



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**ESTUDIO INTEGRAL DE LA HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE  
DE SEDIMENTOS EN CHELEM, YUCATÁN**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA**

P R E S E N T A:

**DIANA CAROLINA FERNÁNDEZ RIVERA**

TUTOR:

**DR. ALEC TORRES FREYERMUTH**

MÉXICO D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA  
2012



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**



Laboratorio de Ingeniería y  
Procesos Costeros, Sisal, Yucatán  
Instituto de Ingeniería



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Escalante Sandoval Carlos Agustín

**Secretario:** Dr. Salles Afonso De Almeida Paulo

**Vocal:** Dr. Torres Freyermuth Alec

**1er. Suplente:** Dr. Pedrozo Acuña Adrián

**2do. Suplente:** Dra. Reyes Chávez Lilia

**Lugar de realización de la tesis:**

Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros. Sisal, Yucatán.

Instituto de Ingeniería UNAM

**TUTOR DE TESIS:**  
**Dr. Torres Freyermuth Alec**

---

**Firma**

*A ti Nico que eres la luz de mi alma.  
Te amo hasta donde están tus estrellas.*

*A ti mami, que siempre me has apoyado, amado  
y acompañado desde que me diste el primer soplo de vida.*

*A ti papi, que me amas en la distancia y en silencio.*

## Agradecimientos

Quiero agradecer a las Instituciones y personas que contribuyeron a la culminación de este trabajo, gracias a ustedes me encuentro escribiendo estas palabras cerrando una etapa de aprendizaje y fortalecimiento personal.

Gracias al Posgrado de Ingeniería de la UNAM, ha sido un privilegio pertenecer a esta gran institución la cual me compartió su calidad académica mediante sus miembros y me dio la oportunidad de divulgar este trabajo en el XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Mis agradecimientos para el equipo del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la UNAM en Yucatán, en especial a los doctores Alec Torres Freyermuth y Christian Mario Appendini quienes me dieron las pautas y apoyo para la culminación de este trabajo.

Al Dr. Adrián Pedrozo Acuña, le agradezco su apoyo, confianza y motivación para culminar la maestría y el presente trabajo.

Le agradezco a CONACYT, por la beca otorgada para estudiantes extranjeros que permitió mi estadía en este bello país.

Agradezco el apoyo brindado por los proyectos: DGAPA - PAPIIT IB102012-2 Parametrización de procesos de transformación del oleaje en playa y FOMIX-CONACYT YUCATÁN (106400 peligro, vulnerabilidad y riesgo asociados a la erosión e inundaciones en el litoral del estado de Yucatán. diagnóstico, pronóstico y propuestas de mitigación y conservación).

También se agradece al DHI - WATER & ENVIRONMENT por haber proporcionado la licencia académica del software MIKE 21/3 FM, utilizado para la modelación numérica implementada en este trabajo.

Gracias a mi compañeros Costas y Puertos, por su disposición y compañía en estos dos años, en especial a los del cubi que hacen agradable la jornada de trabajo. Abril, Ale, Ari, Diana y Juan Pablo les agradezco los buenos momentos y su amistad en los días grises.

En lo personal quiero agradecer a Dios por iluminarme y permitirme vivir la experiencia de tener una formación de calidad, más allá de las fronteras de mi país. A mi hija, que sacrificó algunas horas de juego para permitirme dedicarme a la elaboración de esta tesis y a mi mamá que acepto acompañarme a vivir esta experiencia dándome su incondicional apoyo.

A mi familia y amigas que me animaron y, a pesar de la distancia, siempre mantuvieron el contacto.

A la familia Benítez Mora, que ha sido mi familia en México, gracias por su cariño y ayuda, en especial a Daniel quien ha llenado mi vida de amor y mucha alegría.

**Gracias México!**

## RESUMEN

La evolución del línea de costa oscila de manera natural o puede presentar una tendencia erosiva / acresiva inducida por eventos extremos y/o intervenciones humanas. Estos cambios pueden variar en el espacio y el tiempo y tiene importantes implicaciones sociales, ambientales, y económicos en aquellas zonas afectadas por la erosión de playas. Las playas del estado de Yucatán (México) no están exentas a esta problemática, alcanzando niveles alarmantes en sitios específicos como en el tramo Chelem-Chuburná. La playa de Chelem se encuentra ubicada al Este del muelle fiscal de Progreso y del Puerto de Abrigo de Yucalpetén. Estas dos estructuras perpendiculares a la costa han acelerado el retroceso de la línea de costa al Oeste de las estructuras debido a que modifican la hidrodinámica e interrumpen el transporte de sedimentos en la zona. El objetivo de este trabajo es realizar un diagnóstico del papel de dichas estructuras en la erosión crónica que afecta esta zona a través del modelado numérico bi-dimensional. Los resultados de este trabajo permitirán establecer estrategias para la mitigación de la erosión costera en zonas específicas.

## ABSTRACT

Coastline evolution oscillates naturally or can present an erosive/accretive trend induced by extreme wave events and/or human activities. The rate of these changes can vary in space and time and has important social, environmental, and economical implications in the areas affected by beach erosion. Yucatan beaches have suffered such problem during the past years. Specifically, Chelem beach, located Westfrom the Progreso Pier and the Yucalpetén Port, has reached critical erosion levels. Coastal structures in the area modified both wave transformation and the alongshore sediment transport pattern in this area. Thus, the aim of this work is to conduct a diagnostic investigation on the role of coastal structures on beach erosion by means of numerical models. Results from this study will provide information for establishing a beach restoration program in the study area.

# TABLA DE CONTENIDO

---

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>4</b>
1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	4
1.2 ANTECEDENTES.....	4
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	10
1.4 ÁREA DE ESTUDIO.....	11
1.4.1 Descripción y localización .....	11
1.4.2 Clima marítimo .....	12
1.4.3 Geología.....	13
1.5 ALCANCE DEL ESTUDIO .....	15
<b>2 REVISIÓN DE LA LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
2.1 PROPAGACIÓN DEL OLEAJE .....	14
2.2 REFRACCIÓN Y ASOMERAMIENTO.....	15
2.3 DIFRACCIÓN DEL OLAJE.....	17
2.4 ROTURA DEL OLEAJE .....	18
2.5 CIRCULACIÓN EN LA ZONA DE ROTURA .....	21
2.5.1 Corrientes longitudinales.....	22
2.6 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COSTEROS .....	25
2.6.1 Transporte paralelo a la playa.....	26
2.6.2 Transporte transversal a la playa .....	29
2.7 ESTUDIOS PREVIOS .....	31
<b>3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>32</b>
3.1 MODELO UNIDIRECCIONAL – LITDRIFT .....	32
3.1.1 Descripción del modelo.....	32
3.1.2 Ecuaciones básicas.....	34
3.1.3 Fricción de fondo .....	37
3.1.4 Tamaño del grano.....	38
3.1.5 Velocidad de caída.....	38
3.1.6 Dispersión geométrica del sedimento.....	38
3.2 MODELO ACOPLADO MIKE21/3 FM .....	39
3.2.1 Descripción del modelo mike21/3 fm .....	39
3.2.2 Módulo de Propagación de oleaje SW.....	40
3.2.3 Módulo Hidrodinámico HD .....	45
3.2.4 Modelo de Transporte de sedimentos ST.....	52
<b>4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>56</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE .....	56
4.2 RECOLECCIÓN Y RECOPIACIÓN DE DATOS DE CAMPO .....	57
4.2.1 Perfiles de playa y granulometría .....	57
4.2.2 Información batimétrica.....	60
4.2.3 Línea de costa y estructuras costeras .....	61
4.3 EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE LONGITUDINAL (MODELO UNIDIRECCIONAL).....	61
4.4 MODELADO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL DE LA DINÁMICA LITORAL .....	62
4.4.1 Parámetros de entrada módulo SW .....	67

4.4.2	<i>Parámetros de entrada módulo HD</i> .....	68
4.4.3	<i>Parámetros de entrada módulo ST</i> .....	69
4.5	OBTENCIÓN DE MAPAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	69
4.6	DIAGNOSTICO DE LA INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURAS.....	70
4.7	CAMBIO DE VOLUMEN DEL SISTEMA LITORAL.....	70
4.8	ORIENTACIÓN DE EQUILIBRIO PARA LA COSTA DE CHELEM.....	71
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>74</b>
5.1	CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE .....	74
5.2	RESULTADOS DE MODELADO DE TRANSPORTE LONGITUDINAL .....	76
5.3	RESULTADOS MODELACIÓN BIDIMENSIONAL .....	79
5.3.1	<i>Resultados de los modelos de oleaje e hidrodinámico</i> .....	80
5.3.2	<i>Resultados del modelo de transporte de sedimentos bi-dimensional</i> .....	82
5.4	CAMBIO DE VOLUMEN DEL SISTEMA LITORAL.....	86
5.5	DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE EQUILIBRIO PARA LA COSTA DE CHELEM.....	87
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>90</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>93</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Fotografías de la evidente erosión en las playas de Chelem. Tomadas en recorrido de campo 2012. ....	5
Figura 1-2 Muelle de Progreso en 1985(izquierda). Área de navegación, con profundidad de 12m, actualmente (derecha). (Fuente: <a href="http://www.puertousyucatan.com">www.puertousyucatan.com</a> ).....	6
Figura 1-3Fotografías áreas que muestran las múltiples estructuras (escolleras y espigones) construidas por lo residentes de la costa para proteger sus propiedades de la erosión. Fuente: Meyer-Arendt(1994).....	7
Figura 1-4 Imagen del ojo del Huracán Isidoro en Yucatán 2002 (NOAA, 2002).....	8
Figura 1-5 Muestra de geotextil instalado en la zona de estudio para contribuir a la acumulación de sedimentos .....	9
Figura 1-6 A la derecha zona de dragado en la marina de Yucalpetén. A la izquierda zona de estudio donde se realizaría el relleno artificial. [Fuente: Memorias foro Erosión costera SEDUMA, 2010. ....	10
Figura 1-7 Localización de la zona de estudio y las estructuras marítimas cercanas a ella.....	11
Figura 1-8 Rosa de oleaje en aguas profundas cercana al área de estudio obtenida del hindcast de 12 años del WAVEWATCH III. Tomada de Appendini et al (2012), .....	13
Figura 1-9 Geología de la península de Yucatán (López- Ramos,1975).Q-Cuaternario;N2-Neógeno superior: Plioceno; N1-Neógeno inferior: Mioceno; Pg3-Paleógeno superior: Oligoceno.....	14
Figura 1-10 Mapa geomorfológico basado en la morfología superficial de la península y de la altura sobre el nivel del mar. ....	15
Figura 2-1 Refracción en la costa. (Fuente Coastal Change UCSD,2011).....	15
Figura 2-2 Divergencia y convergencia en la costa (Fuente: Calero et al 2004).....	16
Figura 2-3 Esquema del efecto de la difracción del oleaje (calero et al. 2004) .....	17
Figura 2-4 Ubicación de las estructuras costeras cercanas a la zona de estudio. ....	18
Figura 2-5 Tipos de rotura en playas modificado Pedrozo Acuña, 2011) .....	20
Figura 2-6 La ilustración esquemática adaptada de Komar (1998).....	22
Figura 2-7 Representación esquemática del balance de fuerzas en una corriente longitudinal. (Vergara,2011) .....	23
Figura 2-8 Formas de transporte de sedimentos. Fuente: Vergara, 2011 .....	26
Figura 2-9 Esquema de transporte longitudinal de sedimentos en una playa. ....	27

Figura 2-10 Estimación de las tasas y dirección de transporte longitudinal neto en el Este de la costa de Estados Unidos, basadas en los datos de Johnson (1956,1957) y Komar (1976). Tomado de CEM, 2002. ....	27
Figura 2-11 Plano normal al flujo para la definición de la tasa de transporte de sedimentos. (Modificado de Pedrozo, 2010) .....	28
Figura 2-12 Perfil de playa. (Modificado de Vergara,2011) .....	30
Figura 2-13 Perfiles de invierno y verano.....	30
Figura 3-1 El Esquema representa el proceso litoral modelado con LITDRIFT. (Modificado DHI, 2011) .....	33
Figura 3-2 Interfaz grafica para la configuración de las fronteras .....	52
Figura 4-1 La imagen muestra la instrumentación en campo de un GPS como base fija.....	58
Figura 4-2 Perfil característico de la zona.....	59
Figura 4-4 Datos recopilados de batimetría y elevaciones. ....	60
Figura 4-3 Distribución del tamaño de grano a lo largo de la zona de estudio. (Lira,2011) .....	60
Figura 4-5 Ubicación geográfica del dominio en el modelo.....	63
Figura 4-6 La malla de cálculo.....	64
Figura 4-7. Se muestra la resolución de la malla en cercanías a la costa, con la escala de elevaciones obtenidas en el MDT.Ejes en coordenadas UTM.....	65
Figura 4-8 Evolución de la costa entre Chelem y Chicxulub 1974-2005 (izquierda) Fuente: INOPESA, 2011. Batimetría empleada en Caso1 (derecha). ....	65
Figura 4-9 A La izquierda, fotografía aérea del Puerto de Abrigo de Yucalpetén y estructuras menores. Fuente: Aerozoom, 2011. Derecha: Batimetría empleada en Caso2. ....	66
Figura 4-10 A La izquierda, fotografía aérea del Puerto de Abrigo de Yucalpetén y estructuras menores. Fuente: Google Earth. Derecha: Batimetría empleada en Caso3. ....	66
Figura 4-11 Definición de variables en la ecuación de cambio en la línea de costa. Tomada de Hanson y Kraus (1989). ....	70
Figura 4-12 Esquema representativo ilustrando la profundidad de cierre del perfil. ....	71
Figura 4-13 Curva obtenida por Appendini et al. 2012 en Progreso. El presente estudio empleó una metodología similar para obtener la orientación de equilibrio en la zona de estudio. ....	72
Figura 5-1 Frecuencia de la Altura significativa según intervalos de clase. ....	75
Figura 5-2 Representa la curva del periodo asociado obtenida para cada clase de la muestra de datos. ....	75
Figura 5-3 Rosa de oleaje utilizado para los cálculos con LITDRIFT. ....	76

Figura 5-4 Rosa de contribución al transporte de sedimentos.....	78
Figura 5-5 La batimetría del Caso 3 corresponde a la condición actual, con el puerto de abrigo y el puerto de altura. ....	79
Figura 5-6 Se presenta la propagación del oleaje con un ángulo de incidencia de 45°. La presencia de las estructuras costeras genera un cambio de dirección en los rayos de incidencia por efecto de la difracción. ....	80
Figura 5-7 Se muestra un instante de modelación donde se puede ver que las mayores corrientes se concentran en cercanías a la costa, y están en el rango de 0.06 y 0.15m/s. ....	81
Figura 5-8 Se muestra un instante de modelación de un Norte, donde se aprecia que las mayores corrientes se concentran en cercanías a la costa y son de 0.21m/s aprox., incrementando con respecto a las que son generadas por el oleaje del NE.....	82
Figura 5-9 De arriba abajo: Se muestra el mapa de transporte (a) <b>Caso1</b> sin estructuras, (b) <b>Caso2</b> incluyendo el puerto de abrigo y (c) <b>Caso3</b> estado actual.) .....	83
Figura 5-10 Ubicación de los 131 perfiles extraídos de los mapas de transporte se sedimentos para estimar las tasas de transporte. ....	84
Figura 5-11 Comparación de las tasas de transporte longitudinal por año, en la cual se observa que la influencia del Puerto de Altura es de 6kms.....	85
Figura 5-12 Comparación de la tendencia del transporte longitudinal en 131 perfiles a partir del puerto de Yucalpetén, a 4Km al Este de Puerto progreso para un Norte. ....	85
Figura 5-13 Comparación de la tendencia del transporte transversal en 131 perfiles a partir del puerto de Yucalpetén, a 4Km al Este de Puerto progreso para un Norte.....	86
Figura 5-14 Cambio de volumen de las tasas de transporte longitudinal (en m <sup>3</sup> /año x 1000) en la zona de estudio, identificando las áreas de erosión, depositación y las zonas estables. ....	86
Figura 5-15 Rosas de oleaje propagado a 3m de la costa en la zona de estudio. ....	87
Figura 5-16 Comparación de las curvas alpha-Q, en los puntos 1 y 9, siendo el P1 el más cercano a las estructuras y a 4.5km está el punto 9. (En verde el ángulo de orientación de la playa, en rojo ángulo de equilibrio).....	88

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1 Infraestructura Construida 1985-1998.....	6
Tabla 1-2 Modificaciones de la Costa 1985-1998.....	7
Tabla 4-1 Relación entre el área máxima y largo aproximado del elemento. ....	64
Tabla 4-2 Especificaciones módulo de propagación de oleaje <i>SW</i> .....	67
Tabla 4-3 Especificaciones módulo hidrodinámico <i>HD</i> .....	68
Tabla 4-4Especificaciones del modelo de transporte de sedimentos <i>ST</i> .....	69
Tabla 5-1 Eventos de oleaje seleccionados para el modelado bidimensional .....	79



# Capítulo 1

## Aspectos Generales

# Capítulo 1

## 1 ASPECTOS GENERALES

---

### 1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis se estructura en seis capítulos, como sigue:

**Capítulo 1:** proporciona una visión general de Chelem, y recapitula la historia del proceso de erosión y las medidas que se han tomado para resolver el problema, así como los objetivos y el alcance de esta investigación.

**Capítulo 2:** descripción de la información disponible que se utilizó para la realización de esta investigación, incluyendo algunos conceptos relevantes en los procesos físicos estudiados, así como los estudios previos que se han realizado en la zona.

**Capítulo 3:** descripción general de los modelos de oleaje, hidrodinámica, y transporte de sedimento utilizados en este trabajo. Específicamente, se describen las bases teóricas de los modelos LITDRIFT y el modelo acoplado MIKE 21/3 FM.

**Capítulo 4:** hace una descripción de la metodología empleada en este trabajo para caracterizar la hidrodinámica y transporte de sedimentos en el área de estudio.

**Capítulo 5:** presenta la caracterización del oleaje y transporte de sedimentos que intervienen en la dinámica marina de Chelem Yucatán. Asimismo, se evalúa el efecto de las estructuras costeras en el sistema litoral de la zona.

**Capítulo 6:** contiene un resumen general de los resultados de esta investigación, incluyendo comentarios sobre el proceso de modelado, y da recomendaciones para el control y la mejora de las condiciones costeras en Chelem y para recuperar el equilibrio del transporte de sedimentos en la zona.

### 1.2 ANTECEDENTES

La dinámica en ambientes costeros dependen del: (i) los forzamientos marinos (oleaje, corrientes, mareas); (ii) el receptor (la morfología de la playa); y (iii) la infraestructura costera.

Las playas son espacios donde se desarrollan diversas actividades recreativas y productivas, además de constituir una protección natural en la zona costera. Sin embargo, su dinámica es sensible a las intervenciones antropogénicas por lo que requieren una caracterización adecuada para establecer los efectos de cualquier intervención en esta zona antes de ser llevada a cabo. La playa en Chelem, pertenecientes al litoral yucateco localizado al sureste de México, está siendo afectada por un acelerado proceso erosivo (ver Figura 1-1) que ha sido atribuido a la infraestructura costera en la zona.

Chelem, al igual que otros sectores del litoral en el estado de Yucatán, se ha visto gradualmente afectada por la pérdida del ancho de playa, ocasionando el deterioro debido a la acción del oleaje en las casas y comercios localizados en la primera línea de playa, por lo que han dejado de ser atractiva para el turismo y/o actividades lúdicas para los habitantes del estado.



Figura 1-1 Fotografías de la evidente erosión en las playas de Chelem. Tomadas en recorrido de campo 2012.

La intervención antropogénica en las zonas costera, que acompaña el desarrollo de estas regiones, es uno de los factores que ha influenciado la estabilidad del sistema costero de la zona. De acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1999) en el año 1900 se empezaron a construir las primeras casas veraniegas sobre la primera duna costera desde Progreso hasta el puerto de Chuburná. El desarrollo urbanístico se intensificó en 1928 contemplando la pavimentación la carretera Mérida-Progreso y la construcción de los primeros hoteles.

Posteriormente en 1937 se inició la construcción del muelle de Progreso (Figura 1-2) que consistió en un viaducto de 1.7 km de largo y una plataforma de 200 x 500 m. El sistema constructivo estuvo hecho a base depilas, cabezales, arcos, y paredes laterales sobre los arcos para contener la base de piedraplen para la carpeta asfáltica. La plataforma terminó de construirse en septiembre de 1941,

posteriormente el puerto ha experimentado cuatro etapas de ampliación. La última se inició en el año de 1999, con una inversión del gobierno federal de más de 120 millones de dólares (USD), durante un periodo de 19 meses, sumando una inversión total de 128 millones de USD, incluyendo la inversión privada, según información publicada por La Administración Portuaria Integral De Progreso.



Figura 1-2 Muelle de Progreso en 1985(izquierda). Área de navegación, con profundidad de 12m, actualmente (derecha).  
(Fuente: www.puertosyucatan.com)

A partir de la construcción del muelle de Progreso en 1941, se dio inicio al desarrollo industrial de la zona y a su vez la construcción de estructuras en los años siguientes que modificarían la dinámica de la costa. Las pequeñas obras de protección no estuvieron basadas en criterios técnicos para su diseño y construcción que permitiera buscar una solución integral. Por el contrario, lo anterior ha provocado que el problema se trasladara a otros sectores de la playa. En la

Tabla 1-1 se describen la infraestructura construida y en la Tabla 1-2 las variaciones en la costa, ambas entre 1985 y 1998 según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1999).

**Tabla 1-1 Infraestructura Construida 1985-1998**

1985	Chelém y Yucalpetén	123 espigones	
	Yucalpetén y Progreso	9 espigones	
1998	Chuburná y Chelém	101 espigones	490m protección marginal
	Chelém y Yucalpetén	77 espigones	320m de protección marginal
	Yucalpetén y Progreso	2 espigones	400m protección marginal
	Progreso y Chicxulub	68 espigones	
1998	Chicxulub y Huaymitún	79 espigones	

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1999)

**Tabla 1-2 Modificaciones de la Costa 1985-1998**

1985	Yucalpetén y Chelém	Erosión de la costa.
1998	Progreso y Yucalpetén	Incrementó en 50 m promedio y en el muelle fiscal 100 m. Construcción de estructura 400 m de longitud.
	Yucalpetén y Chelém	Antes 123 espigones, ahora 83. Los restantes destruidos o sustituidos por protección marginal.
	1er km al W Yucalpetén	Antes 10 espigones, ahora 2. Playa sin erosión.
	Siguientes 500 m	Antes 17 espigones. Ahora retroceso 10-20 m. Destrucción de espigones.
	Siguientes 1,000 m	Antes 19 espigones. Ahora 15 con playa estabilizada. 4 protecciones marginales tipo tómbolo.
	Siguientes 1,000 m	Se conservan 24 espigones con algunas protecciones marginales. Retrocesos del orden de los 10 m. Hacia playa Chelém playa estabilizada. Se conservan los 24 espigones.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1999)

Entre las acciones de protección más utilizadas en la región se encuentran la construcción de escolleras y espigones como se muestra en la Figura 1-3, con imágenes aéreas tomadas por Meyer-Arendt en 1984 en su recorrido por la costa de Yucatán.



Figura 1-3 Fotografías aéreas que muestran las múltiples estructuras (escolleras y espigones) construidas por lo residentes de la costa para proteger sus propiedades de la erosión. Fuente: Meyer-Arendt(1994).

De acuerdo al informe de la SCT (1999) se estimó que existía un transporte de sedimentos neto hacia el Oeste, entre Chelem y Progreso, del orden de los 60,000 m<sup>3</sup>/año. Debido a la dirección del transporte litoral neto, se estableció que los procesos de azolve y erosión a los largo de la línea de costa eran producto de las obras de infraestructura portuaria y protección costera que se habían construido en años anteriores.

Adicional a la modificación antropogénica, las diferencias en el ancho, pendiente de playa y orientación de la línea de costa son factores que afectan la transformación del oleaje y generación de corrientes litorales, las cuales juegan un papel importante en la variación del transporte de sedimentos en las diferentes épocas del año a lo largo del litoral yucateco. La época de lluvias y nortes es cuando los cambios son más intensos debido a una mayor energía media del oleaje.

El 22 de septiembre de 2002 la población de Chelém se vio seriamente afectada por el impacto del huracán Isidoro en la costa norte de Yucatán. El ojo del huracán Isidoro (Figura 1-4) impactó sobre tierra firme, en Telchac Puerto, aproximadamente a 45 km al Este de Puerto Progreso, con vientos máximos sostenidos de 205 km/h y rachas de 250 km/h. Durante el resto de este día, el centro de Isidoro se desplazó sobre tierra con rumbo suroeste. (NOAA, 2002).



Figura 1-4 Imagen del ojo del Huracán Isidoro en Yucatán 2002 (NOAA, 2002)

Algunos años después (2005), debido a la persistencia de los problemas de erosión, se llevo a cabo obras de protección basadas en rompeolas sumergidos a base de tubos de geotextil rellenos de arena (ver Figura 1-5) que en su momento favorecieron la acumulación de sedimento en la playa en algunos sectores de la costa.

El nivel de coronación del tubo geotextil se fijo en Nivel Medio de Marea Baja (NMMB), a una distancia de 10 a 15m de la línea de pleamar máxima y una altura de 0.70m. De acuerdo al análisis de mareas esta altura cubriría el rango de mareas astronómicas lo que aseguraría la rotura del oleaje en el tubo geotextil, reduciendo

el movimiento de arena y como resultado la regeneración de la playa en el sector del proyecto (Álvarez et al, 2007).



Figura 1-5 Muestra de geotextil instalado en la zona de estudio para contribuir a la acumulación de sedimentos

Debido a que la función del tubo geotextil es reducir el movimiento de arena y forzar a su acumulación local limitando el movimiento de sedimentos en dirección E-O, los resultados de la aplicación de esta tecnología fue la afectación del lado oeste inmediato de la instalación de la obra y durante el incremento del oleaje en la temporada de nortes y frentes fríos el sedimento transportado costa afuera ya no podía regresar al sistema.

En 2010, los propietarios de los predios afectados en la zona de estudio conformaron el “Movimiento por la Recuperación de Playas de Chelem y Chuburná” con el objetivo de solicitar una solución a la erosión costera. En respuesta a esto el gobierno decidió realizar un relleno en la zona de estudio con el material proveniente del dragado del mantenimiento de la marina de Yucalpetén (Figura 1-6) el cual tuvo varias deficiencias en su diseño y su ejecución (Lira, 2010). Por lo tanto, es necesario desarrollar estrategias que permitan mitigar el problema de la erosión en la zona costera de Chelem. Para ello, requerimos mejorar nuestro entendimiento de la dinámica marina y el efecto de las obras costeras en la zona.



Figura 1-6 A la derecha zona de dragado en la marina de Yucalpetén. A la izquierda zona de estudio donde se realizaría el relleno artificial. [Fuente: Memorias foro Erosión costera SEDUMA, 2010.

La erosión costera es actualmente un reto para las autoridades de Yucatán y los habitantes del litoral costero, ya que está incrementando el riesgo de perder sus propiedades y reduciendo los servicios ambientales de las playas (García *et al.* 2011).

### 1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los principales objetivos del presente estudio son:

- Determinar los climas de oleaje con mayor contribución al transporte de sedimentos en la zona utilizando datos de un hincast (1979-2009).
- Caracterizar la hidrodinámica en la zona de estudio.
- Determinar el transporte de sedimentos 2D en la zona de estudios con y sin estructuras.
- Diagnosticar el problema de erosión en Chelem identificando el papel del Puerto de Abrigo y el Puerto de Altura en la erosión existente en la zona.
- Emitir recomendaciones en cuanto a las posibles alternativas para mitigar la erosión de la costa en la zona más crítica.

## 1.4 ÁREA DE ESTUDIO

### 1.4.1 DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN

La franja playera de Chelem (Figura 1-7) en el estado de Yucatán, hace parte de los 340km (INEGI, 2010) del litoral Yucateco. El área de estudio se encuentra localizada a 4 km del Puerto de Progreso (ubicado al este) y 45 km al norte de la ciudad de Mérida capital del estado de Yucatán.

Chelem es una de las 25 localidades que conforman el municipio de Progreso que a su vez hace parte de los 106 municipios que integran el estado de Yucatán. Debido a su cercanía a Mérida, es uno de las principales fuentes de dinamismo para la economía del estado.

La ciudad de Mérida cuenta con una población aproximada de 830,732 habitantes albergando el 42.44% del total de la población del estado de Yucatán (INEGI, 2010). Esta densidad poblacional y su ubicación geográfica representan una gran contribución a las actividades de industria y turismo desarrolladas en el municipio.

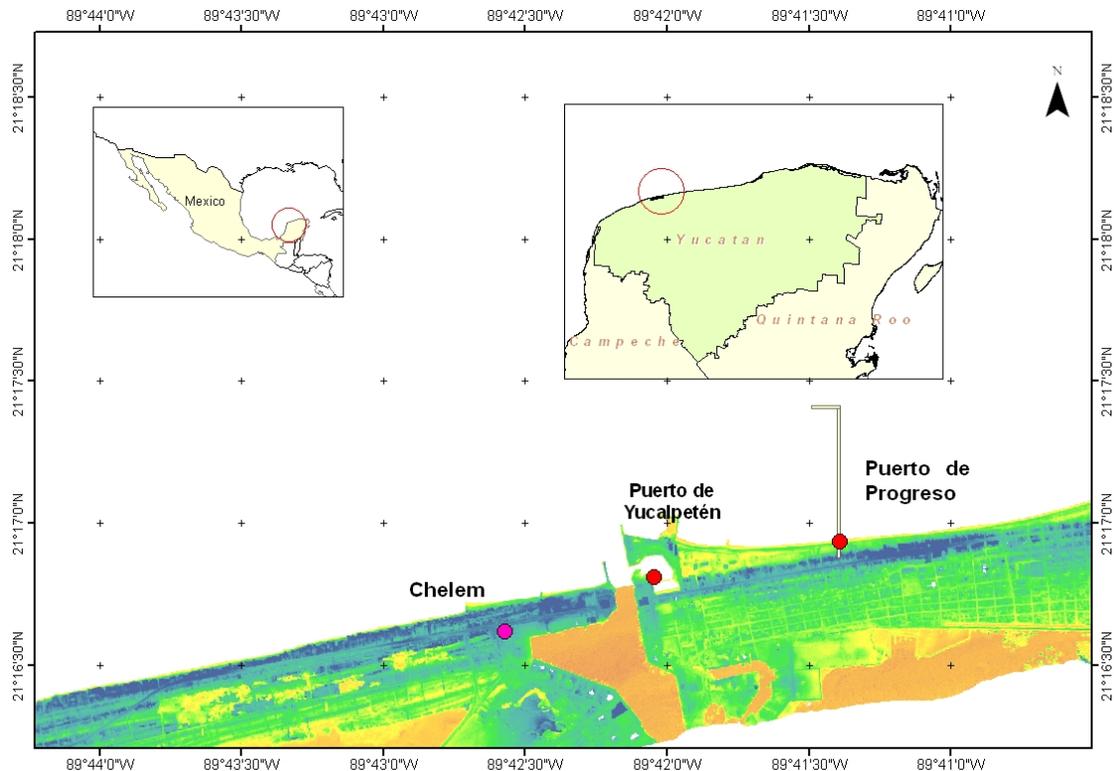


Figura 1-7 Localización de la zona de estudio y las estructuras marítimas cercanas a ella.

### 1.4.2 CLIMA MARÍTIMO

El clima marítimo en la península de la península de Yucatán ha sido caracterizado en diversos estudios (CINVESTAV, 1997; Appendini et al. 2012). Esta zona tiene alta vulnerabilidad a eventos extremos (nortes y huracanes) y a su vez tiene altos ingresos debido a su actividad turística ligada a la riqueza de sus ecosistemas. En el litoral Yucateco, se ha estimado que oleaje predominante tiene una ocurrencia en el ángulo de incidencia de 45% dirección NE y el restante se distribuye con un 25%N, 18%E y 5%NW. En la principal dirección, la NE, el oleaje en su mayoría presenta alturas inferiores a los 0.5 metros, seguida por la ocurrencia de alturas mayores a 2 metros (CINVESTAV, 1997). El área de estudio está sujeta a eventos extremos a lo largo del año. Durante el invierno los sistemas de alta presión conocidos como Nortes, y durante el verano las tormentas tropicales y huracanes provenientes del Mar Caribe (Appendini et al. 2012). A pesar de que los eventos extremos producen erosión de playas, es el clima medio del oleaje el que afecta la capacidad de la playa para soportar estos eventos (Appendini and Fischer, 1998; Fischer, 1985).

Para la zona de Chelem Ruiz (2010) encontró que aunque el oleaje es poco energético, conserva la capacidad de mover partículas inestables (factor de forma menor 0.7mm) a lo largo del litoral hasta encontrar como obstáculo el Puerto de altura de Progreso creando una zona de calma y depositación. Pasado el puerto, continúa la tendencia de transporte hacia el oeste. Por otro lado, Lira (2011) planteó, a partir de un año de mediciones de oleaje a 8m de profundidad y modelación numérica, que el potencial de transporte litoral era modificado en la zona de Chelem debido a la presencia del Puerto de Altura de Progreso.

Más recientemente, Appendini et al. (2012) realizaron la propagación del oleaje en aguas profundas (10m) con los datos de reanálisis obtenidos del WAVEWATCH III (NOAA) (1997-2009) empleando un modelo espectral de oleaje (MIKE21SW). El modelo fue calibrado con mediciones de oleaje a 10 m de profundidad frente a Telchac, reproduciendo satisfactoriamente las series temporales de Hs, Tp, y dirección del oleaje.

La Figura 1-8 presenta el clima de oleaje en la zona cercana al área de estudio, determinando que prevalecen las condiciones de baja energía entre (altura de ola significativa media de 1 m) las cuales condicionan el transporte longitudinal de sedimentos e influyen en la capacidad de respuesta de la playa a eventos de menor probabilidad de ocurrencia pero de mayor energía.

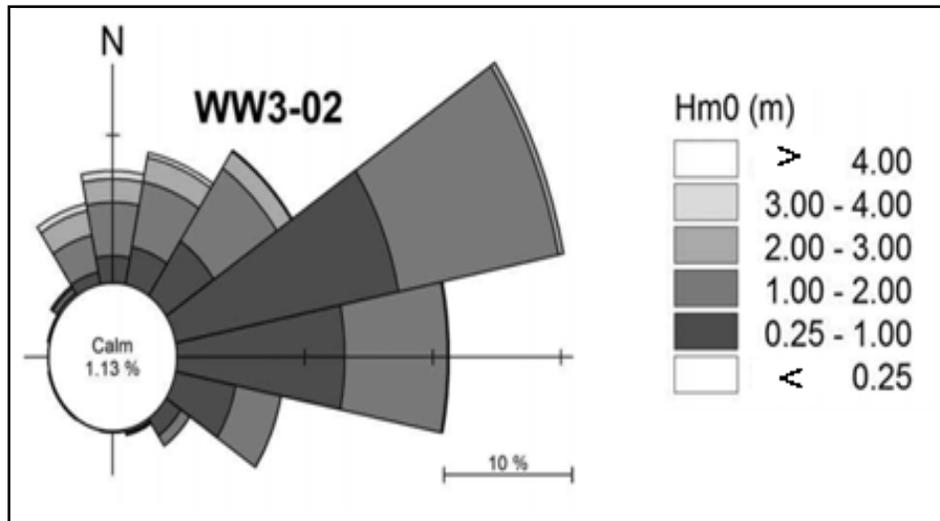


Figura 1-8 Rosa de oleaje en aguas profundas cercana al área de estudio obtenida del hindcast de 12 años del WAVEWATCH III. Tomada de Appendini et al (2012),

### 1.4.3 GEOLOGÍA

Inicialmente el sustrato geológico el estado de Yucatán fue agrupado en tres grupos (López-Ramos, 1975) que corresponden a los procesos geológicos (Figura 1-9) que determinaron la configuración actual de la península de Yucatán:

- a. Cuando el mar se encontraba entre 5 y 8 metros sobre el nivel del mar, hace aproximadamente 80.000 años, se estabilizó la línea de costa durante el Pleistoceno (periodo interglaciar). Lo que indica que sobre donde está hoy la ciudad de Mérida se encontraba un mar somero.
- a. Posteriormente, durante la glaciación, hace aproximadamente 18.000 años el mar descendió alrededor de 130 metros, quedando la plataforma marina expuesta a procesos terrestres y atmosféricos, y sujeta a erosión de valles y cuencas.
- b. Durante el Holoceno, hace aproximadamente 8.000 años, el nivel del mar alcanzó un nivel entre 3 y 6 metros por debajo del nivel actual, iniciándose depositación litoral eólica de sedimentos carbonatados del Cuaternario en áreas costeras actuales.

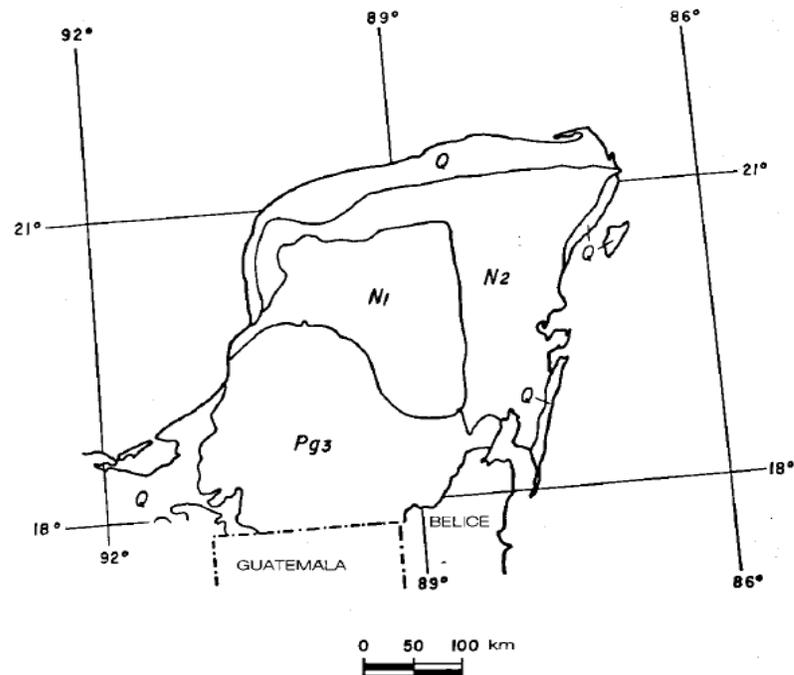


Figura 1-9 Geología de la península de Yucatán (López- Ramos,1975).Q-Cuaternario;N2-Neógeno superior; Pg3-Paleógeno superior; Oligoceno. N1-Neógeno inferior; Mioceno;

Lugo-Aceves (1992), elaboraron un mapa geomorfológico (Figura 1-10 ) basado en la morfología superficial de la península y de la altura sobre el nivel del mar, basado en los 13 distritos fisiográficos siguientes:

(1)Planicie de acumulación marina, formada principalmente en el Holoceno. *Planicies estructurales:* (2)casi horizontal, de hasta 10m de altitud, marginal a la costa;(3)casi horizontal de 10-20m de altitud; (4) casi horizontal, en localidades con lomeríos, marginal a la costa, elevada,10-50m de altitud;(6)planicies y lomeríos con altitud de 50-100m. *Lomeríos* (7)menores, de 100 a 200m de altitud;(8)mayores, de 200 a 350m de altitud. *Dinámica de la línea de costa:*(9) en retrocesos hacia el continente, por sumersión o por ascenso del nivel del mar;(10)avance hacia el mar por emersión y/o por acumulación deltaica; (11) avance hacia el mar por depósitos litorales;(12)neutral o no diferenciada;(13) *Procesos dominantes en la costa:* A, acumulación; AA, acumulación y abrasión (erosión marina); E, erosión.

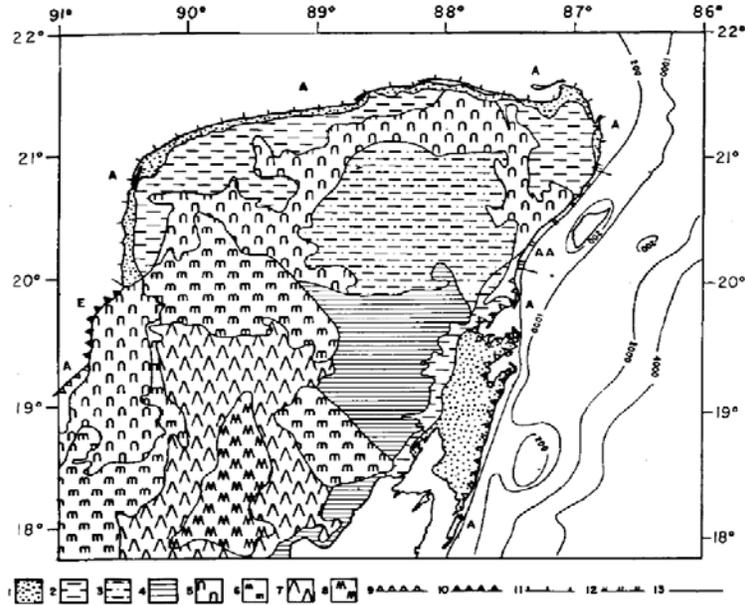


Figura 1-10 Mapa geomorfológico basado en la morfología superficial de la península y de la altura sobre el nivel del mar.

## 1.5 ALCANCE DEL ESTUDIO

El presente estudio pretende dar un diagnóstico detallado de los efectos del Muelle de Progreso y el Puerto de Abrigo de Yucalpetén en la dinámica marina de la zona de estudio. Los resultados de este trabajo podrán ser utilizados para el establecer estrategias de mitigación al problema de la erosión en Chelem.

Esta investigación ha sido desarrollada teniendo en cuenta la información disponible para el estado de Yucatán. Es importante mencionar que no hay mediciones de oleaje y perfiles multi-anales en el área de estudio. Por esta razón, se optó por el uso del modelado numérico en el presente trabajo.

# Capítulo 2

## Revisión de la literatura



## 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

---

Los ambientes costeros son de gran interés, no sólo por su belleza natural sino por la dinámica de los procesos físicos que dan lugar en estos y que aún no son del todo comprendidos por el hombre. En especial las playas arenosas, desde el punto de vista físico se caracterizan por su sensibilidad y capacidad de respuesta ante las condiciones hidrodinámicas que las afectan. Los procesos físicos (oleaje y corrientes) que gobiernan la dinámica litoral causan diferencias en el ancho, pendiente y forma de las playas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año, siendo en épocas de lluvias y nortes cuando los cambios son más intensos en el Golfo de México.

Otro factor importante en la conformación de los procesos de la dinámica costera es la actividad antropogénica. La construcción de vías de comunicación, infraestructura energética, muelles, espigones, escolleras, y rompeolas en la zona costera alteran el transporte litoral y producen cambios en la morfología de playas. Desde el punto de vista ingenieril, los fenómenos costeros sedimentarios están estrechamente relacionados con diversos problemas prácticos, tales como el dragado de los canales de navegación en puertos, acumulación de sedimentos en estructuras, y la erosión de playas.

El presente capítulo se centra en los procesos físicos que controlan la dinámica litoral en la zona de estudio.

### 2.1 PROPAGACIÓN DEL OLAJE

El oleaje es producido por la energía del viento que sopla sobre la superficie libre del mar, para propagarse desde aguas profundas hasta la costa donde es disipada a través de la rotura del oleaje. Durante su propagación el oleaje sufre importantes transformaciones debido a la reducción de la profundidad conforme se aproximan a la costa, las cuales se reflejan en el cambio de la altura, disminución de la longitud, y dirección de la propagación. En general se asume que el flujo de energía se conserva.

Por otro lado, en zonas muy cercanas a la costa ocurren pérdidas de energía debido a la disipación por fricción en el fondo y la rotura del oleaje. Es en la zona de rompientes donde procesos con distintas escalas espacio-temporales interactúan (ej. turbulencia,

oscilaciones infragravitatorias, y corrientes en cercanías a la costa) y contribuyen al transporte de sedimentos en playas, generando cambios en la morfología de las playas.

## 2.2 REFRACCIÓN Y ASOMERAMIENTO

Durante la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la zona de aguas poco profundas, el oleaje sufre modificaciones en su dirección y altura (H) disminuyendo el periodo, la longitud ( $\lambda$ ) y la velocidad de propagación (C) ocasionando que los frentes de las olas cambien de dirección con tendencia a ser paralelos a los contornos o líneas batimétricas del fondo. Este fenómeno se denomina refracción del oleaje y su magnitud está relacionada con el efecto del cambio de la profundidad del fondo marino (batimetría) o asomeramiento (Komar,1998).



Figura 2-1 Refracción en la costa. (Fuente Coastal Change UCSD,2011)

El oleaje puede simplificarse a un tren regular de ondas de crestas largas y la batimetría a un plano con las líneas batimétricas paralelas a los frentes de onda que cambia las características del oleaje debidas al asomeramiento por lo que puede ser tratado como un problema bidimensional. En este sentido, si la altura de ola en profundidades indefinidas ( $H/L > 0.5$ ), es  $H_0$ , la altura de ola,  $H$ , en una profundidad cualquiera,  $h$ , vendrá determinada por el coeficiente de asomeramiento,  $K_S = H/H_0$ .

Para el caso de incidencia oblicua del oleaje y batimetría recta y paralela, el giro de los frentes debido a la refracción del oleaje puede ser calculado empleando la Ley de Snell:

$$\frac{C_0}{\text{Sen } \alpha_0} = \frac{C}{\text{Sen } \alpha} \quad \text{Ec. 2-1}$$

Donde  $C_0$ ,  $C$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha$ , son la celeridad de la onda y el ángulo de incidencia con la batimetría en profundidades indefinidas y en la profundidad local  $h$ , respectivamente. El cambio de la altura de ola provocado solamente por la refracción (debido a la expansión o contracción de los frentes de onda) se define mediante el coeficiente de refracción:

$$K_r = \left( \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 2-2}$$

Cuando la ola se acerca a una playa con un cierto ángulo con respecto a las isobatas (ver Figura 2-2), se produce una diferenciación de velocidades a lo largo de la cresta. La velocidad será menor en aquella parte de la cresta donde la profundidad sea también menor. Esto produce una deformación de la cresta tal que estas tienden a colocarse paralelas a las isobatas (Komar, 1998).

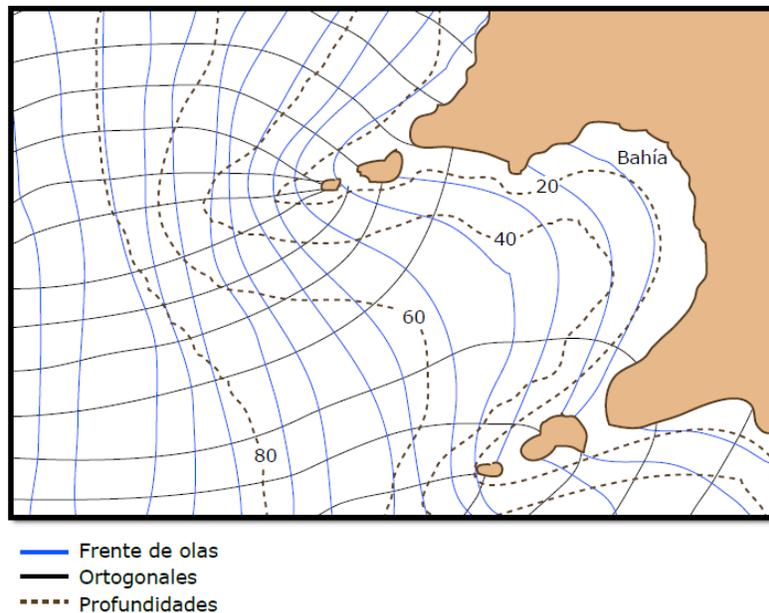


Figura 2-2 Divergencia y convergencia en la costa (Fuente: Calero et al 2004).

Las líneas trazadas en la Figura 2-2, que se juntan identifican la convergencia de energía de la ola (incremento de altura de ola), ya que el frente de las ondas se comprime, lo cual implica un aumento en su altura. Mientras que una separación de las líneas trazadas perpendicularmente al frente de ondas indica divergencia de energía (menor altura), equivalente a que el frente de ola se expande, Calero *et al.* 2004.

En la costa de Yucatán, en condiciones medias el oleaje incide con gran oblicuidad y períodos cortos. Lo anterior ocasiona que el ángulo del oleaje en rotura sea grande ya que la refracción del oleaje ocurre próxima a la costa (SCT,1999).

### 2.3 DIFRACCIÓN DEL OLAJE

La difracción es el fenómeno de transferencia lateral de energía a lo largo de un frente de onda cuando es interrumpido parcialmente por un obstáculo natural o artificial (Vergara,2011). Una parte del oleaje incidente interactúa contra el obstáculo sobre el que se disipa y se refleja parcialmente. Los frentes de onda que rebasan el extremo del obstáculo se difractan formando arcos circulares concéntricos y la altura decrece a lo largo de cada frente de ola con dirección a la estructura.

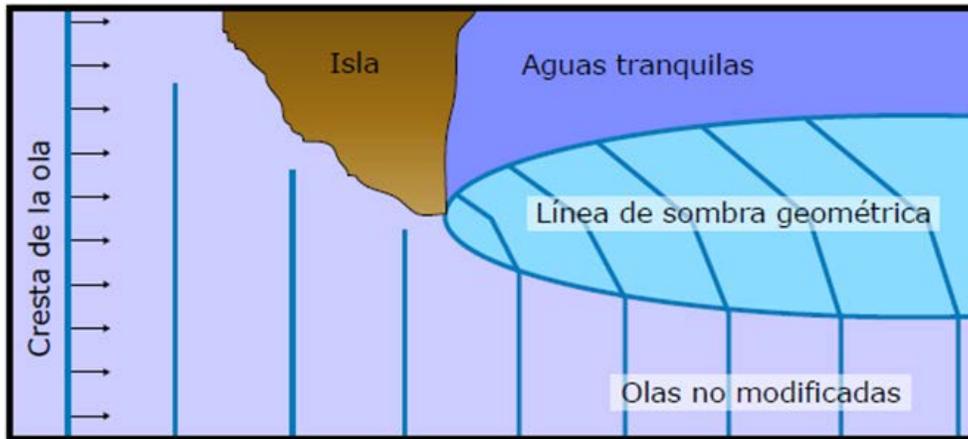


Figura 2-3 Esquema del efecto de la difracción del oleaje (calero et al. 2004)

Los efectos de la difracción se manifiestan en las condiciones de agitación del oleaje en el interior de un puerto o una bahía y en las corrientes generadas cuyas magnitudes dependen de las características de las olas incidentes: altura, periodo, orientación, separación, longitud y orientación del obstáculo.

En el estudio de la dinámica litoral en Chelem es importante establecer la relación de la difracción del oleaje en la zona, su efecto en la incidencia del oleaje y el transporte de sedimentos, debido a la presencia de estructuras costeras aledañas a la zona de estudio como se muestra en la figura 2-4.

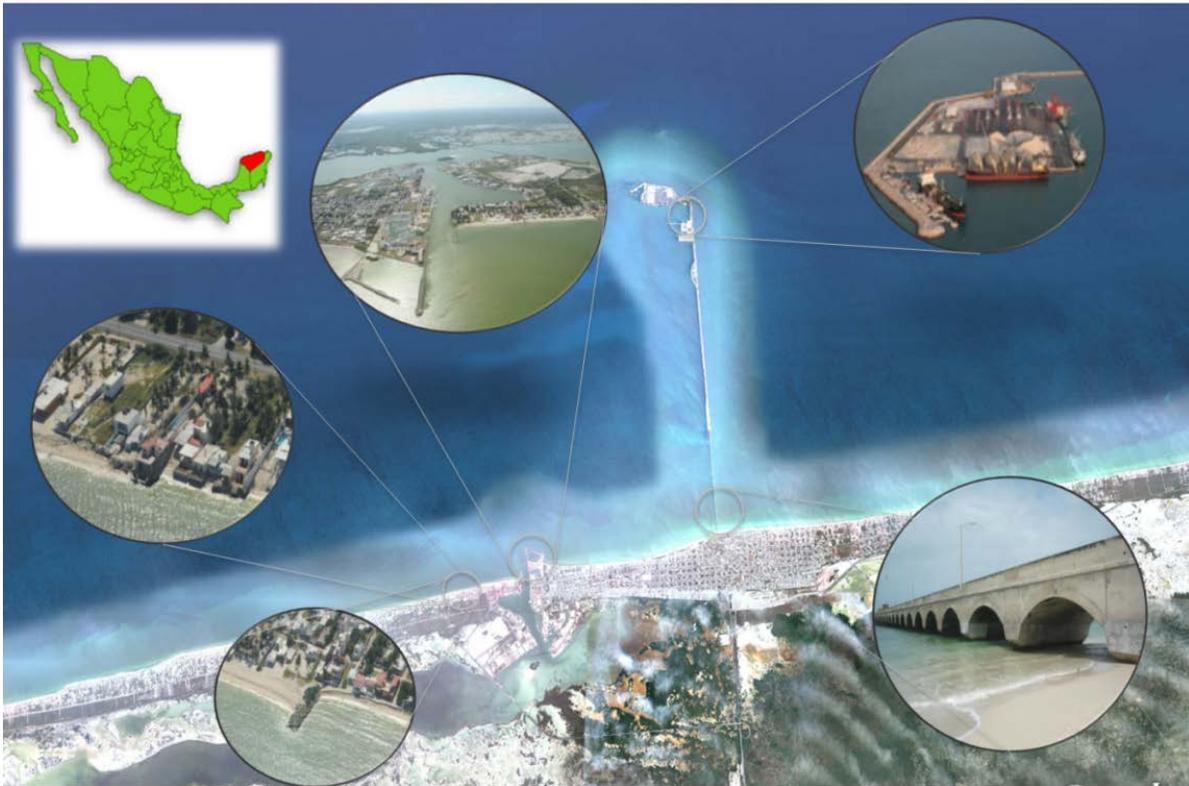


Figura 2-4 Ubicación de las estructuras costeras cercanas a la zona de estudio.

## 2.4 ROTURA DEL OLAJE

La rotura del oleaje es el principal mecanismo de disipación de energía del oleaje en zonas cercanas a la costa. La rotura del oleaje sucede cuando la altura crece hasta alcanzar una altura de ola inestable; por lo tanto rompe y disipa parte de su energía a través de la turbulencia. La zona comprendida entre el punto de rotura y la costa se denomina zona de rompientes. En esta región, la energía disipada se transforma principalmente en turbulencia e induce un incremento del nivel del mar y corrientes longitudinales y transversales.

De acuerdo Sánchez-Arcilla y Lemos (1990), básicamente existen dos tipos de criterios de rotura (para olas en profundidades reducidas e intermedias):

- I. Criterios que expresan las condiciones de rotura en función de parámetros locales de la ola y características batimétricas (o pendiente del fondo).

II. Criterios que especifican la altura de ola en rotura en función de características batimétricas (pendientes de la playa) y peralte de la onda en la zona offshore ( $H_0/L_0$ )

Los *criterios del Tipo I*, que consideran los parámetros locales de la onda, se suelen expresar por medio de relaciones del tipo:

$$\frac{H_b}{h_b} = F \left[ \frac{h_b}{L_b}, m \right] \quad (\text{A})$$

o bien:

$$\frac{H_b}{L_b} = F \left[ \frac{h_b}{L_b}, m \right] \quad (\text{B})$$

Donde  $H_b$ ,  $h_b$  y  $L_b$  son respectivamente la altura de ola, la profundidad y la longitud de onda en rotura y  $m$  es la pendiente del fondo. Las expresiones de tipo (A) corresponden a criterios que limitan el índice de rotura, mientras que las de tipo (B) aparecen en criterios que limitan el peralte de la ola. A continuación se presentan los criterios empíricos más utilizados (Sierra, J. P., Lo Presti Blanco, Alicia, marzo 1998) para predecir la altura del oleaje en rotura.

#### ***Criterio de McCowan (1891)***

En aguas reducidas la altura de la ola se encuentra limitada por la profundidad local y se puede parametrizar en términos de la profundidad. Por lo tanto, McCowan (1894) determinó que las olas rompen cuando su altura alcanza un valor igual a una fracción de la profundidad de rompimiento  $d_b$  expresada por (Dean y Dalrymple 1994):

$$H_b = kd_b \quad \text{Ec. 2-3}$$

Donde  $H_b$  es la altura de la ola rompiente y  $K=0.78$  es el índice de rotura para una ola solitaria viajando sobre un fondo horizontal.

#### ***Criterio de Miche (1944)***

El criterio de Miche (1944) establece que la ola rompe cuando su peralte es igual a  $1/7$ , lo que viene dado por:

$$\frac{H_b}{L_b} = \frac{1}{7} \tanh \left[ \frac{2\pi h_b}{L_b} \right] \quad \text{Ec. 2-4}$$

Este criterio no incluye el efecto de la pendiente, por lo que sólo es válido para ondas sobre fondos horizontales.

Los *criterios del Tipo II*, son para determinar los parámetros del oleaje en rotura, tienen en cuenta las condiciones batimétricas y las características del oleaje en aguas profundas.

Se consideran tres tipos de rotura principales:

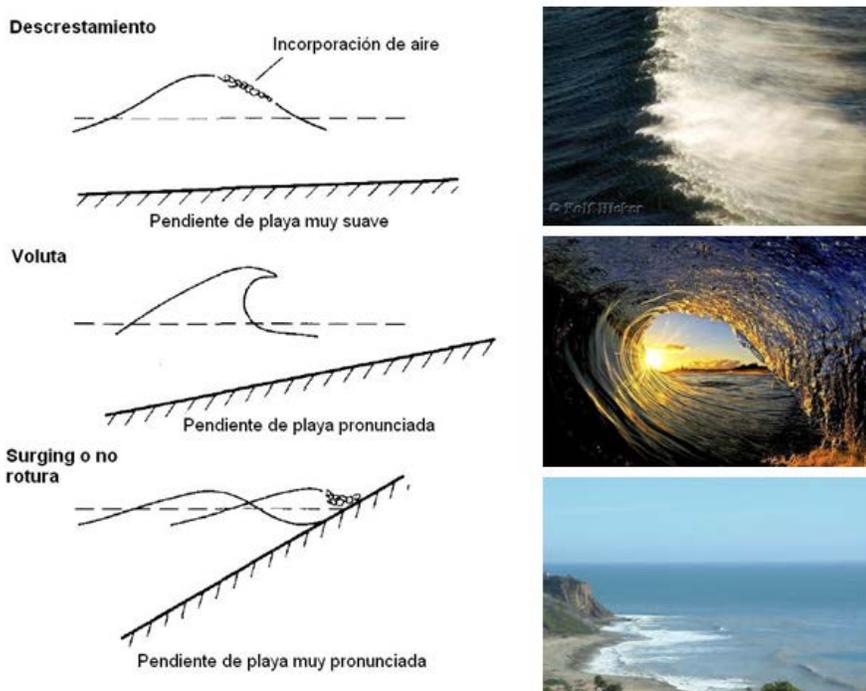


Figura 2-5 Tipos de rotura en playas modificado Pedrozo Acuña, 2011)

Mediante observaciones en laboratorio, Galvin (1968) encontró una expresión empírica relacionando la geometría de la ola y el tipo de rotura empleando dos parámetros adimensionales:  $H_0/L_0 m^2$ , donde  $H_0$  es la altura de la ola en aguas profundas,  $L_0$  la longitud de onda en aguas profundas y  $m$  la pendiente de la playa. Esta relación fue empleada por Battjes (1974) para redefinir estos parámetros en términos del parámetro de Iribarren en aguas profundas y en aguas someras:

$$Ir_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad ; \quad Ir_b = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad \text{Ec. 2-5}$$

donde  $\tan \alpha$  representa la pendiente de la playa,  $L_0$  la longitud de onda en aguas profundas y  $H_b$  altura de ola en el punto de rotura.

De acuerdo a la clasificación de Galvin (1968) y la redefinición de Battjes (1974), los límites de los tipos de rompiente son:

Descrestamiento  $Ir_0 < 0.5$

Voluta:  $0.5 < Ir_0 < 3.3$  o  $0.4 < Ir_b < 2.0$

No rotura o surging  $3.3 < Ir_0 < 3.3$  o  $2.0 < Ir_b$

## 2.5 CIRCULACIÓN EN LA ZONA DE ROTURA

Las velocidades orbitales del oleaje son generalmente lo suficientemente fuertes para mover el sedimento, pero la naturaleza oscilatoria de estas velocidades reduce su capacidad para generar transporte neto en alguna dirección (Pedrozo-Acuña, 2010). Por lo tanto, son otros los flujos que juegan un papel principal en el transporte de los sedimentos tanto longitudinal como transversalmente. Entre la zona de rompientes y la playa, la circulación es prácticamente generada por las fuerzas que resultan de la disipación del oleaje. Como ejemplo se encuentran las corrientes de retorno (rip currents en inglés), corrientes longitudinales, y las corrientes superficiales que producen un transporte de partículas hacia el mar (resaca) (Nittrouer y Wright, 1995).

McKenzie (1958), demostró que el patrón de circulación tanto en corrientes de retorno como en longitudinales en una playa dependía de las condiciones de oleaje incidente. Encontró que con un oleaje incidente fuerte se podían generar tan sólo unas pocas corrientes de retorno de gran intensidad mientras que si el oleaje era débil, se podían producir corrientes más débiles aunque más numerosas.

La ilustración esquemática de Komar (Figura 2-6), muestra un sistema clásico de circulación cuando las olas se aproximan en dirección normal a la costa y sus crestas rompen paralelamente a las líneas batimétricas, las corrientes generadas toman la forma de corrientes de retorno.

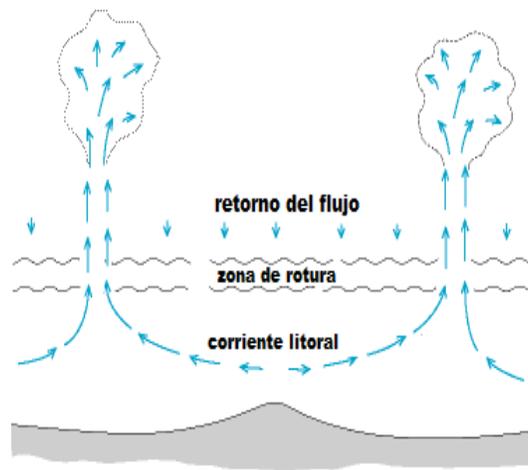


Figura 2-6 La ilustración esquemática adaptada de Komar (1998)

Las corrientes de retorno se alimentan por las corrientes longitudinales en la zona de *surf* dirigidas hacia ellas, incrementando su magnitud desde cero en un punto intermedio entre dos corrientes de retorno vecinas hasta un máximo justo antes de girarse mar adentro para formar la corriente de retorno.

De igual forma, las corrientes longitudinales se alimentan de un flujo lento de transporte de masa de agua atraída por el oleaje hacia la zona de rompientes.

El balance de las fuerzas involucradas en las corrientes sobre una playa recta con pendiente transversal uniforme, se debe únicamente a las fuerzas generadas por los gradientes de presión y del tensor de radiación, además de la fuerza de fricción en el fondo (Vergara, 2011).

Cuando las olas inciden sobre la línea de playa en forma oblicua, transfieren en el proceso de rompimiento una cantidad de movimiento que da origen a los esfuerzos cortantes radiales, que a su vez generan corrientes paralelas a la playa. Estas consideraciones son las que se han aplicado para calcular el caudal sólido a lo largo de la playa.

### 2.5.1 CORRIENTES LONGITUDINALES

La Figura 2-7 representa un esquema del balance de las fuerzas involucradas en las corrientes sobre una playa recta con pendiente transversal uniforme, se debe únicamente

a las fuerzas generadas por los gradientes de presión y esfuerzos radiales, además de la fuerza de fricción en el fondo (Vergara,2011).

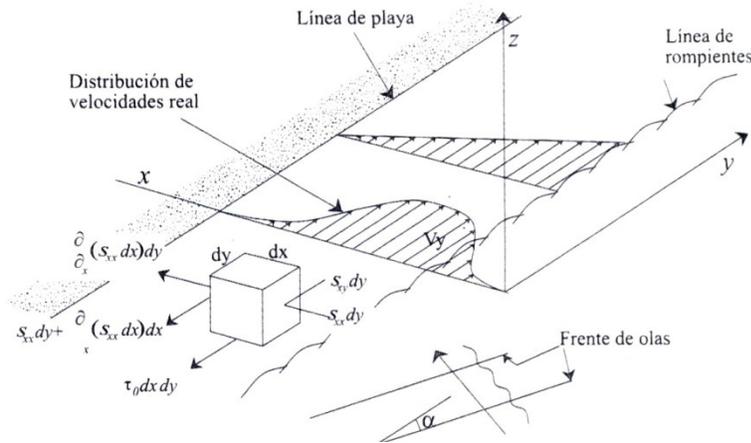


Figura 2-7 Representación esquemática del balance de fuerzas en una corriente longitudinal. (Vergara,2011)

Cuando las olas inciden sobre la línea de playa en forma oblicua, transfieren en el proceso de rompimiento una cantidad de movimiento que da origen a los esfuerzos cortantes radiales, que a su vez generan corrientes paralelas a la playa. Estas consideraciones son las que se han aplicado para calcular el caudal sólido a lo largo de la playa.

Son diversas las teorías propuestas para este tipo de corrientes inducidas, el análisis propuesto por Longuet- Higgins (1964) emplea el concepto de tensor de radiación para describir el flujo de momentum asociado con el oleaje como agente impulsor de las corrientes longitudinales y ha sido el punto de partida para estudios posteriores como Galvin (1967) y Komar (1976). La diferencia entre las aproximaciones desarrolladas es la formulación del coeficiente de arrastre de la corriente y el modelado del coeficiente de mezcla horizontal a través de la zona de surf.

La ecuación para corrientes longitudinales desarrollada por Longuet- Higgins se expresa como:

$$\rho g(d + S) \frac{\partial S}{\partial y} - \left( \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + (\tau_s - \tau_o) + \frac{\partial [(d+S)\tau_{xy}]}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 2-6}$$

donde:

$$\tau_o = \frac{\rho f}{4\pi} u_{om\acute{a}x} V_y, \text{ esfuerzo cortante en el fondo.}$$

$f$  = coeficiente de fricción de Darcy – Weisbach.

$u_{om\acute{a}x}$  = velocidad máxima orbital en el fondo.

$V_y$  = velocidad media en la vertical de la corriente longitudinal y función de  $x$

$\tau_s$  = esfuerzo cortante en la superficie producido por el viento.

$\tau_{xy}$  = esfuerzo cortante lateral por turbulencia.

$d$  = profundidad del fondo respecto del nivel del mar en reposo

$S$  = ascenso del nivel del mar por las olas.

Asumiendo la teoría lineal, en el esquema anterior no considerando la acción del viento, se desprecia el esfuerzo cortante lateral por turbulencia y las derivadas con respecto a  $y$ , además de suponer que el movimiento de la ola en aguas poco profundas se comporta bajo la teoría lineal la ecuación obtenida por Longuet- Higgins es:

$$V_y = \frac{5gk(d + \bar{\eta})}{2f} \tan\beta^* \frac{\text{sen}\alpha}{C} \quad \text{Ec. 2-7}$$

$V_y$  = velocidad media en la vertical de la corriente longitudinal a la profundidad  $d_s \left(\frac{m}{s}\right)k$

$$[g(d + \bar{\eta})]^{1/2}/2 \approx 0.4C$$

$C$  = celeridad de grupo

$\alpha$  = ángulo de incidencia de la ola.

$\tan\beta^*$  = pendiente de la playa modificada por el ascenso del nivel del mar en la zona de rompientes

$\beta$  = ángulo del perfil de la playa con respecto a la horizontal.

$k = H_b/d_b$  es el índice de la rompiente  $\approx 0.8$

La velocidad  $V_y$  aumenta con la profundidad local  $(d + \bar{\eta})$  y el ángulo de incidencia, y disminuye con el coeficiente de fricción. La distribución transversal es triangular, con valor máximo en la línea de rompiente y cero en la línea de playa.

## 2.6 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COSTEROS

Cuando el sedimento se encuentra en suspensión, es susceptible a ser transportado a lo largo del litoral por las corrientes inducidas por el oleaje o por el viento. Esto hace que las playas sean ambientes totalmente dinámicos y sensibles a salir de su equilibrio natural.

El equilibrio natural está dado cuando el volumen total de sedimentos movido en un intervalo de tiempo no presenta pérdidas ni ganancias, al perder alguna de estas condiciones hay un desbalance generando la erosión o acreción de la playa. El balance sedimentario consiste en la aplicación del principio de continuidad o conservación de masa al sedimento litoral en un área conocida, los factores que influyen en la morfodinámica están dados por la hidrodinámica de la zona, las condiciones morfológicas, batimetría y las características del sedimento del que se compone la playa.

Los procesos básicos del transporte de sedimentos son: inicio de movimiento, transportación, y sedimentación (Figura 2-8). Estos procesos pueden ocurrir simultáneamente e interactuar entre ellos, esto depende de las características hidrodinámicas de las corrientes y de las propiedades del sedimento (Vergara, 2011).

El inicio de movimiento es generado cuando las fuerzas de arrastre que actúan sobre las partículas tienen una magnitud tal que un mínimo incremento produce el movimiento, en estas condiciones se dice que el sedimento se encuentra en condiciones críticas y una vez superadas inicia el transporte. Las fuerzas que mueven los sedimentos son la presión hidrodinámica y las fuerzas de viscosidad del flujo mientras que las que oponen resistencia al movimiento están dadas según el tamaño del grano y la distribución de granos en el fondo.

El transporte en suspensión está constituido por todas las partículas que se mantienen en suspensión y puede ser clasificada como: carga de lavado y carga de fondo en suspensión. La primera de ellas hace referencia a las partículas muy finas arrastradas por la corriente y nunca entran en contacto con el fondo, la segunda las partículas son de mayor tamaño o peso que se mantienen en suspensión debido a vórtices turbulentos, sin embargo, pueden hacer contacto con el fondo y ser transportadas por saltación o acarreadas por la corriente cerca al fondo.

La sedimentación ocurre cuando las partículas ya no son arrastradas por la corriente cercana al fondo o se deposita después de ser transportadas en suspensión.

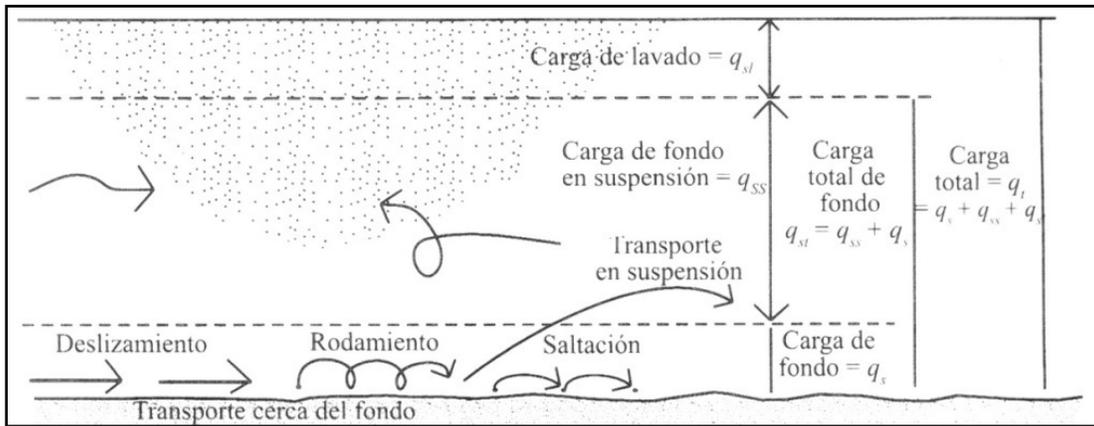


Figura 2-8 Formas de transporte de sedimentos. Fuente: Vergara, 2011

### 2.6.1 TRANSPORTE PARALELO A LA PLAYA

El movimiento del sedimento paralelo a la línea de costa se le denomina transporte longitudinal, este solamente cambia de sentido cuando varía la dirección del oleaje respecto a la perpendicular a la costa.

A lo largo del tiempo la dirección de incidencia del oleaje varía el sentido del transporte; pudiendo ir en uno u otro sentido paralelo a la costa (Figura 2-9). El manual de ingeniería costera (CEM por sus siglas en inglés), define como *transporte longitudinal bruto* a la cantidad total de material transportado en ambas direcciones, esto es a la suma en valor absoluto del material transportado en uno y otro sentido. Y se *denomina transporte longitudinal neto* a la diferencia de material transportado en uno y otro sentido. El primero (bruto) representa la cantidad total de material movido por el mar durante un determinado periodo de tiempo, independientemente de la dirección hacia donde lo haya llevado. Mientras que el segundo representa el balance del material transportado a lo largo de la costa. (CEM, 2002).

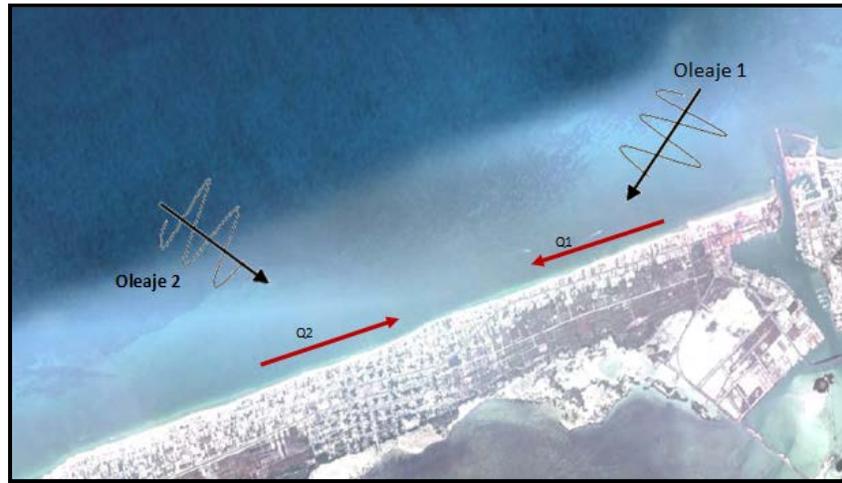


Figura 2-9 Esquema de transporte longitudinal de sedimentos en una playa.

El transporte longitudinal de sedimentos es fluctuante; si se calculase su magnitud se le da un valor positivo al transporte cuando va hacia un sentido y negativo cuando va en sentido opuesto (Figura 2-10).

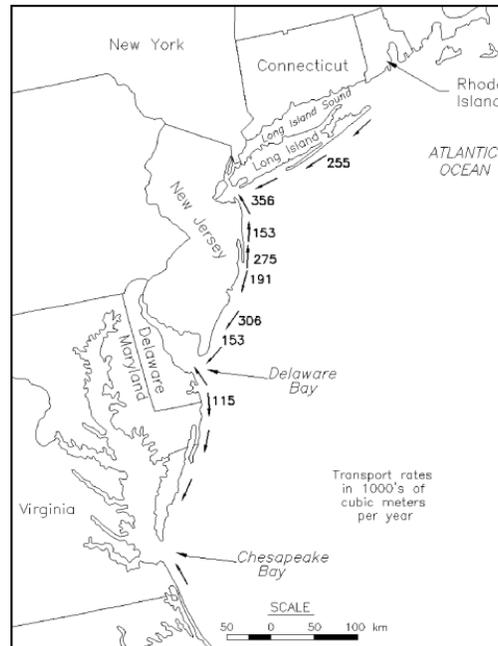


Figura 2-10 Estimación de las tasas y dirección de transporte longitudinal neto en el Este de la costa de Estados Unidos, basadas en los datos de Johnson (1956,1957) y Komar (1976). Tomado de CEM, 2002.

El transporte longitudinal neto vendrá dado por:

$$Q_{INETO} \equiv \bar{Q}_l = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} Q_l(t) dt \quad \text{Ec. 2-8}$$

Que es la media del transporte a lo largo del tiempo. Y el transporte longitudinal bruto por:

$$Q_{IGROSS} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} |Q_l(t)| dt \quad \text{Ec. 2-9}$$

Donde  $T_0$  es tamaño de la muestra, determinando el valor medio transporte o su valor bruto pero este no es el valor máximo, ya que el valor es calculado para un intervalo de tiempo (día, mes, año, etc.) pero no se ha hecho uniformemente a lo largo de ese tiempo sino que puede tener variaciones importantes.

El valor calculado, determina la tasa de transporte de sedimentos que se define como la cantidad de sedimento por unidad de tiempo que pasa por un plano vertical de ancho unitario (Figura 2-11) y que esta perpendicular al flujo (Pedrozo-Acuña,2010).

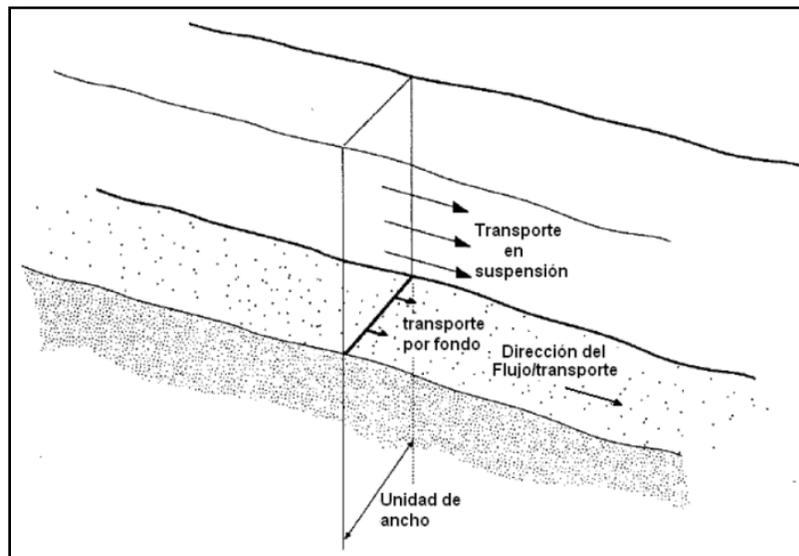


Figura 2-11 Plano normal al flujo para la definición de la tasa de transporte de sedimentos. (Modificado de Pedrozo, 2010)

## 2.6.2 TRANSPORTE TRANSVERSAL A LA PLAYA

Este hace al movimiento del sedimento a lo largo de un perfil perpendicular a la línea de playa debido al rompimiento de las olas y la corriente de resaca. Este proceso se considera responsable de la variación estacional del perfil de la playa, principalmente en régimen extraordinario de oleaje que arrastra el sedimento fuera de la costa hasta la zona exterior de la línea de rompientes para luego transportarlo hacia la playa en el régimen ordinario del oleaje y contribuir a su recuperación.

El perfil de playa (Figura 2-12), regula de manera natural la manera en que las olas rompen y disipan su energía. A medida que la altura de la ola crece la playa responde reduciendo su pendiente y por lo tanto produciendo una zona de rompiente mayor donde la energía de la ola se disipa de manera más eficiente, regulando la pendiente y formando barras sumergidas. Por lo tanto, la playa actúa como un eficaz mecanismo protector de la zona costera resguardándola de la intensa energía del oleaje. Esta capacidad que tienen las playas naturales de ajustarse hace que se constituyan en la primera y muy eficaz defensa costera.

El concepto de perfil de equilibrio fue desarrollado por Bruun (1954) y lo definió como "el perfil promedio estadístico que mantiene su forma, aparte de pequeñas fluctuaciones, incluyendo las fluctuaciones estacionales " y fue redefinido por Dean (1990), en la cual la profundidad  $h(x)$  a una distancia  $(x)$  desde la costa, se relacionan a través de un parámetro de escala  $A$  según la expresión:

$$h(x) = Ax^{2/3} \quad \text{Ec. 2-10}$$

Moore (1982) propone que el parámetro de escala  $A$  depende del tamaño de grano y playa estableció una relación entre  $A$  y tamaño  $d_{50}$  de los sedimentos. Un perfil típico de playa configuración se muestra en la siguiente figura:

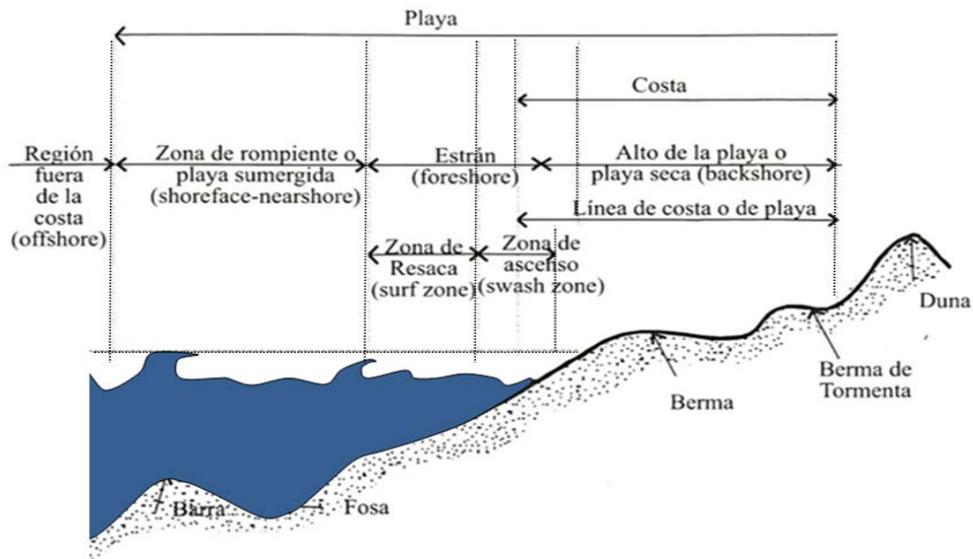


Figura 2-12 Perfil de playa. (Modificado de Vergara,2011)

Al estar un sistema costero en equilibrio, energía proveniente del viento, oleaje y marea continúan entrando al sistema, sin embargo, la morfología es capaz de disipar o reflejar toda la energía incidente de tal forma que no ocurren transporte de sedimentos neto, ni cambios morfológicos (Pedrozo-Acuña,2010). El transporte desde la línea de costa hacia el mar produce la erosión de playa y la formación de una o varias barras en las distintas posiciones de la línea de rompiente, mientras que el transporte hacia la línea de costa conducen a la acreción y a la formación de la berma. Estos dos tipos de perfiles (Figura 2-13) pueden considerarse como antagónicos y se los denomina perfil barra/berma, invierno/verano o tormenta/normal (Komar, 1998).

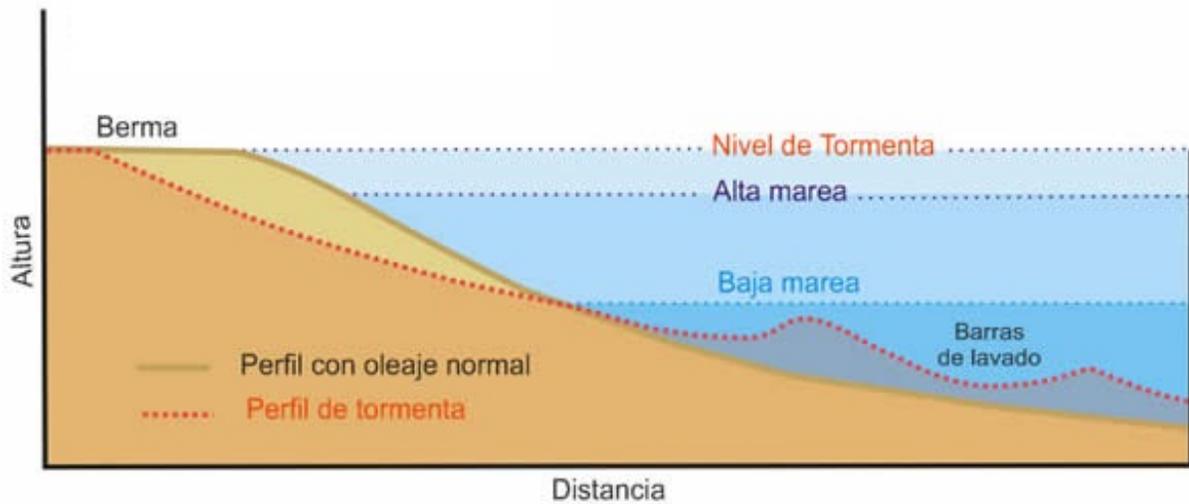


Figura 2-13 Perfiles de invierno y verano.

## 2.7 ESTUDIOS PREVIOS

Lira (2010), realizó el monitoreo de perfiles playeros en 1.8km de playa antes y después del relleno realizado por parte de SEDUMA. Observo que sólo en los primeros 300m de su zona de estudio el relleno fue satisfactorio debido a la presencia de estructuras menores que contribuyen a la retención del sedimento. Por otro lado, en los perfiles localizados al Oeste de dichas estructuras el ancho de playa conseguido por el relleno se perdió casi en su totalidad durante el mismo período de tiempo. Utilizando mediciones de oleaje durante un período de un año utilizó un modelo unidimensional para realizar un diagnóstico preliminar del efecto del muelle de Progreso.

Appendini et al. (2012) realizaron la propagación del oleaje de aguas profundas a 10 m de profundidad con los datos de reanálisis obtenidos del WAVEWATCH III (NOAA) de 1997 a 2009. Para ello, emplearon un modelo espectral de oleaje (MIKE21SW), el cual fue calibrado con mediciones de oleaje a 10m de profundidad frente a Telchac, reproduciendo de forma satisfactoria las series de tiempo de Hs, Tp y dirección de oleaje. Adicionalmente, utilizaron un modelo de transporte de sedimento para estimar el transporte potencial de sedimento a lo largo del todo el litoral Yucateco. El análisis de los gradientes de transporte a escala regional permitió la identificación de zonas propensas a erosión/depositación a lo largo del litoral. Sorprendentemente, para la zona de Chelem-Chuburná el análisis sugiere que la zona es estable. Sin embargo, la presencia de estructuras costeras no fue considerada en el análisis presentado en este trabajo.

Por lo anterior, es evidente la necesidad de llevar a cabo un estudio detallado que contribuya a diagnosticar las causas de la erosión en zonas específicas del litoral Yucateco como es el caso de Chelem. Para ello, es necesario cuantificar los efectos de las diferentes estructuras costeras en el transporte de sedimentos y de esta forma generar la información necesaria para desarrollar propuestas de mitigación.



# Capítulo 3

## Descripción de los modelos numéricos

# Capítulo 3

## 3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

---

Este capítulo presenta una descripción general de los modelos de oleaje, hidrodinámica, y transporte de sedimento utilizados en este trabajo. Específicamente, se describen las bases teóricas de los modelos LITDRIFT y el modelo acoplado MIKE 21/3 FM, al igual que las condiciones de contorno requeridas para la implementación de dichos modelos en la zona de estudio. Esta información fue extraída de los manuales del usuario desarrollados por DHI – Water & Environment (DHI, 2011).

### 3.1 MODELO UNIDIRECCIONAL - LITDRIFT

El modelo LITDRIFT calcula la distribución del transporte de sedimentos no cohesivos a lo largo de un perfil transversal, que se considera representativo de un sector de la playa en estudio, asumiendo que tiene condiciones uniformes a lo largo de la playa. Al integrar estas contribuciones se obtiene la tasa de transporte longitudinal del sedimento total y neto a lo largo del perfil de playa.

#### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

LITDRIFT se compone principalmente de dos módulos de cálculo:

- Cálculo de la corriente litoral
- Cálculo de transporte de sedimentos

El primer módulo de cálculo corresponde al modelo hidrodinámico, el cual incluye la descripción de la transformación del oleaje (asomeramiento, refracción, disipación por fondo, y rotura del oleaje) y el cálculo de las corrientes longitudinales asociadas a este.

La distribución transversal de la corriente longitudinal, altura de ola, y sobre elevación en un perfil arbitrario se encuentra mediante la resolución de las ecuaciones de balance de momento. El transporte de sedimento es calculado por el STP, por su nombre en inglés *Sediment Transport Program* de DHI, basado en

oleaje local, corrientes, y características del sedimento tales como tamaño de grano, velocidad de caída y dispersión geométrica.

La simulación del transporte está dada por las corrientes litorales inducidas por el oleaje, que pueden ser generadas por gradientes en los esfuerzos del tensor de radiación en la zona de rompiente. LITDRIFT calcula los esfuerzos del tensor de radiación, las corrientes longitudinales generadas por el oleaje, y la tasa de transporte de sedimentos longitudinal (ver Figura 3-1).

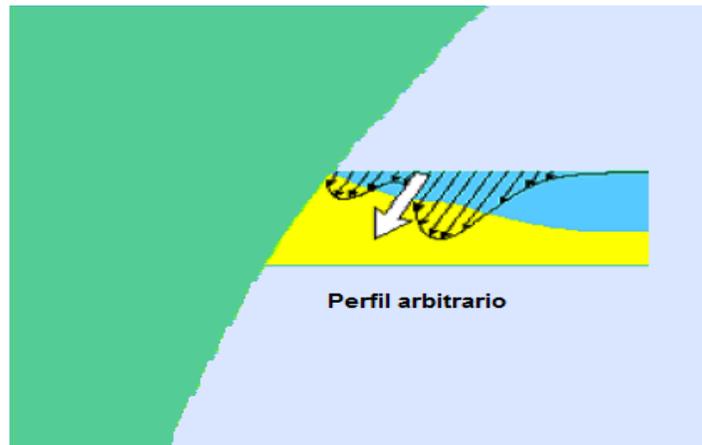


Figura 3-1 El Esquema representa el proceso litoral modelado con LITDRIFT. (Modificado DHI, 2011)

El modelo ofrece los cuatro modelos de solución siguientes:

- ✚ Corrientes litorales (a lo largo de la costa): Calcula las condiciones de oleaje en un perfil transversal a la costa, así como la distribución de las corrientes litorales generadas por la rotura del oleaje
- ✚ Tasas de transporte litoral: Calcula la distribución del transporte de sedimentos a lo largo de un perfil transversal a la costa a partir de los resultados del primer modelo.
- ✚ Transporte litoral anual: Se calcula a partir de una serie temporal de entrada. La distribución a lo largo de un perfil transversal a la costa del transporte litoral total, está dada por el transporte neto y el transporte total.

- ✚ Transferencia del clima del oleaje basado en una serie de tiempo, calcula las condiciones en un punto dado del perfil, a partir de las condiciones de oleaje en un punto con mayor profundidad suponiendo batimetría recta y paralela.

El modelo incluye la refracción, disipación del oleaje por fondo, rotura del oleaje, generación por viento, y la interacción oleaje – corriente.

Los datos de entrada requeridos por el modelo son:

- Clima de oleaje
- Perfil(s) transversal(es) de la playa con la caracterización de los sedimentos en el mismo.

Como resultado del modelo se obtiene el transporte litoral anual y una serie de tiempo que permite obtener rosas de transporte litoral en función de las características del oleaje.

### 3.1.2 ECUACIONES BÁSICAS

- **Cálculo de la corriente litoral**

Es incluida una descripción para oleaje regular e irregular, la influencia de la corriente, el esfuerzo cortante del viento y la fricción de fondo no uniforme, así como la refracción, someramiento y la rompiente del oleaje.

Las ecuaciones básicas que involucra son las siguientes.

- ✓ **Refracción.**

El ángulo entre el frente de ola y la línea de costa,  $\alpha$ , está dado por la ley de Snell:

$$\text{Sen}\alpha = \frac{\text{Sen}(\alpha^*)L}{L^*}$$

Ec. 3-1

donde:

$L$  = Es la longitud de onda

$L^*$  = indica el punto de referencia sobre el perfil

La longitud de onda  $L$  se calcula explícitamente en cada punto. La ecuación que se utiliza para calcular la longitud de onda es función del factor  $K_L$ , dado por:

$$K_L = \frac{\omega^2 D}{g} \quad \text{Ec. 3-2}$$

donde:

$\omega$  = frecuencia angular de la ola

$D$  = profundidad

$G$  = aceleración de la gravedad

Si  $K_L > 1,0$  se utiliza la siguiente expresión:

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad \text{Ec. 3-3}$$

$$L = L_0 \left( \tanh \left( \frac{2\pi D}{L_0} \right)^{0.75} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Ec. 3-4}$$

donde:

$T$  = período de ola

$L_0$  = Longitud de onda en aguas profundas

Si  $K_L \leq 1,0$  se utiliza:

$$L = \frac{2\pi D}{\sqrt{K_L \left( 1 + \frac{K_L}{6} \left( 1 + \frac{K_L}{5} \right) \right)}}$$

Ec. 3-5

Donde  $K_L$  de definió como:

Ec. 3-2

$$K_L = \frac{4\pi^2 D^3}{g T^2}$$

✓ Asomeramiento.

La altura de ola se determina con la ecuación de la conservación del flujo de la energía:

$$H^2 c (1 + G) \cos \alpha \approx \text{constante} \quad \text{Ec. 3-6}$$

$$G = \frac{2kD}{\text{Senh}(2kD)} \quad \text{Ec. 3-7}$$

Donde  $c$  es la celeridad de la onda ( $c = L/T$ )

✓ Rompiente.

Para determinar la altura del oleaje en rotura se utiliza la siguiente relación:

$$Y = \frac{H}{D}, \quad Y_B = 0.8 \quad \text{Ec. 3-8}$$

- **Cálculo de transporte de sedimentos**

Para realizar este cálculo son necesarios los siguientes parámetros:

Profundidad

- ✓ Altura de ola, H
- ✓ Período de ola, T
- ✓ Velocidad de la corriente
- ✓ Rompiente / no rompiente del oleaje
- ✓ Gradiente del fondo

En cuanto al sedimento se requiere:

- ✓ Diámetro medio del sedimento y su dispersión.
- ✓ Velocidad media de caída.
- ✓ Temperatura del agua.
- ✓ Número de fracciones de los tamaños del material

***Algoritmo del transporte anual.***

El transporte anual se calcula con el aporte de cada dirección del oleaje incidente durante un año. El clima de oleaje puede representarse como una serie de tiempo en la que se describen las características de cada dirección incidente y de la batimetría. La duración de cada oleaje incidente se da como una fracción del año.

$$Q_{\text{anual}} = \sum_{i=1}^{\text{NSETS}} Q_s(i) \cdot \text{Duración}(i) \quad \text{Ec. 3-9}$$

Donde NSETS es el número total de direcciones del oleaje incidente.

### 3.1.3 FRICCIÓN DE FONDO

De acuerdo al manual de MIKE 21 la relación entre el número de Manning y la rugosidad equivalente de Nikuradse,  $K_s$  puede ser estimada usando:

$$M = \frac{25.4}{K_s^{\frac{1}{6}}} \quad \text{Ec. 3-10}$$

Utilizando una de las varias relaciones recomendadas en Soulsby (1997), sobre los lechos de fondo plano,  $k_s$  está relacionado con el diámetro de grano medio ( $D_{50}$ ) como aproximadamente:

$$K_s = 2.5D_{50} \quad \text{Ec. 3-11}$$

#### 3.1.4 TAMAÑO DEL GRANO

Se deben de especificar las características que describe las condiciones locales del perfil. Lo anterior es especificado en el archivo de datos que contiene la batimetría del perfil transversal de la costa. El parámetro más importante es el diámetro medio de grano  $D_{50}$  (mm).

#### 3.1.5 VELOCIDAD DE CAÍDA

De acuerdo a la formulación de Van Rijn(1984), la velocidad de caída se expresa de acuerdo a la expresión:

$$W_s = \frac{vD^3}{18d} \quad \text{Ec. 3-12}$$

Donde  $D$  es igual a: 
$$\left[ \frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} * d \quad \text{Ec. 3-13}$$

Donde:

$v$ = viscosidad cinemática

$d$ =diámetro característico  $D_{50}$

$s$ = Densidad relativa

#### 3.1.6 DISPERSIÓN GEOMÉTRICA DEL SEDIMENTO

Para la distribución de la granulometría el manual del MIKE21, sugiere la expresión:

$$\left( \frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{0.5} \quad \text{Ec. 3-14}$$

Donde  $d_{16}$  y  $d_{84}$  son los tamaños de partícula para el cual el 16% y el 84% del sedimento en peso es más fino.

### 3.2 MODELO ACOPLADO MIKE21/3 FM

En los últimos años se ha evolucionado en el desarrollo de la modelación numérica e intensificado su aplicación para el estudio de procesos costeros. Esto ha permitido estudiar la evolución del litoral y hacer predicciones de su comportamiento. Los modelos numéricos han avanzado en respuesta a las limitaciones que presentan los modelos físicos y empíricos debido a las escalas espaciales y el nivel de detalle requerido.

La simulación numérica requiere comprender los factores físicos que intervienen en los complejos procesos morfodinámicos y depende de la calidad de la información empleada para convertirse en una herramienta capaz de evaluar diversos aspectos como la evolución del litoral, los efectos de las estructuras costeras, y la presencia de puertos entre otros.

#### 3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MIKE21/3 FM

El modelo acoplado MIKE21/3FM, diseñado por DHI – Water & Environment, es un sistema dinámico que puede ser aplicado en costas, estuarios y ríos.

El modelo está compuesto por los módulos siguientes:

- Hidrodinámico (HD).
- Transporte de sedimentos cohesivos y no-cohesivos (MT y ST).
- Módulo de propagación de oleaje (SW).
- Calidad de aguas y componente biológico (EcoLab).

El módulo hidrodinámico y el módulo de oleaje son los componentes básicos del modelo acoplado MIKE 21/3 FM. Este modelo permite simular la interacción mutua entre las olas y corrientes usando un acoplamiento dinámico entre ellos. También incorpora un acoplamiento entre el módulo de transporte de sedimentos y la hidrodinámica. El modelo tiene la opción de incluir una realimentación completa de los cambios de nivel en el lecho debidos al oleaje y corrientes.

En los apartados siguientes se describen las características principales de los módulos empleados en el presente trabajo (HD, SW, y ST) para el estudio de la dinámica marina (hidrodinámica y transporte de sedimentos) en Chelem, Yucatán.

### 3.2.2 MÓDULO DE PROPAGACIÓN DE OLAJE SW

El objetivo de emplear el módulo de oleaje espectral SW es obtener los parámetros de oleaje en la zona de estudio y las componentes del tensor de radiación, los cuales son necesarios para la simulación de la hidrodinámica y de transporte de sedimentos en playas.

El modelo SW es un modelo espectral de oleaje generado por viento de tercera generación basado en mallas no estructuradas. El modelo simula el crecimiento, decaimiento, y transformación del oleaje, generado por el viento y mar de fondo, en zonas costeras y en aguas profundas. El modelo incluye aumento de oleaje por la acción del viento, interacción no lineal ola-ola, interacción ola-corriente, disipación por descrestamiento, disipación por fricción del fondo, disipación por rotura de las olas y refracción por variaciones de profundidad. Así como también puede reproducir los principales fenómenos físicos asociados con la propagación del oleaje como asomeramiento, refracción y difracción.

#### 3.2.2.1 Ecuaciones de gobierno

El MIKE 21 SW está formulado en términos de dirección de oleaje ( $\theta$ ) y la frecuencia angular relativa ( $\sigma$ ), donde la densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  está relacionada a la densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$  del espectro por:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad \text{Ec. 3-15}$$

La dirección de propagación del oleaje  $\alpha$  se obtiene a partir de la irrotacionalidad del vector número de onda

$$\vec{\nabla} \times \vec{K} = 0 \quad \text{Ec. 3-16}$$

Con las correspondientes relaciones derivadas de la teoría lineal del oleaje:

$$\omega = \sigma + \vec{V} \times \vec{U} \quad \text{Ec. 3-17}$$

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad \text{Ec. 3-18}$$

$$|\vec{K}|^2 = k^2 + \frac{V \cdot (cc_g \nabla H)}{cc_g H} \quad \text{Ec. 3-19}$$

Donde  $\vec{K}$  es el vector número de onda,  $\omega$  es la frecuencia absoluta,  $\sigma$  es la frecuencia intrínseca,  $\vec{U}$  es el vector corriente,  $k$  es un factor de separación,  $h$  es la profundidad,  $c = \sigma/k$  es la celeridad de fase,  $C_g = \partial\sigma/\partial k$  es la celeridad de grupo y  $H$  es la altura del oleaje.

Para aplicaciones a gran escala, la ecuación de balance de acción de oleaje se formula en coordenadas esféricas, donde la evolución del espectro de oleaje en una posición está dado por la latitud  $\phi$ , y la longitud  $\lambda$ , en un instante  $t$ , de la siguiente manera:

$$\frac{\delta N}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta \phi} c_\phi N + \frac{\delta}{\delta \lambda} c_\lambda N + \frac{\delta}{\delta \sigma} c_\sigma N + \frac{\delta}{\delta \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad \text{Ec. 3-20}$$

La fuente de energía  $S$ , representa una sobre-posición de distintas funciones fuentes que describen los múltiples fenómenos físicos, y está dada por:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad \text{Ec. 3-21}$$

Donde  $S_{in}$  representa la energía del viento,  $S_{nl}$  representa las interacciones no lineales ola-ola,  $S_{ds}$  es la disipación de energía debido al descrestamiento,  $S_{bot}$  es la disipación de energía por fricción de fondo descrita en Johnson & Kofoed-Hansen (2000); y  $S_{surf}$  es la disipación de energía por rotura del oleaje, descrita por Battjes and Janssen (1978) y Eldeberky and Battjes (1996).

La discretización de las ecuaciones de gobierno se realiza utilizando el método de volúmenes finitos centrado en la celda utilizando una malla no estructurada para el dominio geográfico. La integración en tiempo se basa en una aproximación de paso fraccional aplicando un método de multi-secuencia explícito para la propagación de acción de oleaje.

### 3.2.2.2 Rotura del oleaje

La formulación utilizada en el módulo de onda espectral se basa en la formulación de Battjes y Janssen (1978). Este modelo ha sido utilizado con éxito en los modelos espectrales, así como en las versiones con parámetros.

Si la rotura del oleaje está incluida se debe especificar el parámetro Gamma utilizado en la formulación de rotura. El parámetro Gamma se pueden especificar en tres formas:

- Especificado Gamma
- Forma funcional (Ruessink et. al. 2003)
- Forma funcional (Nelson (1987, 1994))

### 3.2.2.3 Fricción de fondo

La fricción con el fondo se puede especificar en cinco formas diferentes:

- Sin fricción con el fondo
- Coeficiente de fricción,  $CFW$ 
  - Valor por defecto es 0,0077 m/s
  - Coeficiente de disipación no depende de las ondas hidrodinámicas / condiciones del sedimento.
- Factor de fricción,  $f_w$ 
  - Valor por defecto es 0,0212
  - El coeficiente de disipación no depende de las ondas hidrodinámicas / condiciones del sedimento.
- Rugosidad Nikuradse,  $k_N$ 
  - El valor predeterminado es de 0.04 m, este valor se utiliza a menudo para aplicaciones marinas utilizando la formulación totalmente espectral, pero es generalmente demasiado alta aplicaciones de cercanías a la costa.
  - El coeficiente de disipación depende de las condiciones hidrodinámicas.
- Tamaño de grano de arena,  $D_{50}$ .

- Valor por defecto es 0,00025 m (tamaño medio de grano del sedimento).
- El coeficiente de disipación depende de las condiciones hidrodinámicas y del sedimento.

#### 3.2.2.4 Estructuras

La dimensión horizontal de estructuras tales como muelles o turbinas eólicas en el mar son generalmente mucho menores que la resolución que se utiliza en la malla computacional. Por lo tanto, la presencia de estas estructuras debe ser modelada con una técnica de escala inferior a la malla. Dos métodos se han desarrollado para tener en cuenta el efecto de estructuras de puntos:

- Fuente enfoque a largo plazo.
- Enfoque de flujo conectivo.

El enfoque término fuente tiene los efectos de las estructuras en cuenta mediante la introducción de un término decaimiento para reducir la energía de las olas detrás de la estructura. Esta formulación es sólo precisa cuando el decaimiento de energía es limitada y la reflexión de la energía de las olas no se tiene en cuenta. Por otro lado, el enfoque de flujo convectivo se basa en una corrección del término flujo convectivo en el espacio geográfico.

Dependiendo de la elección se puede especificar la información detallada de las estructuras o ver un punto de vista geográfico.

#### 3.2.2.5 Condiciones iniciales

Se puede elegir entre los siguientes tres tipos diferentes de condiciones iniciales:

- Cero espectros
  - La acción de las olas se pone a cero en todos los puntos de nodo
- Espectros de formulaciones empíricas
  - Tres tipos diferentes de formulación están disponibles:
    - JONSWAP, SPM 1973 (en aguas profundas) y GDS 1973 (aguas poco profundas)

La descripción de las formulaciones empíricas se pueden encontrar en Komen et al. (1994).

La discretización de las ecuaciones de gobierno se realiza utilizando el método de volúmenes finitos centrado en la celda, tanto para el espacio geográfico como espectral, utilizando una malla no estructurada para el dominio geográfico. La integración en tiempo se basa en una aproximación de paso fraccional aplicando un método de multiseuencia explícito para la propagación de acción de oleaje.

### 3.2.2.6 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera en el módulo *SW*, pueden ser especificadas dentro de las siguientes nueve opciones:

- ✓ Contorno cerrado
- ✓ Parámetros de ola (versión 1 y 2)
- ✓ Parámetros de mar de viento y oleaje (versión 1 y 2)
- ✓ Espectro del Oleaje
- ✓ Espectro de energía
- ✓ Frontera lateral
- ✓ Frontera reflectante
- ✓ Frontera cerrada

La frontera cerrada hace referencia al contorno de tierra, es decir, no hay olas que entren al dominio del modelo a través de esta frontera y las olas de salida son absorbidas por completo. Este tipo de límite se utiliza si no hay datos de oleaje disponibles.

Los Parámetros de ola (versión 1 y 2) se emplean para hacer la representación paramétrica de la distribución espectral. Deben ser especificados los siguientes parámetros en la frontera:

- Altura de ola significativa,  $H_{m0}$  [m]
- Periodo de pico espectral,  $T_p$  [s]
- Media de dirección de las olas, el MWD [grados]
- Índice de dispersión direccional,  $n$  (Versión 1) o
- La desviación direccional estándar,  $DSD$  (Versión 2) [grados]

### 3.2.3 MÓDULO HIDRODINÁMICO HD

El módulo hidrodinámico (HD), es usado para simular la variación de los niveles de agua y flujos sujetos a una variedad de forzamientos y condiciones de frontera en el área costera.

El modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes con promedio de Reynolds en dos dimensiones, considerando la hipótesis de incompresibilidad e implicando suposiciones de flujo de Boussinesq y presión hidrostática.

#### 3.2.3.1 La ecuación local de continuidad

La ecuación de continuidad dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad \text{Ec. 3-22}$$

Y las dos ecuaciones horizontales de momentum para la componente  $x$  y  $y$ , respectivamente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_x S \quad \text{Ec. 3-23}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_x S \quad \text{Ec. 3-24}$$

Donde  $t$  es el tiempo;  $x$ ,  $y$  y  $z$  son las coordenadas cartesianas;  $\eta$  es la elevación de la superficie;  $h = \eta + d$  es la profundidad total;  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las componentes de velocidad en la dirección  $x$ ,  $y$  y  $z$ ;  $f = 2\Omega \sin \varphi$  es el parámetro de Coriolis; ( $\Omega$  es la tasa de revolución angular y  $\varphi$  la latitud geográfica);  $g$  es la aceleración por la gravedad;  $\rho_0$  es la densidad de referencia del agua  $S$  es la magnitud de la descarga;  $s_{xx}$ ,  $s_{yx}$  y  $s_{yy}$  son las componentes del tensor radiación;  $v_t$  es la viscosidad turbulenta vertical;  $\rho_a$  es la presión atmosférica;  $\rho_0$  de referencia y ( $u_s$ ,  $v_s$ ) son las velocidades de descarga de las fuentes de agua.

### 3.2.3.2 Solución técnica

La discretización espacial, el tiempo de integración y las condiciones de frontera son tres aspectos que determinan el tiempo de simulación y la precisión de los resultados. La discretización está dada por la subdivisión del dominio en celdas o elementos (tipo triangular y rectangular en este caso) y la especificación del nivel de los esquemas numéricos que se emplearan en los cálculos.

Para controlar la técnica de solución de las ecuaciones el modelo ofrece al usuario dos opciones: una de primer orden y otra de mayor orden, siendo la primera de menor precisión pero computacionalmente más eficiente. Por tanto para la configuración del modelo se empleo la discretización del dominio de orden mayor con una tiempo de integración de primer orden con un valor mínimo de 0.01 segundos y máximo de 1 hora, siendo que el valor real del paso de tiempo empleado en los cálculos se basa en la condición de CFL (DHI, 2009).

### 3.2.3.3 Inundaciones y secado de áreas

Pueden ser incluidas o no la opción de inundación y secado. De habilitarse esta opción, se deben especificar una profundidad de agua de secado, la profundidad de agua de las inundaciones, y una profundidad de humectación.

Cuando la profundidad del agua es menor que la profundidad de humectación se reformula el problema y sólo si la profundidad del agua es menor que la profundidad de secado se elimina el elemento/ celda de la simulación. La profundidad de las inundaciones se utiliza para determinar cuando un elemento está inundado. La reformulación se realiza mediante el establecimiento de los flujos de momento a cero y sólo tomando los flujos de comunicación en consideración (DHI,2009).

La profundidad ( $P$ ) definida como mojada debe ser mayor que la inundada y la seca, y debe satisfacer la siguiente relación:

$$P_{seca} < P_{inundada} < P_{mojada}$$

### 3.2.3.4 Densidad

La densidad está en función de la salinidad y de temperatura. Si selecciona el modo barotrópico, la temperatura y la salinidad (TS) será constante y la densidad no se actualizará durante la simulación. Cuando la densidad se considera

que es una función de la temperatura y / o salinidad (modo baroclínica), la ecuación de transporte para la temperatura y / o salinidad debe ser resuelto. La solución de estas ecuaciones se activa automáticamente y la densidad se actualiza desde los campos de TS.

### 3.2.3.5 Viscosidad turbulenta

La viscosidad turbulenta le permite a la ecuación de momentum tener en cuenta el esfuerzo laminar y esfuerzo de Reynolds (turbulencia). Estas pueden ser especificadas de tres maneras en el MIKE 21/3-FM: (1) no tener en cuenta la viscosidad turbulenta, (2) escoger una viscosidad turbulenta constante ( $m^2/s$ ), o (3) usar la formulación de Smagorinsky (1963), citado en DHI (2009d), quien propuso expresar el transporte de flujo de masa a diferentes escalas (sub\_áreas de la malla de cálculo), relacionando la viscosidad turbulenta horizontal a una longitud característica. Esto es dividir el área total de cálculo y asignarle un valor de turbulencia a cada sub-área, como se puede observar en la siguiente expresión:

$$A = C_s^2 l^2 \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad \text{Ec. 3-25}$$

donde,  $C_s$  es el coeficiente de Smagorinsky,  $l$  es una longitud característica y la tasa de deformación está dada por:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad \text{Ec. 3-26}$$

El coeficiente de Smagorinsky puede ser constante o variante en el espacio, y se puede variar en el rango de 0.1 a 0.28 DHI (2009d). Se debe tener en cuenta que al usar la formulación de Smagorinsky se incrementa el tiempo de cómputo (DHI 2009c; DHI 2009d). Empleando la formulación de Smagorinsky se debe indicar un mínimo y un máximo valor para viscosidad turbulenta. Las unidades están en  $[m^2/s]$ .

### 3.2.3.6 Fricción de fondo

La resistencia de fondo es calculada usando el esfuerzo de fondo, y puede ser definida por el número de Chezy o por el número de Manning.

El esfuerzo de fondo  $\bar{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$  está determinado por la Ley de Fricción Cuadrática:

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_o} = c_f \bar{u}_b |\bar{u}_b|$$

Ec. 3-27

donde,

$c_f$  = coeficiente de arrastre

$\bar{u}_b = (u_b, v_b)$  = velocidad de flujo sobre el fondo

$\rho_o$  = densidad del agua.

La velocidad de fricción asociada con el esfuerzo cortante en el fondo está dada por:

$$U_{tb} = \sqrt{c_f |\mathbf{u}_b|^2}$$

Ec. 3-28

Para cálculos en dos dimensiones  $\bar{u}_b$  es la velocidad de flujo promediada en la vertical y el coeficiente de arrastre está determinado por el número de Chezy,  $C$  o de Manning,  $M$  :

$$C_f = \frac{g}{C^2} \quad C_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2}$$

Ec. 3-29

donde,  $h$  es la profundidad de la columna de agua y  $g$  es la aceleración gravitacional. Las unidades de los números de Chezy y Manning son  $m^{1/2}/s$  y  $m^{1/3}/s$ , respectivamente.

La relación entre el número de Manning y la rugosidad de fondo  $k_s$ , puede ser estimada usando la siguiente expresión:

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}}$$

Ec. 3-30

La resistencia de fondo puede ser expresada en tres formas diferentes:

- Sin resistencia de fondo.
- Número de Chezy ( $m^{1/2}/s$ ).
- Número de Manning ( $m^{1/3}/s$ ).

El número de Chezy,  $C$  ( $m^{1/2}/s$ ), y el número de Manning,  $M$  ( $m^{1/3}/s$ ), pueden ser expresados en dos maneras:

- Constante en el dominio.
- Variable en el dominio.

Se debe indicar el número de Manning si la variación relativa de la profundidad del agua es considerable. Normalmente se usan valores en el rango de 20-40  $m^{1/3}/s$ , pero de no tenerse ninguna información se sugiere 32  $m^{1/3}/s$  (DHI 2009d). Sin embargo, un número de Manning de 105.26  $m^{1/3}/s$  ha mostrado muy buenos resultados en simulaciones en 2D. Si se usa el número de Chezy, valores en el rango de 30-50  $m^{1/2}/s$  son comunes para aplicaciones costeras y marinas (DHI 2009c).

### 3.2.3.7 Condiciones de viento.

En este modelo es posible incorporar el efecto del viento en el campo de flujo. La información sobre la influencia de viento en el área de estudio puede ser expresada en las siguientes formas:

- **Constante:** El viento está soplando desde la misma dirección y con la misma magnitud para todo el período de simulación y sobre toda el área modelada.
- **Variante en el tiempo y constante en el espacio:** La magnitud y dirección del viento varían durante el período de simulación, pero en la misma proporción sobre toda el área modelada.
- **Variante en el tiempo y en el espacio:** La magnitud y dirección del viento varían durante el período de simulación y en toda el área modelada.

Las direcciones son dadas en grados y medidas desde norte hacia donde el viento está soplando (en sentido horario).

### 3.2.3.8 Fuentes y sumideros.

La magnitud de descarga y velocidad para cada fuente ó sumidero en caso exista, se debe indicar, bien sea constante o variable en el tiempo.

### 3.2.3.9 Fuerza de coriolis.

Existen tres opciones en el MIKE 21/3 FM para el cálculo de la fuerza de coriolis, las cuáles son: sin fuerza de coriolis, constante en el dominio y variante en el dominio.

Al tenerse en cuenta la fuerza de coriolis constante en el dominio, se debe indicar una latitud de referencia (en grados) y al elegir una fuerza de coriolis variante en el dominio se debe dar su correspondiente información geográfica.

### 3.2.3.10 Tensores de radiación

Los componentes del tensor de radiación se pueden incluir en la lectura de los valores de un archivo de datos o directamente a partir de una simulación acoplada como lo emplea el MIKE21/3 FM.

De ser necesario incluirlas mediante un archivo de datos, deben ser especificadas las tres componentes de la tensión  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{xy}$  ( $m^3/s^2$ ), el cual puede ser generado por los modelo de olas MIKE 21 SW, MIKE 21 NSW o PMS MIKE 21.

### 3.2.3.11 Estructuras

La dimensión horizontal de las estructuras es generalmente mucho menor que el tamaño del elemento utilizados en la malla del dominio. Por lo tanto, el efecto de las estructuras en la propagación del oleaje y la hidrodinámica se modela mediante una técnica inferior a la malla (el flujo que rodea una estructura se modela considerando el nivel del agua aguas arriba y aguas abajo).

Cinco diferentes tipos de estructuras se pueden incluir en las simulaciones:

- ✓ Vertederos
- ✓ Alcantarillas
- ✓ Compuertas
- ✓ Puertos
- ✓ Muelles
- ✓ Turbinas

Además se tiene la opción de incluir las estructuras compuestas por la combinación de dos o más estructuras definidas.

### 3.2.3.12 Condiciones iniciales

El modelo tiene unas condiciones iniciales que deben ser especificadas como sigue:

- Elevación de la superficie del agua
- Dirección y velocidad del movimiento del agua en el dominio.

El MIKE 21/3 FM permite que el usuario especifique estas variables como: elevaciones de la superficie variante en el espacio con velocidades nulas ó profundidades totales del agua ( $h$ ) variantes en el espacio y con velocidades no nulas. Para este último caso, la entrada puede ser el resultado de una simulación previa. Se debe elegir una variación de la superficie como parámetro inicial muy cercana a las condiciones de frontera al comienzo de la simulación, lo cual evitará conflictos en la generación del oleaje (DHI 2009 d).

### 3.2.3.13 Condiciones de frontera

El modelo hidrodinámico del MIKE 21/3 acoplado FM contempla seis posibles condiciones de frontera. Dos de ellas hacen referencia cuando la condición de contorno es tierra. En la primera, "Land (normal velocity)", una de las componentes de la velocidad es normal y la otra es tangencial a la frontera; y en la segunda "Land (zeroveLOCITY)" las componentes de la velocidad normal y tangencial a la frontera tierra son ceros. Las condiciones restantes permiten especificar velocidades, flujos, niveles de agua, o descargas a lo largo de la frontera.

Cuando al contorno se le asignan componentes de la velocidad o flujo (flujo obtenido con la velocidad promediada en la vertical), es necesario especificar si son constantes (en el tiempo a lo largo de la frontera), variables en el tiempo, o constantes a lo largo de la frontera o variable en el tiempo y a lo largo de la frontera (Figura 3-2). La descarga será siempre una contribución a lo largo de la frontera.

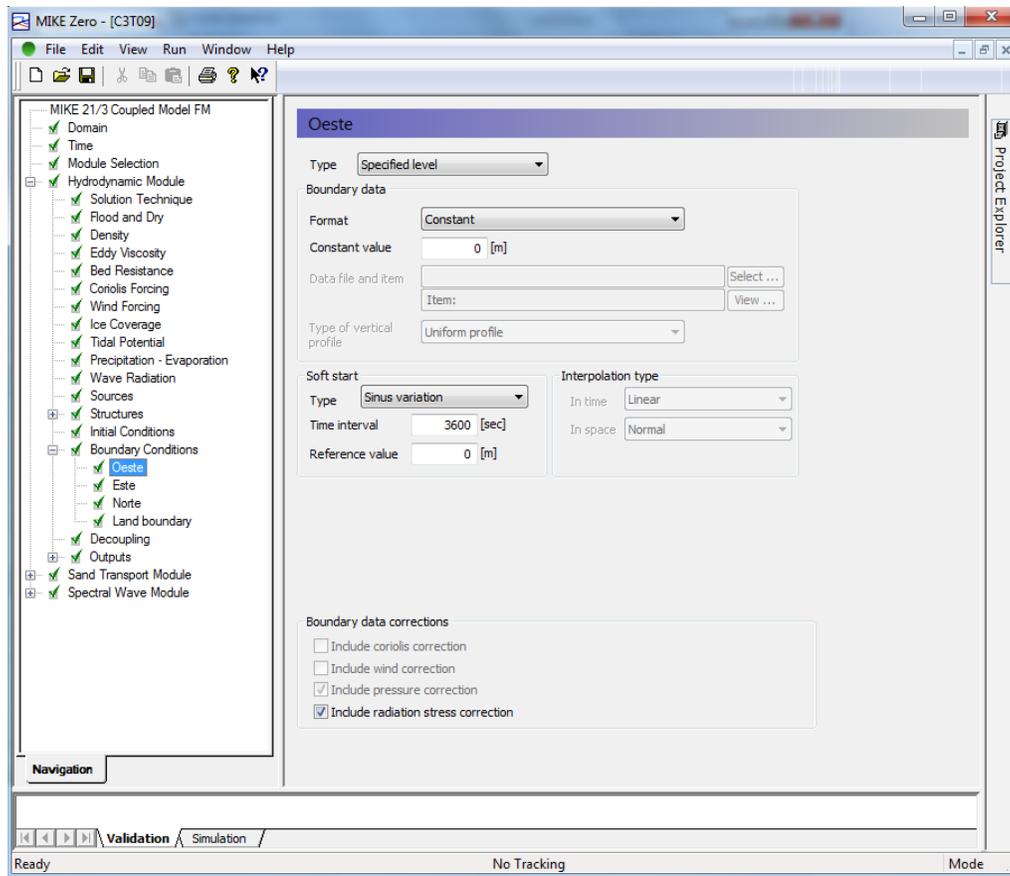


Figura 3-2 Interfaz gráfica para la configuración de las fronteras

### 3.2.4 MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS ST

El módulo de transporte de sedimentos ST (Non-Cohesive Sediment Transport) permite estimar la tasa de transporte y la tasa inicial del cambio de nivel del lecho en áreas costeras sujetas al efecto combinado del oleaje y las corrientes.

#### 3.2.4.1 Ecuaciones de gobierno

El código numérico implementa para el cálculo del transporte de sedimentos está basado en las formulaciones de Meyer-Peter & Mueller, (1948), Engelund & Hansen (1967), Zyserman & Fredsøe (1978). Esta última ha sido ampliamente empleada en la estimación de las tasas volumétricas de transporte por unidad de anchura unitaria ( $m^2/s$ ) para el transporte por fondo ( $q_b$ ), el transporte en suspensión ( $q_s$ ), y el transporte total ( $q_t$ ):

$$q_t = q_b + q_s \quad \text{Ec. 3-31}$$

En el que  $q_b$  y  $q_s$  se expresan como:

$$q_b = 0.005Uh \left[ \frac{U-U_{cr}}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \right]^{2.4} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2} \quad \text{Ec. 3-32}$$

$$q_s = 0.012Uh \left[ \frac{U-U_{cr}}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \right]^{2.4} \left( \frac{d_{50}}{h} \right) \left( \frac{1}{D_*} \right)^{0.6} \quad \text{Ec. 3-33}$$

Donde  $U$ (m/s) es la velocidad horizontal promediada en vertical del flujo,  $U_{cr}$  (m/s) es la velocidad umbral de inicio de sedimentos,  $h$ (m) es la profundidad del agua,  $g$ (m<sup>2</sup>/s) es la aceleración debida a la gravedad,  $d_{50}$  es la mediana del diámetro del grano,  $s=\rho_s/\rho$  es la densidad específica del sedimento, siendo  $\rho_s$  (Kg/m<sup>3</sup>) la densidad del sedimento y  $\rho$ (Kg/m<sup>3</sup>) la densidad del fluido y  $D_*$  es un diámetro adimensional del sedimento expresado por:

$$D_* = d_{50} \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 3-34}$$

Donde  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) es la viscosidad cinemática del agua.

En la definición del modelo es posible determinar si se quiere calcular el transporte de sedimentos con dos diferentes modelos, el primero de ellos sólo contempla la corriente y el segundo de ellos contempla corrientes y olas.

El tiempo para iniciar el cálculo de transporte de sedimentos esta dado cuando las condiciones del modelo son estacionarias, es decir que no varían en el tiempo ni en el espacio. En este sentido se observa en que paso de tiempo las elevaciones de nivel del agua tienden a ser invariables en el tiempo y el paso de tiempo promedio donde están dadas estas condiciones debe ser sincronizado con el tiempo total de la simulación detallado en el módulo hidrodinámico.

#### 3.2.4.2 Propiedades del sedimento

El tamaño de grano es considerado como un tamaño de grano representativo en el área de modelado. Esto significa que puede variar espacialmente en el dominio de cálculo. En las costas con impacto de las olas los sedimentos más gruesos se encuentran a menudo en la playa y en aguas poco profundas, mientras que los sedimentos más finos se encuentran en aguas más profundas.

Sí el tipo de modelo seleccionado combina olas y corrientes se debe especificar la dispersión geométrica del sedimento y la porosidad del material.

### 3.2.4.3 Forzamientos

El forzamiento de este módulo está dado básicamente por el oleaje, el cual puede ser tomado de forma acoplada del modelo *SW* o puede ser especificado al ser procedente de mediciones instrumentales, ingresado en una serie de tiempo indicando si tiene alguna de las condiciones siguientes: constante, variable en el tiempo y constante en el dominio, contante en el tiempo y variable en el dominio o variable en el tiempo y en el dominio.

# **Capitulo 4**

## **Metodología**

## 4 METODOLOGÍA

---

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio de la dinámica marina en Chelem Yucatán que permita elaborar estrategias para mitigar la erosión de la costa en esta zona. Para ello es fundamental caracterizar la hidrodinámica y transporte de sedimentos en el área de estudio. A continuación se describe la metodología utilizada en este trabajo:

- ✚ Caracterizar el oleaje en la zona de estudio.
- ✚ Recolectar datos de campo y recopilar de información existente.
- ✚ Evaluar el transporte longitudinal (modelo unidireccional).
- ✚ Modelación bi-dimensional de transporte de sedimentos.
- ✚ Establecer el cambio de volumen del sistema litoral.
- ✚ Determinar la orientación de equilibrio para la costa de Chelem.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE

Para la caracterización del oleaje en aguas profundas se emplearon los datos de un hindcast de 30 años correspondiente al periodo comprendido entre 1979 a 2008 (Appendini et al,2012). La serie de datos contiene información de alturas de ola significativa, el ángulo de incidencia del oleaje, y el periodo de pico cada 3 horas desde el 01 de Enero a las 00:00hrs hasta el 31 de Diciembre de 2009 a las 21:00hrs.

Para evaluar la ocurrencia de presentación de los eventos se empleo la metodología propuesta por Silva (2005), que plantea dos formas convencionales de evaluar las probabilidades de presentación de un evento. La primera manera es reportar la probabilidad de forma discreta para lo que se dividen los datos en rangos (clase) y se genera una tabla que refleje el número o porcentaje, sea individual, por rango, acumulado o de excedencia.

La estimación se realizó de forma conjunta para altura de ola y dirección de incidencia del oleaje. Se contabilizaron 87.664 olas individuales durante dicho período y se agrupar en 24 intervalos de clase para la altura y 73 intervalos para las direcciones de oleaje.

Conocida la probabilidad discreta, se definió el período mediante una correlación entre altura de la ola significativa ( $H_s$ ) y el período, obteniendo la siguiente relación entre  $H_s$  y  $T_p$ :

$$T_p = 7\sqrt{H_s} \quad \text{Ec. 4-1}$$

## 4.2 RECOLECCIÓN Y RECOPIACIÓN DE DATOS DE CAMPO.

La recopilación y medición de datos de campo se realizó con el propósito de establecer las condiciones de contorno en el modelo numérico. Para ello, se utilizaron mediciones de perfiles de playa, análisis granulométrico, batimetrías, y un modelo digital de terreno obtenido con técnica LIDAR.

### 4.2.1 PERFILES DE PLAYA Y GRANULOMETRÍA

Para las mediciones topográficas se empleó un GPS diferencial contando con una base fija con coordenadas conocidas y uno móvil para hacer las lecturas en el campo. El receptor móvil (GPS ProMark 500) utiliza los errores calculados por la estación base para corregir sus posiciones, las cuales son visualizadas en la tableta digital "Field PC" así como el sentido de cada uno de los transeptos previamente definidos. Por otro lado, también se utilizó una estación total Stonex STS2R y prisma. Esta última permite medir ángulos verticales y horizontales y calcula la diferencia en la altura del terreno (distancia y desnivel). Una de las ventajas de utilizar la estación total, en relación con el uso de GPS, es la capacidad para realizar perfiles en la parte sumergida del perfil de playa hasta la profundidad de cierre (3m) sin el riesgo de dañar el equipo.

Se realizaron tres campañas de campo en el 2011: Septiembre 11, Octubre 25 y Noviembre 11. Obtenida la información de campo se realizaron las respectivas correcciones para referir los datos batimétricos al nivel medio del mar (nmm) local, obteniendo las coordenadas (x,y,z) de los puntos del levantamiento para los diferentes perfiles playeros.

Se consideró el monitoreo en 19 perfiles playeros espaciados cada 100 metros en una franja longitudinal y con una distancia transversal de aproximadamente 200 m hasta alcanzarla profundidad de cierre obtenida con la formulación propuesta por Birkemeier (1985),

$$h_* = 1.57H_e \quad \text{Ec. 4-2}$$

En donde  $h_*$  es la profundidad de cierre y  $H_e$  es la altura de ola significativa que sólo es excedida doce horas por año o 0.14% del tiempo. Para calcular  $H_e$  se recurre a la altura de ola significativa ( $\bar{H}$ ) y a la desviación estándar de la altura de ola, así:

$$H_e = \bar{H} + 5.6\sigma_H \quad \text{Ec. 4-3}$$

En donde  $\bar{H}$  y  $\sigma_H$  son obtenidos a partir de un reanálisis de oleaje de 30 años en la zona.



Figura 4-1 La imagen muestra la instrumentación en campo de un GPS como base fija.

Para el modelado numérico fue necesario caracterizar un perfil transversal de la zona, para lo cual fueron empleados los datos medidos en campo. En la parte seca del perfil hasta una profundidad aproximada de 1.5 metros se emplearon un receptor GPS base en un punto fijo (Figura 4-1) y un receptor móvil o *rover* para la medición del terreno y de los 1.5m hasta una profundidad de 6.4m, donde las variaciones de la batimetría fueron mínimas, se empleó una ecosonda adaptada a una embarcación pequeña.

El perfil caracterizado en campo fue necesario extenderlo a la profundidad de mediciones de oleaje (10 m) de forma numérica empleando la ecuación propuesta por Dean (1977).

$$h = Ax^{2/3}$$

Ec. 4-4

donde:

$h$  =Profundidad

$$A = 0.41D_{50}^{0.94}; D_{50} < 0.4(\text{Hanson y Kraus,1989})$$

$x$  =Distancia

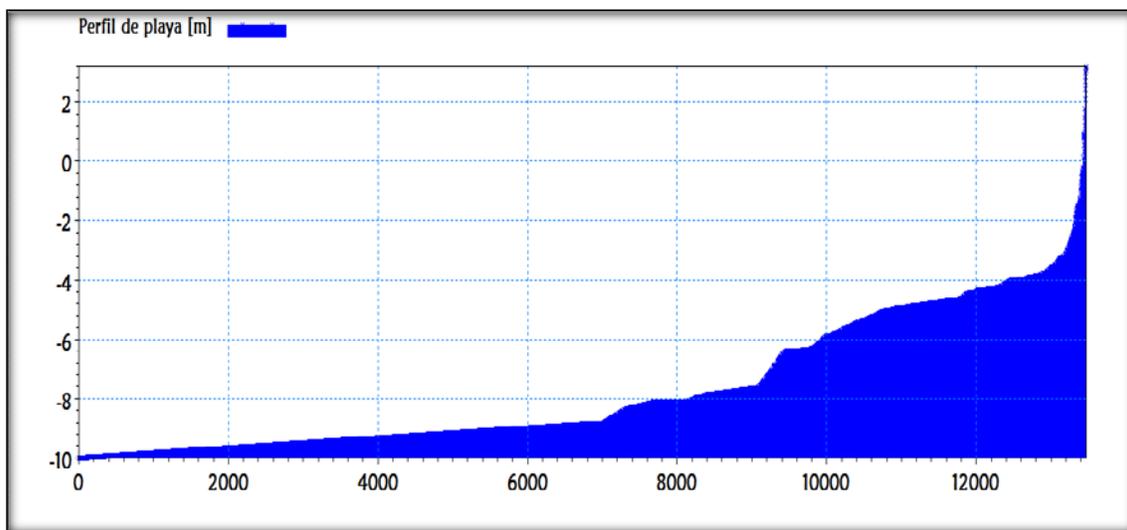


Figura 4-2 Perfil característico de la zona.

Se obtuvo el valor de  $x$  tomando  $h$  igual a 10m y el tamaño de grano según los resultados del análisis granulométrico de la zona realizada por Lira(2011), quien tomó muestras de material de la duna y la zona lavado en 5 perfiles playeros en la zona de estudio. Lira (2011) determinó que el  $d_{50}$  varía desde los 0.008mm~0.075mm a los 4.75cm~5cm con un tamaño de medio de aproximadamente 0.335mm, como se muestra en la siguiente figura:

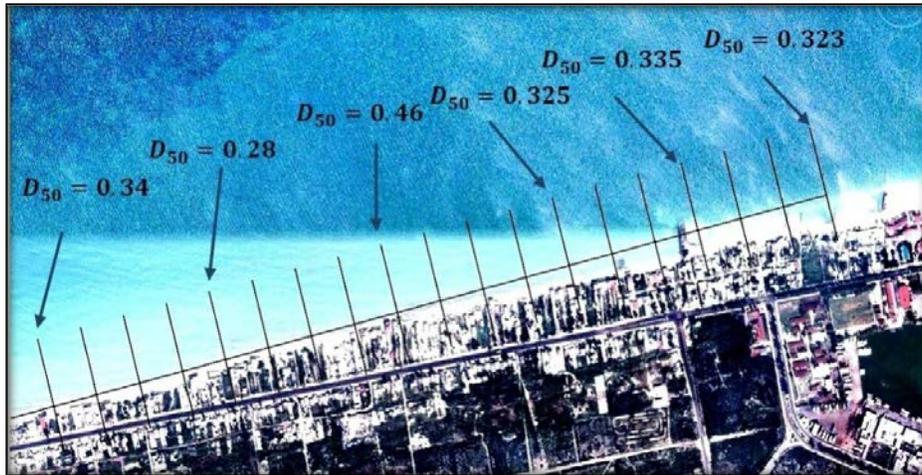


Figura 4-3 Distribución del tamaño de grano a lo largo de la zona de estudio. (Lira,2011)

#### 4.2.2 INFORMACIÓN BATIMÉTRICA

Los datos batimétricos se obtuvieron de las mediciones en campo realizadas por el LIPC-UNAM en Junio de 2010 frente al área de estudio, y los suministrados por las entidades de CINVESTAV (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional) y SEDUMA (Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Yucatán). Estos datos fueron referidos al nivel medio del mar.

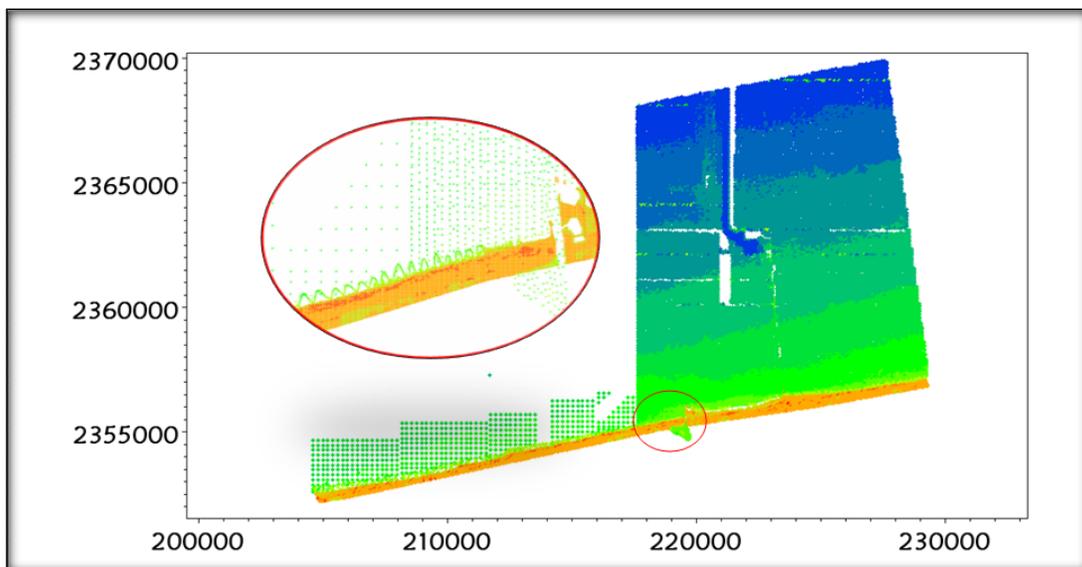


Figura 4-4 Datos recopilados de batimetría y elevaciones.

### 4.2.3 LÍNEA DE COSTA Y ESTRUCTURAS COSTERAS

La localización de la línea de costa se obtuvo a partir de un Modelo Digital de Terreno (MDT) generado mediante un sistema láser aerotransportado (LIDAR) con resolución de 1X1 metro. Este levantamiento se realizó durante Junio del 2011 a lo largo de los 360 km de la franja costera de Yucatán.

La obtención de las elevaciones se realizó mediante ArcGis, después del post-proceso de la información. Los datos de LIDAR se entregan sin un límite de área de datos detallado. A menudo, las extensiones (x,y) del área del levantamiento topográfico se definen por un sistema de teselas (cuadros) de datos LIDAR. Estos datos no cubren totalmente la extensión de las teselas que se encuentran alrededor del perímetro del proyecto. Por lo tanto, sólo se garantiza que los datos cubran una extensión mínima, y no hay límite absoluto de lo que puede deducirse, lo que hace necesario sintetizar un límite de datos desde los puntos que se pueden utilizar para implementar una zona de interpolación de la superficie, sobre todo en las zonas de masas de agua y áreas oscurecidas.

Para eso se vectorizó el ráster con la herramienta de geoprociamiento de ráster a polígono. Esta herramienta produce una clase de entidad poligonal permitiendo delimitar los datos a extraer a partir de la línea de costa y obtener x,y,z de cada punto del ráster.

Se crearon tres archivos de entrada modificando la información batimétrica con el objeto de modelar tres diferentes escenarios nombrados como “casos”. El primero de ellos (Caso1) es sin la presencia de estructuras costeras (P. Progreso y P. Yucalpetén), el segundo sólo incluyendo el puerto de abrigo de Yucalpetén (Caso 2), y un tercer escenario con las condiciones que se cuentan actualmente (Caso 3), que son los dos puertos y algunas de las estructuras menores (espigones).

La localización del muelle fiscal de Progreso requirió su digitalización en GoogleEarth, guardando las coordenadas geográficas en un archivo .kmz y posteriormente se realizó la conversión a UTM para obtener las posiciones x,y,z de los puntos.

## 4.3 EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE LONGITUDINAL (MODELO UNIDIRECCIONAL)

Como se mencionó en el apartado 2.6.1 el transporte litoral de sedimentos a lo largo de la costa se convierte en un problema cuando hay una estructura presente que interfiera con el movimiento natural del sedimento. El Cuerpo de Ingenieros de

EE.UU (2002), indicaron que conocer la dirección y magnitud del transporte de sedimentos es fundamental para estudios exitosos de erosión costera y proyectos de protección costera.

La modelación de la hidrodinámica y transporte de sedimentos de los 30 años no es práctica desde el punto de vista computacional. Es por esto que se hace necesario seleccionar los oleajes de mayor contribución al transporte de sedimentos de la serie de los 30 años de oleaje descrita detalladamente en el apartado 4.1.

Para identificar estos eventos, se realizó una modelación uni-dimensional de transporte longitudinal sobre un perfil característico (Figura 4-2) de la zona de estudio utilizando el modelo numérico LITDRIFT (ver Sección 3.1).

Como resultado de la modelación se obtuvo una rosa de contribución al transporte de sedimentos donde se observa el porcentaje de contribución al transporte total dado por las diferentes direcciones.

Para la selección de los casos se empleó el porcentaje de ocurrencia y parámetros de oleaje de cada sector dados por la siguiente expresión:

$$\text{PESO} = \%OCC * (\text{SUMS}/s) \quad \text{Ec. 4-5}$$

donde:

$\%occ$  = porcentaje de ocurrencia del oleaje seleccionado para representar el sector.

$SUMs$  = sumatoria de los porcentajes de contribución al transporte de todo el sector que se va a representar.

$s$  = porcentaje de contribución al transporte del evento de oleaje seleccionado

#### 4.4 MODELADO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL DE LA DINÁMICA LITORAL.

Los proyectos de regeneración y protección costera dependen de la capacidad para comprender las causas que originan el estado de erosión de la playa en estudio, así como de la capacidad de evaluar los procesos costeros que han dado lugar a dicha situación.

Toda playa cumple, en mayor o menor medida, las siguientes funciones (GIOC, 2001):

- Defensa de costa
- Hábitat de flora y fauna
- Uso lúdico humano

La necesidad de regeneración está siempre originada por la falta de cumplimiento de alguna de estas funciones, y su objetivo es el restablecimiento de dicha función. La simulación del oleaje, corrientes, y transporte de sedimentos presentes en la zona de estudio, se realizó mediante el modelo acoplado MIKE 21/3 FM (DHI, 2011). El modelo es forzado con los casos de oleaje que tienen una mayor contribución al transporte de sedimentos determinados con la metodología descrita en el apartado anterior (Sección 4.3) y utilizando la batimetría y línea de costa resultado del análisis de la información de campo (Sección 4.1).

El dominio del modelo tiene una extensión a lo largo de la costa de 25.47 km y 12.98 km de la costa hacia el mar adentro. La zona de estudio está ubicada en la zona UTM 16 (Figura 4-5), en las coordenadas geográficas -89.84615-21.246056, con una orientación de -11.5321 grados con respecto al Norte.

La zona de estudio fue detallada por una malla rectangular (ver Figura 4-6) que se extiende 11.7 Km a lo largo de la costa, con la intención de cuantificar el alcance del efecto de las estructuras costeras en la dinámica marina de la zona de estudio.

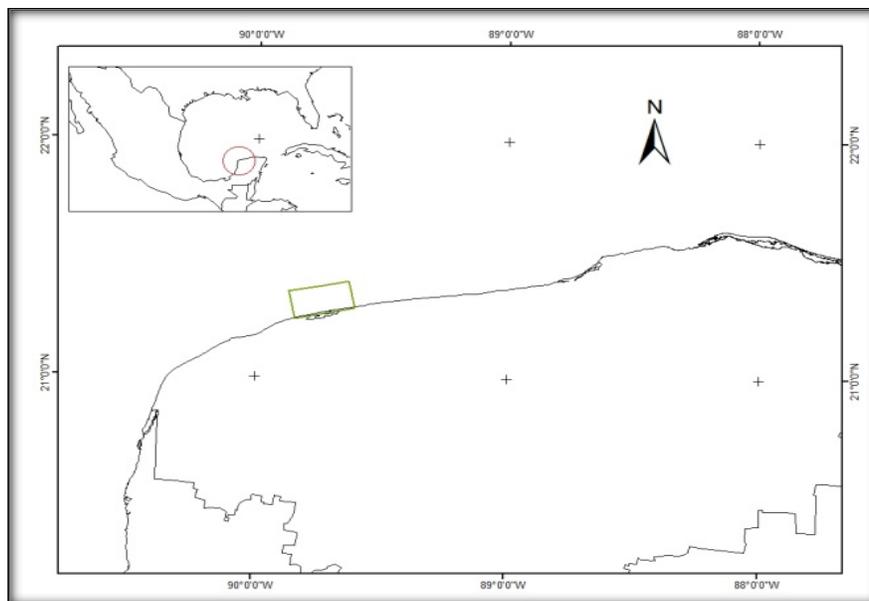


Figura 4-5 Ubicación geográfica del dominio en el modelo

La relación entre área y longitud de los elementos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4-1 Relación entre el área máxima y largo aproximado del elemento.

Sector	Área Maxima (m <sup>2</sup> )	Largo aproximado del elemento (m)
P1	100,000	360
P2	60,000	240
P3	20,000	150
P4	9,000	90
P5	60 x 30	30

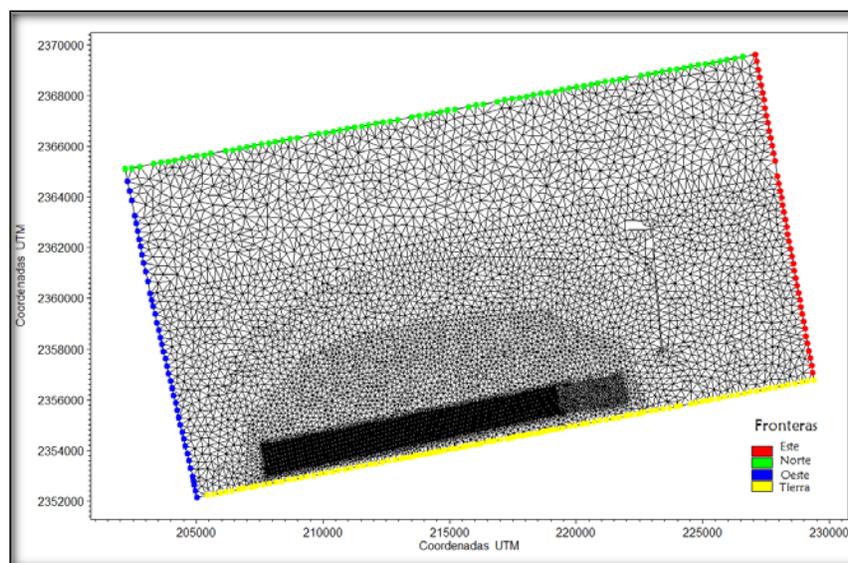


Figura 4-6 La malla de cálculo.

En la zona de cercanías a la costa se utilizó una mayor resolución con elementos rectangulares de 60x30 metros (ver Figura 4-7).

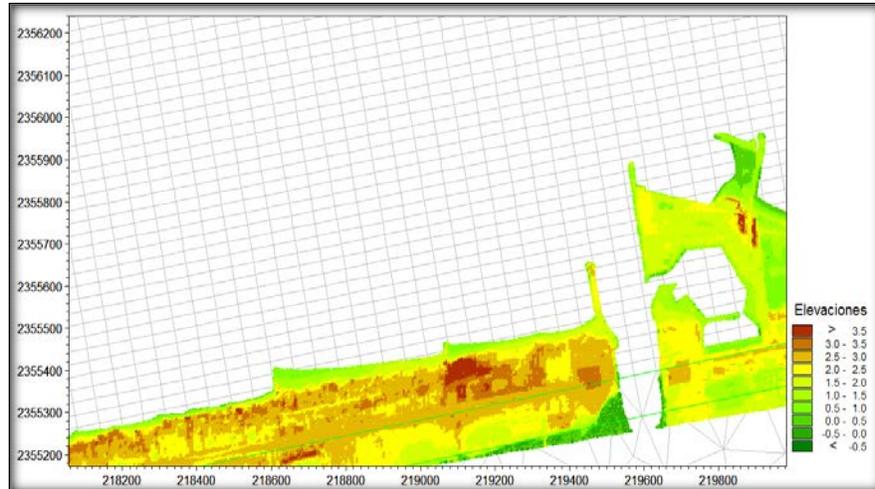


Figura 4-7. Se muestra la resolución de la malla en cercanías a la costa, con la escala de elevaciones obtenidas en el MDT. Ejes en coordenadas UTM.

A partir de la información recabada en el campo y del post-proceso de los datos de LIDAR, se determinó el modelo topo-batimétrico de la zona de estudio para los tres escenarios propuestos que se describen a continuación.

**Caso1:**

Las elevaciones y batimetría fueron modificadas manteniendo la línea de costa, sin la presencia de estructuras, siguiendo la tendencia natural de la costa similar a la que se muestra en la Figura 4-8 en el año 1974.

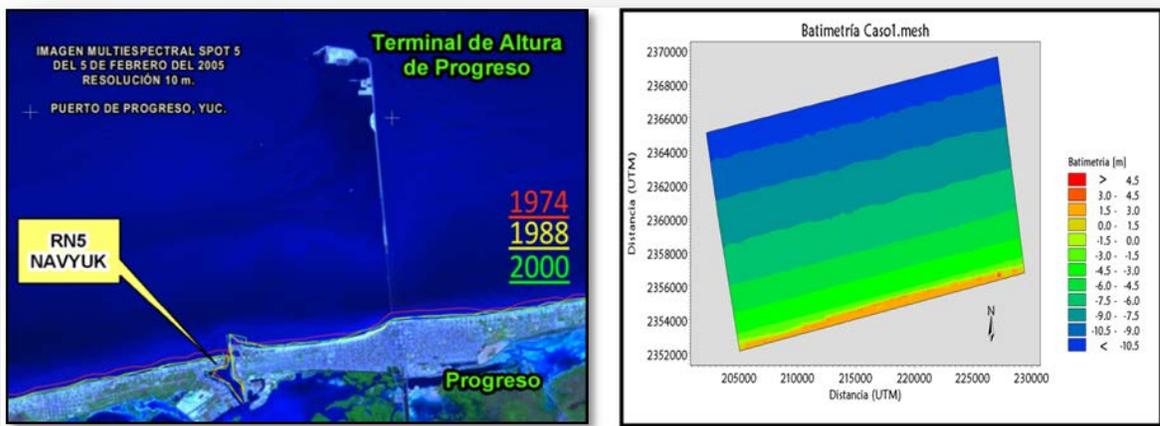


Figura 4-8 Evolución de la costa entre Chelem y Chicxulub 1974-2005 (izquierda) Fuente: INOPESA, 2011. Batimetría empleada en Caso1 (derecha).

**Caso 2:**

Se modificó la línea de costa y la malla de cálculo incluyendo la estructura del Puerto de abrigo y estructuras menores (Figura 4-9) al lado Este del puerto.

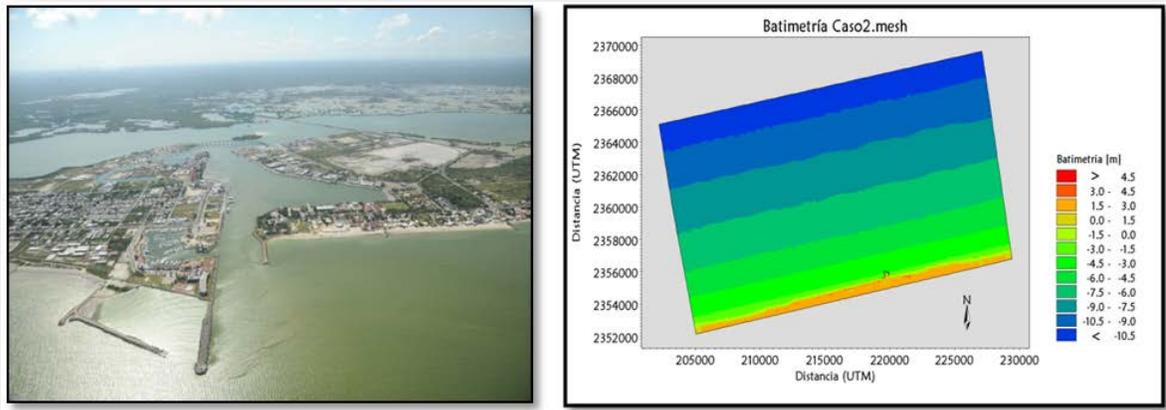


Figura 4-9 A La izquierda, fotografía aérea del Puerto de Abrigo de Yucalpetén y estructuras menores. Fuente: Aerozoom, 2011. Derecha: Batimetría empleada en Caso2.

**Caso 3:**

Este caso representa la situación actual (Figura 4-10) se incluye el Puerto de altura de Progreso adicional a las estructuras consideradas en el Caso 2.

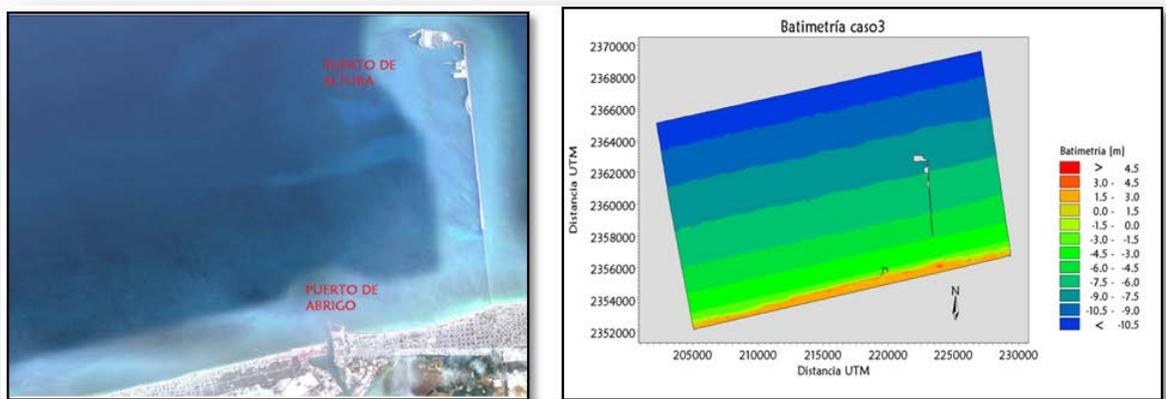


Figura 4-10 A La izquierda, fotografía aérea del Puerto de Abrigo de Yucalpetén y estructuras menores. Fuente: Google Earth. Derecha: Batimetría empleada en Caso3.

En los apartados siguientes se describen las características principales de los módulos empleados en el presente trabajo (HD, SW, y ST) para el estudio de la dinámica marina (hidrodinámica y transporte de sedimentos) en Chelem, Yucatán.

#### 4.4.1 PARÁMETROS DE ENTRADA MÓDULO SW

Como se detallo en el capítulo anterior se emplearon tres módulos del modelo acoplado MIKE21/3 FM, a continuación se presentan los detalles para la implementación del modelo.

Tabla 4-2 Especificaciones módulo de propagación de oleaje SW.

PARÁMETRO	VALOR
<b>Ecuaciones básicas</b>	Formulación espectral: totalmente espectral. Formulación de tiempo: estacionaria.
<b>Tiempo de inicio</b>	0
<b>Discretización espacial</b>	Tipo: Sector de dirección.
	Número de direcciones.
	Dirección mínima. Dirección máxima.
<b>Solución Técnica</b>	Formulación estacionaria
	Bajo orden, logaritmo rapido
	Método Newton- Raphson iteration
<b>Condiciones de elevación de los niveles de agua.</b>	Variación de los niveles de agua generados en la simulación hidrodinamica.
<b>Condiciones de corrientes</b>	Variación de las corrientes de la simulación hidrodinamica.
<b>Forzamiento del viento</b>	Sin viento.
Elevación inicial de la superficie	0.0m
<b>Difracción</b>	Especificada para la malla del Caso3
<b>Rotura del oleaje</b>	Si especificada.
	Gamma 0.8 constante
<b>Fricción de fondo</b>	Modelo: Nikuradse roughness, kn
	Forma: constante
	Valor: 0.008(m)
<b>Estructuras</b>	En el Caso 3 parte impermeable del Puerto Progreso de 1.742km de muelle compuesta por 146 ejes de 12m x 9.5m cada uno, se con un diámetro de 10m.
<b>Condiciones iniciales</b>	Cero espectral
<b>Condiciones de frontera</b>	Este: tipo lateral
	Oeste: tipo lateral
	Norte : Clima de oleaje por cada tormenta (Hs, Tp, Dir)

#### 4.4.2 PARÁMETROS DE ENTRADA MÓDULO HD

Los parámetros aplicados en la configuración del módulo hidrodinámico se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4-3 Especificaciones módulo hidrodinámico HD.

PARÁMETRO	VALOR
Especificación del Archivo	C1T01.mesh
Malla y batimetria.	Caso1.mesh 19256 elementos 13889 nodos
	Caso2.mesh 19264 elementos 13904 nodos
	Caso3.mesh 19273 elementos 13933 nodos
Perido de simulación	2012-03-12 09:00am -- 2012-03-15 09:00pm (2.5 días)
Intervalo de paso de tiempo	3600s
No. De pasos de tiempo	60
Solución Técnica	<b>Tiempo de integración</b>
	Bajo orden, logaritmo rápido
	Incremento de tiempo mínimo:0.1
	Tiempo máximo :3600s
	<b>Discretización del espacio</b>
	Alto orden.
Áreas secas y mojadas	Profundidad en seco:0.005m
	Profundidad de inundación:0.05m
	Profundidad de mojado:0.1m
Densidad	Barotrópica
Viscosidad Turbulenta	Formulación Smagorinsky: valor constante en el dominio y en el tiempo 0.28m <sup>2</sup> /s
Fricción de fondo	Número de Manning constante de 32[m <sup>1/3</sup> ]/s
Elevación inicial de la superficie	0.0m
Tensores de radiación	Acoplados a la simulación del módulo de oleaje SW.
Fronteras	Este: Nivel de agua 0m constante.
	Oeste: Nivel de agua 0m constante.
	Norte: Flujo constante, componentes 0[m <sup>3</sup> /s/m]

#### 4.4.3 PARÁMETROS DE ENTRADA MÓDULO ST

Los parámetros aplicados en la configuración del módulo de transporte de sedimentos presentan a continuación:

**Tabla 4-4** Especificaciones del modelo de transporte de sedimentos ST

PARÁMETRO	VALOR
Definición del modelo	Tipo: Oleaje y corriente
	Archivo con la descripción de olas y corrientes.
Tiempo de inicio	45
Propiedades del sedimento	Porosidad: 0.4
	Sedimento constante ( $D_{50}$ ): 0.335mm
	Dispersión geométrica: 1.9
Solución Técnica	Formulación estacionaria
	Bajo orden, logaritmo rápido
	Método
	Newton- Raphson iteration
Forzamientos	Oleaje proveniente de la simulación numérica.

#### 4.5 OBTENCIÓN DE MAPAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A partir de las simulaciones del modelado bi-dimensional (Sección 4.4) fueron extraídos los resultados del módulo de transporte de sedimentos (ST) correspondientes a cada una de los estados de mar con mayor contribución al transporte (11 en total) en los tres escenarios modelados. Con estos resultados se elaboró el mapa de transporte anual ( $m^3/y/m$ ) a partir de la integración del transporte asociado a cada estado de mar según su porcentaje de ocurrencia en el transporte anual.

Así mismo, fueron extraídos 131 perfiles transversales de 500m de longitud espaciados cada 90 m abarcando la zona de la malla rectangular que corresponde a la zona de estudio. En cada perfil se extrajeron 50 puntos a fin de integrar la tasa de transporte a lo largo del perfil.

#### 4.6 DIAGNOSTICO DE LA INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURAS

Las tasas de transporte longitudinales y transversales obtenidas para cada perfil fueron comparadas en los tres escenarios, esto con el fin de cuantificar la extensión de la influencia de las estructuras costeras en la dinámica costera de la zona.

#### 4.7 CAMBIO DE VOLUMEN DEL SISTEMA LITORAL.

El cambio de volumen del sistema litoral se obtuvo empleando la ecuación de continuidad en la forma presentada por Hanson y Kraus (1989):

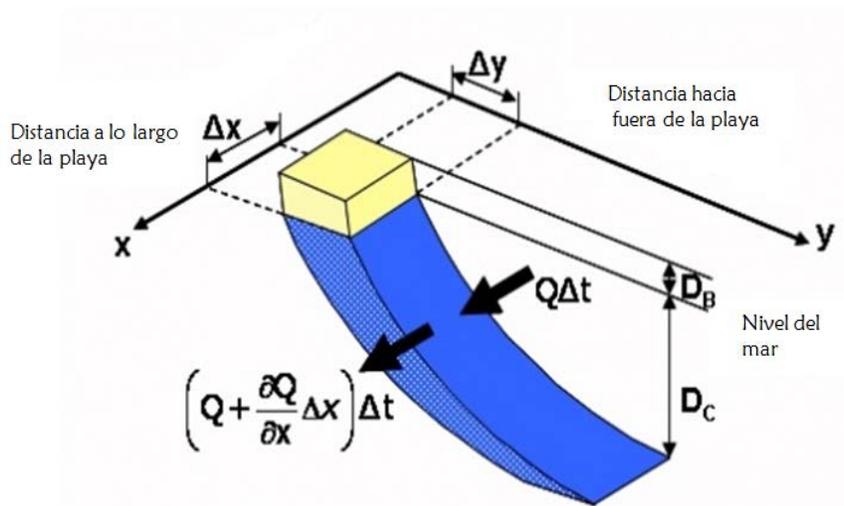


Figura 4-11 Definición de variables en la ecuación de cambio en la línea de costa. Tomada de Hanson y Kraus (1989).

$$\Delta y = \frac{\Delta V}{\Delta x (D_B + D_C)} \quad \text{Ec. 4-6}$$

Donde:

$\Delta V$ = cambio de volumen del sistema litoral.

$\Delta X$ = cambio de distancia a lo largo de la costa

$\Delta Y$ = cambio de distancia normal a la costa o retroceso de la línea de costa

$D_B$ = altura de la berma

$D_c$ = profundidad de cierre.

Con esta información se realizó la identificación geográfica de las zonas de erosión, acumulación, o condición de equilibrio. La profundidad de cierre se determinó según las tasas de transporte obtenidas en los perfiles extraídos y por inspección visual hasta donde hay transporte de sedimentos.

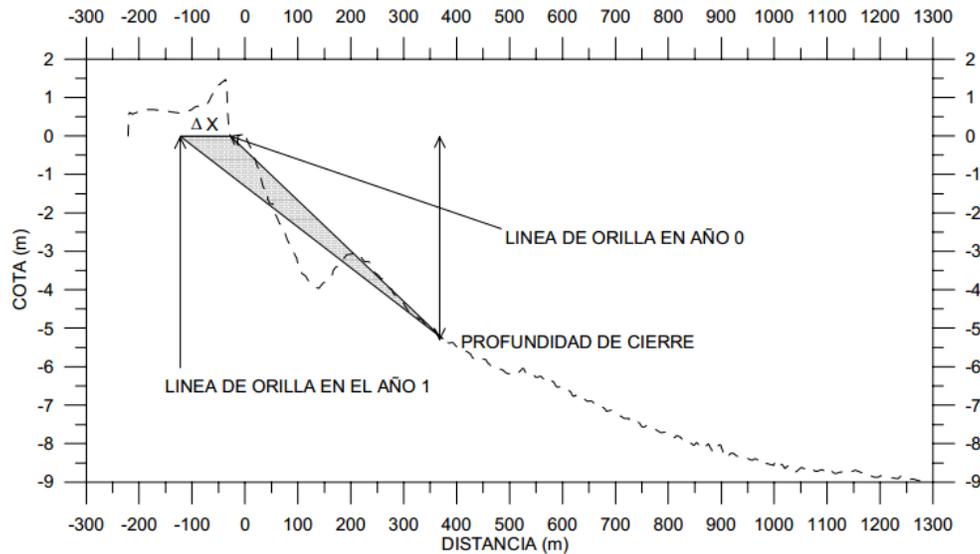


Figura 4-12 Esquema representativo ilustrando la profundidad de cierre del perfil.

#### 4.8 ORIENTACIÓN DE EQUILIBRIO PARA LA COSTA DE CHELEM

Para determinar la orientación de equilibrio a lo largo de la zona de estudio se propagó el oleaje hasta la profundidad activa del perfil (3m) con el modelo numérico MIKE21 SW, obteniendo altura, periodo y dirección para 15 puntos espaciados cada 500m, abarcando el sector de la costa en estudio. Con los parámetros de oleaje obtenidos en cada punto se utilizó la metodología propuesta por (Appendini et al. 2012) empleando el modelo de transporte longitudinal LITDRIFT con el clima de oleaje transformado frente la zona de estudio y variando la orientación del perfil de playa con respecto al norte (Figura 4-13), para obtener la variación del transporte de acuerdo a la orientación del perfil. Se generaron gráficas alpha-Q (orientación del perfil vs transporte), como ejemplo para la aplicación de esta técnica en la toma de decisiones para el manejo de la erosión costera.

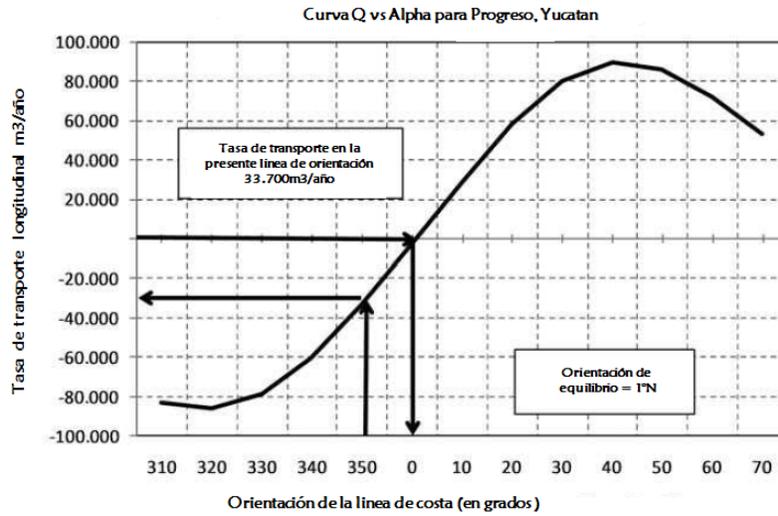


Figura 4-13 Curva obtenida por Appendini et al. 2012 en Progreso. El presente estudio empleó una metodología similar para obtener la orientación de equilibrio en la zona de estudio.

# **Capitulo 5**

## **Resultados**

# Capítulo 5

## 5 RESULTADOS

---

En el presente capítulo se presenta la caracterización del oleaje y transporte de sedimentos que intervienen en la dinámica marina de Chelem Yucatán. Asimismo, se evalúa el efecto de las estructuras costeras en el sistema litoral de la zona. Los resultados están basados en el modelado numérico del oleaje, la hidrodinámica, y transporte de sedimentos.

Las simulaciones numéricas contemplan tres escenarios: (1) sin la presencia de estructuras; (2) con el puerto de abrigo de Yucalpetén únicamente; y (3) con la presencia del muelle de Progreso y el puerto de Yucalpetén (situación actual). Los resultados permiten evaluar la afectación de las dos estructuras mediante la comparación del modelado de los diferentes escenarios.

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DEL OLAJE

En la zona de estudio no se cuenta con mediciones históricas de oleaje que permitan caracterizar el clima medio que afecta la zona de interés. Por lo tanto, se utilizaron resultados de un modelo numérico de oleaje forzados con información de vientos de los últimos 30 años.

En el presente trabajo se emplearon los datos, del nodo más cercano al área de estudio, de un hindcast de oleaje para el periodo comprendido entre 1979 a 2008 (Appendini et al. 2012). La serie de datos contiene información de alturas de ola significativa, ángulo de incidencia del oleaje, y el periodo pico cada 3 horas desde el 01 de Enero a las 00:00 horas hasta el 31 de Diciembre de 2009 a las 21:00 horas.

La Figura 5-1 es una representación gráfica de la probabilidad discreta de las alturas de olas del registro de los 30 años, reflejando el mayor porcentaje de altura de ola del registrado está entre el rango de 0.6 y 0.8 con el 29%.

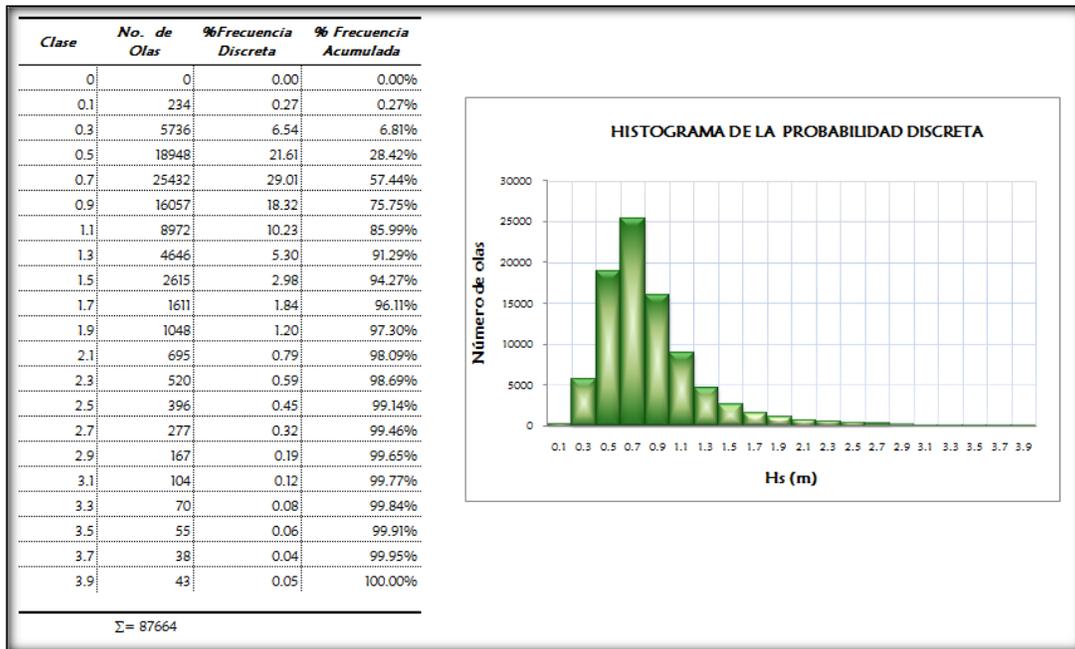


Figura 5-1 Frecuencia de la Altura significativa según intervalos de clase.

Posteriormente, el periodo pico se infirió de acuerdo a la relación de la Ec.4.1, que representa la curva de ajuste a las alturas de ola de los 30 años, como se muestra a continuación:

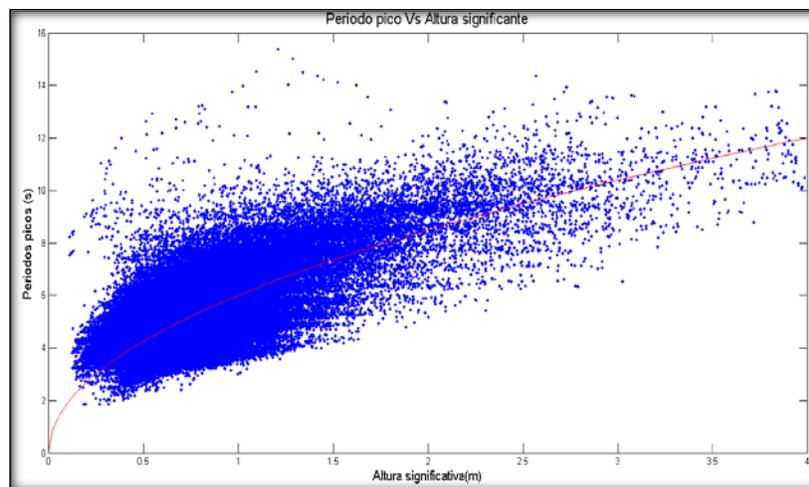


Figura 5-2 Representa la curva del periodo asociado obtenida para cada clase de la muestra de datos.

De forma similar se empleo la metodología para establecer la frecuencia conjunta de de la altura de ola y dirección representada en la rosa de oleaje (Figura 5-3), determinando que el oleaje dominante es del sector NE con el oleaje más intenso proveniente del N.

El análisis de estadístico de oleaje permitió obtener el porcentaje de ocurrencia y las características del oleaje (altura, período, y dirección del oleaje) en una serie temporal que fue empleada para calcular el transporte longitudinal con el modelo numérico LITDRIFT.

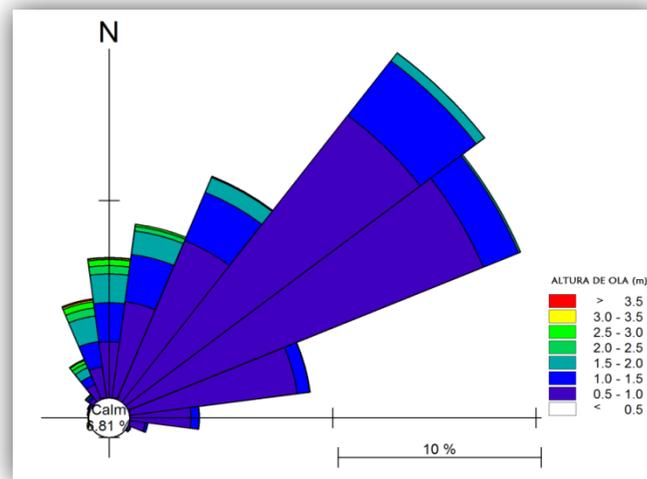


Figura 5-3 Rosa de oleaje utilizado para los cálculos con LITDRIFT.

## 5.2 RESULTADOS DE MODELADO DE TRANSPORTE LONGITUDINAL

Para identificar los eventos de oleaje que, debido a sus parámetros y su ocurrencia, presentan mayor contribución al transporte longitudinal de sedimentos se realizó la modelación con el modelo LITDRIFT. Se calculó el transporte longitudinal para la zona de estudio sobre un perfil de playa característico de Chelem (Figura 4-2

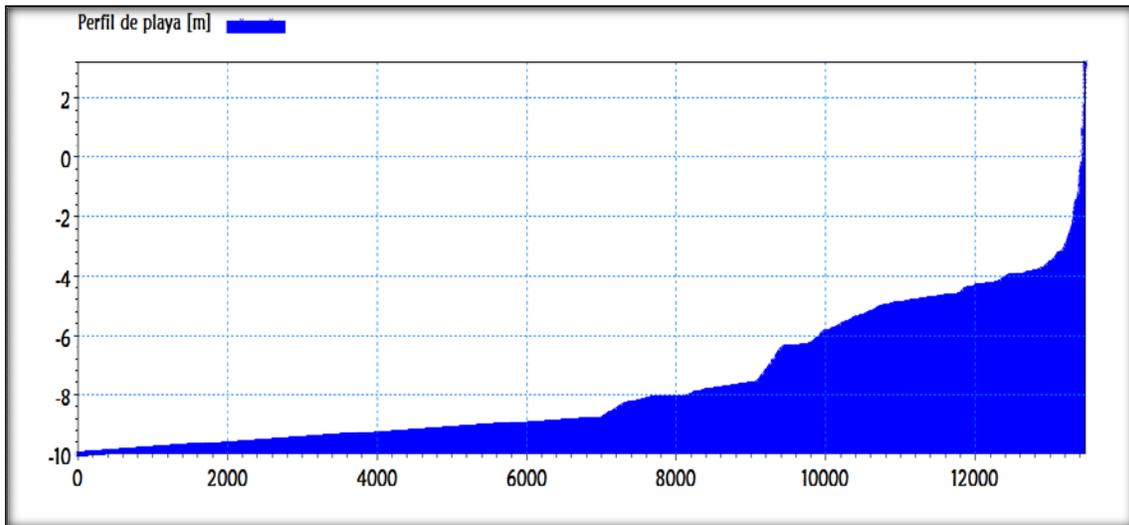


Figura 4-2) y las condiciones de oleaje de acuerdo a la serie de tiempo. Al perfil utilizado se le asignó la inclinación media en el área de estudio ( $346^\circ$ ), y se calculó la contribución de cada uno de los oleajes contenidos en la serie temporal. De esta manera fue posible seleccionar los eventos de oleaje con mayor contribución al transporte de sedimento en la zona.

La Figura 5-4 muestra la rosa de contribución al transporte de sedimentos, donde se observa el porcentaje de contribución al transporte total dado por cada uno de los oleajes presentes en la rosa. Esto quiere decir, que el oleaje presente de cada dirección y altura que conforma la rosa, tiene una contribución al transporte que equivale a la longitud de cada sector representado según la escala gráfica de porcentaje.

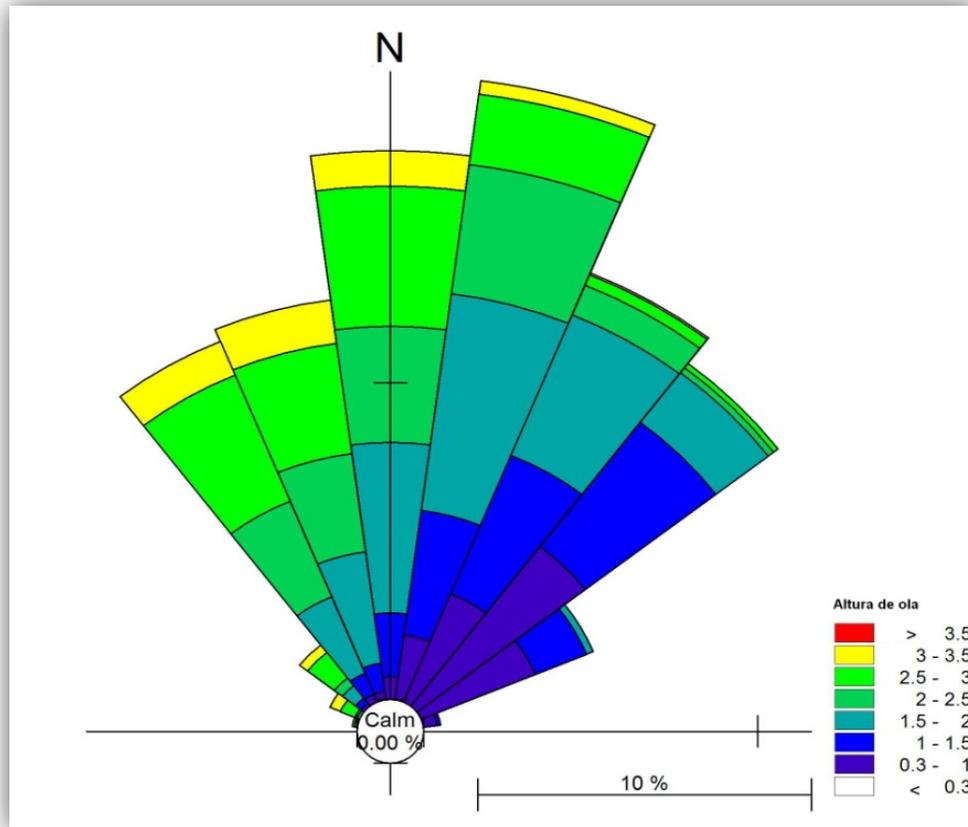


Figura 5-4 Rosa de contribución al transporte de sedimentos

En la rosa se observa que las mayores contribuciones al transporte de sedimentos provienen del oleaje con incidencia NE, seguidas por el oleaje asociado a la dirección Noroeste.

A partir de la rosa de contribuciones al transporte se seleccionaron los eventos de oleaje para forzar el modelo bidimensional de transporte. En la tabla 5-1 se muestra el porcentaje de ocurrencia de los eventos seleccionados para la modelación bidimensional y sus respectivos porcentaje de ocurrencia.

Tabla 5-1 Eventos de oleaje seleccionados para el modelado bidimensional

Evento	H (m)	T(s)	Dirección (°)	Ocurrencia (%)
00	2.7	11.5	315	2.50
01	2.7	11.5	330	12.50
02	2.7	11.5	345	12.83
03	2.7	11.5	360	17.50
04	2.7	11.5	75	13.00
05	1.75	9.26	75	6.83
06	1.75	9.26	30	8.50
07	1.5	8.57	30	6.10
08	1.75	9.26	45	11.33
09	1.25	7.82	45	2.30
10	1.25	7.82	60	5.60
11	0.75	6	75	0.50

### 5.3 RESULTADOS MODELACIÓN BIDIMENSIONAL

En esta sección se presentan los resultados del modelo bidimensional de transporte de sedimentos. Para ello, fue necesario modelar la propagación del oleaje, la hidrodinámica, y el transporte de sedimentos en la zona de estudio bajo los tres escenarios descritos anteriormente.

El modelo topo-batimétrico de la zona de estudio (ver Figura 5-5) se definió a partir de la información recabada en el campo y del posproceso de los datos de LIDAR.

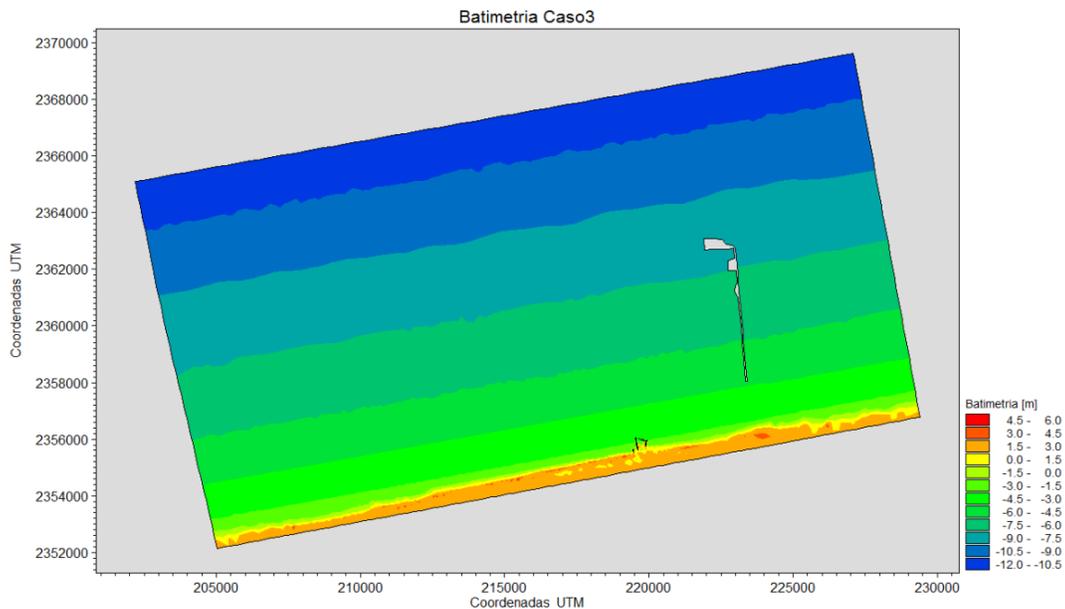


Figura 5-5 La batimetría del Caso 3 corresponde a la condición actual, con el puerto de abrigo y el puerto de altura.

### 5.3.1 RESULTADOS DE LOS MODELOS DE OLAJE E HIDRODINÁMICO

Los casos de oleaje simulados corresponden a aquellos con mayor contribución al transporte de sedimentos (Sección 5.2). La propagación del oleaje en la zona de estudio se realizó con el módulo de oleaje del modelo acoplado MIKE21/3 FM. A partir de las modelaciones de oleaje se obtuvieron los parámetros del oleaje cerca de la costa y los tensores de radiación que son empleados para la generación de corrientes en la zona cercana a la costa por el módulo hidrodinámico.

La Figura 5-6 muestra la distribución espacial de alturas de ola en el área de estudio para el evento 08 ( $H_s=1.75\text{m}$ , período  $T=9.26\text{ s}$ , y dirección de oleaje de N45E) en el Caso 3.

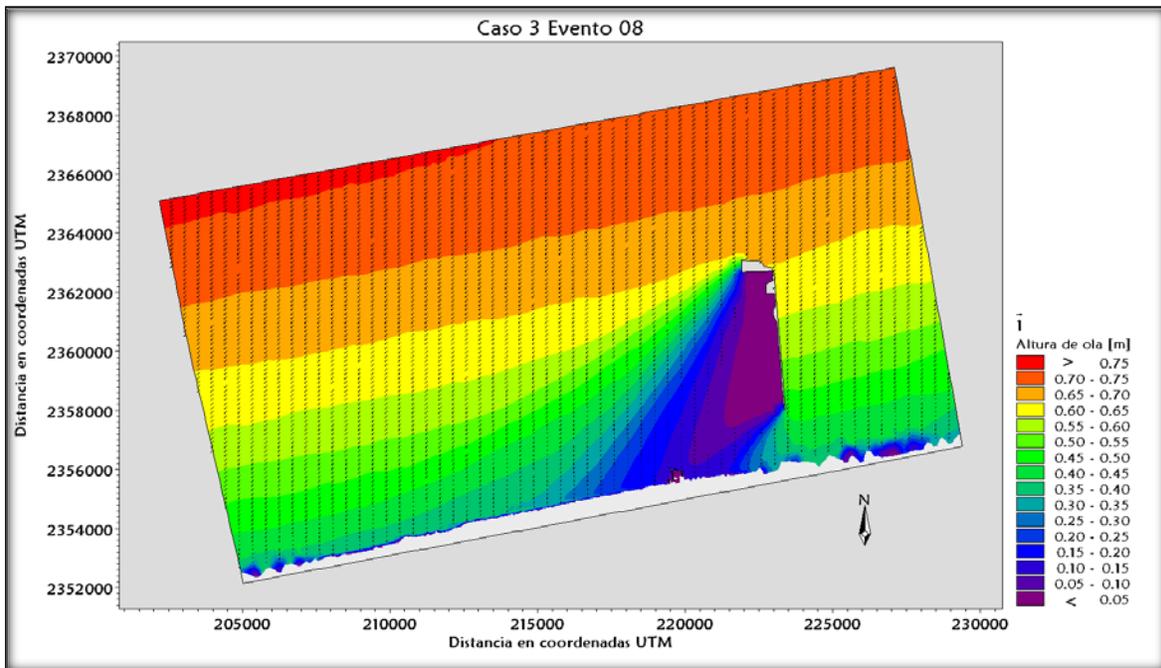


Figura 5-6 Se presenta la propagación del oleaje con un ángulo de incidencia de 45°. La presencia de las estructuras costeras genera un cambio de dirección en los rayos de incidencia por efecto de la difracción.

El modelo hidrodinámico permite conocer las corrientes inducidas por los gradientes en el tensor de radiación debidos a la rotura del oleaje. Debido al bajo rango de marea en la zona, las variaciones de nivel no fueron consideradas en el presente trabajo.

En general se observa una corriente paralela a la costa en dirección Este-Oeste. La Figura 5-7 presenta las velocidades para el caso anterior, donde se muestra que las velocidades en la zona de cercanías a la costa varían entre 0.06 a 0.16m/s para el caso de incidencia de 45° con sentido de Este a Oeste.

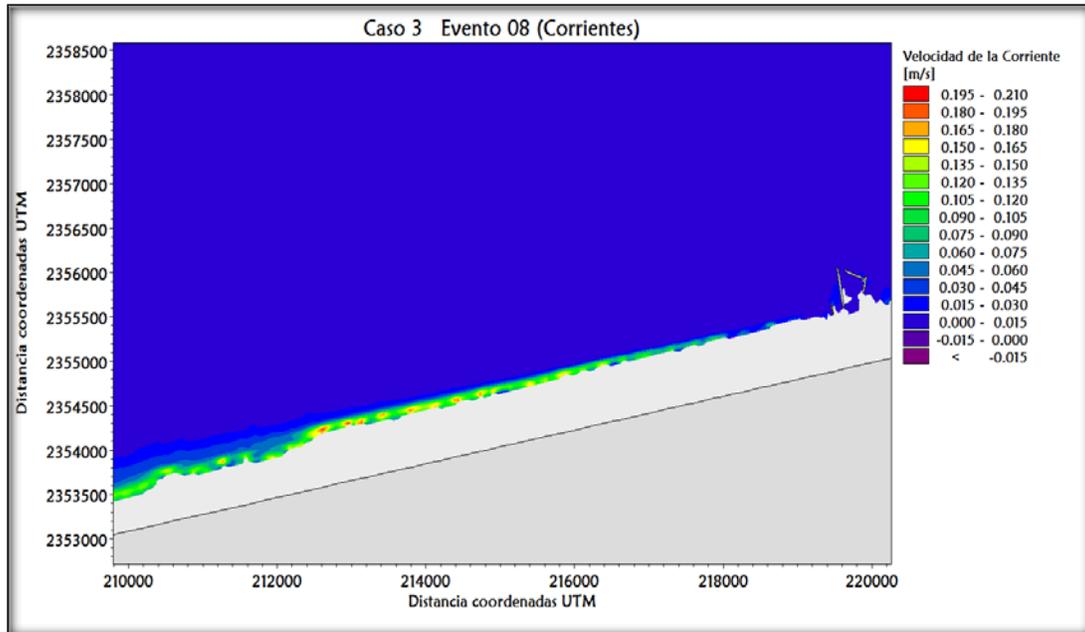


Figura 5-7 Se muestra un instante de modelación donde se puede ver que las mayores corrientes se concentran en cercanías a la costa, y están en el rango de 0.06 y 0.15m/s.

La magnitud de la corriente se incrementa en dirección Oeste de la zona de estudio (ver Figura 5-7), conforme nos alejamos de las estructuras.

En la Figura 5-8 Se muestra un instante de modelación de un Norte, donde se aprecia que las mayores corrientes se concentran en cercanías a la costa y son de 0.21m/s aprox., incrementando con respecto a las que son generadas por el oleaje del NE. se muestra un instante de la modelación del evento N°03 del Caso 3 (con presencia de estructuras) que consiste en la propagación de una ola de 2.7 m, periodo de 11.5 s, y una dirección de incidencia de 360°. Las corrientes promedio generadas en la zona de estudio son de alrededor de 0.21 m/s.

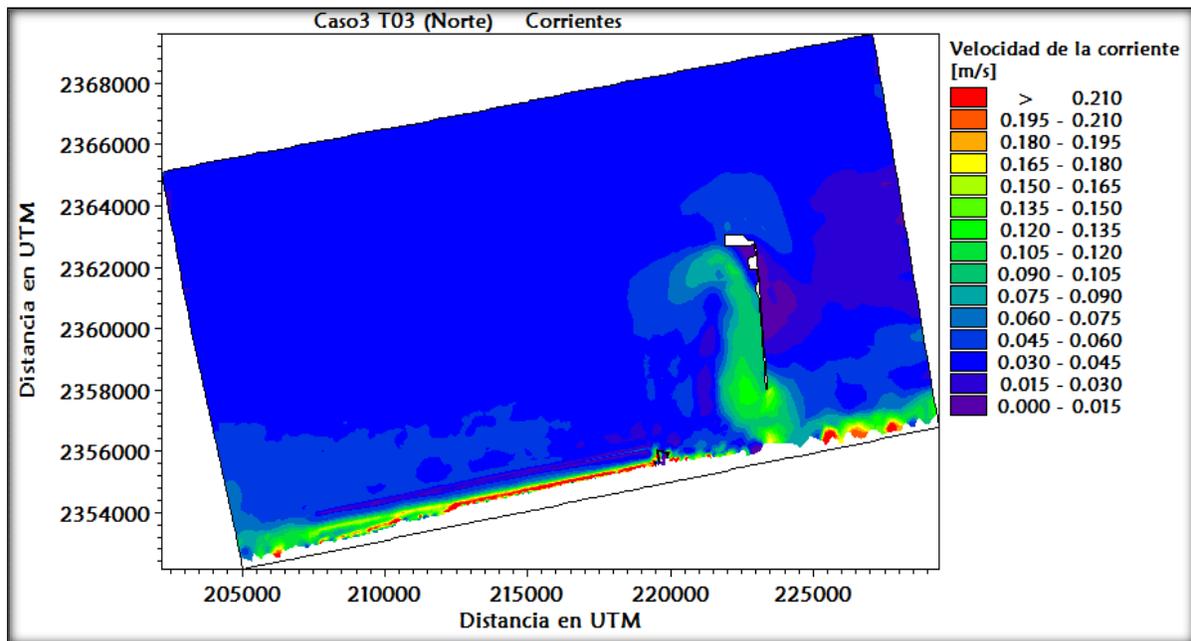


Figura 5-8 Se muestra un instante de modelación de un Norte, donde se aprecia que las mayores corrientes se concentran en cercanías a la costa y son de 0.21m/s aprox., incrementando con respecto a las que son generadas por el oleaje del NE.

De acuerdo a los resultados del modelo hidrodinámico, la presencia del muelle de Progreso induce un gradiente en el potencial de transporte de sedimento longitudinal. Los efectos de la estructuras en el transporte es estudiado con mayor detalle en la siguiente sección.

### 5.3.2 RESULTADOS DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS BIDIMENSIONAL

El transporte de sedimentos se estimó con el modelo acoplado MIKE21/3 FM determinando las tasas de transporte bajo la acción combinada de corrientes y oleaje. Se realizaron las simulaciones para los tres escenarios considerando cada uno de los doce eventos seleccionados presentados en la Tabla 5-1 Una vez estimado el transporte para cada uno de los eventos se empleó el porcentaje de ocurrencia asociado a cada evento para estimar el transporte total a lo largo del perfil. A partir de ello, es posible integrar los resultados de las simulaciones y obtener un mapa de transporte de sedimentos para cada “caso”, representando el potencial de transporte neto por año como se muestra en la Figura 5-9.

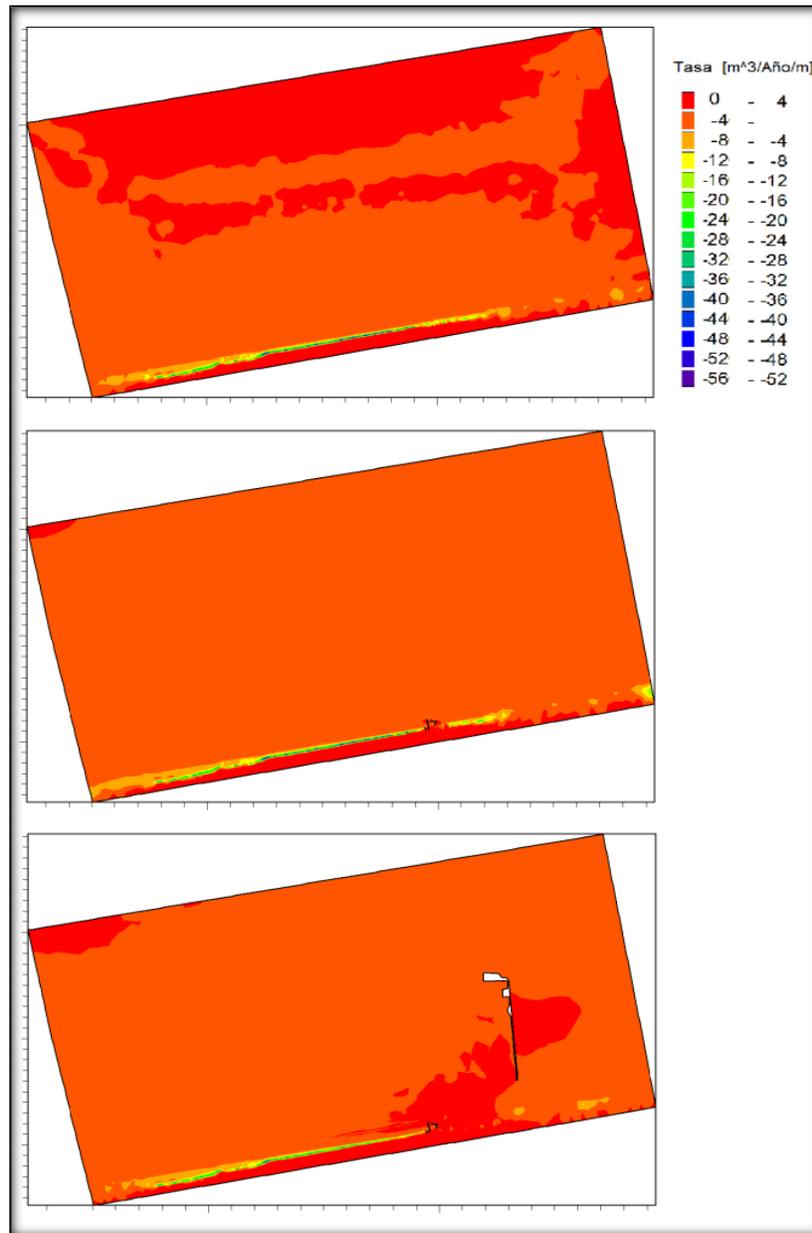


Figura 5-9 De arriba abajo: Se muestra el mapa de transporte (a) **Caso1** sin estructuras, (b) **Caso2** incluyendo el puerto de abrigo y (c) **Caso3** estado actual.)

De los mapas se transporte (ver Figura 5-9 De arriba abajo: Se muestra el mapa de transporte (a) **Caso1** sin estructuras, (b) **Caso2** incluyendo el puerto de abrigo y (c) **Caso3** estado actual.) Se extrajeron 131 perfiles de playa a partir del Puerto de Abrigo en dirección Oeste. La Figura 5-10 se presenta la ubicación de los perfiles, que comprenden desde la parte alta de la duna hasta la profundidad de 3 metros (profundidad activa de transporte de sedimentos en la zona) espaciados en 100metros.

Posteriormente, el transporte fue integrado a lo largo del perfil de playa. Esto se hizo con el fin de establecer el balance de sedimentos en el área de estudio bajo los distintos escenarios.

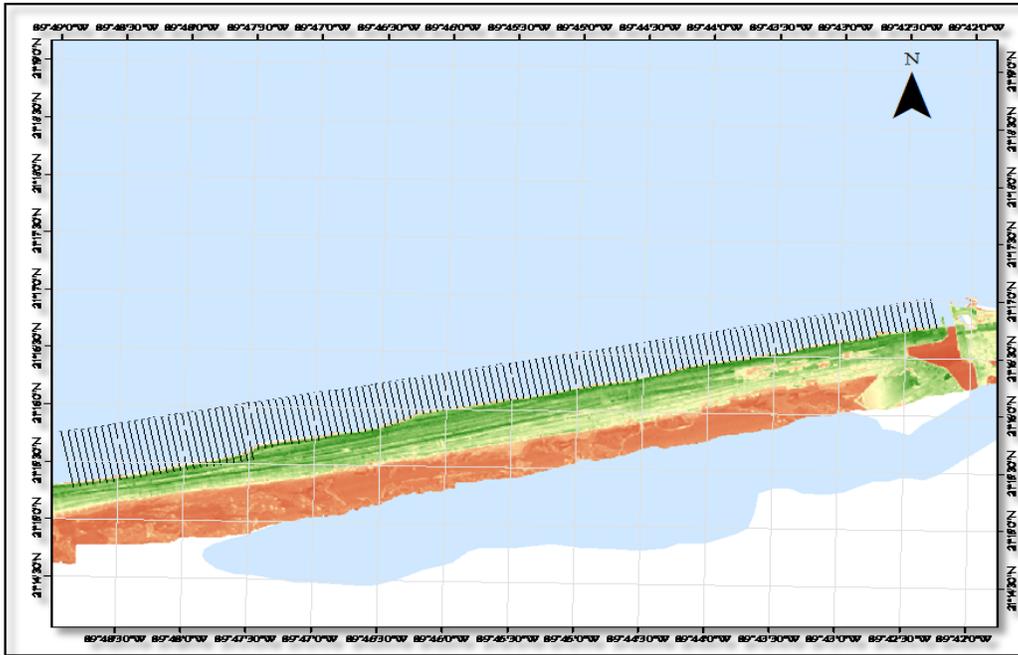


Figura 5-10 Ubicación de los 131 perfiles extraídos de los mapas de transporte de sedimentos para estimar las tasas de transporte.

La Figura 5-11 muestra la comparación de las tasas de transporte longitudinal anual (en miles) a lo largo de la línea de costa. El origen de la distancia en la figura está definido a partir del Puerto de Abrigo localizado 4 km al Oeste del Puerto de Altura (Muelle de Progreso). Es evidente que la presencia del Muelle de Progreso, produce un gradiente en el transporte de sedimentos a lo largo de 10 km (ver Figura 5-13). Esto induce erosión a lo largo de los primeros 6 km después del Puerto de Abrigo, lo cual está fuertemente correlacionado con las observaciones en la zona de estudio en la que se observaron zonas con problemas de erosión a 10 km del Muelle de Progreso. A partir de los 6 km las tasas de transporte mantienen un promedio similar en los tres casos. Por otro lado, el Puerto de Abrigo tiene una menor afectación (comparar línea azul y negra en la Figura 5-11) del orden de sólo 200 m.

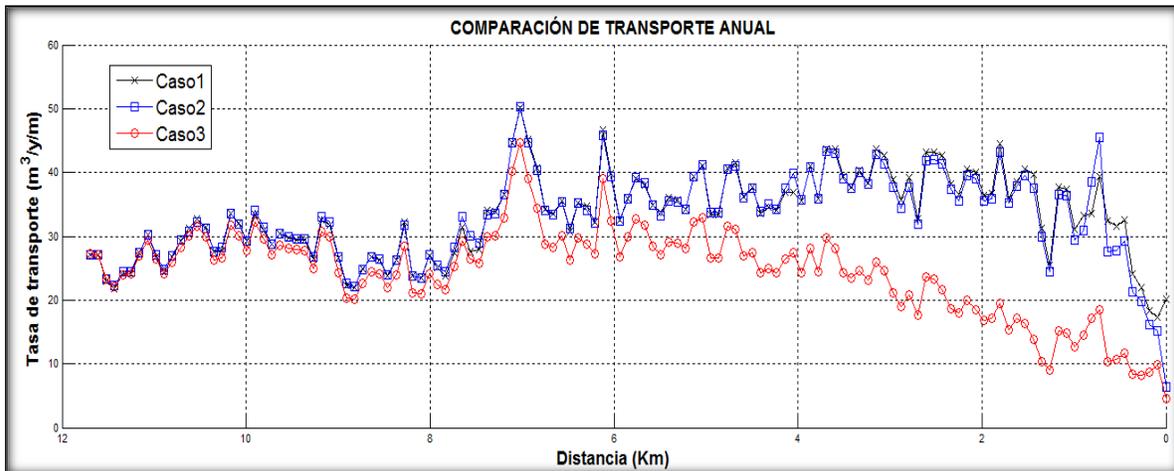


Figura 5-11 Comparación de las tasas de transporte longitudinal por año, en la cual se observa que la influencia del Puerto de Altura es de 6kms.

Por otro lado, se estimaron las tasas de transporte longitudinal y transversal para un Norte típico en la zona ( $H_s=2.8\text{m}$ ,  $T=9.76$  y  $\text{Dir}=347^\circ$ ). La Figura 5-12, muestra la comparación de las tasas del transporte longitudinal y la Figura 5-13 el transporte transversal, obtenidas en los tres diferentes escenarios. Es importante resaltar que en este caso el muelle de Progreso tiene un efecto importante en el transporte longitudinal. Por otro lado, el Puerto de Abrigo modifica el transporte longitudinal a lo largo de 1 km de costa bajo estas condiciones. Con relación al transporte transversal, no existen diferencias significantes a lo largo de la costa para los distintos casos. Lo anterior sugiere que durante tormentas asociadas con Nortes la erosión afecta de igual manera a la zona de estudio.

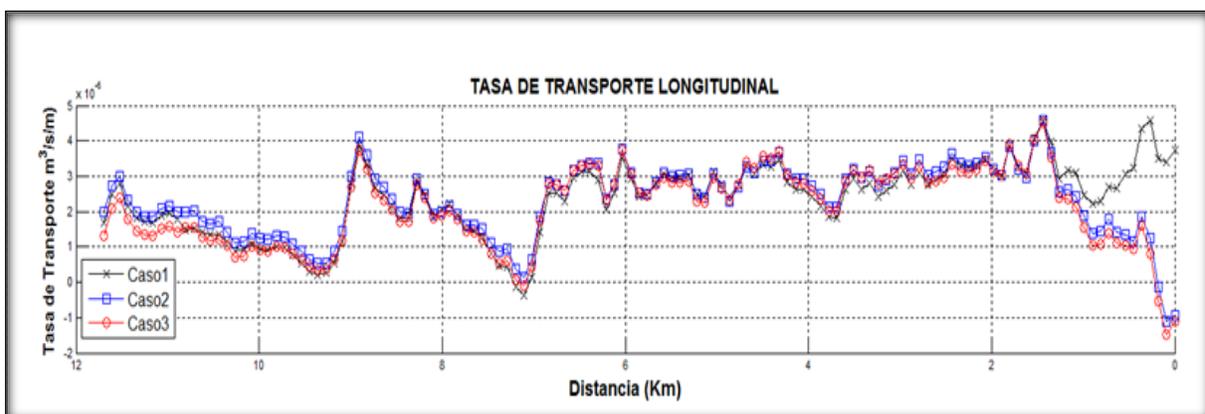


Figura 5-12 Comparación de la tendencia del transporte longitudinal en 131 perfiles a partir del puerto de Yucalpetén, a 4Km al Este de Puerto progreso para un Norte.

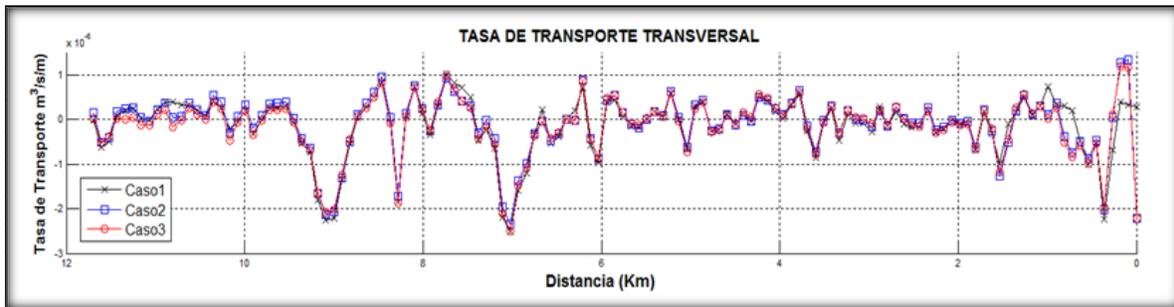


Figura 5-13 Comparación de la tendencia del transporte transversal en 131 perfiles a partir del puerto de Yucalpetén, a 4Km al Este de Puerto progreso para un Norte.

#### 5.4 CAMBIO DE VOLUMEN DEL SISTEMA LITORAL.

El cambio de volumen obtenido aplicando la ecuación 4-2 se presenta en forma gráfica en la Figura 5-14. Las tasas de transporte de los 131 perfiles se promediaron por sectores de 600m, partiendo de un volumen de entrada al sistema de 4.500m³/año de sedimento, con dirección Oeste, el cual aumenta conforme los perfiles son más distantes de las estructuras superando la zona de influencia de los 6km con respecto al puerto de abrigo donde el volumen de salida del sistema está alrededor de los 26.000 m³/año.

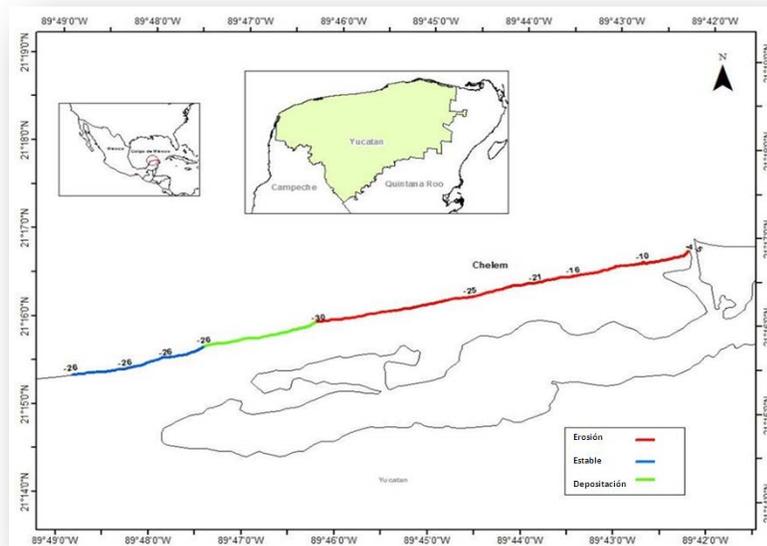


Figura 5-14 Cambio de volumen de las tasas de transporte longitudinal (en m³/año x 1000) en la zona de estudio, identificando las áreas de erosión, depositación y las zonas estables.

## 5.5 DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE EQUILIBRIO PARA LA COSTA DE CHELEM

El presente apartado presenta las rosas de oleaje a 3 m de profundidad en 15 puntos espaciados cada 500 m. En los primeros cuatro puntos se observa ausencia del oleaje con dirección Este y conforme se avanza al Oeste, alejándose de las estructuras, varían las condiciones de oleaje con presencia de oleaje con dirección NE y NOE.

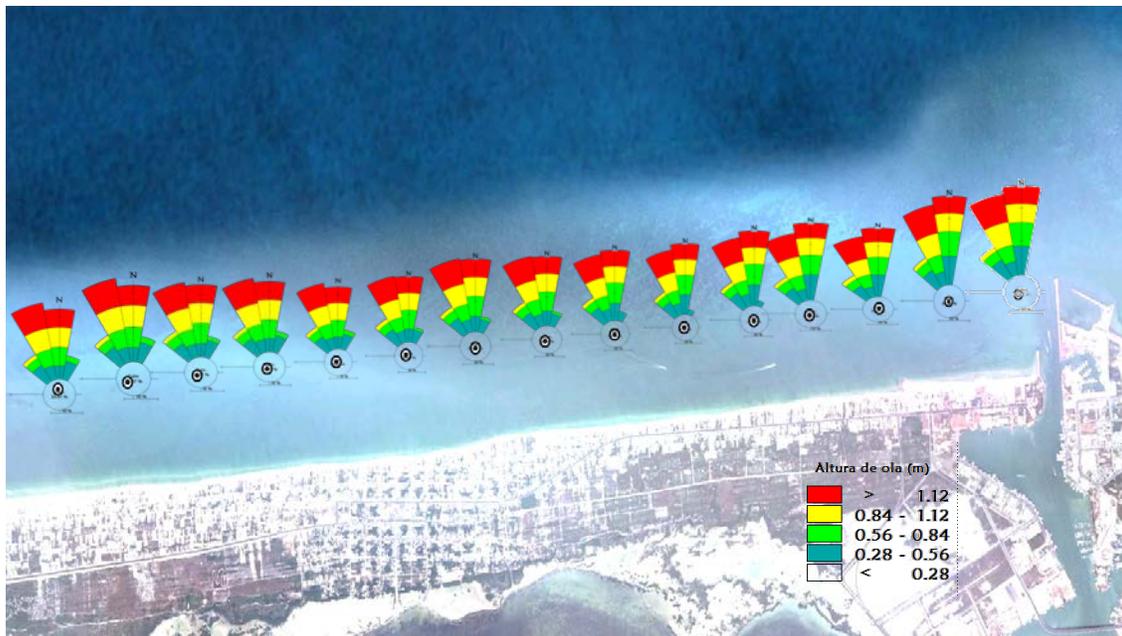


Figura 5-15 Rosas de oleaje propagado a 3m de la costa en la zona de estudio.

En la Figura 5-16 se muestran las curvas  $\alpha$ -Q (transporte vs orientación del perfil) en dos puntos localizados en la zona de estudio. Se observa que para la tendencia de orientación de la costa en Chelem de  $346^\circ$ , es decir entre  $-10^\circ$  y  $-15^\circ$ , se tiene una tasa de transporte aproximada a los  $5,000 \text{ m}^3/\text{año}$  para el punto P1 que es el más cercano al puerto de Progreso (4 km al Este). La orientación de equilibrio en este punto es de  $353^\circ$ . Por otro lado, en P9 el transporte en la orientación actual se incrementa y la orientación de equilibrio es cercana a los  $10^\circ$ . Esta información puede ser utilizada para el diseño de rellenos de playa en la zona con el fin de garantizar las menores de pérdidas de material a zonas aledañas.

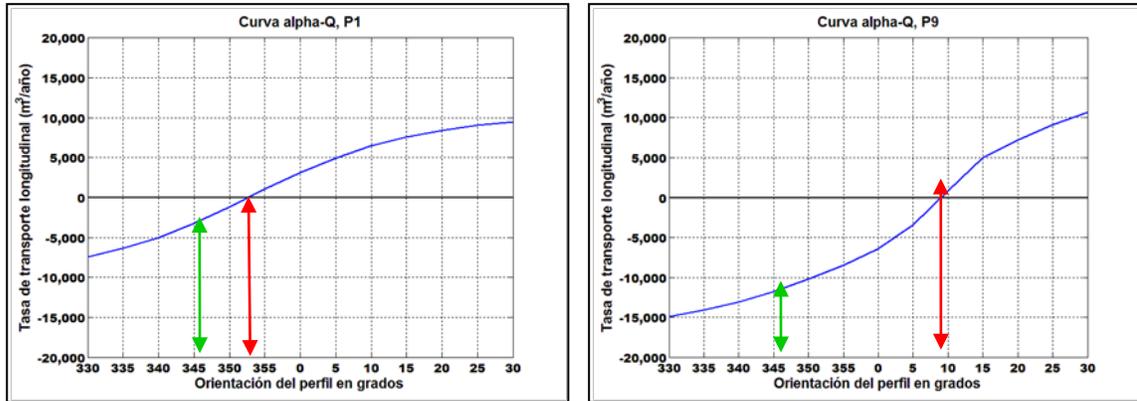


Figura 5-16 Comparación de las curvas alpha-Q, en los puntos 1 y 9, siendo el P1 el más cercano a las estructuras y a 4.5km está el punto 9. (En verde el ángulo de orientación de la playa, en rojo ángulo de equilibrio).



# **Capitulo 6**

## **Resultados y Recomendaciones**



# Capítulo 6

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

En el presente trabajo se presentó un estudio de la dinámica litoral en la playa de Chelem con el objetivo de identificar el origen del problema de la erosión. Debido a la escasa información de mediciones de oleaje y perfiles multi-anales en el área de estudio se optó por la implementación de un modelado numérico de oleaje, hidrodinámico, y de transporte de sedimentos. El uso de modelos numéricos permitió cuantificar los efectos de las diferentes estructuras costeras existentes en la zona en el transporte de sedimentos.

Con base en los resultados numéricos las principales conclusiones fueron las siguientes:

- La propagación de un re-análisis de 30 años propagados a la zona de estudio se estableció que en la zona prevalece el régimen de olas de baja energía del sector NE y que el oleaje de mayor contenido energético es proveniente del Norte.
- A partir de la implementación de un modelo unidireccional, se obtuvo la rosa de contribuciones al transporte en la que se evidencia que el oleaje de baja energía es el que tiene mayor repercusión sobre las tasas de transporte longitudinal. Adicionalmente, este análisis permitió hacer una selección de los 12 eventos más representativos para ser utilizados en la modelización bidimensional de hidrodinámica y transporte de sedimentos.
- A fin de evaluar el efecto de las estructuras en el sistema litoral de la zona, se realizaron modelaciones bidimensionales contemplando tres escenarios: el primero sin la presencia de estructuras, el segundo con el puerto de abrigo de Yucalpetén (estructura de protección más cercana a la zona de estudio) y el tercer escenario que corresponde a la situación actual incluyendo Yucalpetén y el puerto de altura de Progreso. El oleaje predominante en la zona es fuertemente transformado debido a la presencia del Muelle de Progreso debido a la difracción del oleaje en la estructura. Lo anterior tiene

implicaciones en la hidrodinámica y el transporte de sedimentos en la zona de estudio.

- El modelo hidrodinámico sugiere que las corrientes paralela a la costa en el área de estudio tienen una dirección de Este a Oeste y se incrementan sus valores conforme se alejan de las estructuras (hacia el Oeste) , generando gradientes importantes.
- Es evidente que la presencia del Muelle de Progreso, produce un gradiente en el transporte de sedimentos a lo largo de 10 km. Esto induce erosión a lo largo de los primeros 6 km después del Puerto de Abrigo, lo cual está fuertemente correlacionado con las observaciones en la zona de estudio en la que se observaron zonas con problemas de erosión a 10 km del Muelle de Progreso. A partir de los 6 km las tasas de transporte mantienen un promedio similar en los tres casos. El modelo de transporte de sedimentos permitió elaborar los mapas de transporte anual en la zona de estudio y estimar las tasas de transporte bajo la acción combinada de corrientes y oleaje. Se determinó una tendencia dominante hacia el Oeste con valores entre  $4.500\text{m}^3/\text{año}$  en y  $55.000\text{m}^3/\text{año}$ .
- Debido a la dirección de aproximación de los Nortes, el Muelle de Progreso no protege a la zona de estudio durante estos eventos. Por lo tanto, esta zona también se ve afectada por la erosión debida al transporte transversal durante oleaje extremo.
- El Muelle de Progreso disminuye la energía del oleaje de verano en la zona de estudio. Este oleaje es el encargado de recuperar la playa mediante el transporte transversal hacia la costa. Lo anterior implica que la playa de Chelem tiene menor capacidad de recuperar el material erosionado durante los Nortes que las playas aledañas.
- El mapa de transporte correspondiente al tercer escenario permitió extraer las tasas de transporte en 131 perfiles espaciados cada 100 m las cuales fueron promediadas por sectores de 600 m aproximadamente. En base al gradiente se estableció que la zona de estudio es una zona erosiva y que aquellas zonas a una distancia mayor a 10 km al Oeste permanecen estables. Lo anterior es consistente con las observaciones en el campo.
- Finalmente, se obtuvieron las curvas las curvas alpha-Q (transporte vs orientación del perfil) para 15 puntos en la zona de estudio espaciados 500 m. A partir de ellas se puede establecer el transporte longitudinal de sedimento en cada zona y el ángulo requerido para el equilibrio en esa misma zona. La diferencia entre la orientación actual y la orientación de equilibrio se incrementa al alejarse del muelle.

### Recomendaciones y futuras líneas de investigación

Este estudio permitió identificar las causas de la erosión en Chelem y las características de la dinámica litoral de la zona, lo que es una fuente de información para las acciones que permitan regenerar el estado de la playa. El presente trabajo sienta las bases para un estudio de alternativas para mitigar la erosión en la zona. A continuación se presentan algunas recomendaciones resultado de este trabajo:

- La orientación de la playa se encuentra alejada de la orientación de equilibrio debido a la alta persistencia del oleaje proveniente del NE. Por lo tanto, esta zona es altamente sensible a cualquier obra que interrumpa el transporte litoral.
- Dentro de las medidas que pueden ser adoptadas se deben contemplar en la medida de lo posible aquellas que sean las menos intrusivas con el medio como el dragado de material que es sedimentado en obras que retienen material cercanas a la zona de erosión teniendo en cuenta las características granulométricas de los sedimentos disponibles. Otra alternativa es la implementación de un bypass de arena de alrededor de 55,000 m<sup>3</sup>/año.

Siendo el puerto de altura de Progreso el que está influenciando la erosión en Chelem, es importante hacer la revisión de la prevalencia de las características de la zona permeable de la estructura conformada por arcos ya que fueron diseñados con el fin de no interrumpir el transporte longitudinal y sin el mantenimiento adecuado puede estar sedimentando material en las bases de los arcos.

- Las alternativas encaminadas al relleno de playa y colocación de estructuras de protección que permitan mantener el mismo, se deben evaluar en su efecto sobre la dinámica litoral, desempeño como protección costera y posibles afecciones a las zonas aledañas sin perder de vista que cualquier intervención en la costa genera un efecto desfavorable para la misma. El uso de espigones en la zona de estudio sólo se recomienda con la finalidad de servir como estructura de contención del relleno para que la playa se pueda orientar de acuerdo a la orientación de equilibrio estimada en las curvas Q-alpha.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Álvarez, E., Rubio, R., Ricalde H. (2007). Beach restoration with geotextil e tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico.

Appendini and Fischer, 1998; Fischer, 1985. (2012). Longshore sediment transport on the northern coast of the Yucatan Peninsula. Journal of coast Research .

Appendini, C., Oropeza, F., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., López, J. y Mendoza, E., 2012. Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: wind reanalyses assessment, Applied Ocean Research.

Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M. Energy Loss and Set-up Due to Breaking of Random Waves. Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, 1978, pp. 569-587.

Calero, P., Carta, J. y Padrón, J., 2012, Energía, [http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/energia\\_p/le\\_00portada.html](http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/energia_p/le_00portada.html) (consultado 10 de abril de 2012).

CINVESTAV, 2007. Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán (POETCY). Mérida, México: CINVESTAV.

ComunidadPortuariadeYucatán,<http://comunidadprogreso.blogspot.mx/>,(consultado 22 de marzo de 2012).

Consultoría en Ingeniería Marítima y Ambiental, 2011, Proyecto de instalación de tubos geotextiles para el control de erosión costera y protección de infraestructura de predios veraniegos, en Uaymitún, Yucatán, <http://www.axisingenieria.com.mx>, (consultado 10 de mayo de 2012).

Cuevas, J., 2009, Morphodynamics of carbonate beaches in the Yucatán Peninsula. Ciencias Marinas, 35, 307-320.

Dean, R., 1977, Equilibrium profiles, Us Atlantic Gulf and Coasts, Ocean Engineering, Delaware University, No. 12.

Dean, Robert G (2002). Beach nourishment, theory and practice. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. University of Florida, USA, pp. 390.

Dean, Robert G.; Dalrymple, Robert A. (1994). Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 345pp.

De los Santos Ramos, F.J. 2002. Transporte de sedimentos bajo condiciones de Sheet Flow. Trabajo de Investigación Tutelada. Grupode Puer-tos y Costas. Universidad de Granada. ISBN 84-688-0504-1.

DHI, (2011). LITDRIFT, Longshore Current and Littoral Drift. User Guide. Horsholm Denmark, 106 pp.

DHI, (2011). LITPACK, An Integrated Modelling System for Littoral Processes And Coastline Kinetics. Short Introduction and Tutorial. Horsholm Denmark, 64 pp.

DHI, (2011). Couple Model FM (MIKE 21/3 FM ). User Guide. Horsholm Denmark, 118 pp.

Durán R., 2011, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 490p.

El Ente Público Puertos del Estado EPPE, 1991, ROM 0.3-91. Oleaje. Anejo 1. Clima Marítimo en el litoral español. Puertos del Estado Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Eldeberky, Y. and Battjes, J.A., 1996. Spectral modeling of wave breaking: application to Boussinesq equations. *Journal of Geophysical Research*, 101(C1), 1253–1264.

Engineers, U. A. (2002). *Coastal Engineering Manual*. Washington, D.C.

Fischer, D.W., 1985. Shoreline erosion: a management framework. *Journal of Shoreline Management*, 1(1), 37–50.

Fredsoe, J., 1984. Turbulent boundary layer in wave-current motion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(8), 1103–1120.

Fredsoe, J.; Andersen, O.H., and Silberg, S., 1985. Distribution of suspended sediment in large waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111(6), 1041–1059.

García, A., Xool, M., Euán, J., Munguía, A. y Cervera, M., 2011, La costa de Yucatán en la perspectiva del desarrollo turístico, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 82 p.

Gobierno del Estado de Yucatán, 2012, [http://www.yucatan.gob.mx/procivy/clasificacion\\_ciclon.php](http://www.yucatan.gob.mx/procivy/clasificacion_ciclon.php), (consultado 25 de octubre de 2012).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2011, <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/yuc/geolo.cfm?c=444&e=31>, (consultado 13 de febrero de 2012).

Johnson, H.K. and Kofoed-Hansen, H., 2000. Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modeling. *Journal of Physical Oceanography*, 30(7), 1743–1756.

Komen, G.J., Cavaleri, L.; Donelan, M.; Hasselmann, K.; Hasselmann, S., and Janssen, P.A.E.M., 1994. *Dynamics and modelling of ocean waves*. UK, Cambridge University Press, 560 pp. Komen, G.J. and Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14(8), 1271–1285.

Komar, P.D (1998). *Beach processes and sedimentation*. Second edition. Prentice Hall. United States of America, 543 pp.

Lira, A (2011). *Evaluación de la respuesta de la playa de chelem, yucatán a obras de ingeniería costera*. Tesis de Licenciatura. Facultad de ingeniería, UADY.

López,E. (1973). Estudio geologic de la Península de Yucatán. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 25(1-3):23-73.

Lugo-Hubp, Aceves-Quesada y Espinoza Pereña, 1992, Rasgos Geomorfológicos Mayores de La Península de Yucatán. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Revista, volumen 10, número 10, número 2, 1992,p. 143-150.*

Mariño, I. y Enríquez, C., 2010, Estudios batimétricos y de calidad de agua de lagunas costeras de Yucatán, Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física, Departamento de Recursos del Mar, CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Reporte FOMIX-Yucatán 066254, 119 p.

Medina Villaverde, José María (2009). *Oscilaciones del mar*. Apuntes de oleaje e Ingeniería de Costas, Unidad 01. Universidad Europea de Madrid, pp. 7-33.

Meyer-Arendt, K.J., 1991. Tourism development on the north Yucatan coast: human response to shoreline erosion and hurricanes. *GeoJournal*, 23(4), 327–336.

Meyer-Arendt, K.J., 1993. Shoreline changes along the north Yucatan coast. In: Laska, S. and Puffer, A. (eds.), *Proceedings of the 8th Symposium on Coastal and Ocean Management (Coastal Zone 93).Coastlines of the World*. New Orleans: ASCE, pp. 103–117.

Meyer-Arendt, K.J., 2001. Recreational development and shoreline modification along the north coast of Yucatan, Mexico. *Tourism Geographies*, 3(1), 87–104.

Moreno, Eric I et al. (2004). Construcción del muelle de Progreso. *Ingeniería Revista Académica*, enero-abril, año/vol. 8. Número 001. Universidad Autónoma de Yucatán, pp. 61-66.

Pedrozo Acuña, A. (2011). Procesos costeros y morfodinámica de playas, Apuntes de clase. Serie docencia, Instituto de Ingeniería.

Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: Proceedings of the 16th International Coastal Engineering (Hamburg, Germany, ASCE), pp. 569–587.

Ruiz, D (2010) Zonificación de la Península de Yucatán a partir de un análisis sedimentológico. Tesis de Licenciatura, UNAM.

Sánchez-Arcilla A y C.M. Lemos . (1990). *Surf-Zone Hydrodynamics*. Ed. CIMNE,310p.

Santos, A.L. (1984); Aplicación de Principios Geoquímicos en la Hidrología Kárstica de la Península de Yucatán; Ingeniería Hidráulica en México; pp 21-29.

Secretaría de Comunicaciones y transportes, <http://www.sct.gob.mx/informacion-general/mapa-del-sitio/> (consultado noviembre 15 de 2011).

Sierra, J. P.,Lo Presti Blanco, Alicia. (marzo 1998). Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular. *Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua* , p. 34 Vol. 5 • N° 1.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente ,2010, Primer Foro de erosión Costera en Yucatán. <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/eventos-memorias/erosion-costera.php> (consultado 5 de octubre de 2012).

Shore Protection Manual, 1984, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, <http://es.scribd.com/doc/60908177/SPM-Vol-1> (consultado 20 de junio de 2012).

Universidad de Cantabria (UC) y Dirección General de Costas del Ministerio. (s.f.). Sistema de Modelado Costero (SMC).

U.S. Army Corps of Engineers (1984). Shore Protection Manual. Fourth Edition. Coastal Engineering Research Center. U.S. Government Printing Office Washington, D.C. Chapters 1 through 5.

U.S. Army Corps of Engineers, (2003). Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (Chapter 6).

Van der Meer, J. y Janssen, W., 1995, Wave run-up and wave overtopping at dikes, in: Wave forces on inclined and vertical wall structures, Kobayashi, N. and Demirbilek, Z., ASCE, 1–27 p.

Vergara, M., 2011, Zonas y procesos costeros, Instituto Politécnico Nacional, México, 362 p.