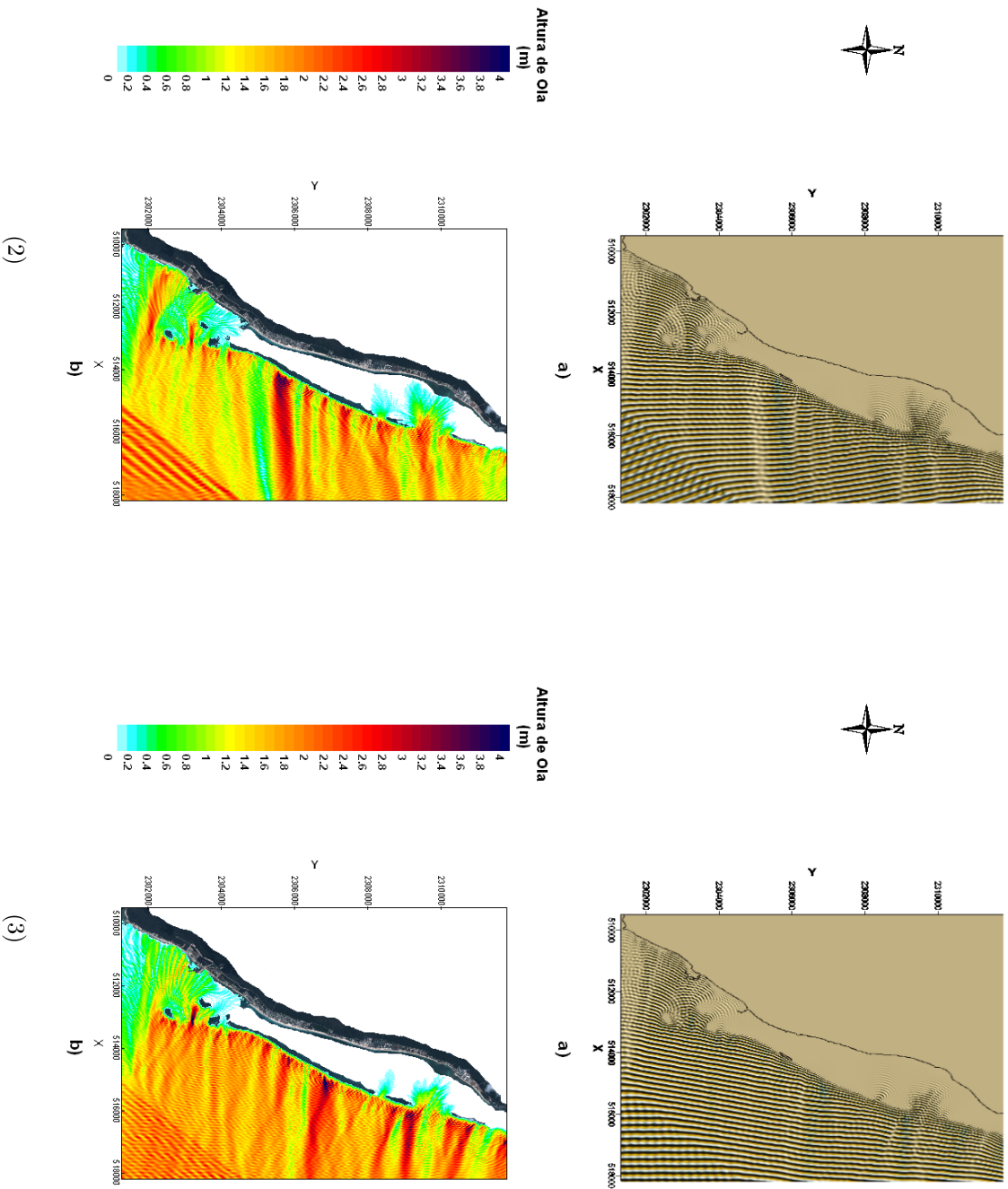


Figura 5.16. Comportamiento del oleaje para la zona 4: (2) $\theta = 22.5^\circ$ (ENE), $T = 12s$, (3) $\theta = 0^\circ$ (E), $T = 12s$

**CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA
HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO**

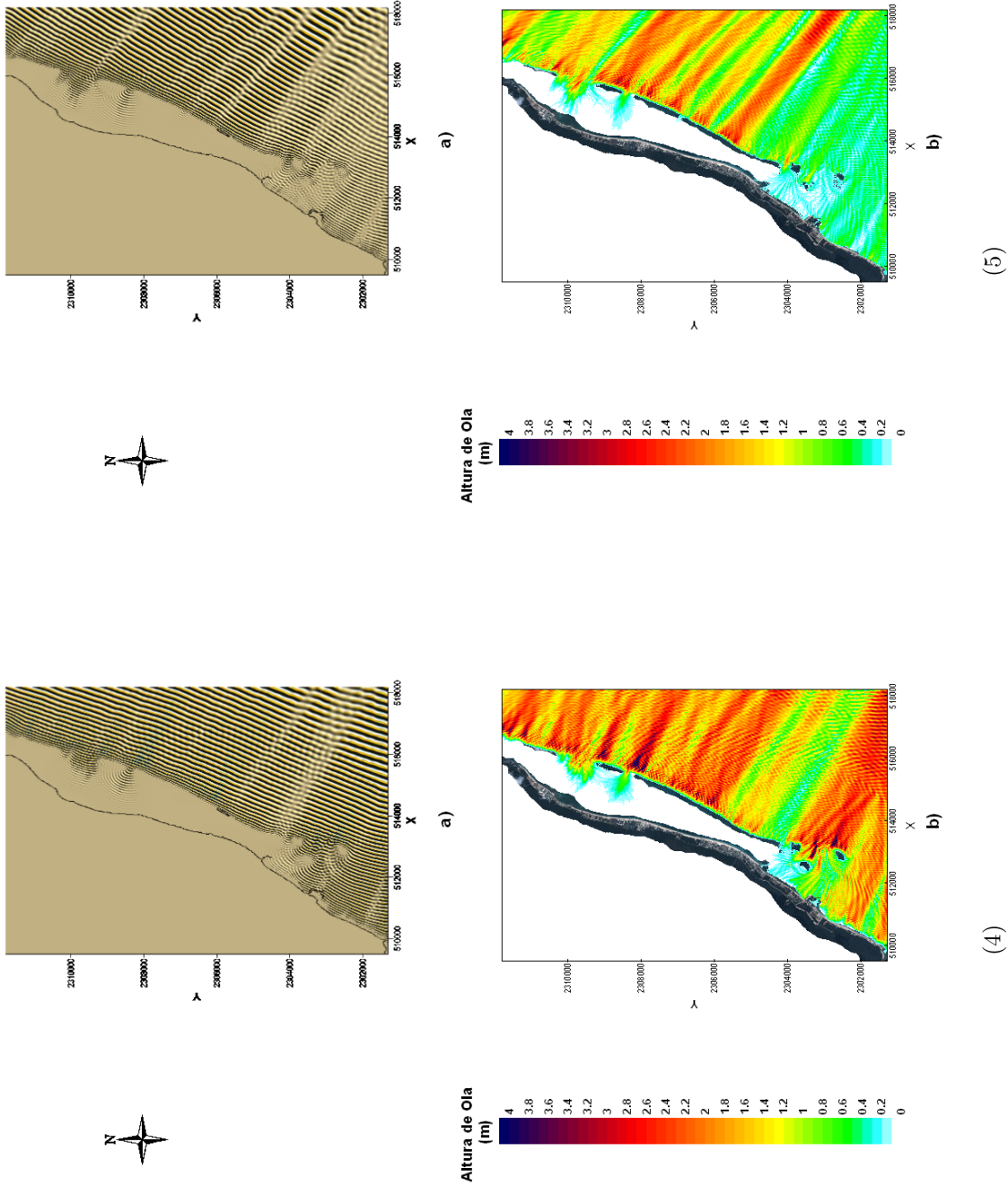


Figura 5.17. Comportamiento del oleaje para la zona 4: (4) $\theta = -22.5^\circ (ESE)$, $T = 12s$, (5) $\theta = -45^\circ (SE)$, $T = 12s$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

posteriores de este trabajo.

Para el escenario de la simulación numérica, donde el oleaje proviene de la dirección noreste (fig. 5.15(1)), se observa que las playas de Puerto Morelos están protegidas por el arrecife de alturas de olas que alcanzan los tres metros. Aproximadamente al frente del muelle federal de las instalaciones portuarias del poblado, el cordón arrecifal se encuentra segmentado en tres partes, lo que origina que las playas que se ubican entre dicho muelle ($x=512,592.5, y=2,304,548$) y la marina de yates ($x=511,397.1, y=2,303,266$), se encuentren semiprotegidas; no obstante lo anterior, el rango de alturas de olas que llegan a esa zona es de 0.1 a 0.3 metros. Las olas tienden a incrementar sus características cuando éstas se desplazan hacia Punta Brava, los valores de la altura variarían de 0.5 a 1 metro.

Cuando el oleaje procede del este-noreste (fig. 5.16(2)), las playas que presentarían problemas de erosión son las que se sitúan en la periferia de la marina de Puerto Morelos, ya que en ellas se disiparía la mayor energía del oleaje en el zona, puesto que las playas recibirían olas con alturas de uno a dos metros. Debido a que los rompeolas de la marina interrumpen la trayectoria natural del acarreo litoral y el complejo turístico que se ha desarrollado en la región, existe un gran riesgo que la playa cambie sus condiciones de estabilidad gradualmente. En este sitio, al igual que otros en la Riviera Maya, se ha desatendido la relación que existe entre el sistema litoral y la zona de manglar que se encuentra después de la duna de la playa. Cuando una tormenta o huracán transportan, ya sea por el oleaje o la marea de tormenta, al sedimento hacia los mangles la misma naturaleza, reconocerá esta área como un elemento de retroalimentación positiva al sistema, que le aportará cierta cantidad de material granular a la playa.

La principal función que tiene el sistema de arrecifes de coral como agente disipador de energía se manifiesta cuando el oleaje tiene una dirección este (fig. 5.16(3)), este-sureste (fig. 5.17(4)). Especialmente, el escenario donde las olas tienen una dirección de propagación este-sureste se valora como el más desfavorable. Un 90 % de las alturas que se registran en la zona frontal del arrecife, fluctúan entre los 2 y los 4 metros.

Las playas que se encuentran dentro de polígono de la zona cuatro, pueden considerarse como el caso opuesto a la línea de playa de Cancún; tal afirmación no implica necesariamente pensar que la naturaleza siempre tendrá la capacidad de regenerar el estado de equilibrio, que guardan las playas de Puerto Morelos ante eventos que modifiquen la configuración costera. El ecosistema que sostiene los mecanismos de recuperación del sistema litoral es considerado como muy frágil. En la zona de Cancún se hace hincapié en el hecho de que no se puede concebir un análisis que intente explicar el comportamiento de la costa como ente natural donde solamente existe una interrelación entre el mar y la playa, y se omitan otros elementos (*e.g.* el sistema lagunar) que influyen en la reacción de la línea de costa ante eventos meteorológicos extremos. El sistema litoral de Puerto Morelos empieza a padecer los efectos adversos que provocan los desarrollos turísticos, ya que los estudios de impacto ambiental no consideran que la estabilidad del ecosistema dependa del sistema litoral y arrecifal, así como de la zona de manglar y humedales que existen en la zona. Desafortunadamente, dichos estudios y análisis, generalmente no ponderan de la manera adecuada, el actuar y la

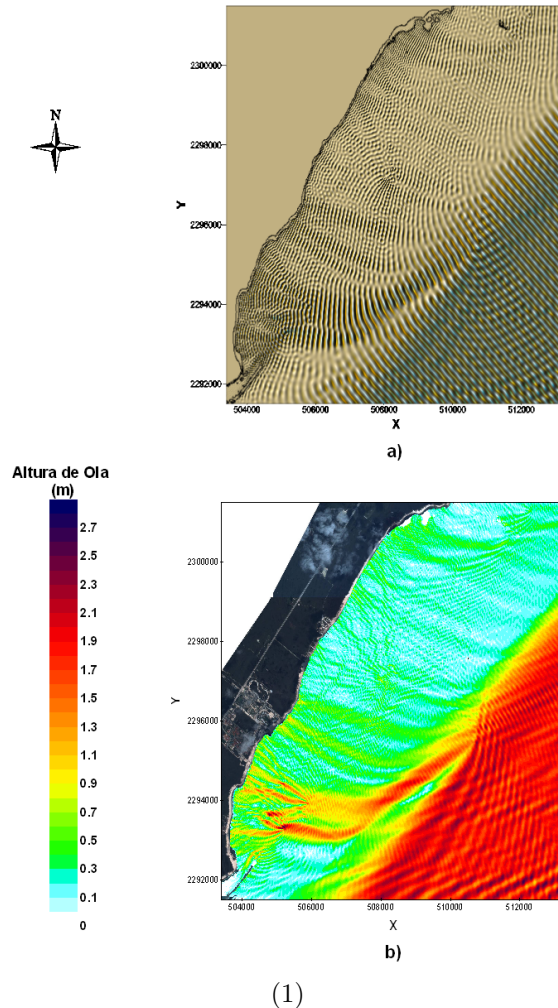


Figura 5.18. Comportamiento del oleaje para la zona 5: (1), $\theta = 45^\circ(NE)$, $T = 12s$

dependencia que existen entre los elementos que proporcionan el equilibrio al sistema natural.

5.6.5. Zona 5, Punta Brava - Punta Maromas

Las playas que se ubican en la zona 5 se les considera como expuestas; sin embargo en la zona existen una serie de rasgos en el fondo marino que les brindan cierta protección a la costa. Según WRI (2006) existen vestigios en el área de lo que fue arrecife en el pasado; en la clasificación de los tipos de sistemas arrecifales que hay en el SAM, el estudio considera que hay un arrecife de plataforma donde no hay actividad biológica. Por otro lado, la pendiente del fondo marino permite la existencia de una llanura que se delimita por un escarpe pronunciado; adicionalmente, la zona sufre cierta influencia de los fenómenos de transformación del oleaje que provoca la isla de Cozumel.

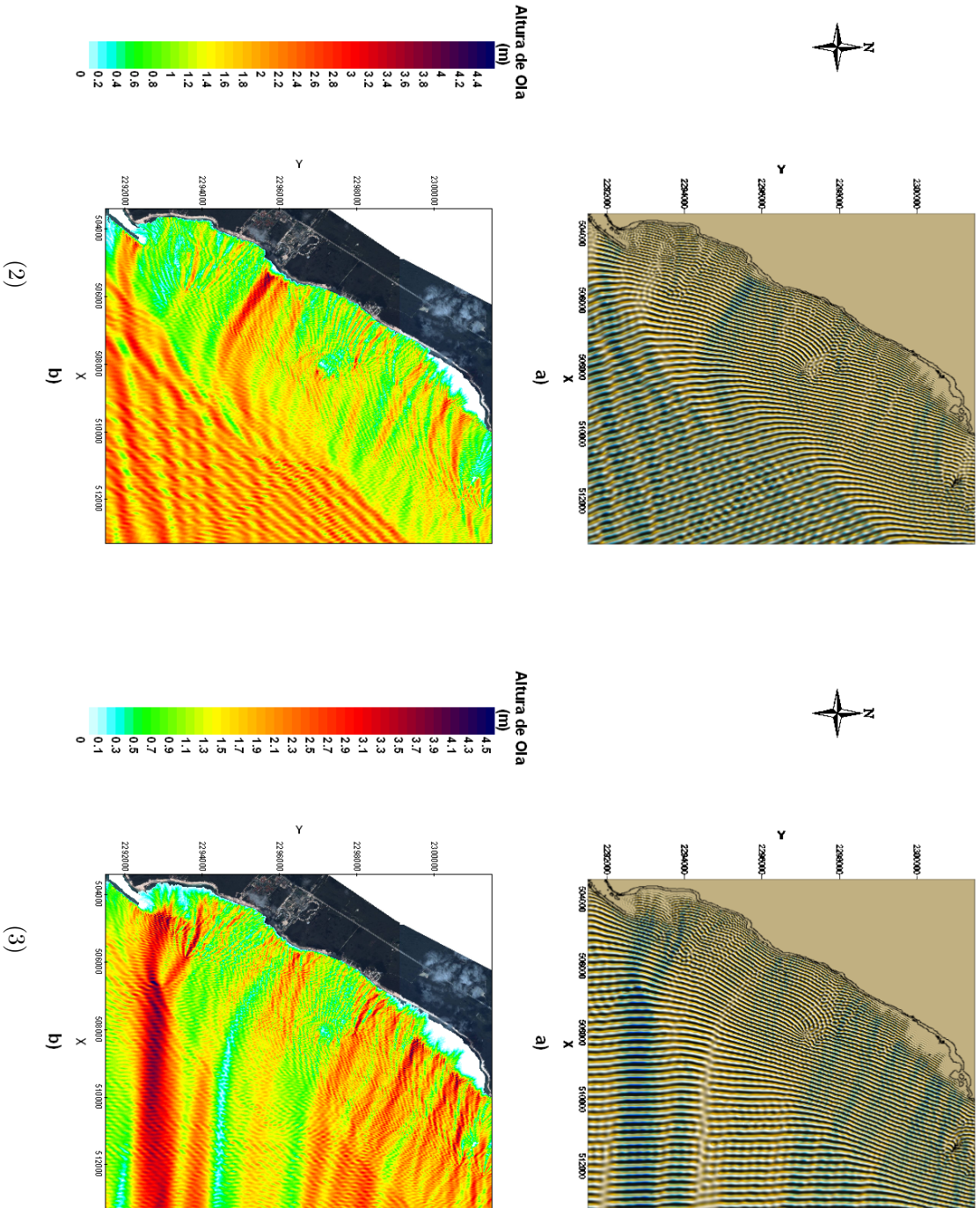


Figura 5.19. Comportamiento del oleaje para la zona 5: (2) $\theta = 22.5^\circ$ (ENE), $T = 12s$, (3) $\theta = 0^\circ$ (E), $T = 12s$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

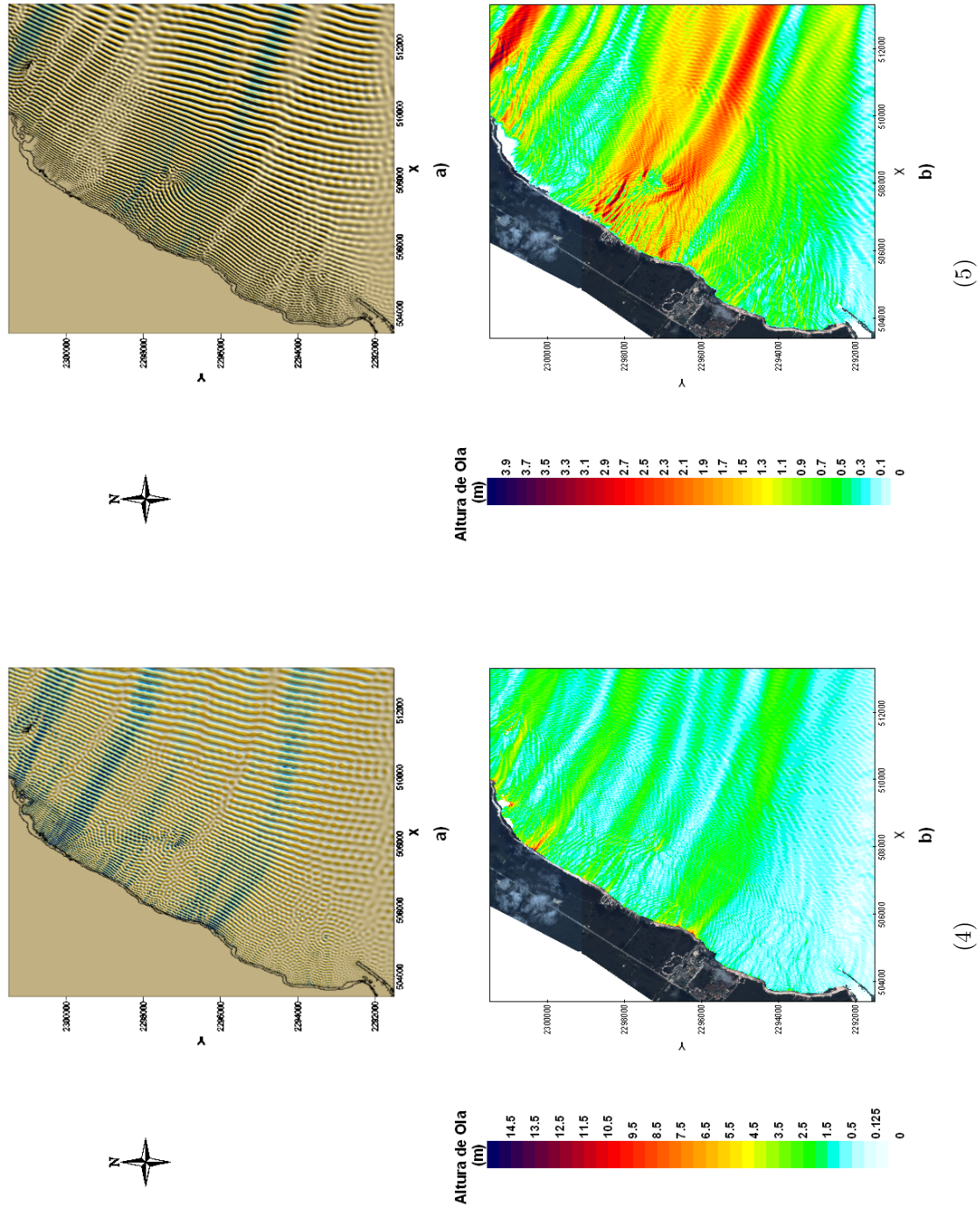


Figura 5.20. Comportamiento del oleaje para la zona 5: (4) $\theta = -22.5^\circ (ESE)$, $T = 12s$, (5) $\theta = -45^\circ (SE)$, $T = 12s$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

El efecto de atenuación que se genera por la presencia del escarpe submarino que se identifica en la área es evidente, cuando los frentes de ola provienen de las direcciones noreste (fig. 5.19(2)) y este-noreste (fig. 5.19(3)), las alturas de olas en la zona del escarpe fluctúan entre 1 y 3 metros. Punta Maromas controla el comportamiento de la playa encajada que se localiza en la periferia de la punta. El acarreo litoral que se presenta de manera paralela a la costa transporta y deposita la arena en esta playa, sin embargo con ayuda de las corrientes litorales, una cantidad del sedimento es conducido hacia el escarpe a través de los canales que origina el oleaje y que se muestran en las figuras 5.19(2) y 5.18(1). El arrecife barrera que se sitúa en frente de la punta, a su vez controla la depositación de arena en ella. El sedimento, producto de la erosión de la playa encajada, se moverá hacia la zona de costa fuera o se desplazará de la celda litoral de Maromas a la siguiente celda litoral de Kanai, que se localiza al sur de Punta Maromas.

A partir de la caracterización geomorfológica que se realizó, fue posible detectar regiones o playas donde existían problemas de erosión evidentes. Precisamente, una de las áreas que se identificó, se encuentra en las coordenadas ($x=506,445, y=2,298,351$), mediante los mapas de la propagación y altura de las olas, es posible analizar la razón por la cual se presenta la erosión en ese sector; los escenarios de simulación muestran que la playa de este sector siempre recibirá oleajes con alturas superiores a los dos metros.

En los escenarios correspondientes a la dirección de propagación del oleaje este-sureste y sureste (figuras 5.20(4) y 5.20(5)), el oleaje impacta las playas con alturas de olas de 2 metros; sin embargo es posible identificar en la parte sur de la zona 5, que los frentes de ola se distorsionan, lo que origina una disminución en las alturas de las olas que registran magnitudes menores a 1.5 metros. La modificación del comportamiento que se observa en la región norte con respecto a la sur de la zona, se debe a la influencia de la batimetría que rodea a la isla de Cozumel, ya que la posible zona de sombras que provoca dicha isla, se extiende desde Kantenah, hasta Punta Maromas.

A pesar que las playas de este sector se clasifican como expuestas, la configuración del fondo amortigua la energía del oleaje, lo que algunas ocasiones y dependiendo de la dirección de llegada de las olas a las playas, aminora el impacto que tienen las olas sobre los sistemas litorales.

Desde Punta Maromas hasta Punta Nizuc, el sistema arrecifal además de brindar abrigo a la línea de costa separa las corrientes marinas que se generan de manera paralela a las playas, de las corrientes marinas del Caribe mexicano. La principal tendencia de circulación del agua a lo largo del litoral de Quintana Roo, es de sur a norte; por otra parte, existe otra corriente que se mueve de norte a sur, la mezcla de ambos flujos, ocasiona que se formen zonas de turbulencia que provocan que la corriente rote o gire (contracorrientes), dicho efecto se ve favorecido por las aperturas o canales que tiene el cordón arrecifal (Suárez y Rivera, 1998). A pesar que dicho patrón de corrientes se observa en la mayoría de las zonas de estudio, la región de Punta Maromas es la excepción, ya que el giro del flujo de agua se debilita por el efecto que tiene el arrecife que se ubican cerca de dicha punta.

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

Una vez que se analizó el actuar de los obstáculos naturales sumergidos, con la restricción del no rebase del oleaje en los arrecifes, se realizó una segunda etapa de simulaciones numéricas pero en esta ocasión, permitiendo que las olas rebasaran del sistema arrecifal, puesto que este comportamiento es el que se presenta en la naturaleza. Para la serie de simulaciones que se realizarían en las cinco zonas, solamente se eligieron los escenarios donde el oleaje se propagaría en dos direcciones: noreste y sureste, con un periodo de 12 segundos. Los resultados de las simulaciones correspondientes a esta etapa se presentan en uno de los apéndices del trabajo. La discusión que se hará en el presente capítulo, solamente considerará el caso de Cancún (zona 1) y Punta Pemtempich-Punta Brava (zona 4). La elección de estos casos se basó en que ambas zonas representan casos opuestos, es decir, las playas de Cancún se consideran expuestas, mientras que las de Puerto Morelos, se catalogan como protegidas. Cabe señalar que el modelo computacional que se usó para la propagación no tiene la capacidad de calcular la marea de tormenta, es por ello que se realizaron ajustes en los datos de entrada para simular la sobreelevación del nivel del mar en las playas que generó el huracán *Wilma* y así, obtener el rebase del oleaje.

De los escenarios simulados, en las figuras 5.21 y 5.22 se muestran los campos de energía y alturas de las olas que se desarrollan en Cancún, cuando éstas arriban de la dirección noreste. El aumento en el nivel del mar que pudiera generar un huracán, similar a *Wilma*. A su vez, se identifica que el comportamiento de las ondulaciones de la superficie libre del agua (figuras 5.5(1)a y 5.21(1)a) no se modifica, sino que presenta el mismo patrón.

En la figura 5.21(2) se reconoce cómo el oleaje se conducen a través de la laguna arrecifal. Cuando el oleaje se aproxima de aguas profundas a someras y a su paso encuentra obstáculos sumergidos (como arrecifes de coral), dichas estructuras naturales disipan la energía de éste a través de fenómenos de transformación del oleaje, como la reflexión, la refracción, la difracción y la rompiente del oleaje. Esto ocasiona que las máximas alturas de las olas se localicen en la zona frontal y en la cresta del arrecife; la importancia que exhiben los arrecifes sobre la línea de playa, siempre ha sido conocida por el papel que éstos tienen para disipar la energía; sin embargo, no suele ser frecuente que se realice una cuantificación del efecto que tienen los sistemas coralinos sobre el oleaje. Las figuras 5.21(2) y 5.22(2) reflejan el desempeño que ejerce el cordón arrecifal para atenuar las características del oleaje en la zona litoral de la playa. En el mapa donde se muestra el patrón de las alturas de las olas (fig 5.21(2)b), en la zona frontal del sistema coralino se identifican que éstas se encuentran en una rango de 1.2 a 2.2 metros, mientras que al interior de la laguna arrecifal, las olas varían de 1 a 1.8 metros. Por otro lado, si se analiza la altura de ola que llega a la playa, se notará que la altura máxima registrada tiene un valor de 1.2 metros; aunque, es evidente que la marea de tormenta es el fenómeno que alimenta con sedimentos el área de humedales y manglar.

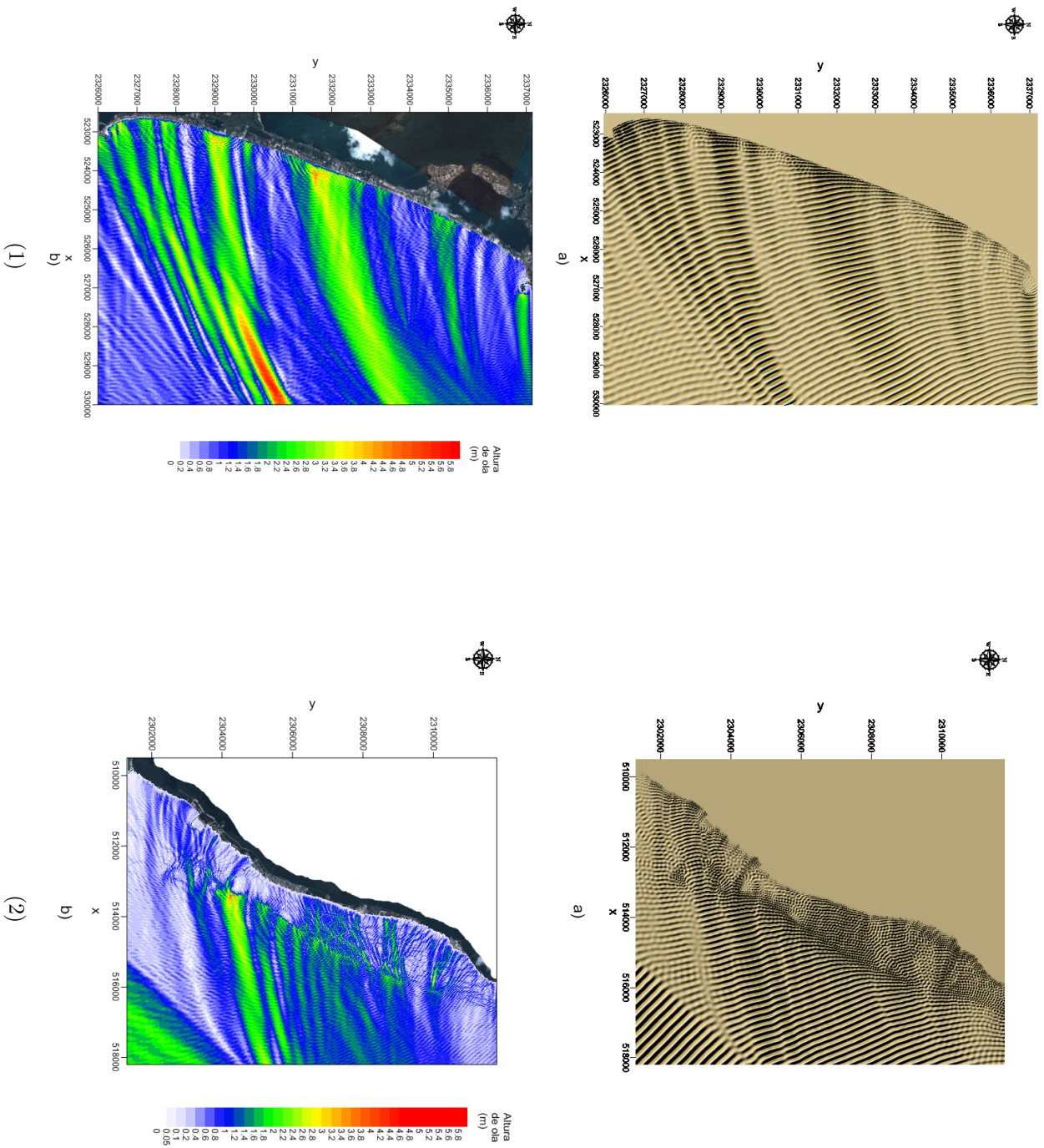


Figura 5.21. Comportamiento del oleaje con rebaje para las zona 1 y 4: (1) $\theta = 45^\circ$ (NE), $T = 12s$, (2) $\theta = -45^\circ$ (SE), $T = 12s$

CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO

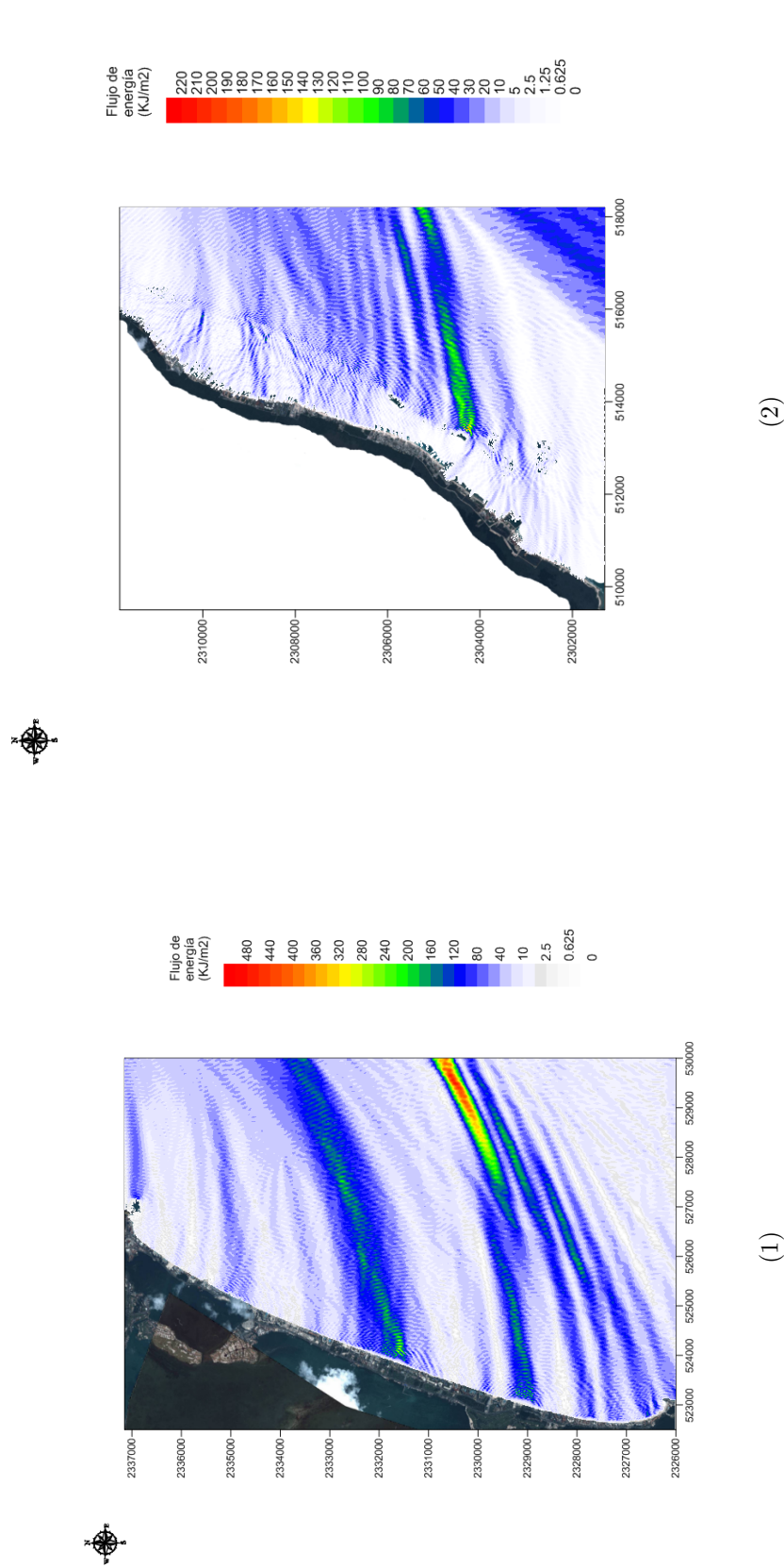


Figura 5.22. Comportamiento de la energía del oleaje para las zona 1 y 4: (1) $\theta = 45^\circ$ (NE), $T = 12s$, (2) $\theta = -45^\circ$ (SE), $T = 12s$

***CAPÍTULO 5. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS CORALINOS EN LA
HIDRO-MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS DEL NORESTE DE QUINTANA ROO***

6

Evaluación del estado morfodinámico y potencial de erosión de las playas

6.1. Introducción

El sistema litoral es un recurso natural que constantemente es utilizado para obtener beneficios económicos y/o sociales. Sin embargo, alterar y manejar los litorales suele acarrear una necesidad de conservación y uso adecuado de éstos; lo cual en muchas ocasiones requiere que se estudie la capacidad de asimilación del sistema ante las nuevas presiones y así valorar la conveniencia de su explotación. Desde una perspectiva que englobe a la geomorfología y la dinámica litoral, el análisis de las costas o playas requiere de: a) un seguimiento sistemático de todos aquellos procesos que producen alteraciones, para tratar de comprenderlos, explicarlos y cuantificarlos; b) elaborar hipótesis, teorías y modelos que conduzcan a reproducir las causas y efectos observados. Es bajo estas dos vertientes que la ingeniería de costas estudia las diversas formas y modificaciones de la costa, que son originadas por las condiciones hidrodinámicas y el transporte de sedimentos, en la zona donde se encuentran el agua y la tierra superficial.

La relación que existe entre los diferentes actores costeros como la morfología, hidrodinámica y transporte de sedimentos es muy estrecha, ya que la hidrodinámica puede inducir un transporte de sedimentos, que conducirá en un lapso de tiempo, a alteraciones en la forma o configuración de la costa. Debido a la interdependencia que existe entre estos tres actores, dicha modificación en el rasgo de la línea de costa tendrá también una influencia sobre la hidrodinámica, lo que provocará un nuevo cambio en el contorno litoral, repitiéndose este ciclo de manera continúa a través del tiempo (comportamiento morfodinámico).

El análisis del comportamiento morfodinámico de las playas expuestas y no expuestas (sin y con protección natural, respectivamente), del mediano al largo plazo, obliga a realizar una evaluación y revisión del acarreo litoral, así como de su estado morfodinámico. Es por ello, que a continuación se presentará un análisis del transporte de sedimentos longitudinal de la línea de playa de Cancún y Puerto Morelos, con el objeto mostrar la relevancia de una manera cuantitativa la relevancia que tienen los obstáculos marinos naturales, ya sean emergidos o sumergidos. Además se revisan las condiciones morfodinámicas, que poseen las playas y que son reguladas por las características del sedimento y el oleaje.

El presente capítulo está dividido en tres apartados: Los dos primeros abordan los parámetros físicos y morfodinámicos con los cuales se determina el tipo de playas que se tienen en las zonas analizadas, mientras que en el tercer apartado se plantea la cuantificación del volumen

neto del transporte de sedimentos longitudinal, mismo que puede ser usado como un elemento de referencia respecto de la relevancia del acarreo litoral en los sistemas litorales de interés.

6.2. Parámetros físicos requeridos para la definición de los estados morfodinámicos de las playas

En los sistemas litorales convergen múltiples agentes (físicos, químicos, biológicos y meteorológicos), fenómenos (mareas, corrientes litorales, transformaciones del oleaje, etc.) y procesos (erosión y depositación), lo que ocasiona que existan múltiples perspectivas para tratar de clasificar dichos sistemas; las playas y las costas pueden agruparse según su origen, forma, altura/energía o tipo de oleaje que arriban a ellas, elementos bióticos, tipo de marea que se registra, sedimentos que se depositan, composición del sedimento, utilidad para el ser humano, ubicación geográfica, agentes que dominan el actuar morfodinámico (oleaje o mareas), etc. A lo largo del presente trabajo tanto la línea de costa, como las playas del noreste de Quintana Roo ha sido clasificadas, tomando en cuenta alguno de los rubros antes mencionados; sin embargo no se ha señalado que el tipo de playas que se encuentran en esta región del sureste mexicano, son consideradas en su mayoría, como playas que están dominadas principalmente por los efectos del oleaje. En condiciones normales, el rango de mareas que se registra en la costa es de 0.20 a 0.68 metros, lo que permite clasificar las playas como micromareas.

En este trabajo, para determinar un tipo de playa, se hace referencia al carácter morfodinámico de un sistema litoral, en el que se incluyen las características de su playa y la zona de rompientes; para determinar exactamente el tipo de playas que se tienen en Cancún y Puerto Morelos, es primordial concebir que existen ciertos parámetros del oleaje, así como características físicas de las playas para realizar una clasificación adecuada de los tipos de los sistemas litorales que se analizan. Para establecer la categoría de una playa es necesario analizar la morfodinámica de la zona de rompientes, es por ello que los principales parámetros que se requieren son:

- altura y dirección de la ola que rompe,
- profundidad de la ola que rompe,
- periodo del oleaje,
- características del sedimento de la playa y
- velocidad de caída de la arena.

A partir de las simulaciones numéricas del campo de oleaje es posible conocer el nivel de protección que proporcionan los sistemas arrecifales a las playas del noroeste de Quintana Roo, por lo tanto se optó por obtener los datos correspondientes a las rompientes del oleaje de los dos escenarios que representarán las condiciones más adversas para las playas.

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

En virtud que el modelo WAPO (capítulo 5) utilizado para simular el patrón del oleaje permite que el oleaje eventualmente se reconstituya y rompa de nuevo, según los contornos batimétricos, para identificar una sola zona de rotura fue necesario filtrar todos aquellos datos que no correspondían a la primera rotura. En principio se identificaron las celdas en las cuales las olas iniciaban el proceso de rotura (figuras 6.1(1) y 6.1(4)); si un sitio de playa tenía un grupo de olas en rotura se elegían los valores máximos de la altura de la ola, es decir, en este proceso se eliminaron todos aquellos valores que no fueran el máximo y que en sus coordenadas de localización no se repitieran (figuras 6.1(2) y 6.1(5)); el procedimiento se realizó el número de veces que era necesario hasta que solamente a un punto de la costa le pertenecía un solo valor de la ola que rompía (figuras 6.1(3) y 6.1(6)). Después de realizar el filtrado de valores, se procedió a determinar la dirección del oleaje en rompiente.

Respecto de las propiedades de los sedimentos de las playas, los datos se obtuvieron a partir del análisis de arenas que se efectuó de las distintas playas del noreste del Estado de Quintana Roo. La ventaja de poseer un banco de datos con las principales características del sedimento es que se está en condiciones de realizar comparaciones entre múltiples escenarios, donde se modifican los parámetros de los sedimentos para establecer los procesos morfodinámicos con un valor medio de los datos de las arenas.

Para la elección de las características del campo de oleaje (altura de ola, periodo y dirección) de los escenarios más desfavorables para Cancún y la zona de Puerto Morelos, se consideraron los resultados que se generaron previamente de las simulaciones numéricas y el análisis de las condiciones del clima marítimo en las zonas. El periodo de oleaje que se utilizó para clasificar los tipos de playas desde un punto morfodinámico fue de 12 segundos. Se consideró que el oleaje arribaría a la playa del noreste y del sureste; y solamente se realizaría una comparación entre las clasificaciones de las playas que se obtuvieran al tomar en cuenta los valores mínimo, medio y máximo del D_{50} del sedimento de cada zona a analizar (tabla 6.1).

Tabla 6.1. Parámetros físicos para la definición de los estados morfodinámicos de las playas

Zona	Dirección (°)	Periodo (s)	D_{50min} (mm)	D_{50max} (mm)	D_{50med} (mm)	W_f (m/s)	A (adim)	Caso
1	noreste	12	0.1986	0.8696	0.4425	0.06085	0.1487	1
	sureste	12	0.1986	0.8696	0.4425	0.06085	0.1487	2
4	noreste	12	0.2794	1.309	0.2969	0.0487	0.1236	3
	sureste	12	0.2794	1.309	0.2969	0.0487	0.1236	4

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

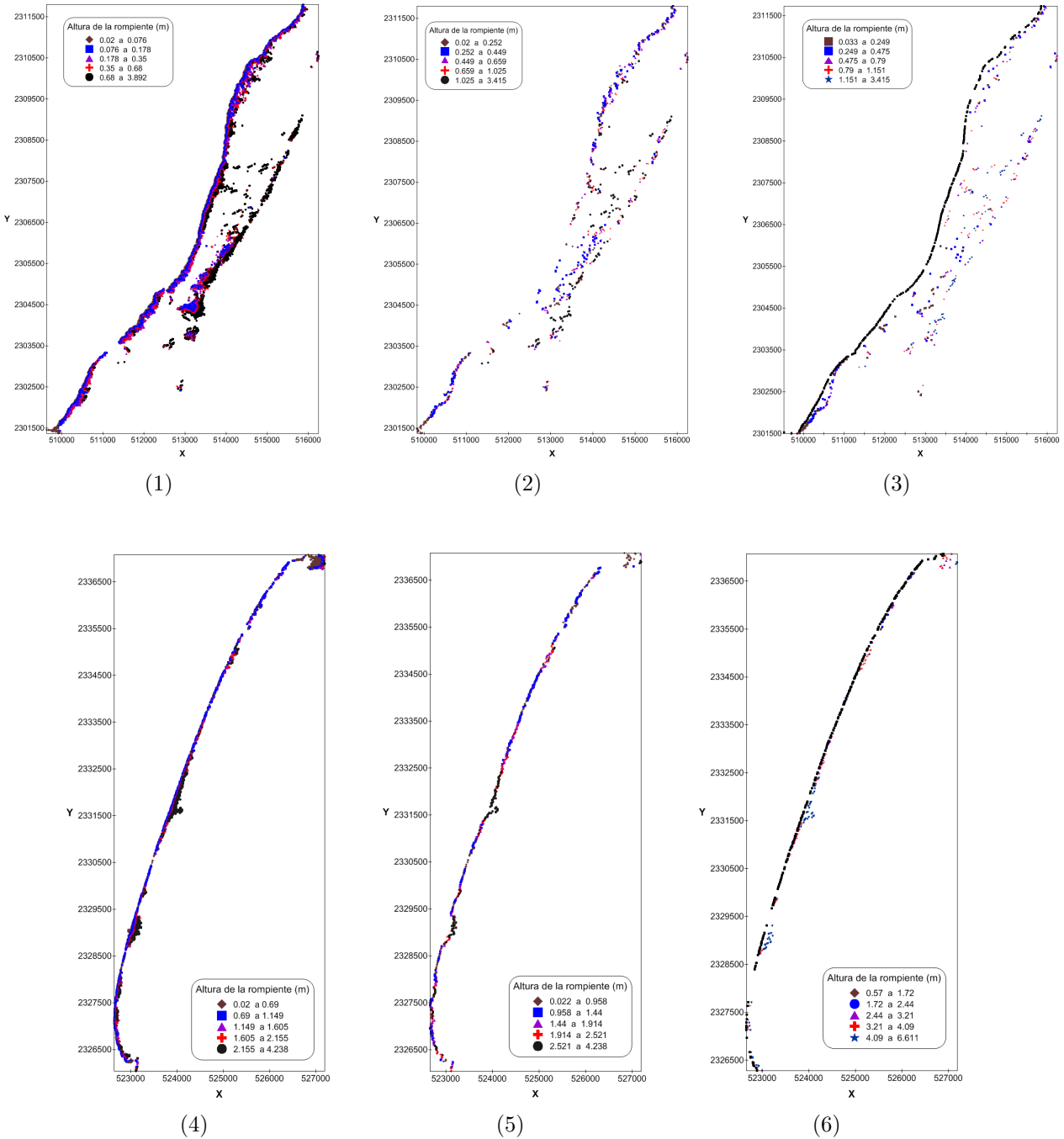


Figura 6.1. Procedimiento de filtrado de olas que rompen en la zona litoral

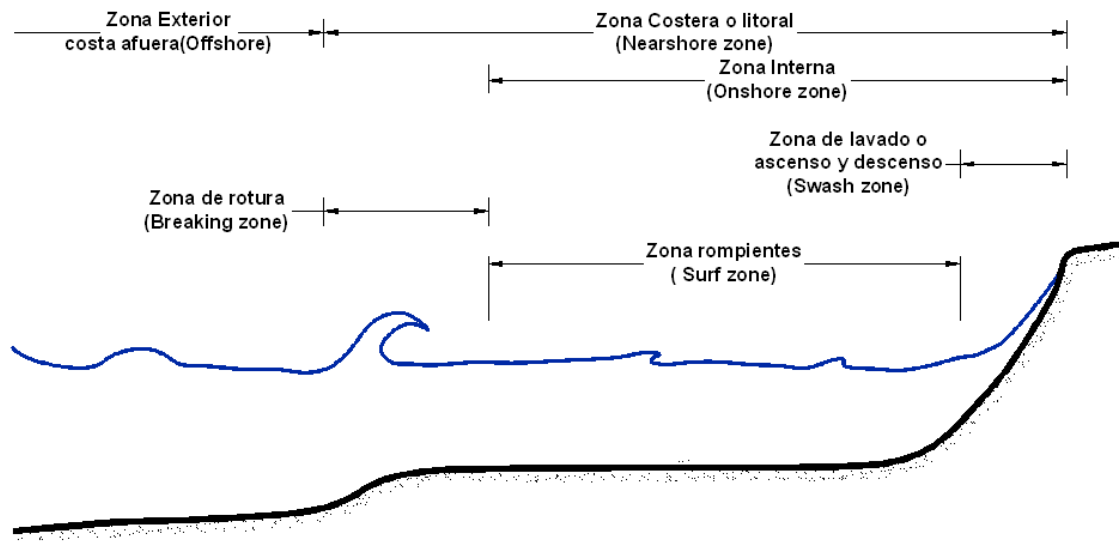


Figura 6.2. Zonas de la playa, según los procesos que se observan en ellas

6.3. Parámetros morfodinámicos de las playas expuestas y no expuestas

Una playa puede examinarse desde un contexto tridimensional o bidimensional. En el enfoque bidimensional, los sistemas litorales se describen a partir del estudio del contorno y los procesos que se observan tanto en la forma en planta, como en el perfil transversal de las playas. La línea de costa del noreste del Estado de Quintana Roo ha sido clasificada desde este contexto, mediante la descripción de los diversos rasgos geomorfológicos que se reconocieron a lo largo del litoral de la región que se analiza; dicho análisis permitió identificar la secuencia de las formas naturales que se relacionan con los procesos físicos que operan en las costas. A su vez, las playas fueron estudiadas desde una perspectiva geológica lo que permitió la comprensión la génesis de la costa y la relación de ésta con las formaciones geológicas que se observan hoy en día.

En cuanto al perfil transversal de la costa, es importante reconocer que éste se integra de una serie de zonas que son delimitadas en función de los fenómenos y procesos naturales que ocurren en ellas (figura 6.2). Principalmente, la región litoral se encuentra conformada por las zonas de rotura, rompientes y lavado; cuando las olas procedentes de costa afuera se aproximan a aguas someras, el oleaje se vuelve inestable por lo que tiende a romper, siendo precisamente, la zona de rotura de la playa donde se presenta dicho fenómeno. En el sitio de rompientes, la ola se reconstituye gradualmente después de romper lo que genera un tipo de ola solitaria que exhibe una cresta turbulenta, en la cual se observa una zona espumosa en la parte frontal de ésta (*bore*); por otra parte, la franja de la playa donde se presenta la variación de la sobre elevación del nivel medio del agua que provocan las olas, se conoce como la zona de lavado de la playa (Komar, 1998).

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

La dinámica que se desarrolla en las tres zonas está directamente relacionada con la disipación de la energía del oleaje; el fenómeno de rotura de las olas convierte la cantidad de la energía del oleaje: a) en calor y turbulencia, b) genera fuerzas que actúan sobre el fondo marino; siendo éstas las más relevantes que se observan en la zona litoral, c) cierta cantidad de momentum sigue viajando a través de la zona litoral hasta que se disipa durante el run up y la cantidad restante genera las corrientes costeras. Al romper la ola, por la difusión turbulenta que se genera, el sedimento se pone en suspensión y junto con el material del fondo que se arrastra, salta o desliza, las partículas del sedimento se mueven a través de la pendiente de la playa; una parte del volumen se dispersa de manera paralela a la costa por las corrientes litorales, en la zona de lavado. A partir de lo anterior, se considera que la zona de rompientes es la región de la zona litoral, donde la rompiente del oleaje induce otros procesos que controlan el movimiento del fluido (*e.g.* corrientes de retorno, paralelas y de resaca) y con ello, el transporte de sedimentos que se puede apreciar en las playas. Es por ello que los perfiles transversales de las playas pueden agruparse, según sea la capacidad que muestren para disipar la energía de las olas.

A pesar de que las playas tienden a ajustarse hacia algún estado de equilibrio en función de su forma y su perfil transversal, el análisis bidimensional de éstas, requiere que se tomen en cuenta los movimientos de la arena, pero desde un enfoque tridimensional; permitiendo con ello comprender que los ajustes de la playa involucran el actuar del transporte de sedimentos longitudinal y transversal, así como el desarrollo y evolución de formas rítmicas a lo largo de una playa, siendo precisamente este tipo de formas rítmicas una evidencia de los movimientos de la arena en los planos (x,y,z).

A través de los años se han propuesto una serie de relaciones que se basan en la interdependencia que existe entre la pendiente de la playa, la altura y periodo de la ola y el tamaño del sedimento. El explicar la manera en cómo se desplaza la arena y cómo el acarreo litoral influye en la formación de barras y bermas, ofrece un cúmulo de fundamentos para una mejor comprensión de los mecanismos de retroalimentación que suelen ser esenciales en el comportamiento morfológico de una playa o costa. Por ejemplo, para resaltar que la morfología puede ser utilizada para comprender el papel que desempeña la retroalimentación natural, pero en términos de procesos, considérese lo siguiente: en el área de Cancún cuando el oleaje proviene de una dirección sureste tiende a poner en movimiento la arena de la parte sur de la isla barrera, un volumen de ese sedimento se deposita a lo largo de la zona exterior de la playa, para posteriormente salir del sistema por las corrientes litorales; cuando cambia el sentido con el cual el oleaje llega a la playa, una cantidad del volumen de arena de la zona exterior es llevado hacia la zona litoral y parte de ese sedimento construye una serie de barras en la zona de rompientes; otra parte del sedimento que se encuentra en dicha zona, se mueve hacia la playa erigiendo la berma de la misma. Las barras temporales, además de considerarse como fuentes de abastecimiento de sedimento, son componentes que no se consideran como elementos estáticos de la zona de rompientes; por lo que emigran o se mueven a lo largo de la playa, actuando como obstáculos flexibles al oleaje y a las corrientes inducidas por el mismo. La recuperación de material en las playas por las barras, no suele ser representativo para la recuperación de la playa, precisamente por las dimensiones de las barras que se observan.

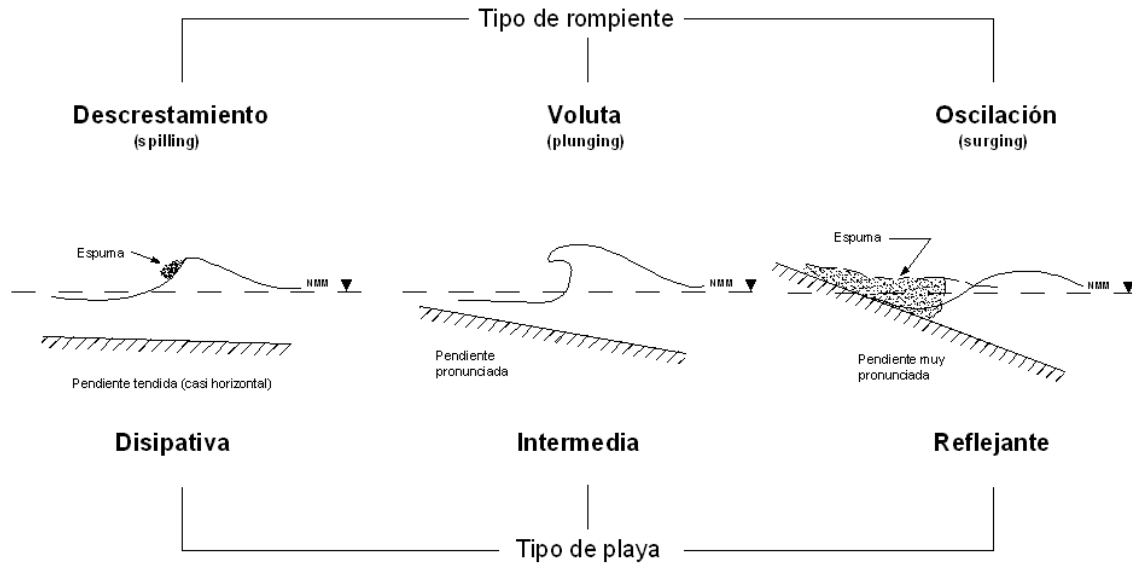


Figura 6.3. Tipos de rompientes y clasificación de las playas según la rompiente que se presenta en ellas

Las olas que se observan en la zona de lavado son el resultado de una serie de transformaciones que sufre el oleaje que se aproxima a la costa; siendo el fenómeno de la rompiente el más relevante de estas modificaciones, ya que éste depende del gradiente de la playa y la relación de esbeltez de la ola. Frecuentemente, en todas las playas que poseen pendientes muy suaves y sedimentos muy finos, las olas que rompen en estas playas tendrán en la parte frontal de la cresta una zona de espuma de agua, estableciendo con ello un descrestamiento de la ola; de manera opuesta, si la playa presenta una pendiente pronunciada y el material de depósito es grueso, rompientes del tipo oscilación se presenciaron en la región litoral. La rompiente de descrestamiento se relaciona a una gran disipación de la energía del oleaje y este tipo de rompiente se asocia a playas disipativas; por otra parte, la rompiente del tipo oscilación suele vincularse con playas donde la zona de rompientes es estrecha y la energía del oleaje es reflejada de nuevo hacia el mar. Las playas que se ubican entre los dos estados límites suelen designarse como intermedias, donde el tipo de rompiente será de voluta. De manera tal que la energía del oleaje es esencial para comprender los cambios tridimensionales que acontecen en las costas (figura 6.3). La relación que existe entre el *momentum* de las olas que rompen y las playas se establece con base en índices adimensionales, tales como el parámetro de escala de la rompiente (ϵ), número de Irribarren (ξ_b), la velocidad de caída del grano (Ω), el efecto relativo de las mareas (RTR) y el parámetro de estabilidad de la playa (K_*):

$$\epsilon = \frac{2\pi a}{gT \tan^2 \beta} \quad (6.1)$$

$$\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\left(\frac{H_b}{L_o}\right)}} \quad (6.2)$$

$$\Omega = \frac{H_b}{TW_f} \quad (6.3)$$

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

$$RTR = \frac{TR}{H_b} \quad (6.4)$$

$$K_* = \frac{H_b}{gT^2 D_{50}} \quad (6.5)$$

donde: H_b es la altura de la ola que rompe en metros, T es el periodo de la ola en segundos, L_o y a representan la longitud de la ola en aguas profundas y la amplitud de la ola, respectivamente y dadas en metros; β es la pendiente de la playa ($^\circ$), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), W_f es la velocidad de caída del sedimento (m/s), TR es el valor del rango de la marea, en metros y D_{50} representa el diámetro medio del sedimento, en metros.

Dentro de los tipos de playas, en las cuales el oleaje domina el comportamiento morfodinámico, se reconocen tres categorías que son: disipativas, intermedias y reflejantes (Short, 1999; Woodroffe, 2003). Las playas que disipan la energía del oleaje generalmente poseen pendientes suaves que van desde la duna hasta la zona de bajamar; el material que se deposita sobre la playa tiene la peculiaridad de estar compuesto de granos o partículas finas. Bajo este esquema de playa, la zona de lavado es usualmente una superficie plana, donde los rasgos más distintivos que aparecen en ella, son amplias formaciones rítmicas que se identifican especialmente en la zona de la playa donde la marea alcanza su máximo valor, mientras que en la región donde se presenta el descenso del nivel medio del mar (por acción de la cantidad de masa del agua) se crean algunas pequeñas rizaduras de arena; por otra parte, la extensión de la zona de rompiente se considera como muy amplia y en ella pueden identificarse, esporádicamente algunas barras y valles. Tanto la parte frontal de la duna, la playa, los valles y las barras proyectan un paralelismo en sus formas. Las playas disipativas suelen tener estados morfológicos *temporales* estables, lo que implica un mínimo de modificaciones en la línea de costa. La estabilidad de la playa suele deberse a (a) que la pendiente de la playa es menos susceptible a cambiar en comparación de playas con pendientes pronunciadas y materiales gruesos; (b) la playa se adapta a los oleajes de tormenta y por ello experimenta pequeñas erosiones durante el transcurso de estos eventos naturales; (c) los grandes oleajes no alcanzan a impactar de una manera relevante a la playa por el ancho de la zona de rompientes, puesto que también en esta región la pendiente es suave, lo que permite que el oleaje vaya disipando de manera gradual su energía conforme éste se desplaza a través de dicha área; (d) la disipación del oleaje provoca que la sobreelevación temporal del nivel del mar con respecto al nivel medio en la playa (*set-up*) distribuya de una manera uniforme los volúmenes de agua en la zona interna de la playa (e) y finalmente no hay grandes variaciones en el sentido paralelo a la costa, lo que minimiza la necesidad de un reajuste espacial o temporal. Debido a que los gradientes de energía del oleaje transversales decrecen por la disipación, los efectos del *setup* y las corrientes de retorno son débiles, tales condiciones propician que la topografía tienda a un estado de equilibrio, donde la hidrodinámica y la morfología serían estables.

Principalmente en las playas disipativas, la erosión se origina cuando en la zona de lavado se presentan grandes olas y bores que ascienden por encima del nivel alcanzado del *set-up*, ocasionando que la zona posterior a la de lavado sea severamente afectada por el incremento de la energía de las ondas infragravitatorias que lavan esta parte de la playa; lo cual desencadena una erosión en la duna y la aparición de un escarpes en la parte frontal de la playa (cara de la playa) (Wright y Short, 1984).

Si el oleaje que arriba a la playa posee baja energía (con grandes periodos) y el sedimento depositado en ella es predominante grueso, a la línea de playa se le reconoce como del tipo reflejante. Suelen existir casos donde las playas están compuestas de materiales finos a medios, pero las alturas de las olas deberán tener menos de un metro para que se genere una playa reflejante; no importa si las características del oleaje son escasas o altamente energéticas, la playa siempre se clasificará dentro del rubro de playas que reflejan la energía de las olas. Relativamente este tipo de playas suelen ser estables, ya que las características de las olas suelen no ser tan determinantes, lo que induce pequeños cambios en el sistema litoral; además cuando la cara de la playa se erosiona, el sedimento se deposita usualmente con la forma de una barra o terraza al pie de la playa, donde el material puede ser movido de nuevo hacia la zona de lavado y seca de la playa. Se considera a las playas reflejantes como las más estables de los tres tipos mencionados.

Cuando se hace mención a una playa intermedia, se reconoce que ésta se encuentra en un estado donde la máxima energía del oleaje se disipa; y cuando las olas poseen bajos gradientes de energía, la playa los refleja. En estos sistemas los patrones espaciales de la transformación del oleaje suelen ser muy fáciles de reconocer; la pendiente de la zona litoral es pronunciada, lo que provoca que la ola que rompe se considere del tipo de voluta. La característica más evidente de este tipo de playas es una zona de rompientes con barras longitudinales de arena y con una marcada tendencia a generar corrientes de retorno. El tamaño del sedimento que se deposita en las playas abarca rangos que van desde tamaño fino a medio. En éstas playas el rango de las alturas de olas (0.5 a 2.5 metros) es el elemento distintivo y a partir del cual, se deriva el carácter morfodinámico de dichas playas.

La transición de una playa disipativa a una reflejante se realiza a través de cuatro etapas morfodinámicas: 1) cuando la playa deja de ser disipativa, ésta se transforma a un estado modal donde se generan barras y valles longitudinales; 2) al disminuir la altura de ola, las formas de las barras y playas se modifican y siguen trazos rítmicos; 3) para que posteriormente aparezcan barras transversales y en la zona de rompientes, se establezcan patrones generados por corrientes de retorno; 4) antes que una playa muestre un comportamiento reflejante, terrazas de bajamar se manifestarán en la configuración de la playa.

Anteriormente, se mencionó que las playas del noreste del Estado de Quintana Roo están consideradas principalmente como playas en las cuales el oleaje dominaba el comportamiento morfodinámico de éstas, con el objeto de complementar la clasificación que se ha realizado en este trabajo, se incluye el parámetro del efecto relativo de las mareas (ecuación 6.4). Los rangos y los tipos de playas, tomando en consideración el efecto del oleaje y la marea se enlistan en la tabla 6.2.

El tipo de playas, según el rango de marea que se encontró en las líneas de costa de Cancún y Puerto Morelos, caen dentro de la categoría de playas ultradisipativas y playas que tienen terrazas de marea baja. En las playas ultradisipativas, la principal característica que resalta de ellas se basa en la presencia de rompientes que descrestan, la zona de rompientes tiene una extensa anchura; en este tipo de playas no existen barras, ni valles y al frente de la playa

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

Tabla 6.2. Tipos de estados morfológicos de las playas, considerando la caída adimensional del grano y el efecto de las mareas (de Short (1999))

RTR	Ω y ϵ	Tipo
		Por efecto del oleaje
< 3	$\Omega < 1, \epsilon < 2.5$	Reflejante
	$\Omega = 2 - 5, \epsilon = 2.5 - 20$	Intermedia
	$\Omega > 6, \epsilon > 20$	Disipativa
		Por efecto de la marea
3 - 7	$\Omega < 2$	Reflejante y terraza de bajamar
	$\Omega = 2 - 5$	Barra de bajamar y corrientes de retorno
	$\Omega > 5$	Ultradisipativa
7 - 15	$\Omega < 2$	Playa y terraza de marea baja
	$\Omega > 2$	Ultradisipativa

se forma una terraza cuasi horizontal. Por otro lado, en las playas con terrazas de marea baja los procesos de someramiento son más relevantes que los provocados por las rompientes y el ascenso y descenso del oleaje; lo anterior conduce a que la terraza de bajamar muestre una pendiente baja y sin formas longitudinales. Este tipo de playas son disipativas cuando se presentan condiciones de baja o media marea y son relativamente reflejantes en pleamar (Vidal et al., 1995).

El parámetro de estabilidad de la playa, puede ser usado para predecir si la playa se erosionará o existirá una depositación de sedimentos en ella. Dicho índice puede aplicarse en playas donde se advierta que la energía del oleaje se encuentra en un rango de moderada a alta, especialmente para sistemas litorales micromareales (rango de mareas menor a dos metros) y pendientes del fondo marino moderadas ($1/50 - 1/200$). El parámetro K_* agrupa a las playas en tres ámbitos: erosión, intermedio y depositación. La erosión ocurre por la acción de las olas de tormenta en un periodo considerable de tiempo; la costa retrocede debido al material que se toma de la playa. La erosión tiende a trazar costas semirectas con barras; puesto que la corriente inducida por el oleaje genera ligeros cambios longitudinales en la playa y no existen variaciones relevantes en las características morfológicas. La pendiente de la cara de la playa se suaviza y se identifica una amplia zona de rompientes que posee un ligero gradiente en el fondo marino; es por ello, que muchas de las olas incidentes disipan su energía en la zona de rompientes, mientras que el *setup* que ocurre en la costa permite el acceso de bores que provocan la erosión en la playa.

En las playas que se ubican en el apartado de depositación, es posible apreciar que las barras de arena de la zona litoral emigran hacia la cara de la playa para formar la berma. La parte superior de la playa se proyecta de manera paralela a la línea de la costa, la zona posterior a la cresta es una superficie casi horizontal; por otra parte, rompientes en descrestamiento se presentan sobre la cresta de la berma, lo que genera la formación de un túnel en la parte posterior de ésta. Bajo ciertas condiciones de oleaje, se establecen rasgos rítmicos sobre la playa, así como un escalón (de dimensiones moderadas) por debajo del nivel del mar; creándose con ello una playa reflejante que cuando emerge, deja al descubierto cara de la playa pronunciada y transformando la forma de la rompiente de descrestamiento a una de oscilación.

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

Tabla 6.3. Tipos de estados morfológicos de las playas, considerando el parámetro de estabilidad la pendiente y el tipo de rompiente en las playas y el efecto de las mareas (de Short (1999))

K_*	Tipo	ξ_b	Tipo
< 3.5	Depositación y pendiente pronunciada	< 0.64	Descrestamiento
$3.5 - 20$	Intermedia y pendiente moderada	$0.64 - 5$	Voluta-Colapsante
> 20	Erosión y pendiente suave	> 5	Oscilante

Los estados modales intermedios son muy similares a los observados en la clasificación de las playas cuando el oleaje domina los procesos costeros, sin embargo los rangos de éstos no han sido exactamente determinados, ya que los valores suelen cambiar si se analiza cómo una playa erosiva se transforma gradualmente a una de depositación y de manera opuesta cómo una playa de depositación tiende a emigrar a una de erosión (Horikawa, 1988). Adicionalmente, el parámetro de estabilidad de la playa, puede ser utilizado para determinar la pendiente de la cara de la playa, esto se logra mediante:

$$\tan \beta = 0.12K_*^{-1/4} \quad (6.6)$$

En la tabla 6.3 se muestran los rangos necesarios para clasificar las playas según el parámetro de estabilidad, la pendiente y el tipo de rompiente en las playas.

Definidos los parámetros (y sus umbrales) requeridos para llevar a cabo una clasificación de los distintos estados morfodinámicos de las playas de Cancún y Puerto Morelos, a continuación se presentan algunos de los resultados que se obtuvieron de dicho ordenamiento; la totalidad de los resultados se muestran en el apéndice correspondiente a esta parte del trabajo.

A continuación se presentan los tipos de playas que se encontraron en las zonas analizadas. Cuando el oleaje proviene de la dirección noreste, la línea de costa de Cancún se comporta como una playa que disipa la energía del oleaje (figura 6.4(1)); debido a que el sistema litoral es tan frágil, la condición de disipación de energía puede alterar de una manera substancial el estado morfodinámico de las playas de la isla barrera. Se ha mencionado que este tipo de playas poseen amplias zonas de rompientes y de playa seca que permiten la atenuación de la energía de las olas; sin embargo en Cancún los problemas de erosión reducen significativamente el ancho de la playa y aumentan la zona de rompientes, por lo que bajo estas condiciones, cuando se presenta un oleaje de tormenta, la zona de rompientes se traslada a la región de la playa seca; si existieran dunas naturales en la línea de costa, éstas se encargarían de regular las dimensiones de las zonas de la playa durante el evento extremo. En Cancún, parte de la infraestructura turística se encuentra construida sobre la duna, lo que provoca que la playa no tenga la capacidad para que sus zonas (y el actuar de éstas) oscilen en las tormentas. La disipación de energía en condiciones normales se presenta en la zona de rompientes y parcialmente sobre la playa seca; en una tormenta, normalmente bajo la influencia de un aumento del nivel del mar (marea de tormenta) la zona de disipación se desplaza en dirección hacia las dunas, lo que induce que dependiendo de la magnitud de la variación del nivel del mar y de la energía del oleaje, solo parte de la energía se disipa en la playa seca y otra es reflejada hacia el mar, lo que detona de manera acentuada los procesos

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

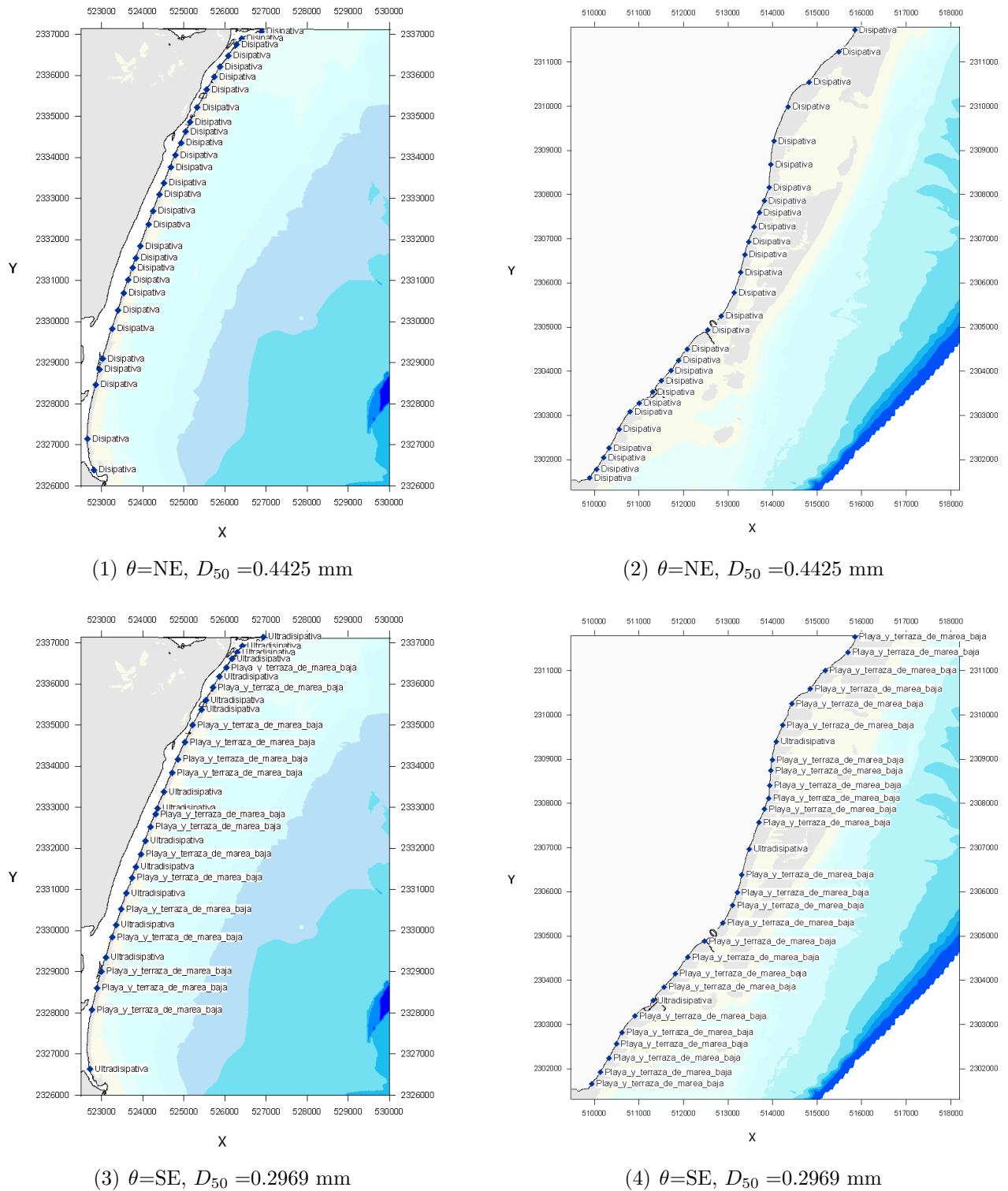


Figura 6.4. Clasificación de las playas, siendo el parámetro dominante el oleaje en: (1) y (2) y la marea en: (3) y (4)

de erosión en Cancún.

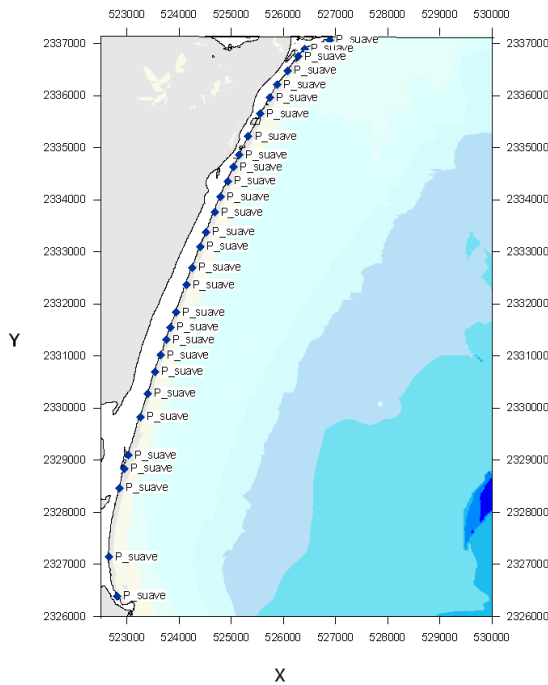
Por otra parte, las playas de Puerto Morelos que se encuentran protegidas por el sistema coralino (figura 6.4(2)) muestran una tendencia a moderar o disipar la energía de las olas que llegan del noreste. En la costa es posible identificar las características inherentes a este tipo de playas; de manera contraria al caso de Cancún, las playas de la región presentan anchos de playa y zonas de rompientes que aminoran los efectos de las olas. A partir de simulaciones numéricas se ha valorado el efecto de atenuación de las olas que brinda el arrecife de coral a la playa; es por ello que cuando las condiciones de tormenta dejan de presentarse, la costa se adapta a las ligeras variaciones que prevalecen. Al comparar los estados de la playa que se observan tanto con oleajes que provienen del noreste y sureste en las zonas que se analizaron, no se encontró una variación significativa entre los tipos de ambas direcciones; lo anterior se debe a que no existe una gran variación de valores entre los parámetros de las ecuaciones 6.1, 6.3 y 6.4.

Sin embargo, los estados modales de las playas muestran cierta diferencia cuando se clasifican las playas según su rango de marea. Considerando que las olas arriban del sureste, en Cancún un porcentaje de las playas revela que son ultradisipativas; mientras otro porcentaje se clasifican como playas con terrazas de marea baja (figura 6.4(3)). En la región de Puerto Morelos es más común identificar las playas con terrazas de bajamar (figura 6.4(4)); es interesante resaltar que las playas que se determinaron con ultradisipativas en esta zona, corresponden a los sitios donde el sistema arrecifal se interrumpe.

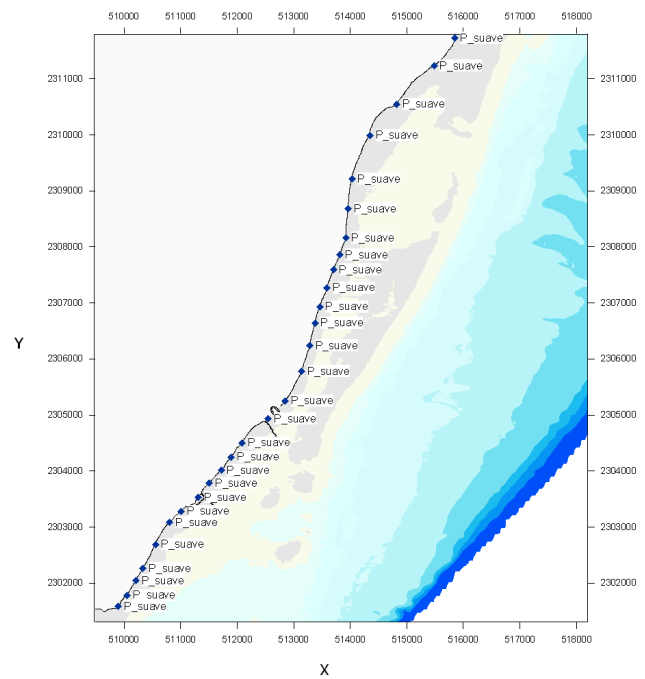
En las figuras 6.5(1) y 6.5(2) se presentan los tipos de pendientes que se determinaron mediante el parámetro de estabilidad de la playa; en dichas figuras se puede notar que tanto las playas de Cancún como de Puerto Morelos tienen pendientes que se consideran suaves. Esta información suele coincidir con las pendientes que se observaron en las distintas visitas de campo que se realizaron a la zona de estudio, además de ello, existe correspondencia entre las características que se observan en el tipo de playas disipativas. Tanto en ambas direcciones, así como con los distintos tamaños de sedimentos y velocidades de caída, todas las playas se ubicaron dentro de la categoría de pendientes suaves. Puesto que el número de Iribaren depende de la pendiente de la playa y la esbeltez de la ola, los parámetros son muy semejantes en los 12 escenarios propuestos para la revisión de los estados morfodinámicos, el tipo de rompiente es muy similar en todos ellos (figuras 6.5(3) y 6.5(4)).

En cuanto a la evaluación del comportamiento morfológico según los procesos de erosión y depositación, en todos los escenarios planteados en Puerto Morelos se encontró que en gran parte de esta costa el proceso de erosión es el que se observa; solamente en un par de sitios, los procesos se consideraron como una etapa intermedia. En la figura 6.6(4) se muestra el tipo de procesos que se presentaría con un oleaje de tormenta que proviene del sureste y con un sedimento de un $D_{50} = 0.1986$ mm que se deposita en la playa. Sin embargo para el caso de Cancún, se puede identificar la relevancia que tiene el tamaño del sedimento en los procesos que se sobrevienen en las playas. Por ejemplo, cuando las olas se aproximan a la costa, a partir del noreste y considerando que en la playa se depositan sedimentos de $D_{50} = 0.1986$ mm (fig. 6.6(1)), a través de la línea de costa se identifican zonas intermedias, de erosión y

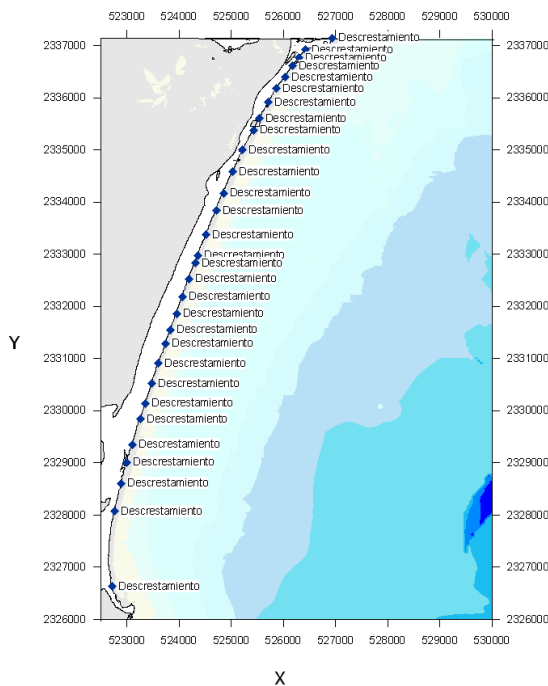
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS



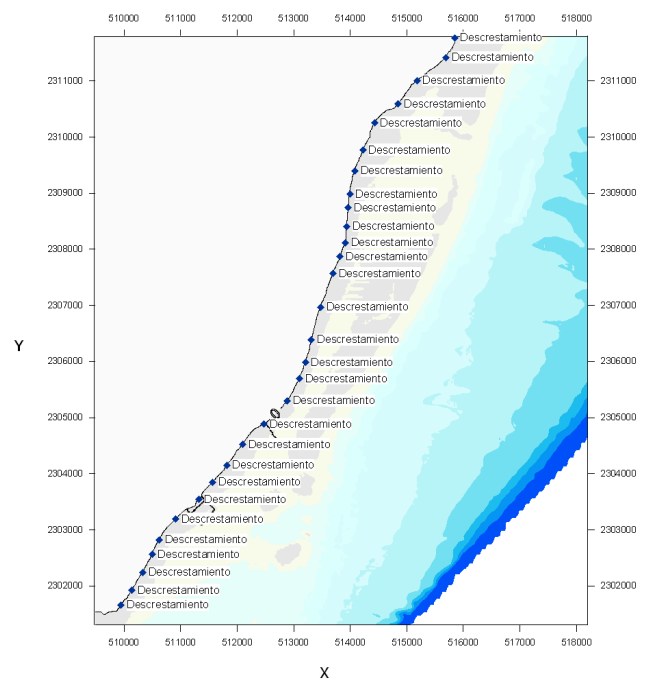
(1) $\theta=NE$, $D_{50} = 0.4425$ mm



(2) $\theta=NE$, $D_{50} = 0.4425$ mm



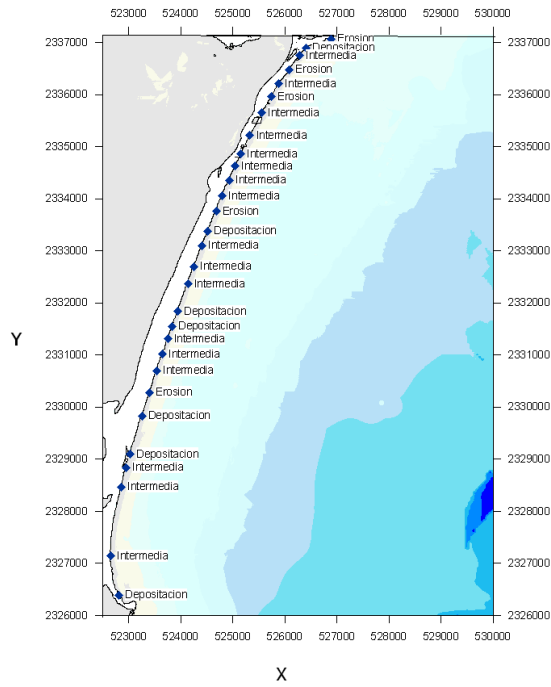
(3) $\theta=SE$, $D_{50} = 0.2969$ mm



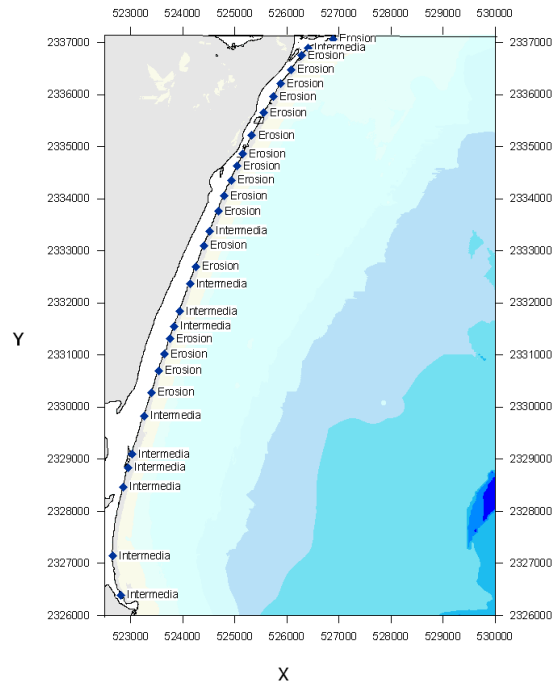
(4) $\theta=SE$, $D_{50} = 0.2969$ mm

Figura 6.5. Clasificación de las playas, según la pendiente de la playa: (1) y (2). Rompiente del oleaje en las playa: (3) y (4)

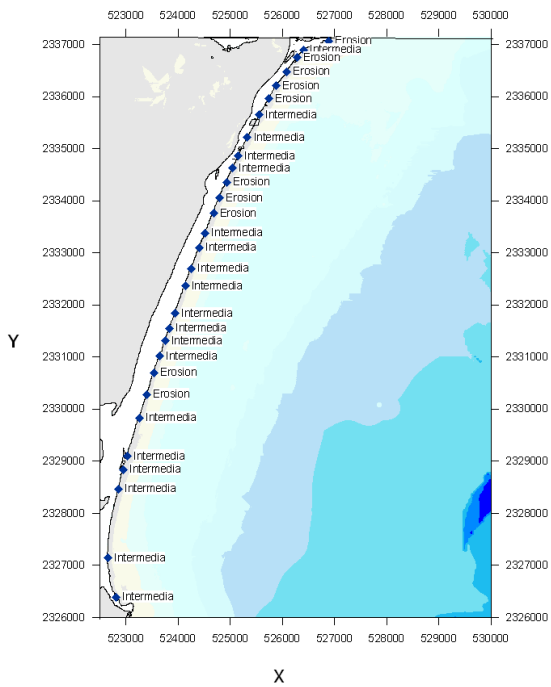
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS



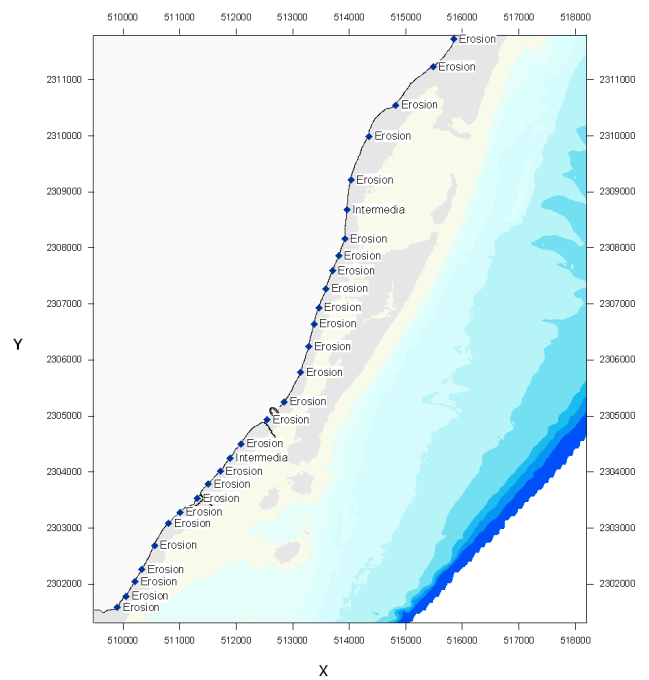
(1) $\theta=NE$, $D_{50} = 0.1986$ mm



(2) $\theta=NE$, $D_{50} = 0.8696$ mm



(3) $\theta=NE$, $D_{50} = 0.4425$ mm



(4) $\theta=NE$, $D_{50} = 0.1986$ mm

Figura 6.6. Clasificación de las playas, según parámetro de estabilidad de la playa

deposición; por otra parte, cuando aumenta el tamaño del sedimento ($D_{50} = 0.8696$ mm) (fig. 6.6(2)), la mayoría de las playas tienden a erosionarse, en especial todas las playas que se encuentran al norte de la isla barrera; mientras que las del sur son playas intermedias. Si se toma un tamaño de sedimento medio $D_{50} = 0.4425$ mm (fig. 6.6(3)), la línea de playa será intermedia. A partir de las figuras presentadas, queda claro que los procesos marinos que se observan en las playas de Cancún están íntimamente ligados al tamaño del sedimento, esta afirmación cobra relevancia ante el hecho que eventualmente se realizan rellenos de playas; ya que la elección del material de relleno debería estar basada en resultados como los que se han mostrado para garantizar un ancho de playa, que de igual manera influiría en el estado morfodinámico de la playa.

6.4. Cuantificación del potencial de erosión

El comportamiento de las playas es complejo debido a las múltiples relaciones que se entrelazan entre los parámetros, fenómenos y procesos que ocurren en ellas; las sinergias que existen entre el sedimento, las olas y las corrientes regulan la manera en cómo las playas evolucionan y actúan. Para complementar el análisis morfológico de las playas bajo la influencia de obstáculos sumergidos y emergidos, a continuación se presenta una cuantificación del transporte de sedimentos longitudinal, con una perspectiva en la cual, los volúmenes que se obtengan, se interpreten como un índice de la cantidad de sedimentos que pueden ser transportados de las playas bajo una condición de tormenta.

Generalmente, el sedimento que es conducido y distribuido en la costa, por las olas y las corrientes litorales se conoce como acarreo litoral; mientras que la cantidad de material sedimentario que se mueve a lo largo de las playas se identifica como transporte litoral. Aunque los desplazamientos que exhiben los sedimentos en la naturaleza suelen ser complicados de analizar, éste suele ser estudiado atendiendo el sentido de aproximación o alejamiento de las costas o también, el movimiento del sedimento puede ser analizado según la zona de la playa, ya sea en la zona interna o externa de ella (figura 6.2).

En la zona externa de la playa solamente existen movimientos de carácter transversal; por otra parte, en la zona interior el acarreo litoral se encuentra integrado de dos componentes: a) un transporte de sedimentos paralelo a la costa y b) otro que se desplaza transversalmente sobre el perfil de la playa.

El transporte transversal de sedimentos es generado por el flujo del agua que se origina por las olas o el viento y es responsable de la existencia de barras de arena y otras modificaciones en el perfil transversal de la playa; con el objeto de estudiar los estados morfodinámicos de las playas, se consideró que con la cuantificación del transporte de sedimentos longitudinal se podían establecer magnitudes de erosión en las costas y que este tipo de transporte tiene una mayor influencia en la configuración de toda una zona costera; mientras que el análisis del movimiento del sedimento en dirección transversal, solamente modifica los rasgos de las playas y no de una costa como la del noreste del Estado de Quintana Roo. No obstante lo

anterior, se reconoce la importancia que tiene el estudio del transporte de sedimentos en el sentido transversal y en un futuro, el análisis de esta clase de transporte podría complementar este trabajo.

El transporte de sedimentos longitudinal (*TLS*) (en la zona de rompientes) se origina a partir de dos mecanismos simultáneos que se producen cuando las olas alcanzan la línea de costa de forma oblicua. En el acarreo de material asociado a la acción del oleaje mueve la arena a través de la pendiente de la zona de lavado hacia playa; cuando la ola retrocede, el agua y los sedimentos tienden a seguir el movimiento de descenso del oleaje, siendo conducidos hacia el mar de manera perpendicular; dicho fenómeno se repite una y otra vez mientras las olas arriban a la playa. El transporte que tiene lugar en la zona de rompientes se produce por una corriente litoral que se induce por la energía del oleaje que rompe; dicha corriente muestra una considerable capacidad de transporte, ya que se crea una zona fuertemente turbulenta (generada por la rompiente) donde existen abundantes sedimentos en suspensión que son susceptibles a ser transportados (Del Moral, 1978).

Dado que el transporte longitudinal depende de la naturaleza y la magnitud de los mecanismos antes descritos en un determinado lapso de tiempo, no es posible identificar una zona específica de la playa donde este transporte actúa con mayor intensidad. El hecho de tratar de parametrizar los factores que influyen en el TLS (tales como las corrientes litorales, el oleaje y su rompiente, las características del fondo marino y de los sedimentos) no debe considerarse como simple, por la variabilidad espacial y temporal en la que éstos se presentan (Kamphuis, 2000).

De igual manera que otros agentes o procesos naturales requieren ser comprendidos, el estudio del transporte de sedimentos longitudinal puede ser abordado desde dos vertientes diferentes, una lógica y otra temporal^a; la primera de ellas trata de explicar interrogantes basadas en el cómo y por qué del fenómeno, mientras planteamientos basados en el cuándo y en dónde se explicarían con un enfoque temporal; ante ello han sido desarrollados modelos matemáticos que suelen diferir en términos de objetivos, expectativas de modelado y de soporte para clarificar el comportamiento del TLS. Para propósitos basados en la óptica lógica, no todos los parámetros involucrados en el fenómeno necesitan ser perfectamente evaluados, ya que la meta que se persigue es determinar la influencia o los mecanismos de un proceso que dan origen o modifican la configuración costera; sin embargo desde una perspectiva temporal, deben considerarse los parámetros más importantes que se ven implicados en el proceso natural, ya que la omisión de uno de estos implicaría una respuesta errónea a las incertidumbres relacionadas a la manifestación espacial del proceso sedimentario (Cooper y Pilkey, 2004).

Debido a que los modelos numéricos desarrollados bajo la concepción temporal, requieren de datos medidos del oleaje, las corrientes y parámetros de la playa y sedimentos para determinar las tasas del transporte de sedimento en un determinado tiempo y espacio, se optó que para este el trabajo se utilizarían las expresiones que relacionan las tasas del

^aparaKamphuis (2000) la perspectiva lógica representan un análisis de volumen y la temporal, un enfoque de detalle.

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

transporte longitudinal con los parámetros del oleaje y la playa (enfoque lógico) que han sido obtenidos a través del estudio que se realiza; para un análisis de detalle no fue posible obtener la información de campo que se requiere (principalmente, los datos relacionados a las corrientes litorales).

A través de los años se ha reconocido que el TLS de arena es proporcional a la componente paralela del flujo de energía de las olas que rompen en la zona litoral, lo que permite que el transporte de sedimentos se conozca a través de metodologías que analizan la energía y el flujo de energía del oleaje. Normalmente, en la ingeniería costera se utilizan expresiones que han sido desarrolladas a partir de evaluar el flujo de energía del oleaje para cuantificar el TLS (Benassai, 2006).

En la metodología del flujo de energía, la cantidad total de material que se mueve a través de la línea de costa se relaciona con la cantidad de energía disponible en las olas que se aproximan a la costa; en el modelo de transporte de sedimentos longitudinal, el flujo de la energía con la dirección de la ola se determinará a partir de $\mathcal{F}\Delta l$, donde \mathcal{F} es la energía del flujo de las olas por unidad de ancho de cresta y Δl es una longitud a lo largo de la cresta del oleaje (Δx); para determinar la cantidad del flujo de energía por unidad de longitud en la costa, se utiliza una relación geométrica ($\Delta x = \Delta l / \cos \alpha_b$) basada en el ángulo de los frentes del oleaje que rompe con la orientación de la playa (α_b). Si la energía del flujo en la dirección longitudinal se presume sea la responsable del TLS, entonces multiplicando la energía de flujo por unidad de longitud (Δx) con el $\text{sen } \alpha_b$ se obtiene:

$$P_l = (EC_g)_b \cdot \text{sen } \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \quad (6.7)$$

siendo, P_l la componente longitudinal de la energía del flujo del oleaje (N/s), E_b es la energía de la ola (N/m) evaluada en la línea de rompiente:

$$E_b = \frac{\rho g H_b^2}{8} \quad (6.8)$$

y C_{gb} es la celeridad del grupo de olas (m/s) en la zona de rompiente:

$$C_{gb} = \sqrt{gd_b} \quad (6.9)$$

ρ es la densidad del agua (kg/m^3); g representa la aceleración de la gravedad (m/s^2); H_b la altura de la ola que rompe, en metros y d_b la profundidad en la que se presenta la rompiente, en metros. Por muchos años P_l fue correlacionado empíricamente con el volumen de arena que se movía por las olas para determinar el transporte de sedimentos longitudinal, I_l :

$$I_l = CP_l \quad (6.10)$$

donde C es una constante de proporcionalidad dimensional. Sin embargo, en la ecuación 6.10, la relación entre las unidades de medida no es homogénea, puesto que el lado izquierdo de dicha expresión representa una magnitud de volumen por unidad de tiempo y en el lado derecho supondría un valor de energía por unidad de largo de playa por unidad de tiempo, CP_l tiene dimensión de peso por unidad de tiempo. Para solucionar esta ambigüedad, es

necesario tomar en cuenta el peso inmerso del transporte en la ecuación 6.10. Básicamente, el peso inmerso del transporte se determina a partir de que cierta masa de arena (por unidad de área) se mueve por las olas y las corrientes; el peso sumergido del material se calcula dividiendo la masa del sedimento con su densidad, para con ello obtener magnitudes de volumen de arena por unidad de área y posteriormente multiplicar dicho peso con su peso específico sumergido (Komar e Inman, 1970; Dean y Dalrymple, 2001; Rosati et al., 2002). Una vez que se incluye el peso inmerso del transporte, la ecuación 6.10 queda como:

$$I_l = K P_l \quad (6.11)$$

donde K es un coeficiente de proporcionalidad adimensional. Así pues, el volumen del transporte longitudinal de sedimentos (m^3/s) se puede obtener, mediante el uso de:

$$Q_l = \frac{I_l}{(\rho_s - \rho) g (1 - P_{or})} \quad (6.12)$$

siendo ρ_s la densidad del sedimento (kg/m^3) y P_{or} el valor de la porosidad del material (adimensional).

Generalmente a la expresión 6.11 se le identifica como la ecuación del *CERC* para el transporte longitudinal de sedimentos. Las desventajas que muestra la ecuación 6.11^b pueden ser atenuadas mediante la calibración de la fórmula con datos de campo; sin embargo, cuando no es posible realizar la calibración, debe tenerse en consideración que la ecuación proporcionará una precisión de un o dos órdenes de magnitud. A pesar de las limitaciones que exhibe la ecuación del *CERC*, ésta continúa siendo la más empleada en la ingeniería de costas debido a su simplicidad (Smith et al., 2009).

Wang et al. (2002) compararon el desempeño de la ecuación 6.11 con la expresión del transporte de sedimentos longitudinal de Kamphuis (1991) y sugirieron que para el análisis de la evaluación del TLS generado por condiciones de tormenta, se recomendaba utilizar la expresión del *CERC* (siendo conscientes de sus limitaciones) y para condiciones regulares, la expresión de Kamphuis podía ser empleada. Es por ello que en este trabajo se calculó el transporte de sedimentos longitudinal con ambas expresiones, con el objeto de verificar la diferencia entre las magnitudes obtenidas; sin embargo la determinación del volumen del transporte de sedimentos, también se realizó para obtener un potencial de erosión, que pudiera ser ligado con los estados morfodinámicos que se obtuvieron y con ello, proporcionar los elementos necesarios para la identificación y ponderación cualitativa del estado morfodinámico que guardan las playas, que se encuentran bajo la protección o no de obstáculos naturales. Cabe señalar que en la evaluación del TLS, adicionalmente a las dos expresiones que se utilizaron, se agregó la expresión de Bayram et al. (2007); en el análisis que se llevo a cabo, se tomó en cuenta esta ecuación, ya que en ella se consideran de manera más activa las variables de los sedimentos y el estado de equilibrio del perfil de la playa. Lo anterior hace posible que características de la arena, como por ejemplo el parámetro de escala que se obtienen de la determinación de las propiedades de los sedimentos, puedan ser incluidas para observar la influencia que éstas tienen en el volumen del sedimento y realizar

^bcfr. Kamphuis (2000); Cooper y Pilkey (2004); Bayram et al. (2007).

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

una comparación con las expresiones del CERC y Kamphuis.

Debido a la dependencia que existe entre el coeficiente de proporcionalidad adimensional y la ecuación del CERC, así como la influencia que tiene el tamaño del sedimento en dicho parámetro, se emplearon cinco diferentes formulaciones para determinar su valor:

1) Bailard:

$$K = 0.050 + 2.6 \operatorname{sen}^2(2\alpha_b) + 0.0096 \tan \beta + 0.0073 \frac{u_m}{W_f} \quad (6.13)$$

2) Del Valle et al.:

$$K = 1.4 \exp^{-2.5D_{50}} \quad \text{solo cuando} \quad 0.44 \text{ mm} < D_{50} < 1.5 \text{ mm} \quad (6.14)$$

3) King:

$$K = 2 \left[\frac{0.1}{(D_{50})(1000)} \right] \quad (6.15)$$

4) Swart:

$$K = 1.15 \log_{10} \left(\frac{0.00146}{D_{50}} \right) \quad (6.16)$$

5) Kamphuis:

$$K = 2 \left(0.022 \sqrt{\frac{\gamma_b H_b}{D_{50}}} \right) \quad (6.17)$$

donde u_m es la máxima velocidad oscilatoria (m/s) del oleaje en aguas someras y se obtiene con:

$$u_m = \frac{\gamma_b}{2} \sqrt{gd_b} \quad (6.18)$$

y $\gamma_b = H_b/d_b$ representa el índice de la rompiente (adimensional). Como se puede identificar, no existe aún hoy en día una anuencia sobre cómo el parámetro K depende del tamaño, densidad, velocidad de caída y formas del sedimento, la temperatura y salinidad del agua y el ángulo de la incidencia (Swart, 1976; Kamphuis et al., 1986; Del Valle et al., 1993; King, 2005).

Kamphuis (1991) desarrolló una relación para calcular el volumen del transporte de sedimentos longitudinal en una playa, a partir de datos obtenidos de una modelación física; la ecuación se encuentra expresada por:

$$I_{lk} = 2.27 H_b^2 T^{1.5} m^{0.75} D_{50}^{-0.25} \operatorname{sen}^{0.6}(2\alpha_b) \quad (6.19)$$

donde m es la pendiente de la playa sobre la cual se desplazan una o dos longitudes de ola (adimensional). La ecuación de Kamphuis es relevante, ya que en dicha expresión se toman en cuenta los efectos del periodo del oleaje y la pendiente de la playa, siendo que ambos ejercen una influencia en la altura de la ola y el tamaño del sedimento, que a su vez, se consideran factores importantes en el desplazamiento del sedimento de la playa. La expresión 6.19 puede sustituir a la ecuación 6.11 en la formulación 6.12.

Por otra parte, la formulación de Bayram et al. (2007) considera los valores promedio de la concentración de la suspensión del sedimento, así como la magnitud promedio de la velocidad de la corriente paralela a la costa que se presenta en la zona de rompientes; región en la cual, la corriente se origina a partir de las olas que rompen, por el viento o las mareas. Además, en la ecuación se agrega un coeficiente de transporte que es función del número de Dean (expresión 6.3). El volumen del TLS, según Bayram et al., se puede obtener usando:

$$Q_t = \frac{\chi}{(\rho_s - \rho) g (1 - P_{or}) W_f} F \bar{V} \quad (6.20)$$

donde:

$$F = E_b C_{gb} \cos \theta_b; \quad (6.21)$$

$$\bar{V} = \frac{5}{32} \frac{\pi \gamma_b \sqrt{g}}{c_f} A^{3/2} \text{sen } \alpha_b \quad (6.22)$$

$$\chi = \left(9.0 + 4.0 \frac{H_b}{TW_f} \right) \cdot 10^{-5} \quad (6.23)$$

siendo F la energía del flujo del oleaje (N/s), \bar{V} representa la velocidad la corriente paralela a la costa (m/s), χ es un coeficiente de transporte (adimensional); c_f y A son los valores del factor de fricción de la corriente (adimensional) y el parámetro de escala del sedimento ($m^{1/3}$), respectivamente.

A través de la modelación numérica se determinaron las características de las olas que llegan a la playa, además a través de los mapas de flujo de energía que se generaron, fue posible la identificación de sectores en la línea de costa donde la energía se manifiesta con un mayor grado; el reconocimiento de estas zonas permite establecer aproximadamente los sitios de las playas que son especialmente propensos a presentar algún grado de erosión^c, directamente relacionados con el oleaje y los fenómenos que se derivan de éste. Una manera de reafirmar los efectos que tienen las olas sobre las playas se basa en relacionar el flujo de energía con el transporte de sedimentos, en este caso, longitudinal y a partir de ello, analizar el acarreo litoral, para ligarlo directamente con el comportamiento morfodinámico o estado modal de la playa. Este ejercicio se ha realizado y los resultados de la cuantificación del volumen de sedimentos para las líneas de costa de Cancún y Puerto Morelos, se presentan a continuación.

En la tabla 6.4 se enlistan los datos obtenidos del cálculo del transporte de sedimentos

^cgeneralmente conocidos en el argot costero, como “hot spots”.

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

longitudinal de 18 escenarios para la zona de Cancún. Como se ha mencionado, la evaluación del volumen de sedimento se efectuó mediante el uso de tres modelos matemáticos; en uno de ellos (la expresión del CERC) se utilizaron cinco formulaciones diferentes para determinar el parámetro K , que se requiere en la expresión 6.11; además el volumen que se obtuvo fue multiplicado por un lapso de tiempo, con el objeto de producir una tasa de variación volumétrica del sedimento que componen las playas y que éste tienden a movilizarse bajo las solicitaciones que origina en un evento meteorológico extremo. Dicha magnitud puede ser considerada como un valor potencial de erosión de una playa. Para verificar la cantidad de material que se mueve en una tormenta, Norte o huracán se eligieron tres periodos de tiempo, que permitirían vislumbrar cuanta arena se mueve, de manera aproximada en un lapso de diez minutos, una y seis horas.

La tabla 6.4 reafirma el hecho que la dirección del oleaje que es más desfavorable para las playas de Cancún es la noreste. Si se compara cualquiera de los valores que arrojan las distintas formulaciones para la dirección noreste y sureste, se observará que los mayores valores, siempre se presentan cuando las olas llegan a la playa del sector que se localiza a 45° con respecto al norte e independientemente de la ecuación que se consulte, el volumen de sedimentos que se desplaza bajo la dirección más desfavorable para la costa es de dos o más órdenes de magnitud con respecto a los valores mostrados en el sector sureste.

Es evidente que la ecuación del CERC proporciona mayores valores de transporte con respecto a las expresiones de Kamphuis y Bayram et al., comprobándose la afirmación de Wang et al. que sugirieron que el análisis del transporte de sedimentos longitudinal en una condición de tormenta, se evalué con la ecuación 6.11 y para condiciones normales utilizar, ya sea la expresión 6.19^d o 6.20.

Cuando los ciclones tropicales que se forman en el Océano Atlántico se desplazan hacia el norte, a través del Mar Caribe, éstos o sus remanentes suelen afectar a los sistemas litorales que se encuentran dentro de las zonas que se estudian; los efectos que dichos fenómenos meteorológicos producen en una línea de playa tan vulnerable como la de Cancún, se ven materializados en una gran pérdida de sedimentos de la playas; en Octubre del año 2005, el huracán Wilma se presentó en la región noreste del Quintana Roo y ocasionó con su paso que fueran movidos entre 4 y 6 millones de metros cúbicos de arena en el línea de playa de Cancún (Lara et al., 2006). Considerando este dato como elemento de juicio para realizar una comparación de las diferentes expresiones utilizadas para cuantificar el transporte de sedimentos y sugerir el uso de alguna de ellas en las regiones analizadas, es posible establecer que con el D_{50} promedio que se obtuvo a partir de la determinación de las propiedades físicas de los sedimentos de Cancún, la ecuación que proporciona valores similares a los provocados por el huracán Wilma es la del CERC. Es por ello que se recomienda utilizar las ecuaciones sugeridas por Del Valle et al., King y Swart para calcular el parámetro K ; en la tabla 6.4 se puede observar que el volumen de sedimentos calculado con estas formulaciones es semejante al registrado, sin embargo la ecuación propuesta por Del Valle et al. 6.14 solamente puede ser empleada, bajo un cierto rango de tamaños de sedimento, lo que la imposibilita a ser usada

^d *cf.* Abadie et al. (2006).

Tabla 6.4. Potencial de erosión en las playas de la región de Cancún

No.	D_{50} (mm)	Zona	Dirección	Duración tormenta (hrs)	Sedimento desplazado ($m^3/día$)									
					CERC								Kamphuis	Bayram et al.
					Bailard	Del Valle et al.	King	Swart	Kamphuis					
1	0.1986	Cancún (I)	Noreste	6	18,728,522	8,940,948	8,845,775	36,369,468	666,607	405,023				
2	0.8696	Cancún (I)	Noreste	6	18,728,522	1,413,528	2,297,616	17,380,682	460,824	405,023				
3	0.4425	Cancún (I)	Noreste	6	18,728,522	4,111,711	4,012,819	5,293,328	545,615	405,023				
4	0.1986	Cancún (I)	Noreste	1	3,121,420	1,490,158	1,474,295	6,061,578	111,101	67,503				
5	0.8696	Cancún (I)	Noreste	1	3,121,420	235,588	382,936	2,896,780	76,804	67,503				
6	0.4425	Cancún (I)	Noreste	1	3,121,420	685,285	882,221	4,060,866	90,935	67,503				
7	0.1986	Cancún (I)	Noreste	0.16	499,427	238,425	235,887	969,852	17,776	10,800				
8	0.8696	Cancún (I)	Noreste	0.16	499,427	37,694	61,269	463,484	12,288	10,800				
9	0.4425	Cancún (I)	Noreste	0.16	499,427	109,645	141,155	649,738	10,800	10,800				
10	0.1986	Cancún (I)	Sureste	6	3,745,785	3,472,430	3,435,467	13,742,852	659,850	155,181				
11	0.8696	Cancún (I)	Sureste	6	3,745,785	548,977	892,334	6,567,600	456,152	155,181				
12	0.4425	Cancún (I)	Sureste	6	3,745,785	1,596,881	2,055,790	9,206,824	540,084	155,181				
13	0.1986	Cancún (I)	Sureste	1	624,297	578,738	572,577	2,290,475	109,975	25,863				
14	0.8696	Cancún (I)	Sureste	1	624,297	91,496	148,722	1,094,600	76,025	25,863				
15	0.4425	Cancún (I)	Sureste	1	624,297	266,146	342,631	1,534,470	90,014	25,863				
16	0.1986	Cancún (I)	Sureste	0.16	99,887	92,598	91,612	366,476	17,596	4,138				
17	0.8696	Cancún (I)	Sureste	0.16	99,887	14,639	23,795	175,136	12,164	4,138				
18	0.4425	Cancún (I)	Sureste	0.16	99,887	42,583	54,821	245,515	14,402	4,138				

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

en diámetros menores de 0.44 mm. Así pues, se recomienda utilizar las expresiones 6.15 y 6.16 para obtener una estimación del transporte de sedimentos longitudinal, que suele requerirse frecuentemente en los proyectos de ingeniería que se desarrollan en la costa.

Las arenas de menor diámetro facilitan al oleaje y a las corrientes litorales la movilización de las partículas a través de la playa, ya que gran cantidad de éstas son puestas en suspensión lo que facilita su desplazamiento. Sin embargo los sedimentos de mayor tamaño tienden a desarrollar una mejor capacidad de resistencia al movimiento que provocan los agentes naturales marinos; en las costas que se depositan materiales gruesos, el transporte de fondo deberá considerarse el más importante en comparación al de suspensión, siendo éste último más relevante en las playas de sedimentos finos. En la tabla del potencial de erosión de las playas de Cancún, se identifica que el transporte generado por una partícula de 0.8696 mm es menor con respecto al provocado por una arena de 0.1986 mm, independientemente de la expresión que se elija para calcular el volumen de sedimento; lo anterior, ratifica la estrecha relación que existe entre el tamaño del sedimento con la magnitud del transporte de sedimentos. Si bien es cierto que el D_{50} del material que se deposita sobre las playas se considera directamente solo en la formulación de Kamphuis y tanto en la del CERC como la Bayram et al. dicho parámetro se encuentra relacionado de manera implícita.

Es precisamente la influencia del tamaño del sedimento quien genera las mayores diferencias de los valores de K en la ecuación del CERC. Solamente en la expresión de Bailard, dicho parámetro está tácitamente considerado en la velocidad de caída de la partícula que se relaciona con la máxima velocidad oscilatoria del oleaje; por otra parte, en las formulaciones de Del Valle et al., King, Swart y Kamphuis el diámetro de las arenas se relaciona directamente con el coeficiente de proporcionalidad, lo que induce que cuando se tenga un tamaño de grano menor, el valor de K será mayor; de ahí que el volumen del transporte aumente y este comportamiento se puede comprobar mediante el análisis de las tablas 6.4 y 6.5 .

Como se ha mencionado anteriormente, la línea de costa que se localiza entre Punta Pemtempich y Punta Brava (línea de playa “de” Puerto Morelos) se encuentra abrigada por un cordón arrecifal, lo que trae consigo desde una perspectiva de morfodinámica, cierta estabilidad a la playa. Con la meta de equiparar los volúmenes de arena de sistemas litorales que tienen estados de equilibrio diferentes, en la tabla 6.5 se presenta la cuantificación del transporte longitudinal de sedimentos (denominado para este trabajo, potencial de erosión) correspondiente a la costa de Puerto Morelos.

Al comparar las tablas 6.4 y 6.5, se identifica que el tamaño del sedimento promedio es más fino que el depositado en las playas de Cancún; a partir de los datos obtenidos se ratifica la hipótesis que señala que cuando se presenta un menor tamaño de sedimento, se registrará un mayor volumen de sedimentos desplazados. Por ejemplo, si una playa se encontrara sujeta a los efectos de una tormenta durante una hora, la arena con un D_{50} de 1.3 mm representaría el 6 % del volumen total del sedimento, calculado mediante la ecuación del CERC y la expresión de Swart para K .

Tabla 6.5. Potencial de erosión en las playas de la región de Puerto Morelos

No.	D_{50} (mm)	Zona	Dirección	Duración tormenta (hrs)	Volumen del transporte de sedimentos longitudinal (m^3 /día)							
					CERC				Bayram et al.			
					Ballard	Del Valle et al.	King	Swart	Kamphuis	Kamphuis	Kamphuis	Bayram et al.
1	0.2794	Pto. Morelos (IV)	Noreste	6	4,949,420		858,063	1,979,905	2,380,513	9,641	51,203	51,203
2	1.309	Pto. Morelos (IV)	Noreste	6	4,949,420	127,246	183,149	130,720	1,099,800	6,553	51,203	51,203
3	0.2969	Pto. Morelos (IV)	Noreste	6	4,949,420		807,487	1,907,1642	2,309,291	9,496	51,203	51,203
4	0.2794	Pto. Morelos (IV)	Noreste	1	824,903		286,021	329,984	793,504	1,606	8,533	8,533
5	1.309	Pto. Morelos (IV)	Noreste	1	824,903	21,207	61,049	21,786	366,600	1,092	8,533	8,533
6	0.2969	Pto. Morelos (IV)	Noreste	1	824,903		269,162	317,860	769,763	1,582	8,533	8,533
7	0.2794	Pto. Morelos (IV)	Noreste	0.16	131,984		45,763	52,797	126,960	257	1,365	1,365
8	1.309	Pto. Morelos (IV)	Noreste	0.16	131,984	3,393	9,767	3,485	58,656	174	1,365	1,365
9	0.2969	Pto. Morelos (IV)	Noreste	0.16	131,984		43,065	50,857	123,162	253	1,365	1,365
10	0.2794	Pto. Morelos (IV)	Sureste	6	3,494,963		742,050	1,712,216	2,096,063	7,936	44,941	44,941
11	1.309	Pto. Morelos (IV)	Sureste	6	3,494,963	110,042	158,387	113,046	968,384	5,394	44,941	44,941
12	0.2969	Pto. Morelos (IV)	Sureste	6	3,494,963		698,312	1,649,310	2,033,351	7,817	44,941	44,941
13	0.2794	Pto. Morelos (IV)	Sureste	1	582,493		247,350	285,369	698,687	1,322	7,490	7,490
14	1.309	Pto. Morelos (IV)	Sureste	1	582,493	18,340	52,795	18,841	322,794	899	7,490	7,490
15	0.2969	Pto. Morelos (IV)	Sureste	1	582,493		232,770	274,885	677,783	1,302	7,490	7,490
16	0.2794	Pto. Morelos (IV)	Sureste	0.16	93,199		39,576	45,659	111,790	211	1,198	1,198
17	1.309	Pto. Morelos (IV)	Sureste	0.16	93,199	2,934	8,447	3,014	51,647	143	1,198	1,198
18	0.2969	Pto. Morelos (IV)	Sureste	0.16	93,199		37,243	43,981	108,445	208	1,198	1,198

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

Tabla 6.6. Variación de la ecuación de Bayram et al. (2007) según sus parámetros

					Volumen del transporte de sedimentos longitudinal ($m^3/día$)					
					CERC				Kamphuis	Bayram et al.
Punto	Dirección	A ($m^{1/3}$)	D_{50} (mm)	W_f (m/s)	Bailard	King	Swart	Kamphuis	Kamphuis	Bayram et al.
Pto Mor. Pb	Noreste	0.14109	0.37452	0.051535	467,601	126,431	160,878	706,248	15,169	612
Pto Mor. Pl	Noreste	0.12624	0.29727	0.040092	470,440	159,287	188,193	792,719	16,071	493
Cancún 4APb	Noreste	0.11573	0.24864	0.034365	472,890	190,441	209,316	866,781	16,805	444

De la comparación de la información, se determinó una tasa de variación que reflejara la diferencia entre volúmenes obtenidos con granos de arena finos y gruesos; tanto para la zona de Cancún y Puerto Morelos se encontró que el volumen de arena para sedimentos de un mayor tamaño, representarán el 22% del volumen total que se obtiene para los sedimentos finos, utilizando la formulación de King para el coeficiente de proporcionalidad; si se utiliza la expresión de Kamphuis para conocer el valor de K , entonces la relación de la variación se incrementa a un 45%. Sin embargo, cuando se emplea la expresión de Swart, dicho porcentaje difiere tanto en Cancún (25%) como en la zona de Puerto Morelos, que es del 6%. Esta relación podría considerarse útil para proyectos de rellenos de playas, ya que permitiría vislumbrar de una manera rápida los umbrales de las cantidades de sedimento que se moverían, dependiendo de las características del tamaño del sedimento.

Mediante el análisis de los valores obtenidos del transporte de arena con la ecuación de CERC-Bailard se puede identificar que en la formulación de Bailard, para el parámetro K , la influencia del diámetro del sedimento se encuentra representada implícitamente en la velocidad oscilatoria de las olas; por otra parte, si se revisan las magnitudes de la velocidad de caída del sedimento en la tabla 6.1, no existe una diferencia considerable entre los valores correspondientes entre Cancún y la zona de Puerto Morelos, ante ello se ratifica que el flujo de energía es el parámetro más relevante en la expresión del CERC-Bailard. A través de las magnitudes calculadas por las ecuaciones 6.11 y 6.13, fue posible reconocer que los mayores valores se suscitan cuando el oleaje proviene de la dirección noreste; por ello las olas que se aproximan de dicha dirección son las que más influyen en el comportamiento hidro-morfodinámico de la isla barrera de Cancún y la línea de costa que se encuentra entre Punta Petempich y Punta Brava.

A través del análisis de la disparidad de los volúmenes totales de arena susceptibles a ser transportados, es posible establecer el papel que tienen los arrecifes coralinos para disipar la energía del oleaje y la protección de la playa, ya que en la zona de Cancún se mueven mayores cantidades de arena que en la región de Puerto Morelos.

Respecto a la expresión que desarrolló Kamphuis para cuantificar el valor del transporte de sedimentos longitudinal, se puede concluir por medio de la comparación de los resultados obtenidos con su ecuación y la de Bayram et al. (2007), que debido a la implicación que se hace del efecto que produce la ola a través de la pendiente de la playa en los sedimentos, se registra un mayor volumen que el calculado con la expresión 6.20. De manera tal que se recomienda el uso de la ecuación 6.19 para condiciones normales y cuando se desea involucrar de modo más activo el tipo de rotura del oleaje sobre la pendiente de la zona litoral.

Como se percibe, en las tablas 6.4 y 6.5, no es posible notar alguna variación en los valores determinados por la formulación de Bayram et al. (2007); esto se debe a que los parámetros que rigen el comportamiento de dicha expresión se establecieron como constantes. Ante ello y a manera de ejemplo, en la tabla 6.6 se muestran los resultados que se obtuvieron al cambiar las principales variables que desempeñan un papel relevante en dicha formulación, puesto que ésta trata de tomar en consideración el efecto de las corrientes litorales, el flujo de energía del oleaje y en el estado de equilibrio de la playa en el transporte de sedimentos. A partir del análisis de los resultados, se identificó que el transporte de sedimentos es mayor cuando los valores de la velocidad de caída y el parámetro de escala se consideren altos, recordando que cuando la magnitud del parámetro A es alta, esto produce que el perfil de equilibrio de una playa sea más tendido. Para trabajos futuros es posible aplicar esta expresión matemática para la cuantificación del volumen de sedimentos en condiciones normales, ya que la información que resultó de la determinación de las principales propiedades físicas de la arena de las playas del noreste de Quintana Roo, podrían ser utilizados en el cálculo del transporte de sedimentos longitudinal. De las ecuaciones utilizadas para el transporte de sedimentos longitudinal para condiciones de tormenta, se recomienda utilizar la ecuación del CERC, sin embargo deberá ponderarse las limitaciones que ésta tiene para realizar una adecuada interpretación de los resultados obtenidos.

El análisis del volumen total o neto del transporte de sedimentos ha sido presentado en las tablas correspondientes al potencial de erosión en las playas de la región de Cancún y Puerto Morelos, sin embargo en las figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 se exhibe de manera gráfica la cuantía del transporte de arena en cada de los puntos correspondientes a las costas de la zona 1 y 4.

En estas figuras también se muestra la evolución del transporte de sedimento a lo largo de las costas estudiadas, mediante la aplicación de los modelos matemáticos del CERC (incisos a), Bayram et al. (2007) (incisos b) y Kamphuis (1991) (incisos c). Cabe resaltar que la expresión propuesta por Bayram et al. (2007) fue desarrollada a partir del análisis del flujo de energía del oleaje en la zona de rompientes, por lo cual los resultados obtenidos tienen cierta similitud con el comportamiento mostrado por la del CERC; al adicionar el efecto de más fenómenos y procesos físicos, consiguen precisar la magnitud del transporte de sedimentos.

La relevancia que poseen las diferentes gráficas que se incluyen en cada figura, radica en el hecho que a partir de ellas es posible identificar que playas son potencialmente propensas a sufrir el desplazamiento de sus sedimentos, así como conocer de manera cuantitativa cuánto material es trasladado de su región de depositación. La generación de este tipo de gráficas tiene como objetivo dar mayor certeza a las conclusiones alcanzadas por análisis hidrodinámico; los mapas de alturas de las olas, así como del flujo de energía y estados modales pueden amalgamarse con la información que ha sido plasmada en las gráficas para determinar los estados morfodinámicos de cada playa.

Es conveniente mencionar que, en las gráficas, se puede observar que el transporte de sedimentos siempre tendrá un valor positivo o negativo; el signo proporcionará la dirección

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

del acarreo litoral, para este estudio, todo el volumen de arena con signo positivo se mueve de manera paralela a la costa hacia el norte, mientras que los valores negativos se mueven hacia el sur. Desde la visión del transporte de sedimentos, el punto donde converja una magnitud positiva con una negativa, puede señalarse como un sitio donde ocurrirá cierto grado de depositación; no obstante, el empleo de este criterio también puede ser utilizado para determinar el estado morfodinámico de una playa, puesto que se encuentran los patrones de depositación y erosión de la playa. Debe tomarse en cuenta que la configuración de la celda o sistema litoral, también influirán en la captación o pérdida del material de la playa.

Para ejemplificar el criterio planteado en el signo del transporte de sedimentos, se observa que en la gran mayoría de las playas de Cancún (figuras 6.7 y 6.9) existirían predominantemente estados de erosión y en las escasas áreas donde se presentaría una depositación, el volumen de material que se coloca sería el mínimo. Para la zona de Punta Pemtempich a Punta Brava (figuras 6.8 y 6.10), se advierte un mayor número de playas en las cuales podrían presentarse depositación de sedimentos.

Es evidente que el oleaje que tiene más influencia en los procesos costeros que se desarrollan en la línea de costa de la parte noreste de Quintana Roo. Cuando el oleaje tiene una dirección sureste, las playas que se encuentran al norte de la isla barrera son las que presentan mayor volumen de sedimentos desplazados; mientras que para la zona de Punta Petempich-Brava, los volúmenes de arena más relevantes se moverán hacia las puntas. Si el oleaje se aproxima del sector noreste, en las playas del área central y sur de Cancún se identificará la movilización de arena; este comportamiento varía en la costa de Puerto Morelos donde se observa que las partes norte y central son donde se ve un comportamiento más activo del transporte de sedimentos.

El crecimiento del coral ha sido mínimo en épocas recientes, lo que ha ocasionado que las características de las estructuras más antiguas sean las que dominan aun hoy en día la morfología del sistema arrecifal. La especie más comunes en la cresta y en la zona frontal son la *Acropora palmata*^e y *Montastraea annularis*^f, respectivamente. La laguna arrecifal se encuentra principalmente, cubierta por pasto marino de la especie *Thalassia testudinum* y algas de la especie *Halimeda incrassata*^g, dicha especie se cataloga como el principal productor de materia orgánica y de carbonato de calcio $CaCO_3$ (Jordan, 1979); se ha calculado que la producción de $CaCO_3$ que la Halimeda puede generar anualmente, se encuentra en el rango de $580 - 1051g/m^2$ (Van Tussenbroek y Van Dijk, 2007).

Los sistemas litorales y arrecifales que se ubican en la zona noreste del Estado de Quintana Roo, son altamente vulnerables a los efectos que los huracanes producen al acercarse a la Península de Yucatán, siendo el oleaje de tormenta uno de los agentes que provoca el

^ecoral, comúnmente llamado cuernos de alce, es fácil de reconocer debido a sus grandes ramas las cuales llegan a medir más de 2 metros de longitud y tener el grueso de un cuerpo humano en el área basal.

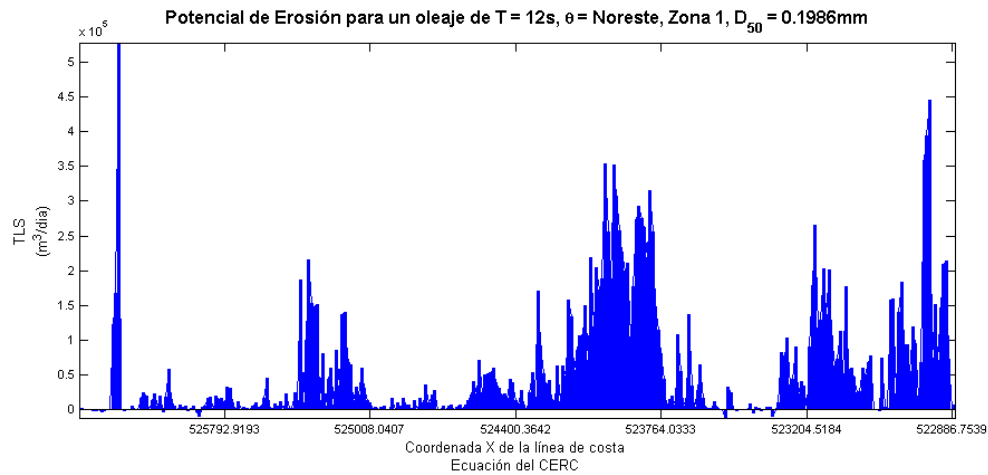
^fcolonias de coral formadas por nódulos densamente agrupados o columnas anchas separadas. Exhiben superficies onduladas sin presencia de protuberancias irregulares, lo que provoca una similitud con la forma de un cerebro humano.

^galga de color verde tropical que generalmente, habita en las claras y cálidas aguas de las zonas tropicales.

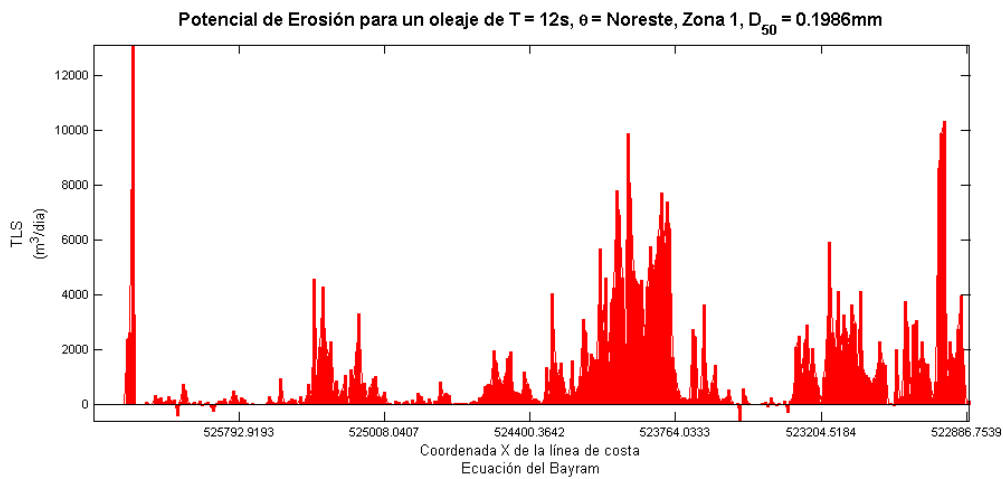
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

desplazamiento de sedimento en las costas; ante ello frecuentemente, algunas de las playas de esta zona tienden a perder sedimentos, lo que origina que éstas se rellenen de manera artificial por el ser humano. En muchos de los casos que se requiere recuperar el frente de playa de un determinado sitio en la zona, no suele ser una opción adecuada evaluar que el relleno de la playa se pudiera realizar por la misma naturaleza, debido a la carencia de aporte de sedimento superficial y la poca contribución de material que podrían hacer los arrecifes; para vislumbrar de una manera simple, el tiempo que una playa necesitaría para recuperar sedimentos de manera natural y teniéndose en cuenta la tendencia de la *Halimeda incrassata* para generar sedimentos de carbonato de calcio, considérese el siguiente caso: si las playas de Puerto Morelos perdieran arena y esto ocasionará que el frente de la playa se redujera de 14 a 10 metros en una extensión de 12 kilómetros de longitud, tendrían que transcurrir aproximadamente 50,000 años para que se restituir el ancho de playa perdido.

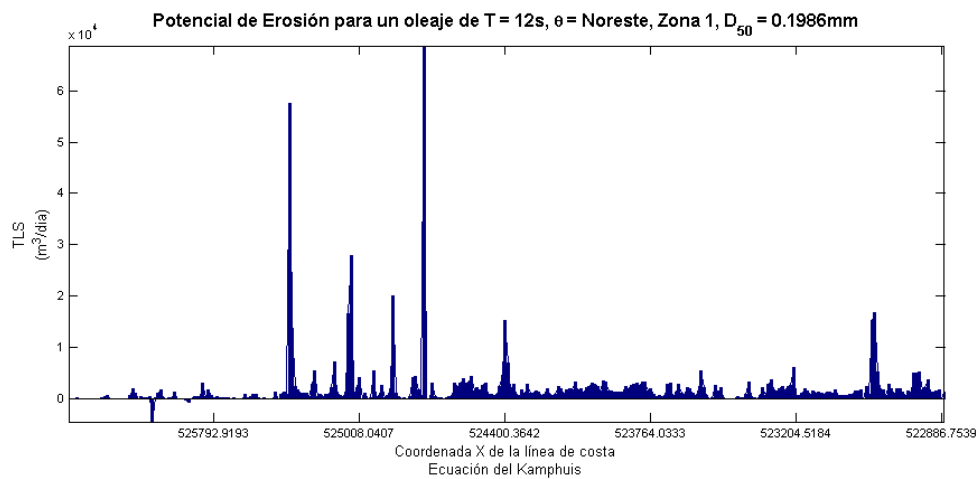
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS



(1)



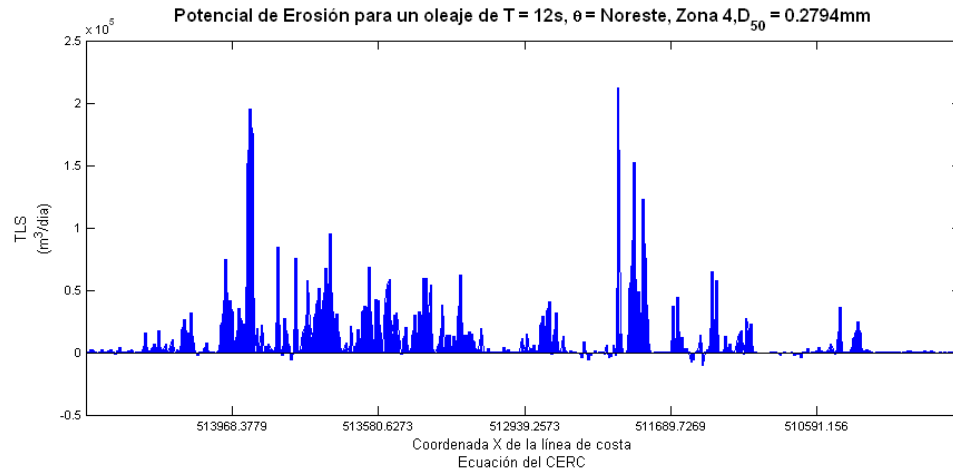
(2)



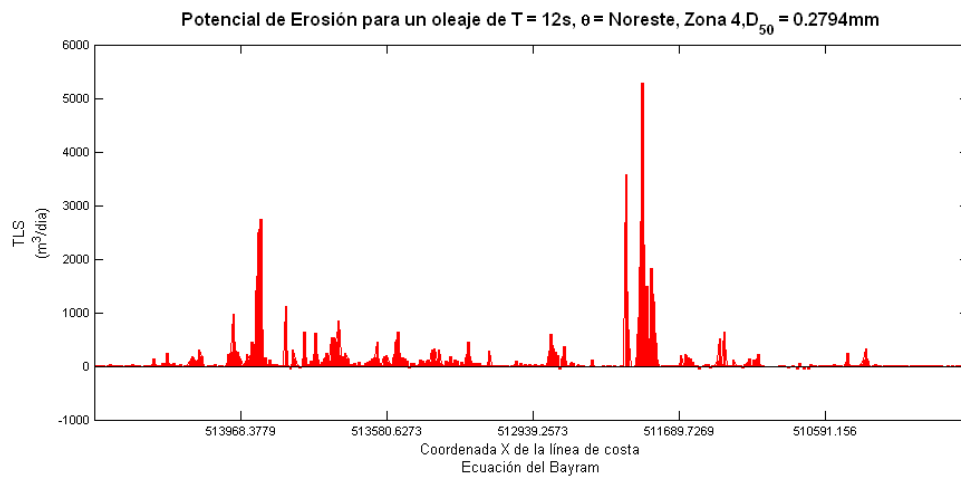
(3)

Figura 6.7. Patrón de comportamiento del transporte de sedimentos longitudinal a lo largo zona 1 (Cancún) con dirección de propagación, NE.

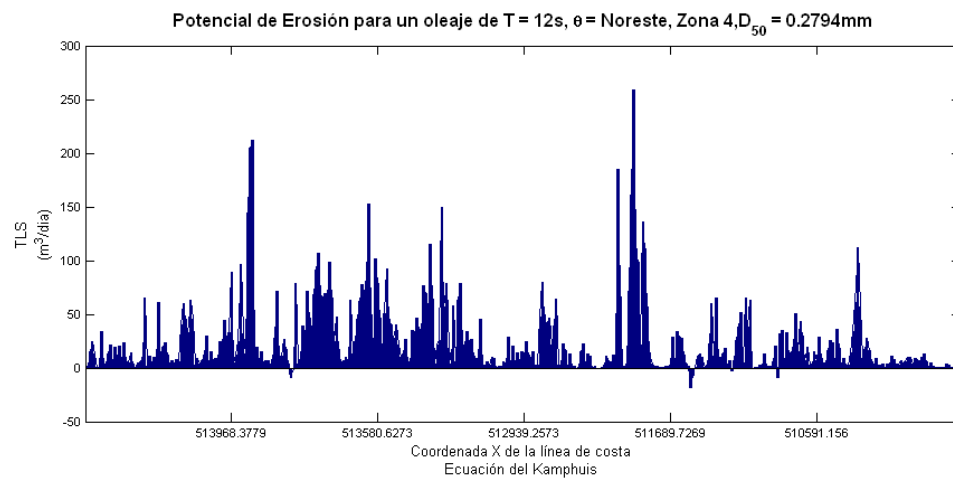
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS



(1)



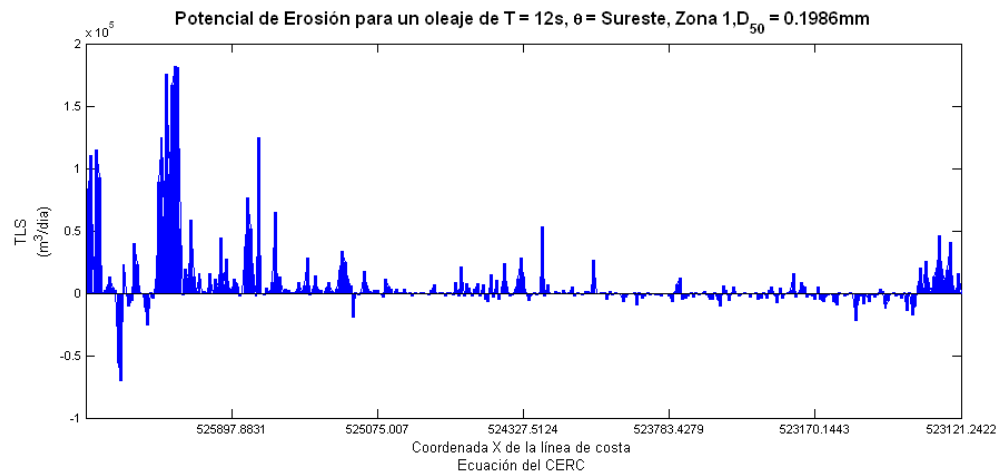
(2)



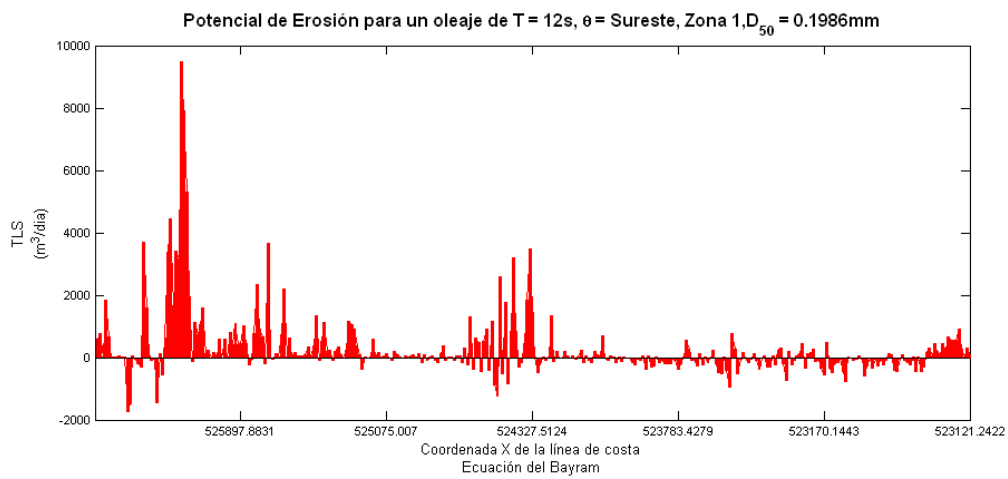
(3)

Figura 6.8. Patrón de comportamiento del transporte de sedimentos longitudinal a lo largo zona 4 (Puerto Morelos) con dirección de propagación, NE.

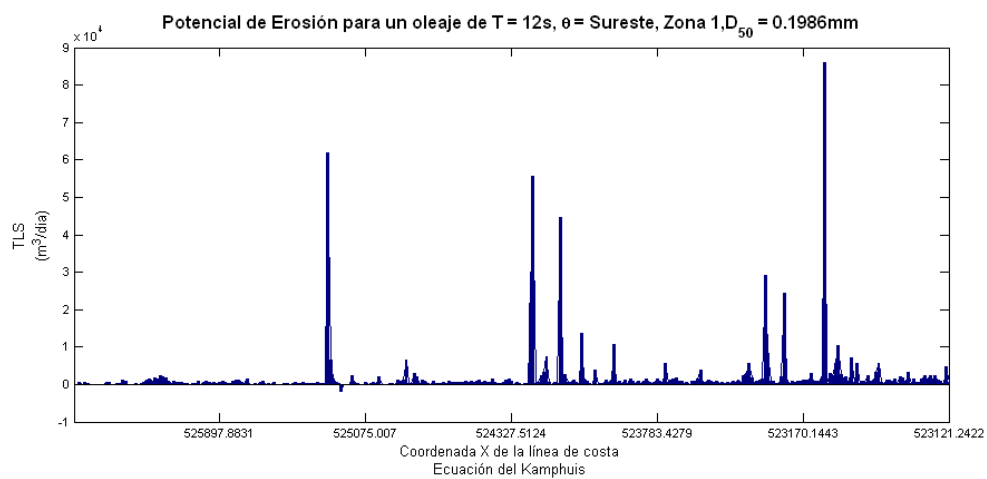
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS



(1)



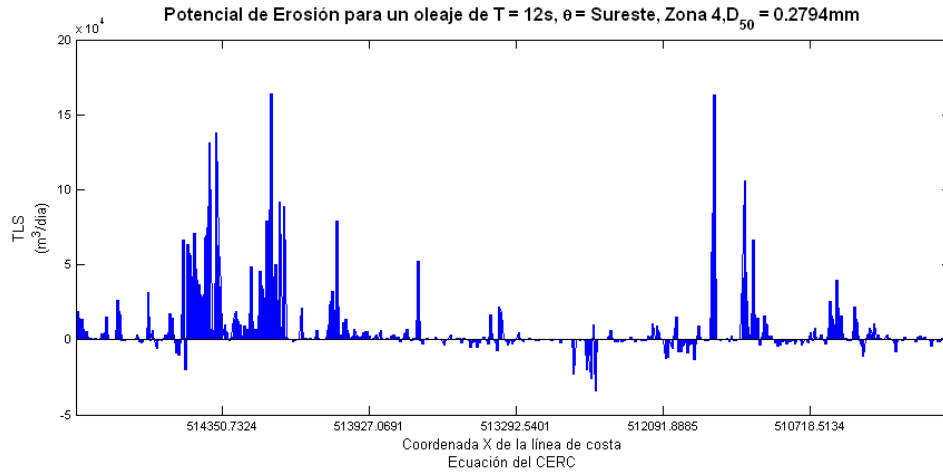
(2)



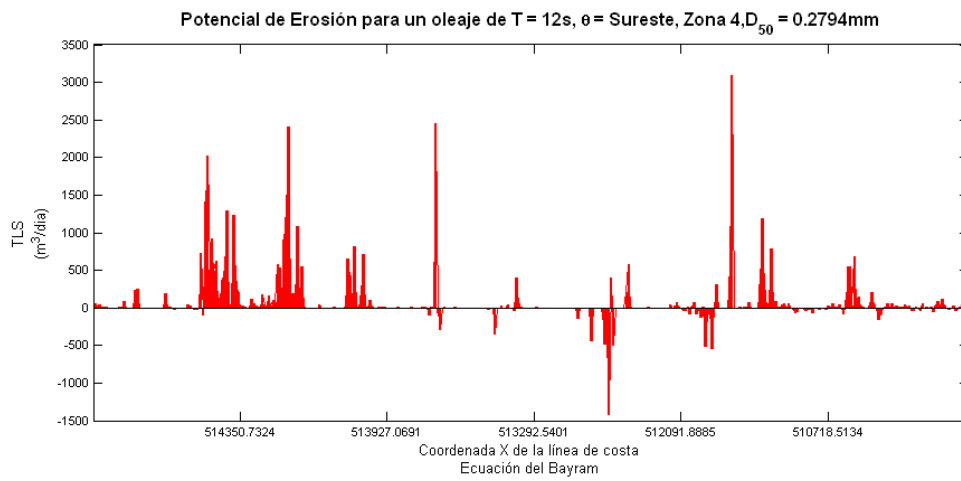
(3)

Figura 6.9. Patrón de comportamiento del transporte de sedimentos longitudinal a lo largo zona 1 (Cancún) con dirección de propagación, SE.

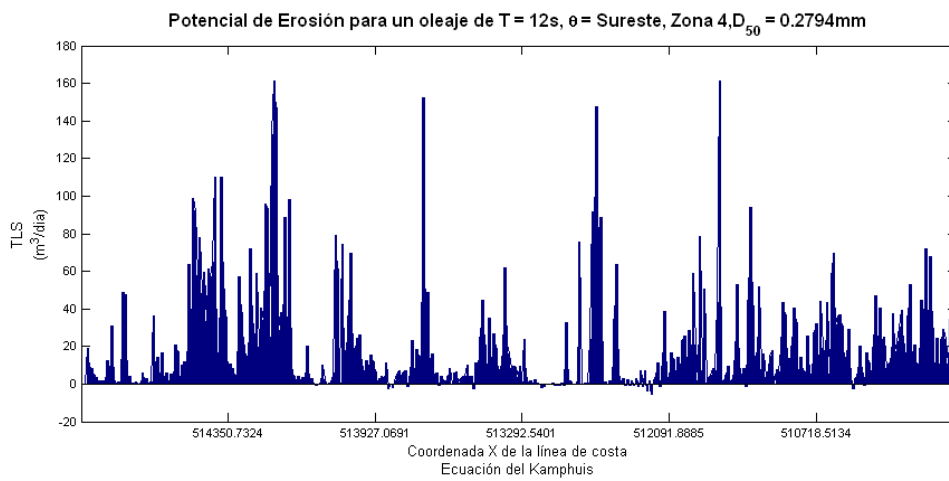
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS



(1)



(2)



(3)

Figura 6.10. Patrón de comportamiento del transporte de sedimentos longitudinal a lo largo zona 4 (Puerto Morelos) con dirección de propagación, SE.

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL ESTADO MORFODINÁMICO Y POTENCIAL DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS

Aportaciones, Conclusiones, Recomendaciones y futuras líneas de investigación

7.1. Aportaciones

La principal aportación de este trabajo de investigación es la propuesta y aplicación de una metodología para detectar los procesos y condiciones que debilitan la estabilidad de las playas de la costa noreste del estado de Quintana Roo. Las etapas de la metodología desarrollada incluyen la revisión y análisis, a nivel regional, de: las características geológicas y geomorfológicas las propiedades físicas de los sedimentos, la estadística del clima marítimo, la hidrodinámica inducida por el oleaje y el potencial de erosión de las playas. Con los resultados es posible determinar el estado morfodinámico de cada una de las playas dentro del área de estudio.

Adicionalmente, el trabajo presenta una serie de avances en el estado del arte de la estabilidad y clima costero, mismos que se enlistan a continuación:

- A partir de la caracterización geológica y geomorfológica del corredor turístico Tulúm-Cancún, se generó una base de datos inédita que contiene las principales características de las formas costeras del noreste de Quintana Roo.
- Se compiló el primer banco de datos con los parámetros físicos más relevantes de las arenas de playa del noreste de Quintana Roo. Cabe señalar que los parámetros se midieron en el Instituto de Ingeniería.
- Se implementó un modelo numérico híbrido para predicción de oleaje en aguas profundas. Con sus resultados se construyó un atlas de clima marítimo para el Golfo de México y Mar Caribe que contiene información estadística resumen de 60 años.
- A partir de las simulaciones numéricas de dinámica del oleaje cerca de la costa, se crearon 250 mapas que describen los campos de oleaje, a nivel local, para la región noreste del estado de Quintana Roo.

7.2. Conclusiones

- A partir de la recopilación de la información geológica se identificó que: a) en la región de interés no existen fuentes superficiales de sedimento que alimenten de manera natural a las playas, b) el tipo de arena que se deposita en las playas es predominantemente calcáreo y se encuentra formado por oolitas.

CAPÍTULO 7. APORTACIONES, CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- El análisis de la geomorfología costera del noreste de Quintana Roo permitió reconocer los mecanismos de retroalimentación (positiva y negativa) de las playas y su relevancia la estabilidad de las mismas.
- El corredor turístico Tulúm-Cancún se dividió en cinco regiones en función del grado de protección y el estado de equilibrio morfodinámico de cada playa. Esta información se cruzó con las propiedades del sedimento y se halló que: a) en las playas protegidas por arrecife de coral (Akumal, Puerto Morelos, Puerto Príncipe, Sian Ka'an) el diámetro medio de la arena es menor respecto de las playas que no tienen dicha protección (Cancún, Punta Brava, Playa del Carmen); b) las propiedades físicas de los sedimentos de Sian Ka'an y Puerto Morelos (protegidas) son muy similares y c) los sedimentos más densos se encuentran en Cancún (presumiblemente alterados por el relleno artificial), mientras que los más ligeros se localizan en la zona de Tulúm y Akumal.
- El análisis del clima marítimo del Golfo de México y Mar Caribe, obtenido vía re-análisis de viento y predicción de oleaje desde el año 1948 a 2007; indicó que la zona noreste de Quintana Roo es el tramo costero más vulnerable de la vertiente Atlántica mexicana, ya que sus playas son las que reciben la mayor cantidad de energía que genera el oleaje.
- Las estimaciones de los campos de oleaje local permitieron comprender más detalladamente la función de los arrecifes como protección costera natural. De ahí se concluye que, en condiciones ordinarias, aún cuando parte de la energía del oleaje pasa a través de las discontinuidades que existen en el cordón arrecifal, no genera condiciones con la capacidad de alterar de manera significativa los estados morfodinámicos y de equilibrio de las playas. Por otra parte, cuando se presenta una tormenta, la sobre-elevación del nivel del mar asociada hace que parte del oleaje se propague por encima de los arrecifes provocando una condición más energética en la playa. Sin embargo, la disipación de energía debida al arrecife es suficiente para evitar que los mecanismos de recuperación natural de las playas sean afectados de manera considerable. Luego entonces, dos condiciones son directamente responsables de la pérdida permanente de playa seca, el debilitamiento o no existencia de arrecife y la actividad humana. Obviamente la combinación de ambas representa la condición más desfavorable (*e.g.* caso Cancún).

7.3. Recomendaciones

El trabajo de investigación que se presenta en esta Tesis ha sido desarrollado buscando evaluar la influencia de diferentes procesos y condiciones en la estabilidad de un sistema litoral. Si bien, durante la investigación nunca se planteó como objetivo resolver los problemas de erosión costera que se observan en algunas playas de la zona de estudio, en virtud del conocimiento generado de la física y dinámica involucrada, es posible realizar algunas recomendaciones al respecto para reducirlos. El caso más popular y de interés nacional, razones por las cuales se toca en específico, es el frente de playa de Cancún.

A partir del comportamiento morfodinámico de los sistemas litorales estables que existen

en la zona (*e.g.* Puerto Morelos), se considera que la playa de Cancún es recuperable siempre que:

1. Se devuelva al sistema la flexibilidad con que contaba antes de la explotación turística masiva de la zona costera. Esto es, permitir que la comunicación entre el sistema lagunar y el litoral se presente cuando las condiciones climatológicas y morfológicas así lo requieran. Esta acción, a la par de favorecer la estabilidad de la playa es benéfica para la calidad de agua al interior del sistema lagunar Nichupte.
2. Se genere la reducción energética y protección de los puntos más vulnerables del frente playero mediante la colocación de estructuras que emulen el funcionamiento de los arrecifes.

Cabe señalar que un relleno artificial de arena no puede considerarse como la única acción para dar solución al problema de erosión en Cancún, ya que la actividad humanas ha llevado al sistema a un grado de inestabilidad que demanda soluciones rígidas (estructuras) o la combinación de rígidas con flexibles. La función que se puede asignar a un relleno es la de acelerar el proceso de estabilización del sistema, lo cual puede ser necesario cuando en este mismo trabajo se ha dicho que la región no cuenta con fuentes de alimentación de material de playa suficientes.

La solución final y detallada, obviamente, tiene un costo económico, ambiental y social que debe ser evaluado cuidadosamente antes de tomar decisiones definitivas. La valoración de la solución más adecuada depende de muchos factores y su pertinencia se debe incorporar a un plan de manejo costero y ordenamiento litoral, que están fuera del alcance del presente trabajo.

En el apéndice A, se describen de una manera más detallada las aportaciones de cada uno de los capítulos que conforman este trabajo; adicionalmente en dicho apéndice también se encuentra una descripción más amplia de las recomendaciones que se han realizado.

7.4. Futuras líneas de investigación

En el desarrollo de este trabajo fue necesario acotar los fenómenos que serían estudiados y caracterizados, ya que es prácticamente imposible abarcar la totalidad de los fenómenos que interactúan en un sistema litoral. Sin embargo, la información generada constituye una muy buena base para futuros estudios, trabajos y proyectos científicos e ingenieriles en las costas de Quintana Roo.

Aún así, se dejan abiertas una serie de líneas de investigación que bien pueden derivar en estudios posteriores trabajos, entre ellos se pueden citar:

- comprender y explicar con mayor detalle el proceso de recuperación de playas de manera natural o bien inducida por el hombre.
- entender más extensamente el balance sedimentario y el intercambio de material que tiene lugar en playas donde hay poco aporte de sedimentos.

CAPÍTULO 7. APORTACIONES, CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- evaluar la existencia de depósitos (bancos) o sumideros de arena en las proximidades de las playas, así como la delimitación de su superficie y el cálculo del volumen de material que poseen.
- establecer los perfiles transversales tipo y los estados morfodinámicos post-tormenta para las playas del noreste de Quintana Roo.
- realizar la determinación de los estados morfodinámicos de las playas del noreste de Quintana Roo, pero a partir de una perspectiva de corto plazo que permita indagar el comportamiento temporal de la playa.

Bibliografía

- Abadie, S., Butel, R., Mauriet, S., Morichon, D., y Dupuis, H. (2006). Wave climate and longshore drift on the South Aquitaine coast. *Continental Shelf Research*, 26:1924–1939.
- Aguayo, J., Bello, R., Vecchio, M., Araujo, J., y Basañez, M. (1980). Estudio sedimentológico en el área de Tulum-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 41(1-2):15–32.
- Ahrens, J. (2000). Simple equations to calculate fall velocity and sediment scale parameter. *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng. Am. Soc. Civ. Eng.*, 129(3):146–150.
- Badillo, J. y Rodríguez, R. (1995). *Mecánica de suelos*. Limusa-Noriega, México.
- Bayram, A., Larson, M., y Hanson, H. (2007). A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering*, 54:700–710.
- Benassai, G. (2006). *Introduction to coastal dynamics and shoreline protection*. WIT Press, Southampton.
- Berkhoff, J. (1972). Computation of combined refraction-diffraction. En *Proc. 13th. Intl. Conf. Coastal Eng.*, pp. 471–484, Vancouver. ASCE.
- Bird, E. (1993). *Submerging coasts: the effects of a rising sea level on coastal environments*. John Wiley & Sons, UK.
- Bocconi, P. (2000). *Wave mechanics for ocean engineering*, volumen 64 de *Elsevier Oceanography series*. Elsevier Science, Amsterdam.
- Bohnsack, J. and Sutherland, D. (1985). Artificial reef research: a review with recommendations for future priorities. *Bulletin of Marine Science*, 37(1):11–39.
- Bretschneider, C. (1990). Tropical cyclones. En Herbich, J., editor, *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, volumen 1, pp. 249–370. Gulf Publishing Co., USA.
- Briggs, L., McCulloch, D., y Moser, F. (1962). The hydraulic shape of sand particles. *J. Sediment. Petrol.*, 32(4):645–656.
- Britannica Inc., E. (1995). *Coast, Enciclopedia Britannica*, volumen 3. Encyclopaedia Britannica.

- Bunte, K. y Abt, S. (2001). Sampling surface and particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring. General Technical Report RMRS-GTR-74, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Butterlin, J. (1958). Reconocimiento geológico preliminar del territorio del Estado de Quintana Roo. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 10(9-10):531–570.
- Butterlin, J. y Bonet, F. (1963). Mapas geológicos de la Península de Yucatán. *Ingeniería Hidráulica en México*, 1(18):65–71.
- Chamberlain, P. y Porter, D. (1995). The modified mild-slope equation. *Journal Fluid Mechanics*, 29:393–407.
- Chappel, J. (1980). Coral morphology, diversity and reef growth. *Nature*, 286:249–252.
- Chieng, N. y Wan, Z. (1998). *Mechanics of sediment transport*. ASCE Press, Virginia.
- Cifuentes, J., Torres-García, P., y Frías, M. (2002). *El océano y sus recursos. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química*, volumen 12 de *La ciencia para todos*. Fondo de Cultura Económica, México.
- CNA (1991). Actualización geohidrológica del acuífero de la zona norte del Estado de Quintana Roo. Informe final realizado por Infraestructura Hidráulica y Servicios S.A. de C.V.
- CNA (1996). *Manual de Ingeniería de ríos: Transporte de sedimentos*. México.
- Cooper, J. y Pilkey, O. (2004). Longshore drift: trapped in an expected universe. *Journal of Sedimentary Research*, 74(5):599–606.
- Cox, A., Cardone, V., y Swail, V. (1999). On the use of in situ and satellite wave measurements for evaluation of wave hindcasts. En *CLIMAR 1999 Preprints*, Vancouver, Canada. Oceanweather, Inc.
- Dally, W., Dean, D., y Dalrymple, R. (1985). Wave height variation across beaches of arbitrary profiles. *Journal of Geophysics Research*, 90(6):11917–11927.
- Dean, R. y Dalrymple, R. (2001). *Coastal Processes with engineering applications*. Cambridge University Press, U.K.
- Dean, R. y Dalrymple, R. (2000). *Water wave mechanics for engineers and scientists*, volumen 2 de *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific, Singapore.
- Del Moral, R. (1978). *Ingeniería de costas*. MOPU. Ministerio de Fomento, España.
- Del Valle, R., Medina, R., y Losada, M. (1993). Dependence of coefficient k on grain size. *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng. Am. Soc. Civ. Eng.*, 119(5):568–754.

- Delgado, A. (2007). Análisis de la dinámica geomorfológica de la zona hotelera de Cancún como contribución al desarrollo de un plan de manejo costeros. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche.
- Dietrich, W. (1982). Settling velocity of natural particles. *Water Resources Res.*, 18(6):1615–1626.
- Diez, J., Esteban, M., y Paz, R. (2009). Cancun-Nizuc coastal barrier. *Journal of Coastal Research*, 25(1):57–68.
- Don, L. y Sheldon, J. (1968). *Fundamentos de Geología Física*. Editorial Limusa-Wiley, México.
- Drake, F. (2000). *Global Warming*. Arnold, Great Britain.
- Druyan, J. y Lonergan, P. (1997). The impact of climate change on tropical cyclones. En *Risk Prediction Initiative Workshop*, Hamilton, Bermuda.
- Folk, R.L. y Ward, W. (1957). Brazos river bar: study in significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.*, 27(1):3–26.
- Frias, A. y Moreno, G. (1992). *Ingeniería de costas*. Trillas-Limusa, México.
- Gallegos, A. (2006). Clima oceánico: los mares mexicanos ante el cambio clima global. En Martínez, J. y Fernández, A., editores, *Cambio climático: una visión desde México*, pp. 41–52. SEMARNAT-INE, México.
- García, M., Camarena, T., Gold, G., Vasquez, M., Galland, G., Nava, M., Alarcón, G., y Ceja, D. (2006). Línea base del estado del Sistema Arrecifal Mesoamericano. Documento Técnico del SAM 18, Proyecto para la conservación y uso sostenible del sistema arrecifal mesoamericano.
- Gibbs, R., Matthews, M., y Link, D. (1971). Reply to a discussion of use and presentation of Janke empirical formula for the settling velocity of spheres. *J. Sediment. Petrol.*, 41:1146–1147.
- Hallermeier, R. (1981). A profile zonation for seasonal sand beach from wave climate. *Coastal Engineering*, 4:253–277.
- Hasselmann, K. (1960). Grundgleichungen der Seegangsvoraussage. *Shiffstechnik*, 7:191–195.
- Hedges, T. (1976). An empirical modification to linear wave theory. part 2. En *Proc. Institute of Civil Engineering*, volumen 61, pp. 575–579.
- Holuben, N. (1990). Long term wave statistics. En Lémehuaté, B. y Hanes, D., editores, *The Sea*, volumen 9 de *Ocean Engineering Science*, capítulo 8, pp. 293–334. John Wiley and Sons, US.
- Holthuijsen, L. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, USA.

- Horikawa, K. (1988). *Nearshore dynamics and coastal process*. University of Tokio Press, Japan.
- INEGI (2007). *Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos*. INEGI, México.
- INEGI (2008). *Sistema de cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por entidad federativa 2001-2006*. INEGI, México.
- IPCC (2001). Cambio climático 2001. La base científica. Reporte técnico, UNEP-WMO.
- Janke, N. (1966). Effect of shape upon the settling velocity of regular convex geometric particles. *J. Sediment. Petrol.*, 36(2):370–376.
- Janssen, P. (1989). Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 19:745–754.
- Johnson, R., Mansard, E., y Ploeg, J. (1978). Effects of wave grouping on breakwater stability. En *Proc. 16th Int. Conference on Coastal Engineering*, pp. 2228–2243, Hamburg. ASCE Press.
- Jordan, E. (1979). Estructura y composición de arrecifes coralinos, en la región noreste de la Península de Yucatán, México. *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nat. Auton. México*, 6(1):69–85.
- Jordan, E. and Rodríguez, R. (2003). The Atlantic coral reefs of México. En Cortes, J., editor, *Latin American Coral Reefs*, capítulo 6, pp. 131–158. Elsevier, Science, Amsterdam.
- Kamphuis, J. (1991). Alongshore sediment transport rate. *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng. Am. Soc. Civ. Eng.*, 117(6):624–640.
- Kamphuis, J. (2000). *Introduction to coastal engineering and management*, volumen 16 de *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific, Singapore.
- Kamphuis, J., Davies, M., Narim, R., y Sayao, O. (1986). Calculation of littoral sand transport rate. *Coastal Engineering*, 10:1–21.
- Kennedy, D. y Woodroffe, C. (2002). Fringing reef growth and morphology: a review. *Earth Science Reviews*, 57(3-4):255–277.
- King, D. (2005). Influence of grain size on sediment transport rates with emphasis on the total onshore rate. Reporte técnico ERDC/CHL CHETN-II-48, US Army Engineer Research And Development Center, Vicksburg, Mississippi.
- King, D. y Galvin, C. (2002). Coastal sediment properties. En Vincent, L. y Demirbilek, Z., editores, *Coastal Engineering Manual*, número 1110-2-1100 en Engineer Manual, capítulo III-I. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Kinsman, B. (2002). *Wind waves: their generation and propagation on the ocean surface*. Courier Dover Publications, USA.

-
- Kirby, J. y Dalrymple, R. (1986). Modeling waves in surf zone and around the islands. *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng. Am. Soc. Civ. Eng.*, 112:234–345.
- Kirby, J. y Dalrymple, R. (1994). *Combined Refraction/Difraccion Model REF/DIF 1, Version 2.5. Documentation and User's Manual. Research Report No. CACR-94-22*. Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, Newark, USA.
- Komar, P. (1998). *Beach processes and sedimentation*. Prentice Hall, USA.
- Komar, P. y Inman, D. (1970). Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, 75(30):5914–5927.
- Kraus, N. y Horikawa, K. (1990). Nearshore sediment transport. En Lémehuaté, B. y Hanes, D., editores, *The Sea*, volumen 9 de *Ocean Engineering Science*, capítulo 22, pp. 715–813. John Wiley and Sons, US.
- Lara, A., Sánchez, J., y Espinal, J. (2006). Recuperación de las playas de Cancún, Q.R. *Noticias AMIP*, 8:4–7.
- Lémehuaté, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer-Verlag, USA.
- López, E. (1973). Estudio geológico de la Península de Yucatán. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 25(1-3):23–73.
- Losada, I. y Liu, P. (2000). El modelaje matemático de la propagación del oleaje en ingeniería de costas. *Ingeniería del Agua*, 7(1):37–45.
- Losada, I., Silva, R., y Losada, M. (1996). Interaction of non-breaking directional random waves with submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 28:249–266.
- Lozano, C. y Meyer, R. (1976). Leakage and response of waves trapped by round islands. *The Physics of Fluids*, 19:1075–1088.
- Massel, S. (1989). *Hydrodynamics of coastal zones*, volumen 48 de *Elsevier Oceanography Series*. Elsevier Science, Amsterdam.
- Miles, J. (1991). Variational approximations for gravity waves in water of variable depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 232:681–688.
- Morán, D., Salles, P., Ruiz, A., Sánchez, C., y Espinal, J. (2007). Beach nourishment evolution in the Cancún beach, Quintana Roo, México. En Kraus, N. C. y Rosati, J. D., editores, *Proceedings of the 6th International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Process*, pp. 2279–2291, Reston, VA. ASCE.
- Nolasco, M. (1986). Sedimentol oa litoral de los Estados de Yucatán y Quintana Roo. Tesis de licenciatura, UNAM, México.
- Pedrozo, D. (2008). Respuesta hidrodinámica del sistema lagunar Nichupté, Cancún, México. Tesis de maestría, UNAM, México.

- Pérez, D., Bolaños, R., y Silva, R. (2008). Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del golfo de México. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXIII(2):5–20.
- Rosati, J., Walton, T., y Bodge, K. (2002). Longshore sediment transport. En Vincent, L. y Demirbilek, Z., editores, *Coastal Engineering Manual*, número 1110-2-1100 en Engineer Manual, capítulo III-2. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Ruiz, G. (2004). Modelos para determinar la geomorfología de la línea de playa en costas en equilibrio. Tesis de maestría, IPN, México.
- Ruiz, G., Silva, R., Pérez, D., Posada, G., y Bautista, G. (2009). Modelo híbrido para la caracterización del clima marítimo. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXIV(3):5–32.
- Scoffin, T. (1993). The geological effects of hurricanes on coral reefs and the interpretation of storm deposits. *Coral reefs*, 12(3-4):203–221.
- Scoffin, T., Brown, B., Dunne, R., y Le Tissier, M. (1997). The controls on grow form of intertidal massive corals, Phuket, South Thailand. *Palaios*, 32:237–248.
- SEDETURQR (2008). Estadísticas. indicadores turísticos por año. Sitio web. <http://sedetur.qroo.gob.mx/estadisticas/estadisticas.php>.
- Serra, J. (1992). *Apuntes de Ingeniería de Costas: introducción y bases teóricas*, volumen 1 de SPUPV. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Short, A. (1999). *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley and Sons, Ltd, U.K.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*, volumen 49 de *Docencia*. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Silva, R. (2008). Manual del usuario y documento de referencia del programa mwapo3. UNAM-II, México.
- Silva, R., Borthwick, A., y Eatock, R. (2005). Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. *Coastal Engineering*, 52:391–407.
- Silva, R., Govaere, G., Salles, P., Bautista, G., y Diaz, G. (2002a). Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast. En *Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering*, Singapore. World Scientific.
- Silva, R., Ruiz, G., Posada, G., Pérez, D., y Rivillas, G. (2008a). Atlas de clima marítimo de la vertiente atlántica mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN en trámite.
- Silva, R., Salles, P., y Palacio, A. (2002b). Linear waves propagating over a rapidly varying finite porous bed. *Coastal Engineering*, 44:239–260.

-
- Silva, R. (2008b). Caracterización morfodinámica y evaluación de alternativas para la recuperación de playas en la zona norte de Quintana Roo. Proyecto de investigación de Fondo Mixto CONACYT-Quintana Roo: QROO 2003 C02 12707.
- Smith, E., Wang, P., Ebersole, B., y Zhang, J. (2009). Dependence of total longshore sediment transport rates on incident wave parameters and breaker type. *Journal of Coastal Research*, 25(3):675–683.
- Smith, R. y Spinks, T. (1975). Scattering of surface waves by a conical island. *Journal Fluid Mechanics*, 2:373–384.
- Snyder, R., Dobson, F., Elliot, J., y Long, R. (1981). Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 102:1–59.
- Sorensen, M. (1993). *Basic wave mechanics for coastal and ocean engineers*. John Wiley and Sons, USA.
- Soulsby, R. L. (1997). *Dynamics of marine sands*. Thomas Telford, London.
- Suárez, E. y Rivera, E. (1998). Zooplankton e hidrodinámica en zonas litorales y arrecifales de Quintana Roo, México. *Hidrobiológica*, 8(1):19–32.
- Swail, V., Cox, A., y Cardone, V. (1999). Trends and potential biases in ncep-driven ocean wave hindcasts. In *2nd Conf. on Reanalysis*, Redding, UK.
- Swart, D. (1976). Predictive equations regarding coastal transports. En *Proc. 15 th Coastal Eng. Conf.*, pp. 1113–1132, Honolulu, Hawaii. ASCE.
- Szabo, B., Ward, W., Wiedie, A., y Brady, M. (1978). Age and magnitude of the late Pleistocene sea-level rise on the eastern Yucatán Peninsula. *Geology*, 6(12):713–715.
- Thornbury, W. (1969). *Principles of geomorphology*. John Wiley & Sons, US.
- Van Rijn, L. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, Amsterdam.
- Van Tussenbroek, B. y Van Dijk, J. (2007). Spatial and temporal variability in biomass and production of Psammophytic Halimeda Incrassata (bryopsidales, chlorophyta), in a Caribbean reef lagoon. *Journal of Phycology*, 43(1):69–77.
- Vidal, C., Losada, M., Medina, R., y Losada, I. (1995). Modelos de morfodinámica de playas. *Ingeniería del agua*, 2(N. extraordinario):55–74.
- WAMDI (1988). The WAM model, a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18:1775–1810.
- Wang, P., Ebersole, B., y Smith, E. (2002). Longshore sand transport-initial results from large scale sediment transport facility. Nota técnica ERDC/CHL CHETN-II-46, US Army Engineer Research And Development Center, Vicksburg, Mississippi.

- Ward, W.C. y Wilson, J. (1974). General aspects of the northeastern coast of the Yucatán Peninsula. En *Field Trip 2, Annual Meeting of the Geol. Soc. of America*, pp. 96–105. Geological Society of America, USA.
- Ward, W.C. y Brady, M. (1979). Strandline sedimentation of carbonate grainstones, Upper Pleistocene, Yucatán Peninsula. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 63:362–369.
- Ward, W. (1985). Quaternary geology of northeastern Yucatán Peninsula. En Ward, W., Weidie, A., y Back, W., editores, *Geology and hydrogeology of the Yucatan and quaternary geology of Northeastern Yucatán Peninsula*, pp. 62–72. New Orleans Geological Society, USA.
- West, R. (1962). Physical geography of the Yucatán platform. En *Peninsula of Yucatan, Field trip guidebook*, pp. 58–62. New Orleans Geological Society, USA.
- Wiegel, R. (1968). *Oceanographical Engineering*. Prentice Hall, USA.
- Woodroffe, C. (2003). *Coasts: form, process and evolution*. Cambridge University Press, UK.
- WRI (2006). Watershed for analysis for the Mesoamerican Reef. CD.
- Wright, L. y Short, A. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56:93–118.

Apéndice A.

Aportaciones

A continuación se describen de manera más detallada las aportaciones del trabajo doctoral que se presenta:

- la aportación más relevante con respecto a la caracterización geológica y geomorfológica de la Península de Yucatán y corredor turístico Tulúm-Cancún fue la generación de una base de datos nueva, que integra entre sus campos de información las características geomorfológicas correspondientes a 170 celdas litorales, que abarcan una extensión longitudinal de 150 kilómetros de la costa noreste de Quintana Roo. En dicha base de datos, es posible consultar las dimensiones de las formas costeras de las playas, así como una descripción detallada de la geomorfología costera de cada una de las distintas celdas litorales analizadas.
- Se implementó una metodología para la generación de un banco de información para la caracterización de los sedimentos del corredor turístico Tulúm-Cancún, en el cual se integraron los principales parámetros físicos de los sedimentos, a partir del análisis de aproximadamente 110 muestras de arena. Adicionalmente, en este capítulo se presenta una caracterización de las propiedades más relevantes de los sedimentos analizados, como lo son el D_{50} , la densidad relativa del material, la velocidad de caída de los sedimentos, el ángulo de reposo, etc. Los resultados de dicha caracterización fueron agrupados en cinco diferentes regiones de la línea de costa del noreste de Q.R.
- Se desarrolló una metodología para determinar los principales parámetros del oleaje y viento que son necesarios para cualquier tipo de obra y estudio de ingeniería de costas. Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología se validaron con datos de campo registrados por boyas marinas, lo que ratificó las bondades del modelo híbrido de oleaje propuesto. A partir de la información que se originó del modelo híbrido, fue posible elaborar dos atlas de clima marítimo para las vertientes del Atlántico y Pacífico Mexicano, en los cuales es posible consultar los parámetros horarios más relevantes del oleaje y el viento que se presentaron en el litoral de México del año de 1948 al 2007. En dichos atlas se pueden encontrar la información correspondiente a las alturas y periodos significantes del oleaje, con su dirección asociada; la velocidad y la dirección del viento para diferentes estados de mar, porcentajes de ocurrencia o frecuencia para datos de oleaje y viento, probabilidades conjuntas y de excedencia de altura y periodo de ola y viento, mapas de periodos de retornos, etc.

- Se elaboraron alrededor de 250 mapas, a partir del resultado de las simulaciones numéricas, que se encuentran divididos en tres rubros relacionados a la propagación del oleaje, alturas de olas significativas que se aproximan a la costa y energía del oleaje. La información que se encuentra plasmada en estos mapas puede ser utilizada para identificar posibles zonas de erosión en las playas, así como identificar patrones de comportamiento que tiene el campo de oleaje a través de la zona litoral.
- Se determinó el estado morfodinámico de las playas que se encuentran expuestas y protegidas al oleaje en la región de Puerto Morelos y la isla barrera de Cancún. El estado morfodinámico se obtuvo mediante el uso de tres diferentes criterios a partir de los cuales se determinó si la playa presentaba una tendencia a la erosión o la depositación, o si el comportamiento de la línea de playa disipaba o reflejaba la energía del oleaje. En dicho capítulo se obtuvo un potencial de erosión de las playas, tomando en consideración diferentes expresiones para el cálculo del transporte de sedimentos longitudinal; la finalidad que persigue el potencial de erosión es cuantificar el volumen neto que se moverá de la playa, bajo una condición de tormenta.
- Se ha explicado el funcionamiento de playas expuestas y protegidas por sistemas arrecifales, con la información tanto de campo y laboratorio y numérica generada a través de la presente tesis, así como también se presentaron las bases fundamentales que pueden permitir una mejor explotación, protección y recuperación de las playas del noreste de la Península de Yucatán.

Recomendaciones

La zona costera está íntimamente ligada al desarrollo económico y social de un país, lo que trae consigo que los sistemas litorales se encuentren bajo una constante presión socioeconómica que provoca que éstos sean sobreexplotados y con ello, la vulnerabilidad y erosión de las playas y costas aumente. La fragilidad que posee una playa radica en la capacidad de autorecuperación del estado de equilibrio morfológico de ésta cuando por un fenómeno natural extremo y la acción antropogénica modifica el comportamiento de la playa a través de procesos de erosión o de depositación.

En el trabajo se analizan los factores que incrementan la vulnerabilidad del sistema costero de las playas del noreste de Quintana Roo en el mediano y largo plazo y en una escala espacial que va de los cientos de metros a los kilómetros; la elección de estudiar la costa a partir de dichas escalas se fundamenta bajo la percepción que las playas, efectivamente, tienden a alterar su estado de equilibrio y forma morfológica en el corto plazo, sin embargo las modificaciones que regulan a su vez las variaciones de las playas en escalas instantáneas o de eventos (cambios observados en periodos de tiempo que van de los segundos a los meses y de forma espacial de los centímetros a los cientos de metros) son controladas por el comportamiento global que exhibe el sistema litoral. Por ejemplo, cuando un evento meteorológico extremo, tal como un huracán, se presenta en un segmento de playa (compartimiento litoral) donde se encuentra edificada una estructura marina sobre la costa, el huracán provocará una inestabilidad en el estado de equilibrio de la playa lo que a su vez, producirá una condición de cambio local en el

comportamiento de la forma del segmento de línea de playa. Por otra parte, las alteraciones del compartimiento litoral se encuentran influenciadas por los cambios que se generan en la celda litoral por el huracán; sin embargo, en la forma morfológica de la celda litoral quedarán las modificaciones provocadas por el fenómeno meteorológico extremo, que aunadas a los cambios observados en el comportamiento litoral influirán en la vulnerabilidad de la playa.

Cuando un oleaje de tormenta o extremo, impacta un sistema litoral, éste tiende a reconfigurar las playas que se encuentran dentro de la celda litoral al corto, mediano y largo plazo; esta nueva composición, esencialmente, se debe a la redistribución del sedimento a lo largo de la playa, generándose procesos de erosión y depositación en ella. Dependiendo de las características batimétricas, la configuración de la playa y el material que se deposita, cuando un oleaje de gran periodo arriba a la costa, el sedimento tiende a depositarse sobre la duna de la playa; en caso contrario, el sedimento puede desplazarse a través del perfil transversal, en dirección costa afuera; sin embargo si éste se deposita más allá de la distancia correspondiente a la profundidad de cierre del perfil de equilibrio de la playa, el material posiblemente será desalojado del sistema litoral por la acción de las corrientes marinas. Cuando la playa o costa no se ven afectados por las sollicitaciones del oleaje extremo, se inicia un proceso donde la naturaleza tratará de recobrar las condiciones reinantes antes de la tormenta. Si el sistema litoral posee la capacidad de autoregeneración, se presentarán ciertos fenómenos que originarán la existencia de un balance entre el aporte y la pérdida de sedimentos; como consecuencia de lo anterior, la playa reestablecerá las alteraciones debidas a la tormenta.

Cuando un evento meteorológico extremo provoca modificaciones en un sistema costero, el mismo sistema siempre trata de recuperar las condiciones que éste originalmente tenía, pero si durante el evento extraordinario, el material sedimentario tiende a salir o ser desalojado de la celda litoral, difícilmente el proceso de regeneración de las formas y condiciones que mostraba la playa, pueden volver a reproducirse. Ante este caso, la naturaleza tratará de realizar un balance del sedimento, pero con la condicionante que alguno de los dos procesos, erosión o depositación, ponderará, uno con respecto del otro; por ello, la playa sufre modificaciones permanentes con respecto a las condiciones anteriores de la tormenta y una nueva condición de estabilidad gobernará el estado morfodinámico de la playa. El oleaje normal o de calmas así como las corrientes y el transporte de sedimentos, serán los elementos que brindarán los medios necesarios para alcanzar el nuevo estado de equilibrio que la playa tendrá, pero desde la óptica del corto plazo. Así pues, ciertos cambios morfológicos de una playa pueden conocerse a partir de la determinación de las condiciones de tormenta o de la consideración de un análisis de mediano o largo plazo.

Los factores que desestabilizan un sistema litoral pueden ser estudiados, agrupando las condiciones de la línea de costa o playa, la biota, el sistema lagunar (si existe en el sistema), las condiciones espaciales, etc. (figura 7.1).

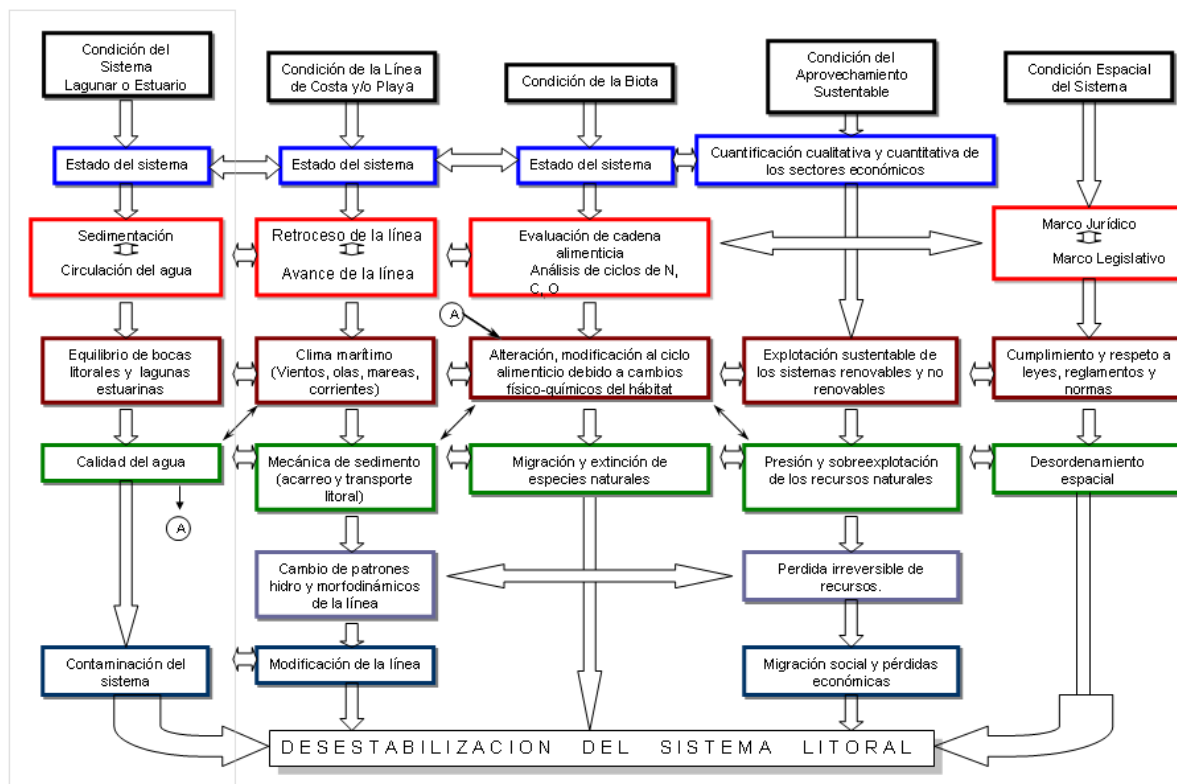


Figura 7.1. Proceso de desestabilización de un sistema litoral

Recomendación 1.

Una de las recomendaciones que se podría realizar a partir del análisis del comportamiento geomorfológico de la línea de costa de Cancún, es examinar a qué costo económico y social se desean preservar las playas de la isla barrera, para que éstas continúen siendo un punto de atracción para el turismo nacional e internacional. A través del estudio de las características morfológicas de la isla barrera de Cancún, se identificó la interdependencia que existe entre el sistema litoral con el lagunar, ya que la interacción de ambos sistemas regula los mecanismos de retroalimentación que brindan la estabilidad de la playa. Mediante el análisis de imágenes de diferentes años de las playas de la zona de Cancún se detectaron bocas litorales intermitentes que aparecían después de un evento meteorológico extremo. Estas bocas representaban el mecanismo de retroalimentación positiva que abastecía de cierto volumen de sedimento a la zona de dunas como un “buffer” o fuente de abastecimiento natural de arena. Es cierto que la capacidad de depositación de arena que proporcionaban dichas bocas no era el suficiente para solventar el problema de erosión de la costa, sin embargo, la importancia de dichas bocas radicaba en la influencia que éstas tenían en el estado de equilibrio de la playa. Al desarrollarse los diferentes complejos turísticos sobre las dunas, la capacidad de autoregeneración de la playa fue gradualmente disminuyendo ya que las dunas fueron desapareciendo y las bocas litorales intermitentes fueron bloqueadas por los edificios. Mediante simulaciones numéricas de la marea de tormenta se ha demostrado que bajo condiciones similares a las producidas por un huracán como Wilma (2005), se forman distintas bocas litorales que comunican el sistema laguna con el mar, ubicándose un número

de ellas en las bocas naturales del sistema lagunar y en la región central de la isla barrera.

En las figuras 7.2 y 7.3 se muestran las bocas intermitentes a través de las cuales el sistema natural alcanzaba su equilibrio morfológico natural; además en figura 7.2 se observa la estrecha relación que existe entre el sistema lagunar y la isla barrera de Cancún, lo que consolida la idea que estos rasgos morfológicos deben considerarse como un solo sistema, lo que origina que ambos deban ser estudiados de manera conjunta para solucionar los problemas que se presentan tanto en la playa como dentro de la laguna. Con base a las modelaciones de la marea de tormenta y a la luz de los resultados, el planteamiento de la solución al problema de la erosión de las playas de Cancún deberá considerar el papel tan relevante que tiene la laguna litoral en la estabilidad dinámica del sistema.

Con los resultados que se obtuvieron de la modelación de la marea de tormenta inducida por Wilma (2005) fue posible establecer los sitios donde sería prudente establecer, con las condiciones actuales, sistemas de interconexión entre la laguna y las playas; desafortunadamente y debido a la sobreexplotación de la línea de playa de Cancún (construcción vías principales de acceso, campos de golf y desarrollos turísticos) y la falta de una adecuada planeación de mediano y de largo plazo en la región, cualquier intento de implementación de canales de comunicación natural entre la laguna y las playas, acarrearía la remoción de cualquier tipo de obra edificada por el ser humano, lo que inevitablemente ocasionaría un conflicto de intereses económicos y sociales en las zonas donde se localizan las bocas litorales temporales. Las autoridades del gobierno estatal, así como federal, deben evaluar y considerar que la alternativa planteada podría ayudar a regenerar la estabilidad de la playa, lo que garantizaría la rentabilidad turística de la isla barrera al mediano y largo plazo y adicionalmente, la recomendación de permitir la comunicación natural entre la laguna y el mar ayudaría a solucionar los problemas de contaminación que tiene el sistema lagunar Nichupté.

Recomendación 2.

A partir de las simulaciones numéricas que se mostraron en capítulo 5, donde se observa cómo se desempeña el arrecife coralino como elemento de protección para las playas, es factible recomendar estructuras marinas en la zona litoral de las playas de Cancún que trabajen de forma parecida a los arrecifes que existen en la región; como se ha mencionado, una cantidad de la energía del oleaje se refleja en el arrecife, mientras que otra cantidad se disipa por el fenómeno de rotura que se induce y tan solo una porción de la energía es transmitida hacia la costa. Adicionalmente, el uso de estructuras que generen un efecto de protección, similar al que ofrecen los arrecifes, genera un obstáculo físico que sirve como apoyo al perfil transversal de la playa, ya que refuerza la profundidad de cierre del perfil de la playa, originando con ello que la línea de playa se estabilice.

Se recomienda que para mitigar parcialmente los problemas asociados al desalojo de arena del sistema litoral de la isla barrera de Cancún se coloquen, con carácter temporal, estructuras sumergidas fabricadas con material geotextil y que se rellenen con arena (geotubos). Debido a la controversia que existe en los sectores sociales acerca del uso de estructuras marinas y los

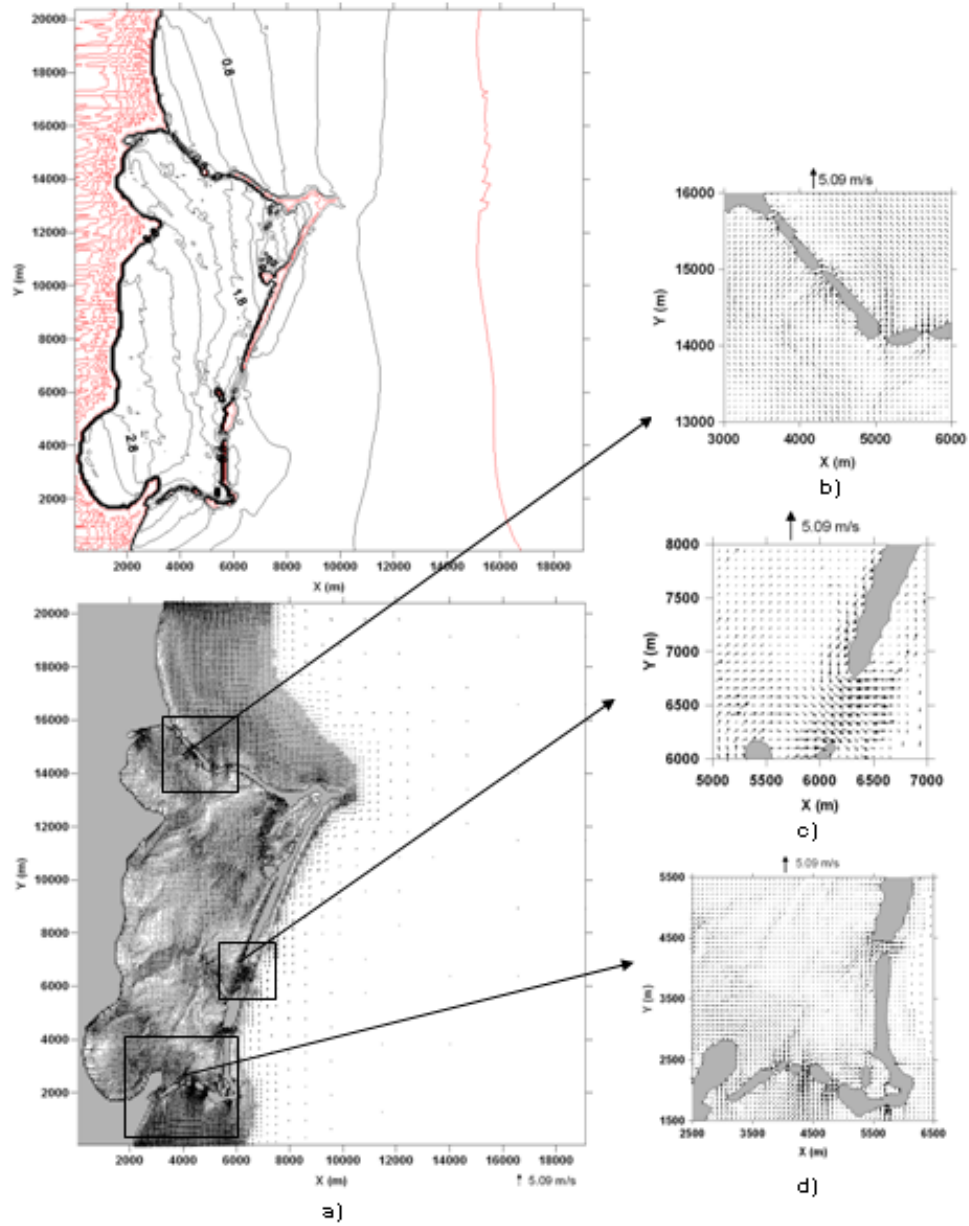


Figura 7.2. (a) Mapa de variación de superficie libre y campo de velocidades de la zona de estudio. Acercamiento en boca norte(b); en la barra (c) y en la boca sur (d). (Con permiso de Pedrozo, D. Respuesta hidrodinámica del sistema lagunar Nichupté, Cancún, México. 2008)

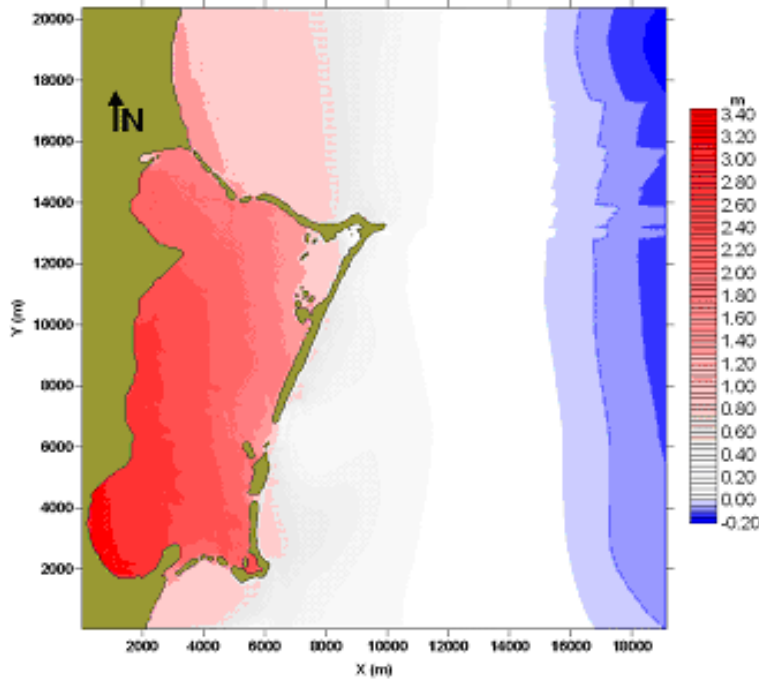


Figura 7.3. a) Mapa de variación de superficie libre por marea de tormenta (huracán Wilma, 2005). (Con permiso de Pedrozo, D. Respuesta hidrodinámica del sistema lagunar Nichupté, Cancún, México. 2008)

efectos adversos que algunas de ellas generan, es recomendable utilizar el término técnico de “mamparas” a las estructuras que se recomiendan. Estas estructuras en su conjunto podrían llegar a presentar una longitud total de 1200 metros y se sugeriría que se colocaran a una distancia entre 100 y 150 metros de la playa, con una sumergencia relativa de 1.5 metros con respecto del nivel medio del mar con el objeto de:

1. no alterar la navegación recreativa que se realiza en la zona,
2. no afectar la riqueza paisajística de la playa,
3. eliminar bajo condiciones reinantes, la exportación de arena a través de las puntas del sistema litoral y con ello, retener el mayor tiempo la arena de los rellenos artificiales evitando, dentro de lo posible, los conflictos asociados con la presencia de arena en la zona donde habitan los arrecifes coralinos (localizados en las puntas de la isla barrera) y
4. generar un pie de playa que permita, con menos material, mantener el ancho de playa seca lo más amplio posible.

El carácter temporal de las obras se sugiere para evitar conflictos existentes entre los diferentes usos que tienen el sistema playero (incluido el Sistema Lagunar de Nichupté) y los procesos naturales.

Es evidente que el equilibrio morfodinámico que tenía el sistema litoral ha sido alterado en los

últimos 40 años, como consecuencia del tipo de explotación que se ha venido realizando en la zona (modificación de bocas lagunares temporales y permanentes, consolidación y afectación de dunas, relleno de la playa con material diferente a la arena nativa, alteración de los niveles freáticos, entre otros). El planteamiento de una solución a largo plazo, como primer paso deberá de contemplar la elaboración e implementación de un plan de manejo costero que integre todas las componentes que están involucradas en un sistema tan importante y a la vez tan frágil como el de Cancún. Dicho plan de manejo costero y su implementación tendrán que valorar e integrar, bajo la premisa del establecimiento de equilibrios dinámicos, aspectos de tipo social, ambiental, cultural, paisajístico, urbanista, económico, jurídico, político y tecnológico. Sin embargo en la actualidad, el avance en el desarrollo de este plan es nulo y se estima que su diseño e inicio de operación podría llevar del orden de cinco de años; mientras tanto la actividad turística no puede detenerse. Por otro lado, los recursos económicos disponibles para la implementación de una solución a corto plazo han sido muy reducidos. La recomendación de utilizar mamparas como estructuras marinas del tipo frágil evita el empleo de obras del tipo “duro” que pudieran no ser compatibles con los criterios de uso, conservación y explotación derivados del eventual plan de manejo costero y la consecuente solución de largo plazo o que no pudiera retirarse a un costo razonable.

Es cierto que recomendaciones, como la que se realiza, no proporcionan una solución a todos los problemas de la región, ni tampoco consideran una vida útil de las obras que sobrepase los cinco años; ya que debe siempre tenerse en cuenta que los problemas que afrontan las playas se deben a un déficit de arena en el sistema que dificulta garantizar una playa continua y por otro lado, la ubicación de los desarrollos turísticos y la infraestructura existente es tal que desestabilizan al sistema más que otros factores o fenómenos. La recomendación de las mamparas no aborda ningún tipo de marco de ordenamiento de usos y construcciones.

El uso de mamparas se enfocaría principalmente, a mejorar parte del deterioro visual y de confort del sistema litoral. Para poder establecer el efecto de los rellenos de playa, primero, se recomienda un estudio geológico detallado del material de préstamo y, segundo, evaluar el volumen de sedimentos que se podrían verter definiendo tiempos y volúmenes.

Es importante que los diferentes órganos de gobierno atiendan las recomendaciones realizadas en cuanto al ordenamiento costero, ya que de no ordenar los usos de explotación, el desarrollo económico y social, no habrá solución sostenible en el largo plazo que proteja y restaure los equilibrios ambientales adecuados para la zona.

El empleo de estructuras sumergidas que proporcionen abrigo a la playa, tal como lo hacen los arrecifes coralinos, tendría como objetivos:

- reforzar las zonas geológicamente más vulnerables,
- disminuir el efecto del oleaje en zonas donde existe una alta concentración energética,
- en virtud que existe un déficit de arena, genera un apoyo artificial al perfil de playa para que su desarrollo espacial y requerimientos volumétricos no sean tan amplios,

- debido a que las estructuras son sumergidas, se conservaría la calidad del paisaje y a su vez se permitiría, de manera segura, la navegación recreativa,
- no obstaculizaría los flujos de agua entre la laguna y la playa (recomendación de conectar el sistema lagunar con el litoral), tan solo mitiga parcialmente los efectos del oleaje.

Debido a que la recomendación es de tipo flexible, la remoción de las mamparas en cualquier momento es factible.

Para cumplir lo mejor posible los objetivos establecidos y con base en las consideraciones de tipo geológicas, clima marítimo, mecánica de sedimentos e hidrodinámicas, las características de las mamparas podrían ser:

- Preferentemente, las estructuras podrían estar integradas por un solo geotubo y las dimensiones mínimas del mismo deberían ser las siguientes: Circunferencia de 36.58 metros, altura de 2.44 metros, anchura de 17.07 metros y longitud de 20 metros. En caso que en el proceso constructivo propuesto por la constructora se considere la posibilidad de rellenar los geotubos fuera de la celda litoral y los geotubos llenos fueran a transportarse, se utilizarían geotubos de menor circunferencia apilados en forma piramidal hasta alcanzar una altura de al menos 2.25 m.
- En caso que las estructuras no alcanzaran una altura de 2.25 m, podría ponerse una escollera de recubrimiento con un talud máximo de 2:1 con un coronamiento tal que se alcance dicha altura. Se recomendaría que el peso de las piedras no fuera menor a 250 kilogramos.
- Las cotas, en las cuales se desplantarían los geotubos, no deberán ser mayores a la cota -5.0 metros, ni menores a la -4.0 metros para lograr un equilibrio entre los aspectos estéticos, de navegabilidad turística y de funcionamiento hidrodinámico de los mismos.
- La arena de la playa con la cual se llenarían los geotubos, debería ser del material más grueso que se encuentre en la berma sumergida.

Adicionalmente, se consideraría un abundamiento del 40%, la densidad sumergida del material de relleno de $1.7 \text{ ton}/\text{m}^3$ y dada la geometría propuesta, el peso sumergido de cada uno de los segmentos de 20 m de longitud sería de poco más de mil toneladas, por lo que no se recomendaría realizar ningún análisis de estabilidad por deslizamiento, flotación o inercia. En la figura 7.4 y en la tabla 7.1 se presenta la ubicación de las mamparas.

Recomendación 3.

La realización de cualquier proyecto de relleno de playas en la costa noreste del estado de Quintana Roo deberá considerar los siguientes puntos:

1. El relleno de arenas se considerará como un complemento de obras de ingeniería que tengan como meta estabilizar el sistema litoral.

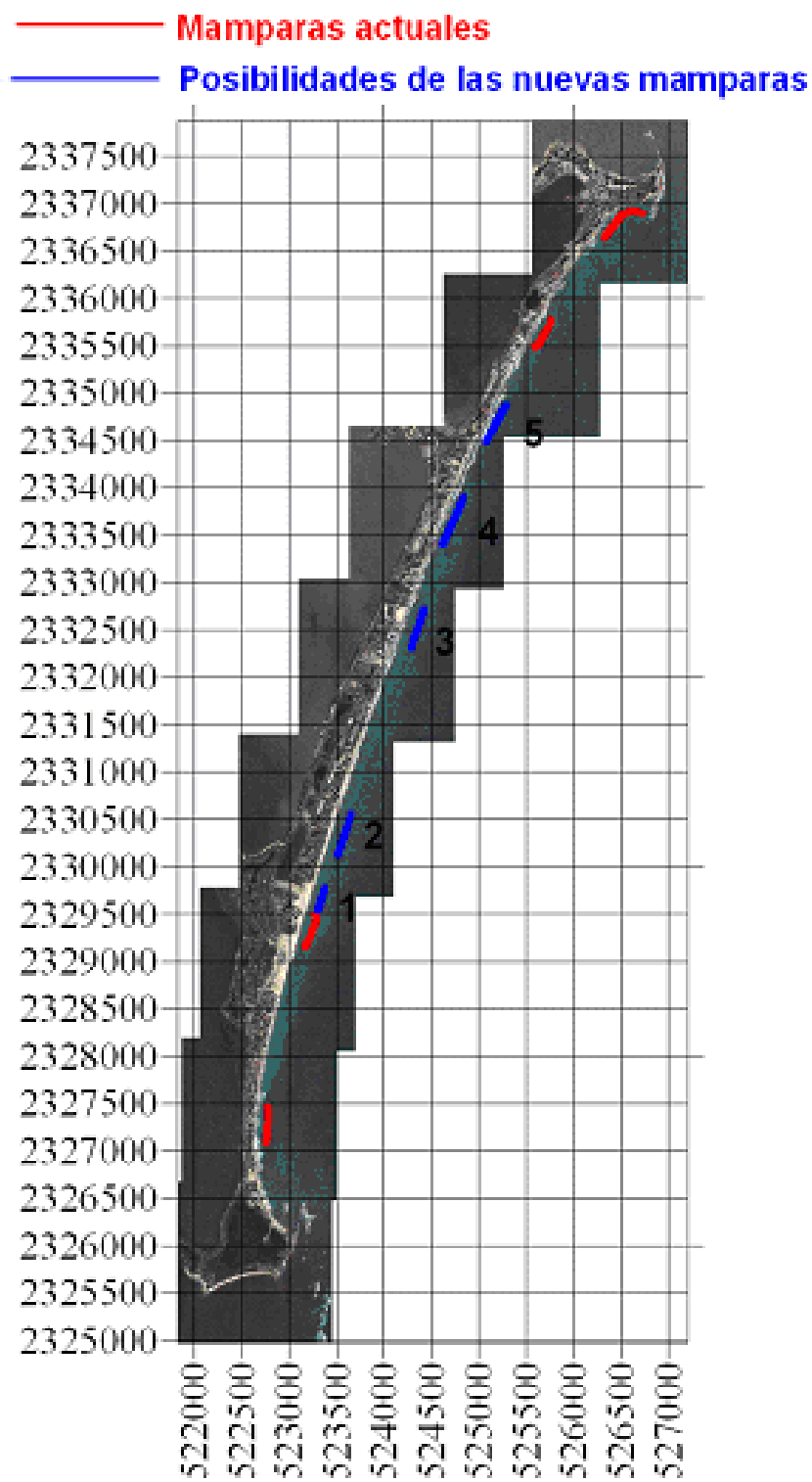


Figura 7.4. Propuesta de ubicación de estructuras sumergidas (mamparas).

Tabla 7.1. Ubicación de las mamparas

Mampara	Coordenadas UTM		Longitud (m)
	X	Y	
5	525,075	2,334,489	420
	525,278	2,334,864	
4	524,621	2,333,409	520
	524,840	2,333,879	
3	524,287	2,332,309	420
	524,413	2,332,701	
2	523,511	2,330,124	440
	523,651	2,330,546	
1	523,301	2,329,540	240
	523,373	2,329,761	

2. El vaciado del sedimento en la playa a restituir, deberá realizarse siguiendo la tendencia natural del talud de la playa.
3. Analizar de manera detallada las características del material de relleno.

A través de los años, el sistema litoral de Cancún ha experimentado gradualmente problemas de erosión que ha puesto en riesgo la sustentabilidad del sistema litoral de la isla barrera. En gran medida las soluciones que se han propuesto para restaurar de una manera natural los sedimentos que se han perdido de la zona costera han fracasado por el enfoque con el cual ha sido abordado el problema, ya que no se han analizado de una manera conjunta todos los elementos que interactúan en la zona costera, por ejemplo: suele omitirse el papel que desempeña la laguna litoral en la playa, no se identifican o interpretan de manera adecuada el actuar de los mecanismos naturales de estabilidad de la playa (barras, dunas, etc.), se considera la configuración y la génesis del sistema como un elemento aislado y no se visualiza que el sistema costero es parte de un sistema que debe ser analizado en las escalas espaciales y temporales del mediano y largo plazo.

Las recomendaciones acerca de colocar mamparas en sitios que son considerados altamente vulnerables a la erosión costera y reestablecer las conexiones naturales entre la laguna y el mar, son medidas de mitigación que tratan de reestablecer el equilibrio de la playa en el mediano y largo plazo; es precisamente por esta razón, que los rellenos de playas deben considerarse como obras que tienden a acelerar el estado de equilibrio y se recomienda utilizar sólo como un complemento de las dos recomendaciones antes mencionadas.

Por otra parte y a partir de los resultados de modelaciones físicas que se han realizado por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos de la UNAM en cuanto al comportamiento que tiene un perfil de playa que se ha originado de un relleno de arena, se observó que en cualquier tipo de relleno que se realice en las playas del noreste de Quintana Roo, se deberá de evitar que el vertido de material produzca amplias zonas de playa seca casi horizontales; una playa que presenta un perfil que proyecta la forma de una escarpe, producirá que el comportamiento morfodinámico de ésta corresponda a una playa que tiende a reflejar el oleaje que incide en ella. Lo cual provoca que la playa sea susceptible a perder el material de relleno, ya que la planicie de arena produce un escarpe que gradualmente se modifica por la deformación

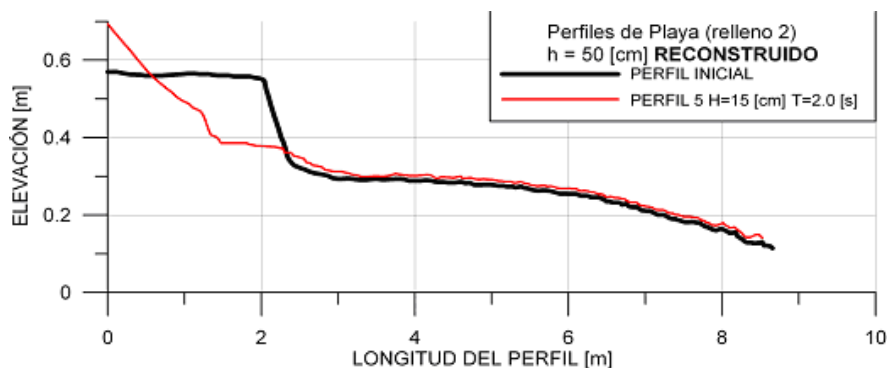


Figura 7.5. Perfil medido con relleno reconstruido para tormenta intensa con sobreelevación de mayor magnitud.

del perfil y que se genera por el rebase del oleaje sobre la playa; a su vez, el mismo oleaje conduce el material erosionado del escarpe hacia las aguas profundas del perfil de la playa. En la figura 7.5 se muestra el comportamiento que tuvo un perfil de playa, al que se le aplicaron condiciones de oleaje extremo. Como se nota en la figura, el perfil de relleno proyecta un escarpe, que al impactar el oleaje sobre éste hace que la arena se mueva hacia la zona exterior del perfil. Este comportamiento de la playa sería aceptable si se considera que el relleno de playa tiene el objetivo de generar una playa de sacrificio, en donde se tiene considerado que cierto volumen de material se perderá, mientras se estabiliza la playa; sin embargo, los rellenos de arena que se realicen en la isla barrera de Cancún, presentan la condicionante que debe de existir el mínimo de pérdida de volumen de arena. Si se contempla realizar un relleno de playa en la región estudiada, no se recomiendan los vertidos de arena que formen planicies en la zona seca de playa por sus posibles repercusiones negativas en el: a) ámbito económico, por el derroche de recursos ocasionados por la pérdida del material del escarpe; b) sector turístico y social, por el impacto visual, que produce observar que una playa gradualmente se erosiona.

Con base al análisis de la evolución de los perfiles de playa observados de la modelación física de éstos, se recomienda que durante los trabajos de vertido del material de relleno, se coloque el mayor volumen de material posible en la proximidad de los paramentos de los desarrollos turísticos; buscando con ello, que el material depositado actúe como una duna ante eventos extremos y el perfil trate de estabilizarse apoyado en las estructuras verticales. Tomando en cuenta la recomendación anterior, la depositación del material deberá realizarse de tal forma que el perfil de la playa tenga una pendiente somera (mayor a 1:15) y de ser posible, proyectar una forma cóncava hacia arriba; todo ello con la finalidad de formar una playa que disipe la mayor energía del oleaje en condiciones normales de oleaje y que las mayores modificaciones del perfil solo se observen cuando se presenten oleajes, generados por eventos meteorológicos extremos.

En la figura 7.6 se presenta el comportamiento del perfil de playa modelado, donde se puede identificar la forma del perfil que se recomienda para que la línea de playa se comporte como una playa disipativa. Con respecto a las características del sedimento que se utilizaría para realizar los rellenos se puede señalar lo siguiente:

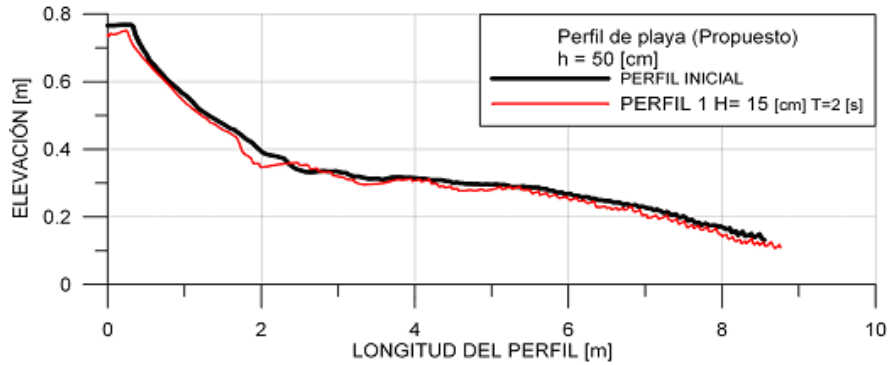


Figura 7.6. Perfil medido para el relleno propuesto con la sobreelevación de mayor magnitud.

- El material de playa que se perdió durante el paso del huracán Wilma por la región, tenía un diámetro medio de 0.31 milímetros, por lo cual el sedimento de relleno deberá ser mayor que el antes señalado.
- Debido a la incertidumbre relacionada al diámetro de sedimento que se utilizaría para el relleno, se recomendaría utilizar sedimentos que se encuentren en un rango de 0.42 a 0.52 milímetros, ya que los parámetros de forma del sedimento para estos diámetros (aprox. 0.17) tienden a generar perfiles de equilibrio similares a los que se presentaron en el campo antes de Wilma.
- La ubicación del banco de préstamo no deberá basarse solamente en la localización del material que cumpla el diámetro del sedimento de relleno propuesto; la similitud en cuanto a la composición, forma y tamaño de los sedimentos deberá ser el criterio de selección de los bancos de préstamo de material.
- En caso de decidir realizar rellenos de playas, lo más adecuado es buscar y explotar bancos en las inmediaciones de Cancún en lo que fueron en otros tiempos geológicos playas. La ventaja de esta opción es que la arena que se explote tiene características más semejantes a la arena nativa.
- Se recomienda que durante el vertido de arena se evite el traslado y manejo excesivo de la maquinaria que dispersa el material sobre las áreas previamente rellenadas, con el objeto de evitar en lo posible, cualquier tipo de compactación de la arena.

Si los bancos de préstamo se ubican dentro de la región del Sistema coralino Mesoamericano, deberán evaluarse las repercusiones ambientales que implicaría la modificación de los mecanismos de retroalimentación positivos (en este caso, resultado de la extracción de la arena de los bancos) que controlan la línea de playa de Punta Bete a Punta Caracol; recordando que estos mecanismos controlan la estabilidad de la playa. Por otra parte, también es necesario considerar las repercusiones que tendrán las obras de extracción y transportación de la ubicación del banco de material a las playas de Cancún. Las obras de remoción y traslado de arena, independientemente del tipo de draga que se utilice, pondrán una gran cantidad de sedimentos en suspensión, de los cuales un volumen de estos sea transportado por el oleaje y las corrientes marinas hacia los arrecifes coralinos. Debido a la fragilidad que las estructuras

arrecifales ostentan, una alteración en el fondo marino por la sedimentación del material en suspensión, incrementaría la vulnerabilidad de los arrecifes.

Como medidas no estructurales se recomiendan las siguientes:

- Evitar el uso de estructuras marinas en las cuales se utilicen elementos artificiales de concreto o rocas, para resolver problemas de erosión costera, ya que dichas estructuras tienden a incrementar el proceso erosivo, al menos en esta zona.
- Reemplazar las estructuras del tipo rígido (escolleras y espigones de rocas o piezas prefabricadas de concreto) por estructuras de tipo flexible (arrecifes artificiales, geotextiles sumergidos).
- En todos aquellos desarrollos turísticos que se han edificado sobre la zona de dunas de la playa, especialmente en la Riviera Maya, se recomienda, proyectar áreas en las cuales sea posible repoblar con vegetación de la región, con el objeto de estabilizar las dunas que han sido modificadas por la acción antropogenica.