



Características y Modelación Numérica del Oleaje  
en Dos Regiones Costeras del Caribe Mexicano:  
Playa del Carmen y Akumal.

# T E S I S

que para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias  
(Oceanografía Física)

p r e s e n t a

Santiago Gajá Ferrer

Director de Tesis: Dr. Steven Peter Reed Czitrom Baus

Comité Tutorial: Dr. Rodolfo Silva Casarín  
Dr. Jorge Zavala Hidalgo  
Dr. Francisco Ocampo Torres  
Dr. Julio Candela Pérez

México, D.F. Junio de 2007



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.

*A las olas, energía en movimiento.  
A Lucas.*

Agradecimientos:

Al Dr. Steven Czitrom por su dirección, compañerismo, paciencia y confianza a lo largo de mi maestría, así como por aclarar mi visión en momentos difíciles.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín por enseñarme el valor de la autocrítica y como sacarle el mayor provecho al trabajo realizado.

Al Dr. Jorge Zavala Hidalgo por valorar mi trabajo y generar un lazo de confianza para trabajar en el futuro.

Al Dr. Francisco Ocampo Torres por invitarme a colaborar con su equipo de trabajo, por compartir su espacio y su amplio conocimiento acerca del oleaje y más que nada, por su paciencia y apoyo en la fase terminal de mi tesis.

Al M. en C. Iván Penié por ser el brazo derecho durante las salidas de campo y por sus sabios consejos.

Al Dr. Francisco Ruiz Rentería y al M. en C. Edgar Escalante Mancera por su compañerismo y apoyo otorgado durante mis salidas de campo en Playa del Carmen y Akumal.

A Luís Leal por apoyar incondicionalmente a los científicos con ganas de bucear; gracias por esas inmersiones inolvidables.

A la Dra. Guadalupe de la Lanza por el apoyo otorgado para la obtención de instrumentación y para las salidas de campo.

Al CONACYT por otorgar la beca de Maestría

A la UNAM y en especial al ICMYL por su formación académica y por seguir luchando para que la oceanología crezca tanto en nuestro país como en el mundo.

Al CICESE por abrirme nuevas puertas en el mundo de la investigación.

Al M. en C. Héctor García y al M. en C. Guillermo Díaz por su apoyo constante y los buenos ratos en el laboratorio de oleaje, gracias por su amistad.

A la M en C. Diana Juárez por sus consejos y su asesoría.

A Gabriela Almaráz, Chantal Ruiz y Guadalupe Godoy por su apoyo incondicional en los trámites administrativos.

Al Dr. Paúl Sánchez Navarro del CEA por brindar la logística para los muestreos en Akumal.

A todos mis cuates por los buenos momentos.

A mis padres, por su confianza inquebrantable, y por su gran interés en lo que hago. Les agradezco tanto.

A mis hermanos Lucía, Silvestre y Magrit por hacerme sentir este lazo irrompible de carnalismo y confianza, gracias, me hacen muy feliz.

Y por último a Citlalli, por cuidarme en un momento muy difícil durante la conclusión de mi tesis y más que nada, por caminar sin mirar atrás en esta aventura de la vida con el corazón lleno de alegría y confianza. Gracias amor!

## INDICE

<b>I. RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>II.1 VISIÓN GENERAL.....</b>	<b>2</b>
<b>II.2 PREDICCIÓN DE OLEAJE.....</b>	<b>5</b>
<i>II.2.1 Generalidades de la predicción de oleaje por medio de modelos de tercera generación:         Funcionamiento y Aplicaciones.....</i>	<i>5</i>
<i>II.2.2 Modelo SWAN: Teoría y Formulación.....</i>	<i>6</i>
<i>II.2.3 Antecedentes del modelo SWAN.....</i>	<i>10</i>
<b>III. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
<b>III.1 GENERALES.....</b>	<b>12</b>
<b>III.2 ESPECÍFICOS.....</b>	<b>12</b>
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>14</b>
<b>IV.1 INSTRUMENTACIÓN: FUNCIONAMIENTO DE LOS PERFILADORES ACÚSTICOS NORTEK     (MÉTODO PUV).....</b>	<b>14</b>
<b>IV.2 ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>16</b>
<b>IV.3 MEDICIONES <i>INSITU</i>.....</b>	<b>18</b>
<b>IV.3 DESCRIPCIÓN DEL HURACÁN WILMA.....</b>	<b>20</b>
<b>IV.4 ESTADÍSTICA DE OLEAJE.....</b>	<b>23</b>
<i>IV.4.1 Determinación de la malla batimétrica.....</i>	<i>25</i>
<i>IV.4.2 Determinación de las condiciones de frontera y descripción de la propagación del error         con fronteras laterales abiertas.....</i>	<i>26</i>
<i>IV.4.3 Determinación de la malla computacional.....</i>	<i>29</i>
<b>IV.6 CORRIENTES.....</b>	<b>29</b>
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>V.1 ESTADÍSTICA DE OLEAJE PARA PLAYA DEL CARMEN.....</b>	<b>30</b>
<i>V.1.1 Histogramas de mayor porcentaje de ocurrencia.....</i>	<i>30</i>
<i>V.1.2 Diagrama de cajas para la selección de eventos extremos.....</i>	<i>31</i>
<b>V.2 ESTADÍSTICA DE OLEAJE PARA AKUMAL.....</b>	<b>32</b>
<i>V.2.1 Histogramas de mayor porcentaje de ocurrencia.....</i>	<i>32</i>
<i>V.2.2 Diagrama de cajas para la selección de eventos extremos.....</i>	<i>34</i>
<i>V.2.3 Series de tiempo.....</i>	<i>35</i>
<b>V.2 BATIMETRÍAS.....</b>	<b>41</b>
<b>V.3 MODELACIÓN DE OLEAJE.....</b>	<b>43</b>
<i>V.3.1 Condiciones Frecuentes para Playa del Carmen.....</i>	<i>44</i>
<i>V.3.2 Condiciones Extremas para Playa del Carmen.....</i>	<i>46</i>
<i>V.3.3 Condiciones Frecuentes para Akumal.....</i>	<i>55</i>
<i>V.3.4 Condiciones Extremas para Akumal.....</i>	<i>58</i>
<i>V.3.5 Modelación del Huracán Wilma en la costa de Akumal.....</i>	<i>65</i>
<b>VI CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>VII NOTAS DE TESIS: ERRORES, SOLUCIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>69</b>
<b>VII.1 ANCLAJES.....</b>	<b>69</b>
<i>VII.1.1 Dimensiones y costos.....</i>	<i>71</i>
<b>VII.1.2 DESEMPEÑO DEL ANCLAJE.....</b>	<b>71</b>
<i>VII.1.2.1 Ventajas.....</i>	<i>71</i>
<i>VII.1.2.2 Desventajas.....</i>	<i>71</i>
<i>VII.1.2 Recuperación.....</i>	<i>72</i>
<b>VII.2 SERIES DE TIEMPO.....</b>	<b>74</b>
<b>VII.2 BATIMETRÍAS.....</b>	<b>75</b>
<b>VII.3 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....</b>	<b>75</b>
<i>VII.3.1 Artículo científico.....</i>	<i>75</i>

<i>VII.3.2 Información útil</i> .....	76
<b>VIII ANEXOS</b> .....	<b>77</b>
<b>VIII.1 ANEXO I.- FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA LA OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DIRECCIONAL DE OLEAJE, ALTURA, DIRECCIÓN Y PERIODO</b> .....	77
<b>VIII.2 ANEXO II.- DESCRIPCIÓN DE LOS COMANDOS UTILIZADOS EN LA PROGRAMACIÓN DEL SWAN Y SU APLICACIÓN EN DOS</b> .....	79
<i>VIII.2.1 Programa</i> .....	79
<i>VIII.2.2 Descripción de los comandos</i> .....	80
<b>VIII.3 ANEXO III.- ANIMACIÓN DE LA MODELACIÓN DEL HURACÁN WILMA (CD-ROM)</b> .....	82
<b>VIII.4 ANEXO V.- COMPLEMENTO: CORRIENTES OBSERVADAS POR EL ADCP EN LAS DOS LOCALIDADES</b> .....	83
<i>V.4.1 Playa del Carmen</i> .....	83
<i>V.4.1 Akumal</i> .....	84
<b>IX BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>86</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Presión dinámica por debajo de una ola. La presión hidrostática se ejerce constante a partir de la línea azul.....	14
Figura 2.- <i>Izq.</i> Localización general del área de estudio, los triángulos indican ciudades y las cruces instrumentos. <i>Der.</i> Posición de los instrumentos (ADCP) y distancia hacia la costa (90° con respecto al norte geográfico). De arriba hacia abajo: Playa del Carmen, Akumal. ....	16
Figura 3.- Arena típica de las playas del Mar Caribe (Akumal), formada en su mayoría por carbonatos de calcio. ....	17
Figura 4.- <i>Izq.</i> Perfilador Acústico Nortek de 0.6 Mhz. <i>Der.</i> Instalación del ADCP por medio de la técnica de fluidización de arena. Ambas fotografías son del instrumento localizado en Playa del Carmen.....	18
Figura 5.- <i>Der.</i> Trayectoria de la tormenta tropical Stan (rojo) y el huracán Wilma (amarillo) en donde se presenta la intensidad de viento en km/h (máximo de 280 km/hr). <i>Izq.</i> Acercamiento del recuadro A ( <i>izq.</i> ) para observar la posición de los instrumentos al paso del huracán (solamente se registraron datos en el instrumento de Akumal). Los datos de posición y velocidad del viento fueron obtenidos de Pasch <i>et al</i> (2006). ....	22
Figura 6.- Diagrama de cajas o <i>boxplot</i> en donde se identifican los datos extremos. Q <sub>1</sub> y Q <sub>3</sub> representan el primer y tercer cuartil y RIQ el rango intercuartil. En este caso la variable es la altura significativa. ....	24
Figura 7.- Histogramas de frecuencia para la altura significativa (en azul), periodo (en rojo) y rosa de oleaje de la dirección asociados al pico espectral para Playa del Carmen. ....	31
Figura 8.- Diagrama de cajas para la localización de los valores extremos o <i>outliers</i> (puntos azules) para la localidad de Playa del Carmen, la caja representa los tres cuartiles, en donde la línea roja (segundo cuartil) representa la mediana de los datos. La línea que se extiende desde el tercer cuartil hasta los datos extremos es llamada <i>whisker</i> . ....	32
Figura 9.- Histogramas de frecuencia para la altura significativa (en azul), periodo (en rojo) y rosa de oleaje de la dirección asociados al pico espectral para Akumal.....	33
Figura 10.- Diagrama de cajas para la localización de los valores extremos o <i>outliers</i> (puntos azules) para la localidad de Akumal, la caja representa los tres cuartiles, en donde la línea roja (segundo cuartil) representa la mediana de los datos. La línea que se extiende desde el tercer cuartil hasta los datos extremos es llamada <i>whisker</i> . ....	34
Figura 11.- Series de tiempo de los parámetros estadísticos del oleaje para Playa del Carmen. De arriba hacia abajo: Serie de tiempo del espectro de frecuencias, serie de tiempo de la altura significativa, la línea horizontal muestra el mínimo valor a partir del cual se consideró al oleaje extremo (bandas amarillas) y serie de tiempo del periodo asociado al pico espectral. ....	39
Figura 12.- Series de tiempo de los parámetros estadísticos del oleaje para Akumal. De arriba hacia abajo: Serie de tiempo del espectro de frecuencias, serie de tiempo de la altura significativa, la línea horizontal muestra el mínimo valor a partir del cual se consideró al oleaje extremo (bandas amarillas) y serie de tiempo del periodo asociado al pico espectral. ....	40
Figura 13.- Mapa de contornos representando la batimetría de Playa del Carmen, la escala de colores tiene unidades en metros. Los datos de batimetría fueron adquiridos por medio de una ecosonda GARMIN y por medio de un protocolo de transferencia de la NMEA ( <i>National Marine Electronics Association</i> ). ....	41



Figura 14.- Mapa de contornos representando la batimetría de Akumal, la escala de colores tiene unidades en metros. Los datos de batimetría fueron adquiridos por medio de una ecosonda GARMIN y por medio de un protocolo de transferencia de la NMEA ( <i>National Marine Electronics Association</i> ).....	42
Figura 15.- Rotación de la malla computacional con respecto a la isóbata de los 16 metros en Akumal y área de propagación de error.....	43
Figura 16.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. La línea negra delimita la zona de error. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m)...	45
Figura 17.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso extremo 1. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m). .....	48
Figura 18.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso extremo 2. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m). .....	50
Figura 19.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso extremo 3. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m). .....	52
Figura 20.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso extremo 4. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m). .....	54
Figura 21.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m). .....	57
Figura 22.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso extremo 1. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m). .....	60
Figura 23.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso extremo 2. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m). .....	61
Figura 24.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso extremo 3. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m). .....	62
Figura 25.- <i>Der.</i> Modelación de la Hs y $\theta$ asociada al pico espectral para el caso extremo 4. <i>Izq.</i> evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m). .....	64
Figura 26.- <i>Izq.</i> Anclaje de loseta de concreto antes de su instalación en Tulum. <i>Der.</i> Daños que sufrió el ADCP. ....	69
Figura 27.- Esquema del anclaje propuesto para instalaciones en suelos arenosos y mediciones bajo eventos meteorológicos extremos.....	70

Figura 28.- Esquema tridimensional del anclaje propuesto en diferentes vistas. ....	72
Figura 29.- Esquema que representa la simulación de la recuperación del anclaje por medio del sistema de inflado automático de boyas. ....	73
Figura 30.- Velocidad y dirección de las corrientes observadas en PC durante la primera y segunda campaña de medición. ....	83
Figura 31.-Velocidad y dirección de las corrientes observadas en PC durante la tercera y cuarta campaña de medición.....	84
Figura 32.-Velocidad y dirección de las corrientes observadas en AK durante la primera y segunda campaña de medición. ....	85
Figura 33.-Velocidad y dirección de las corrientes observadas en AK durante la tercera campaña de medición. ....	85

## LISTA DE TABLAS

Tabla I.-Periodos de medición para PC (arriba) y AK (abajo) para el 2005 y parte del 2006. Las semanas en las cuales se registraron datos de oleaje y corrientes se enumeran en las casillas correspondientes a cada mes.....	20
Tabla II.-Dimensiones de la malla batimétrica para Playa del Carmen. ....	26
Tabla III.-Dimensiones de la malla batimétrica para Akumal.....	26
Tabla IV.- Puntos de interés socioeconómico para Playa del Carmen.....	28
Tabla V.- Puntos de interés socioeconómico para Akumal.....	28
Tabla VI.-Ejemplo de dimensiones y rotación de la malla computacional para el caso de la zona costera de Akumal.....	43
Tabla VII.-Condiciones de frontera para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia observadas en PC.....	44
Tabla VIII.-Comparación de los valores de los parámetros de oleaje en los puntos de interés con respecto a la frontera para las condiciones de mayor porcentaje de ocurrencia. ....	45
Tabla IX.- Condiciones de frontera para los casos extremos observados en PC.....	46
Tabla X.- Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 1. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional. ....	48
Tabla XI.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 2. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional. ....	50
Tabla XII.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 3. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional. ....	52
Tabla XIII.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 4. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional. ....	54
Tabla XIV.- Condiciones de frontera para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia observados en AK.....	55
Tabla XV.- Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional.....	57
Tabla XVI.- Condiciones de frontera para los casos extremos observados en AK.....	58
Tabla XVII.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 1. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional. ....	60
Tabla XVIII.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 2. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional. ....	61
Tabla 19.- Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 3. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional. ....	62
Tabla XX.- Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 4. $X_p$ y $Y_p$ representan la distancia total en metros de la malla computacional. ....	64
Tabla XXI.-Evolución de la Hs en los puntos de interés en Akumal durante la presencia del huracán Wilma.....	66

Tabla XXII.- Dimensiones y costos del anclaje propuesto. .... 71

## I. Resumen

Se obtuvieron datos de oleaje en dos regiones del Caribe mexicano por medio de dos perfiladores acústicos (**ADCP**) instalados en los 10 metros de profundidad en Playa del Carmen (**PC**) y en los 16 metros de profundidad en Akumal (**AK**). Los datos de oleaje se analizaron estadísticamente para obtener la altura significativa ( $H_s$ ), el periodo del pico espectral ( $T_p$ ) y la dirección asociada al pico espectral ( $\theta_p$ ) de mayor porcentaje de ocurrencia. Los valores encontrados durante el periodo de medición fueron de  $H_s = 0.3$  m,  $T_p = 5.6$  s y  $\theta_p = 259^\circ$  para **PC** y de  $H_s = 0.34$  m,  $T_p = 6$  s y  $\theta_p = 300^\circ$  para **AK**. También se identificaron los parámetros estadísticos del oleaje generado por eventos extremos como la tormenta tropical Stan y el huracán Wilma en donde en este último se registro una altura significativa máxima de 7.58 m. A partir de esta información se generaron las condiciones iniciales y de frontera para simular la propagación del oleaje en aguas someras por medio de un modelo de tercera generación llamado SWAN (Simulating WAves Nearshore) con el cual se obtuvo la evolución del espectro direccional del oleaje así como la  $H_s$  y  $\theta_p$  en diferentes puntos de interés socioeconómico a lo largo de las costas de **PC** y **AK**. Las características del oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ ), se mantuvieron constantes en ambas localidades desde la frontera espectral hacia la costa, para valores de  $H_s$  (en la frontera espectral) de 0 a 1 m, debido a que existe poca disipación de energía por rompimiento con el fondo. Por otro lado para los casos extremos ( $H_s > 1.5$  m), las condiciones del oleaje se mantuvieron constantes desde la frontera espectral hasta la isóbata de los 3.3 m en **PC** y desde la frontera espectral hasta la isóbata de los 5 m en **AK**. Las zonas de mayor convergencia de  $H_s$  en **PC** se observaron en la isóbata de los 3.3 metros y entre los puntos de Playa Centro y el Muelle Fiscal. Las zonas de mayor convergencia de  $H_s$  en **AK** se observaron en la puntas norte y la punta sur de la bahía. En todos los casos se observó una transferencia de energía de frecuencias bajas (0.125 Hz) a frecuencias altas (0.25 Hz) debido a los efectos no lineales. Para los casos extremos, la  $H_s$  (en los puntos de interés socioeconómicos a lo largo de la costa) en **PC** disminuyó aproximadamente entre un 30% y un 40% con respecto al valor de  $H_s$  observado en la frontera; y de 67% a 80% para el caso de la Punta Norte y la Punta Sur de la Bahía de **AK**, indicando que el arrecife de **AK** funciona como un rompeolas natural el cual protege a la costa del oleaje.

## II. INTRODUCCIÓN

### II.1 VISIÓN GENERAL.

La constitución natural y la infraestructura socio-económica de las playas de México, y en especial las pertenecientes a la costa del Caribe Mexicano, se han visto envueltas en escenarios de constante riesgo debido a la presencia de eventos meteorológicos extremos, tales como los huracanes y las tormentas tropicales, y la consecuente generación y evolución de procesos físicos oceanográficos extremos, como oleaje de gran tamaño y corrientes intensas. El estudio y el monitoreo de la generación y propagación de dichos fenómenos oceánicos, son fundamentales para la conservación y el desarrollo productivo de las zonas costeras, en particular para el diseño de estructuras de protección, puertos y muelles, la operación de embarcaciones, la planeación de rutas marítimas, el monitoreo de arrecifes naturales la pesca comercial y deportes recreativos como el “surfing”.

En los últimos dos años, se ha observado un considerable aumento en la frecuencia y la intensidad de eventos atmosféricos extremos en nuestro país. El embate de tormentas tropicales y huracanes sobre nuestras costas ha generado cuantiosas pérdidas socio-económicas y ambientales, afectando principalmente a los estados del sur de México. Ejemplos de esto han sido el paso del huracán Emily (categoría 4, SSHS) el cual afectó principalmente a los estados de Yucatán y Tamaulipas, con un saldo de 4 personas fallecidas y pérdidas estimadas hasta por 26 millones de dólares; el huracán Stan (categoría 1, SSHS) perjudicando a los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas dejando un saldo de 51 personas fallecidas en este último estado y el más intenso, el Huracán Wilma (categoría 5, SSHS) dejando un millón de damnificados en el estado de Quintana Roo (Pasch *et al.*, 2006). Debido a estos eventos catastróficos, que ocurren repetidamente en las costas de nuestro país, es de vital importancia aplicar sistemas de medición y predicción del oleaje, especialmente para condiciones de eventos extremos, con el fin de comprender el fenómeno y eventualmente minimizar los impactos a la sociedad y al ambiente costero.

Las boyas superficiales y los perfiladores acústicos (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP, por sus siglas en inglés) anclados al fondo marino son sistemas comúnmente

utilizados para la medición de parámetros físicos en zonas costeras. Los perfiladores acústicos son una tecnología desarrollada en los últimos 20 años que ha proporcionado nuevas posibilidades de medición en el campo de la oceanografía física, permitiendo estudios más profundos en términos del análisis espectral. Estos instrumentos se utilizan cotidianamente para el monitoreo en programas climatológicos y en la administración de puertos (Soares *et al.*, 2002). Los datos de corrientes y oleaje del presente trabajo fueron recolectados como parte de un estudio acerca de la evaluación de la calidad ambiental y dinámica de la zona costera para la certificación Bandera Azul del Municipio Solidaridad del Caribe Mexicano (De la Lanza., 2005) y se han utilizado aquí para observar las características del oleaje bajo modelaciones numéricas en condiciones oceanográficas medias y extremas en dos localidades del Caribe mexicano.

El avance en los sistemas de cómputo y el desarrollo teórico dentro del campo de la oceanografía física en tiempos recientes han impulsado una importante evolución en los métodos de predicción y descripción del oleaje. Los primeros modelos numéricos identificados como modelos de primera generación, basados en el balance entre la entrada de energía debida al viento y la disipación de energía ocasionada por el rompimiento del oleaje en aguas profundas, han evolucionado a modelos de segunda (SG) y tercera generación (TG) a diferentes escalas en donde se considera un balance de energía más complejo entre: 1) la entrada de energía al campo de oleaje por la acción del viento; 2) la disipación de energía por medio del rompimiento del oleaje y 3) el intercambio de energía entre olas mediante interacciones no lineales. La diferencia entre los modelos de SG y TG se basa en la representación de las interacciones no lineales por parametrización y mediante la integral de Boltzman (Padilla *et al.*, 2004) desarrollada por Hasselmann (1962).

En este trabajo se describen los parámetros físicos del oleaje adquiridos en varias campañas de medición durante el 2005 y parte del 2006 utilizando perfiladores acústicos (**ADCP**) instalados en dos zonas de la región del Caribe Mexicano (**regCM**) en la Riviera Maya, identificadas como Playa del Carmen (**PC**) y Akumal (**AK**). A partir de las mediciones adquiridas se alimentó un modelo operacional de oleaje de resolución fina. Se buscó un modelo de tercera generación que fuera capaz de resolver oleaje en aguas poco profundas y con cambios inducidos por la fricción y el someramiento; así como resolver olas largas provocadas particularmente por el huracán Wilma (octubre de

2005), el cual fue registrado por el ADCP de AK. El modelo SWAN ver. 40.41 se ajustó a las características antes descritas, por lo que se usó para la modelación de los datos recopilados como parte del trabajo de la presente tesis. El modelo SWAN fue desarrollado por Holthuijsen (1999), Booij (1999) y Ris (1999) y ha sido validado numerosas veces para regiones costeras. SWAN es un modelo de dominio público y puede ser obtenido directamente del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Tecnológica de Delft, Holanda (<http://www.citg.tudelft.nl/>). Las características de este modelo se describen más adelante.

Dado que el Caribe Mexicano es frecuentemente impactado por huracanes (Lizano 2000, Lizano y Fernandez 1996) se estudian los productos del modelo bajo condiciones del oleaje provocado durante el huracán Wilma 2005 para la *regCM*. Esta información puede jugar un papel crucial en la planeación de las actividades marítimas costeras, en el desarrollo confiable de la protección e infraestructura costera y en la identificación de zonas vulnerables a oleaje extremo a lo largo de la franja costera.



## II.2 PREDICCIÓN DE OLEAJE.

### II.2.1 Generalidades de la predicción de oleaje por medio de modelos de tercera generación: Funcionamiento y Aplicaciones.

Los modelos de predicción de oleaje de tercera generación, de escala global y de meso-escala, tales como el WAM *Wave Model* (WAMDIG 1988, Komen *et al.*, 1994), y el WWIII *Wave Watch III* (Tolman, 1997) no suministran información detallada para el análisis del oleaje en aguas someras cercanas a la costa y con extensiones pequeñas de playa, tales como lo son el caso **PC** y **AK**. Por otro lado, el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft) puede simular oleaje en aguas profundas, intermedias y específicamente en aguas someras, además de poder manejar una resolución espacial detallada; alrededor de los  $0.01^\circ$ .

El oleaje en el modelo SWAN es representado por medio del espectro bidimensional de densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en vez del espectro de densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$ , ya que en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no (Whitham, 1974). La relación entre la densidad de acción y la densidad de energía es:  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ , donde  $\sigma$  es el dominio de la frecuencia y  $\theta$  el de la dirección.

La evolución de  $N(\sigma, \theta)$  se describe por medio de la ecuación de balance de acción (Hasselmann *et al.* 1973) la cual incluye la razón de cambio local de la densidad de acción en el tiempo, la propagación del oleaje en un espacio geográfico, la refracción y el cambio en la frecuencia relativa, ambos fenómenos provocados por variaciones en profundidad y en corrientes. Los términos fuente que se toman en cuenta dentro del modelo SWAN son (1) generación de oleaje por esfuerzo del viento y por forzamientos en la frontera, (2) disipación de la energía por el efecto de “crestas espumosas” o *white-capping*, debida al viento, (3) disipación de la energía inducida por la rompiente de la ola, (4) disipación de la energía por fricción con el fondo y redistribución de la energía sobre el espectro debida a interacciones no lineales entre las olas (Booij *et al.* 1999). En la siguiente sección se describe de manera detallada la formulación utilizada por el modelo.

Dentro de las aplicaciones más comunes del SWAN se encuentran: la instalación y el diseño de estructuras de mar adentro (*offshore*); la administración y el desarrollo dentro de las zonas costeras y los pronósticos de oleaje para la anticipación de eventos extremos.

## II.2.2 Modelo SWAN: Teoría y Formulación.

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, la evolución del espectro de oleaje está descrita por la ecuación de balance de acción para coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{ec. 1})$$

El término inicial izquierdo representa la razón de cambio de la densidad de acción en el tiempo, el segundo y el tercer término constituyen la propagación en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $C_x$  y  $C_y$  respectivamente). El cuarto término representa el cambio de la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y en las corrientes (con velocidad de propagación  $C_\sigma$  en el espacio  $\sigma$ ). El quinto y último término del lado izquierdo, se refiere a la refracción inducida por cambios en la profundidad y en las corrientes (con velocidad de propagación  $C_\theta$ , en el espacio  $\theta$ ). Del otro lado de la igualdad se tiene el término fuente en función de los procesos de generación, disipación e interacciones no lineales entre las olas. De los términos fuente anteriores, Battjes (1994) argumenta que la refracción, somerización, el rompimiento de olas y las interacciones no lineales entre triadas, son los procesos que dominan en aguas costeras poco profundas.

El suministro de energía por viento en el modelo SWAN comprende el mecanismo de resonancia (Phillips, 1957) y el mecanismo de retroalimentación (Miles, 1957). En donde el primero considera la generación de oleaje por fluctuaciones de presión provocados por vientos turbulentos sobre un mar de calma; y el segundo mecanismo parte de un oleaje existente en donde su aumento exponencial en el tiempo es provocado por la cizalladura vertical del viento en la capa superficial del océano. El término fuente

asociado a este mecanismo es comúnmente descrito como la sumatoria del crecimiento lineal y exponencial:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (\text{ec. 2})$$

La disipación de la energía del oleaje por medio del efecto de “crestas espumosas” o *white-capping* es controlado por la pendiente de la ola. La formulación del término fuente  $S_{ds}$  asociada a este mecanismo de disipación está basada en el modelo de Hasselmann (1974) y posteriormente adaptada por el grupo WAMDI (1998) :

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} (k / \bar{k}) E(\sigma, \theta) \quad (\text{ec. 3})$$

En donde el coeficiente  $\Gamma$  depende de la pendiente de la ola,  $k$  es el número de onda y  $\tilde{\sigma}$  y  $\bar{k}$  denotan las medias de la frecuencia y del número de onda respectivamente. El valor estimado del coeficiente  $\Gamma$  (Komen *et al.* 1984) se logró mediante una aproximación del balance de la energía del oleaje en un mar con condiciones completamente desarrolladas. De manera que este coeficiente depende del término fuente asociado al suministro de energía por viento.

En el modelo SWAN, la disipación de energía causada por el rompimiento del oleaje, inducido a su vez por los cambios en el fondo, se expresa de la siguiente manera:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = (D_{tot} / E_{tot}) E(\sigma, \theta) \quad (\text{ec. 4})$$

en donde  $E_{tot}$  es la energía total de la ola y  $D_{tot} < 0$  es la tasa de disipación de la energía total debido al rompimiento del oleaje de acuerdo a Battjes y Janssen (1978). El término  $D_{tot}$  depende de manera crítica en el parámetro de rotura  $\gamma = H_{max} / d$  (en donde  $H_{max}$  es la altura individual máxima posible en una profundidad local  $d$ ). El valor constante utilizado en el modelo es de  $\gamma = 0.73$ .

Otra disipación energética inducida por la profundidad e incluida en el modelo es la fricción con el fondo descrita por Bertotti y Cavaleri (1994):

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{prof} (\sigma^2 / g^2 \sinh^2(kd)) E(\sigma, \theta) \quad (\text{ec. 5})$$

En donde  $g$  es la gravedad y  $C_{prof}$  es el coeficiente de fricción con el fondo, el cual depende del valor cuadrático medio de la velocidad orbital del fluido en el fondo. Este proceso se considera dominante para suelos arenosos en plataformas continentales a diferencia de la percolación.

Las interacciones no lineales en aguas someras (triadas) transfieren energía de las bajas frecuencias hacia las altas frecuencias provocando cambios en el espectro de manera significativa y afectando los procesos de generación y disipación del oleaje (Beji y Battjes 1993). Abreu *et al*, (1992) realizaron la primera descripción aproximada de las triadas como término fuente respecto a la energía espectral. Sin embargo, obtuvieron una expresión restringida a olas no dispersivas en aguas someras, lo cual carece de sentido en muchas aplicaciones del oleaje. Posteriormente una mejor descripción fue desarrollada por Elderberky y Battjes (1995) quienes transformaron la parte de amplitud del modelo de Boussinesq de Madesen y Sorensen (1993) en una formulación de densidad de energía y parametrizaron la bi-fase de las olas con base en observaciones realizadas en laboratorio. Subsecuentemente se obtuvo una aproximación discreta de triadas (DTA) en donde se consideraron solamente las interacciones dominantes entre olas y se comprobaron con observaciones de olas aleatorias de longitudes largas, las cuales rompían sobre una barra sumergida (Beji y Battjes, 1993). Las triadas pueden presentarse entre olas con frecuencias y números de onda que cumplan con la siguiente relación:

$$f_1 \pm f_2 = f_3 \quad (\text{ec. 6})$$

$$k_1 \pm k_2 = k_3 \quad (\text{ec. 7})$$

donde  $f$  es la frecuencia escalar y  $k$  es el vector número de onda de la ola. Los factores que satisfacen las ecuaciones anteriores pueden interactuar de forma no lineal e intercambiar energía y momentum.

El esquema numérico de la propagación que se utiliza para resolver la ecuación de balance de acción (ec. 1) se basa en el método de diferencias finitas que se aplica en las cinco dimensiones: (a) geográfica ( $x,y$ ), (b) espectral ( $\sigma,\theta$ ) y (c) temporal ( $t$ ).

El tiempo es discretizado en un incremento constante  $\Delta t$  para la integración simultánea de la propagación y los términos fuente.

El espacio geográfico es discretizado dentro de una malla rectangular de resolución constante  $\Delta x$  y  $\Delta y$  en la dirección  $x$  y  $y$  respectivamente.

Dentro del modelo, el espectro es discretizado en una resolución direccional  $\Delta\theta$  y una resolución de la frecuencia relativa  $\Delta\sigma/\sigma$  (distribución logarítmica de la frecuencia), en donde ambas son constantes. El dominio de la frecuencia se define como el intervalo entre una frecuencia de corte baja e invariante,  $f_{min}$  (generalmente 0.04 Hz) y una frecuencia de corte alta,  $f_{max}$  (generalmente de 1 Hz).

La discretización de la ecuación de balance de acción es la siguiente:

$$\begin{aligned}
& \left[ \frac{N^{i_t, n} - N^{i_t-1, n}}{\Delta t} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta} + \left[ \frac{[c_x N]_{i_x} - [c_x N]_{i_x-1}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i, n} + \left[ \frac{[c_x N]_{i_x} - [c_x N]_{i_x-1}}{\Delta y} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i, n} + \\
& \left[ \frac{(1-\nu)[c_\sigma N]_{i_\sigma+1} + 2\nu[c_\sigma N]_{i_\sigma} - (1+\nu)[c_\sigma N]_{i_\sigma-1}}{2\Delta\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\theta}^{i, n} + \quad (\text{ec. 8}) \\
& \left[ \frac{(1-\nu)[c_\theta N]_{i_\theta+1} + 2\nu[c_\theta N]_{i_\theta} - (1+\nu)[c_\theta N]_{i_\theta-1}}{2\Delta\theta} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma}^{i, n} = \left[ \frac{S}{\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i, n*}
\end{aligned}$$

Donde  $i_t$  es el índice nivel-tiempo,  $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_\sigma$  e  $i_\theta$  son los contadores de malla y  $\Delta t$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta\sigma$  y  $\Delta\theta$  representan los incrementos en tiempo, espacio geográfico y espacio espectral respectivamente. Los pasos en la iteración computacional se indican en el término  $n$ . Los coeficientes  $\nu$  y  $\eta$  determinan el grado del esquema numérico en el espacio espectral, si es central o de forma *upwind*. Por lo tanto, estos coeficientes son los que controlan la difusión numérica tanto en la frecuencia como en la dirección.

### II.2.3 Antecedentes del modelo SWAN.

Ris *et al* (1999) realizaron validaciones del modelo SWAN en diferentes regiones costeras con batimetrías complejas. Encontraron que los resultados derivados por el modelo SWAN corresponden a los obtenidos por soluciones analíticas, estudios de laboratorio y observaciones en campo.

Debido a que el modelo SWAN tiene una gran flexibilidad y puede ser ajustado a diversos procesos físicos que influyen la propagación de las olas y que además pueden ser escogidas libremente por el usuario, Palmsten (2001) realizó diversas corridas del modelo SWAN para diferentes escenarios y procesos (*white-capping*, fricción con el fondo, triadas, formas del espectro en condiciones de frontera, velocidad y dirección del viento, etc) y comparó los resultados contra observaciones obtenidas en campo. Después de realizar cerca de 100 corridas sobre una batimetría de 15 a 40 metros de profundidad en la zona costera de Washington, E.U.A. y con variaciones de los parámetros antes mencionados; encontró que la altura significativa (Hs) era 2 % mayor en las zonas costeras cuando no existía una presencia de viento que cuando si lo había. También encontró un aumento del 7 % en la Hs cuando no incluía el efecto de rompimiento de crestas (*white-capping*) y de un 5% cuando no incluía la fricción con el fondo. Al variar las formas del espectro como condición de frontera, encontró una diferencia máxima de 3% en el cálculo de la Hs.

Monbaliu y Defevere (2000) calcularon la climatología de oleaje en una región costera de Bélgica por medio de la utilización del modelo SWAN e integrando espectros observados fuera de la costa como condición de frontera para realizar la propagación de oleaje hacia la costa y calcular el espectro direccional en aguas cercanas a la costa. Los resultados que obtuvieron por medio del modelo fueron muy similares a los datos medidos *insitu* por medio de perfiladores acústicos.

Wornom y Welsh (2000), por medio de una comparación entre el modelo WAM y SWAN para predicción de oleaje en las costas de Virginia y Carolina del Norte, E.U.A.; encontraron que el modelo SWAN arroja resultados más precisos que el modelo WAM en cuestiones de predicción de oleaje cercano a la costa.

Perelló Reina (2002) estudió la propagación del oleaje en la Bahía de Todos Santos, Ensenada, B.C., México usando el modelo SWAN. Comparó los resultados del modelo contra observaciones obtenidas con 3 perfiladores acústicos dentro de la Bahía, por medio de correlaciones y pruebas de hipótesis para parámetros como la altura significativa, el periodo y la dirección. Encontró que los valores de los parámetros de oleaje antes mencionados fueron similares en un 85 % a los observados *insitu*.

Dykes *et al* (2002) realizaron experimentos con el modelo SWAN en la zona norte del Golfo de México durante eventos notorios de *swell* en el mes de Enero de 2001. Utilizaron como condición de frontera la información espectral obtenida por la NDBC (*National Data Buoy Center*). Concluyeron que los datos obtenidos por el SWAN se asemejaron a los observados en campo, en donde la Hs tuvo una correlación de 0.87, el Tp de 0.74 y la  $\theta_p$  de 0.79.

Zhang *et al* (2003) utilizaron el modelo SWAN para predecir el oleaje entrante a las costas de Singapur (con una batimetría complicada y una configuración costera compleja) inducido por una tormenta tropical formada en el Mar del Sur de China. Encontraron que los valores numéricos obtenidos de altura significativa y periodo del modelo SWAN corresponden a los obtenidos por soluciones teóricas o formulaciones empíricas antes obtenidas. Por lo tanto, afirmaron que el modelo puede reproducir de una manera realista el oleaje inducido por tormentas tropicales.

### **III. OBJETIVOS**

#### **III.1 Generales.**

1) Determinar, por medio de simulaciones numéricas (SWAN), el espectro direccional, la altura significativa (Hs) y la dirección ( $\theta$ ) del oleaje en diversos puntos de interés socioeconómicos a lo largo de las costas de **PC** y **AK** para condiciones frecuentes y extremas (tormentas y huracán Wilma 2005).

2) Determinar zonas de convergencia de la Hs del oleaje a lo largo de las costas de **PC** y **AK**.

#### **III.2 Específicos.**

1) Describir los parámetros físicos del oleaje ( $E(\sigma, \theta)$ , Hs, Tp y  $\theta$ ) por medio de series de tiempo de las mediciones realizadas en **PC** y **AK**.

2) Identificar por medio de histogramas de frecuencia la Hs con mayor porcentaje de ocurrencia así como su periodo asociado al pico espectral (Tp) y  $\theta$  correspondientes para **PC** y **AK**.

3) Identificar de manera estadística los eventos extremos de la Hs (tormentas y huracanes) así como su Tp y  $\theta$  correspondientes.

4) Realizar la simulación numérica con forzamientos en la frontera este (condiciones de frontera), a partir de la Hs con mayor porcentaje de ocurrencia y su Tp y  $\theta$  correspondientes para los puntos de interés en la costa de **PC** y **AK**.

5) Realizar la simulación numérica con forzamientos en la frontera este (condiciones de frontera), a partir de la Hs observada en eventos extremos (tormentas y huracán Wilma) así como su Tp y  $\theta$  correspondientes para los puntos de interés en la costa de **PC** y **AK**.



6) Obtener la evolución de los parámetros físicos de oleaje ( $N(\sigma, \theta)$ ,  $H_s$  y  $\theta$ ) a partir de la frontera espectral (frontera este) hacia los puntos de interés a lo largo de la costa de **PC** y **AK**.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### IV.1 Instrumentación: funcionamiento de los perfiladores acústicos NORTEK (Método PUV).

Hoy día, las olas del mar son medidas comúnmente utilizando perfiladores acústicos (ADCP). Los parámetros estadísticos más importantes del oleaje ( $E(\sigma)$ ,  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ ) se obtienen por medio del método de transformación PUV (Kuik *et al.*, 1988, Herbers *et al.*, 1999). Este método de transformación utiliza algunas de las propiedades físicas principales del oleaje como lo es la presión dinámica asociada ( $P$ ) y sus velocidades orbitales ( $U$  y  $V$  para las direcciones  $x$  y  $y$ ; de ahí el nombre PUV). La señal de presión dinámica (Fig. 1) es utilizada para estimar el espectro de frecuencia. Este espectro de frecuencia es utilizado para estimar la altura y el periodo y por otro lado, la velocidad orbital de la ola provee un estimado de la dirección. Ya que estas estimaciones se encuentran basadas en la distribución de la energía de la ola y no son mediciones directas de la superficie, se consideran estimaciones inferidas y requieren especial atención durante el proceso de transformación. Las señales asociadas a la presión dinámica y a las velocidades orbitales son un tanto complejas debido al hecho de que son atenuadas con la profundidad. El comportamiento de la atenuación tiene que ver con el tamaño de la columna de agua y la longitud de onda de la ola, de manera que la señal se atenúa exponencialmente con la distancia desde la superficie con un factor que aumenta al disminuir la longitud de onda de la ola. En pocas palabras, se requiere instrumentación más precisa y sensible para medir las olas de periodos cortos desde profundidades mayores.

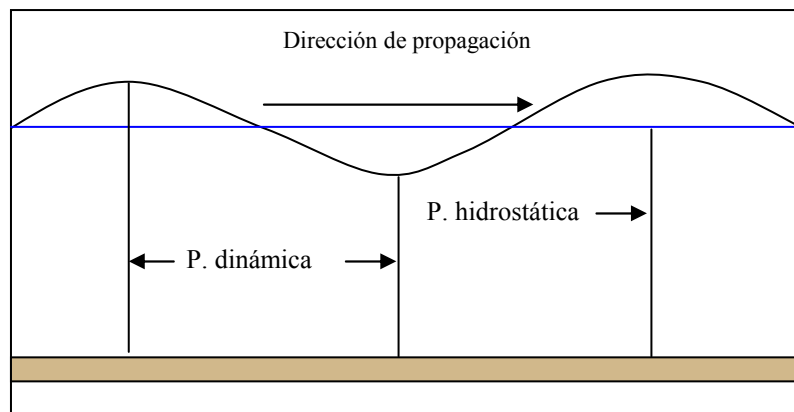


Figura 1.- Presión dinámica por debajo de una ola. La presión hidrostática se ejerce constante a partir de la línea azul.

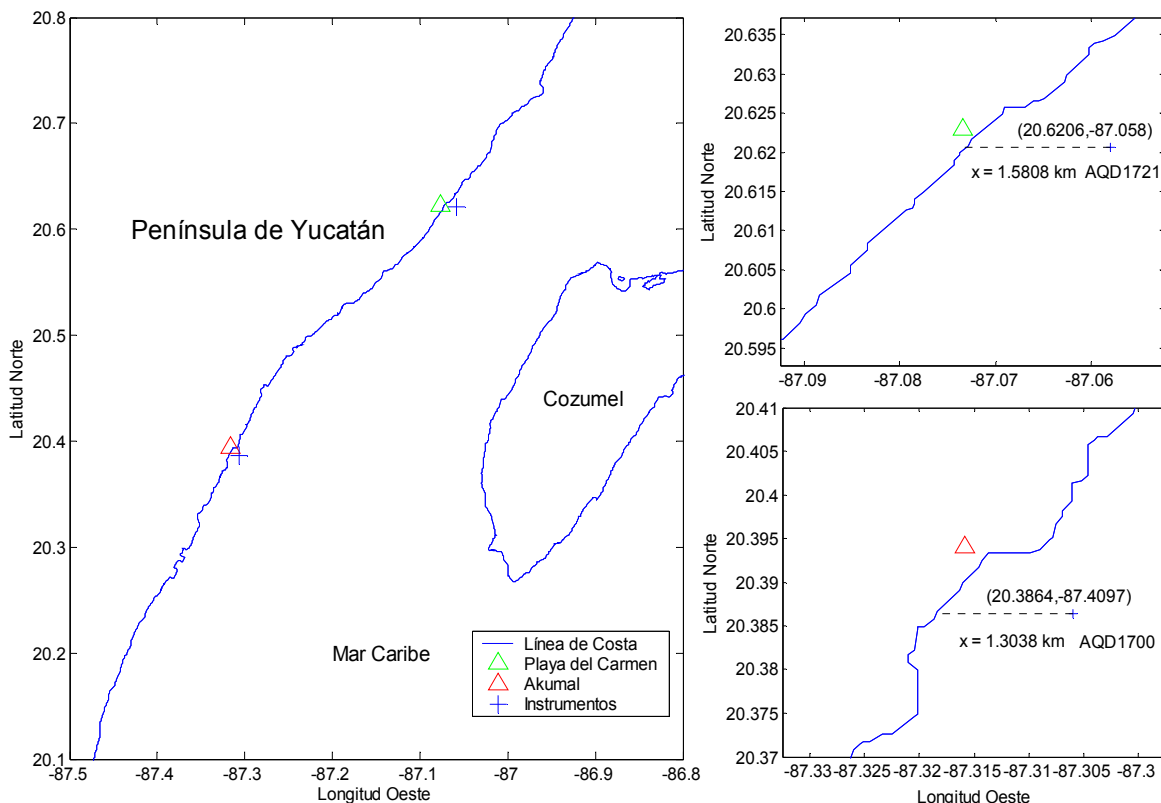
El método de medición PUV está basado en la teoría lineal del oleaje; de forma que algunas situaciones erróneas en la medición surgen cuando la teoría lineal pierde validez y los efectos de segundo orden toman un puesto significativo. Estas situaciones ocurren generalmente cuando se intenta medir el oleaje en aguas muy poco profundas, en donde olas con longitudes de onda muy grandes en aguas someras se vuelven solitarias presentando un perfil no lineal el cual no puede ser integrado de forma correcta en la transformación PUV.

En el presente trabajo, la transformación PUV se realizó de forma automática mediante el *software WaveExtract v1.11* proporcionado por la compañía NORTEK. A continuación se mencionan los pasos del proceso PUV utilizados de forma automática por el *software* mencionado:

- 1) Transformada rápida de Fourier (FFT).-Transformación del dominio de tiempo al dominio de la frecuencia de las series de tiempo de la presión y las velocidades orbitales.
- 2) Cálculo de los auto-espectros y los espectros cruzados para la presión y las dos velocidades (Kuik *et al.*, 1988).
- 3) Aplicación de la función de transferencia (Anexo I) a los auto-espectros con el fin de obtener los espectros de energía para la superficie libre (Herbers *et al.*, 1999).
- 4) Aplicación del control de calidad a los espectros (determinando una frecuencia de corte y extrapolándola).
- 5) Estimación de los parámetros estadísticos de  $H_s$  y  $T_p$  usando los momentos espectrales (Anexo I).
- 6) Cálculo del primer par de coeficientes de Fourier (Anexo I) para la obtención de la dirección media  $\theta_M$  (Herbers *et al.*, 1999).

## IV.2 Área de Estudio.

Se escogieron dos zonas costeras representativas de la Riviera Maya, localizadas en la parte norte del estado de Quintana Roo, en la costa este de la Península de Yucatán frente al Mar Caribe (Fig. 2). Las dos localidades se identifican como Playa del Carmen (PC) y Akumal (AK). Las dos playas son de arena muy fina y clara (Fig. 3) y se encuentran sobre una planicie de origen marino, cuyos suelos están formados por carbonato autigénico y anhidritas procedentes del mioceno y el plioceno (López-Ramos, 1974). Mientras que la plataforma continental se originó en el Holoceno debido a la transgresión postglacial. Dicha plataforma acorta su extensión de norte a sur y presenta terrazas que posiblemente sean antiguas líneas de costa (Castro, 1976). Playa del Carmen es la cabecera del municipio de Solidaridad en Quintana Roo. Esta ciudad se encuentra ubicada geográficamente al  $20.62^\circ$  de latitud norte y  $87.07^\circ$  de longitud oeste. Se encuentra a una altitud media de 15 metros sobre el nivel del mar (msnm) y cuenta con una extensa población de 100,383 habitantes y con la tasa de crecimiento más alta del mundo (21% anual).



**Figura 2.- Izq.** Localización general del área de estudio, los triángulos indican ciudades y las cruces instrumentos. **Der.** Posición de los instrumentos (ADCP) y distancia hacia la costa ( $90^\circ$  con respecto al norte geográfico). De arriba hacia abajo: Playa del Carmen, Akumal.



**Figura 3.- Arena típica de las playas del Mar Caribe (Akumal), formada en su mayoría por carbonatos de calcio.**

Akumal, a 37 kilómetros al sur de Playa del Carmen, es una delegación perteneciente al municipio de Solidaridad, su localización geográfica se encuentra en los 20.4° de latitud norte y 87.3° de longitud oeste. Su altitud media es de 5 m.s.n.m y contiene una bahía somera y protegida, con una playa tranquila. Contiene un segmento importante de la barrera arrecifal Mesoamericana (segunda más grande en el mundo). Cuenta con una población de 1,198 habitantes (INEGI, 2005).

El clima presente en la región es tropical con dos temporadas dominantes las cuales se encuentran marcadas por los patrones de viento y temperatura. El invierno comienza en Noviembre y prevalece hasta los meses de Marzo y Abril. La temperatura media durante todo el año se encuentra entre los 24 y 25 °C; sin embargo, la temperatura mínima diurna puede bajar considerablemente durante las temporadas de los frentes fríos comúnmente llamados “Nortes”. Desde el mes de Octubre hasta el mes de Febrero se presentan vientos dominantes del noreste, con algunas variaciones durante los frentes fríos en donde provienen generalmente del norte. En el verano se presentan vientos dominantes del este con velocidades de 3-9 m/s (Merino-Ibarra *et al.*, 1999).

### IV.3 Mediciones *In situ*.

Se realizaron mediciones de oleaje y corrientes en aguas someras en las 2 localidades mencionadas, con la ayuda de dos perfiladores acústicos NORTEK de 0.6 Mhz de frecuencia. Los ADCP's fueron instalados a 10 y 16 metros de profundidad en PC y AK respectivamente (Fig. 4). Las corrientes se midieron en celdas con tamaño de 1 metro, de forma que el aparato en PC se configuró a 10 celdas y en AK a 14 celdas. Los promedios fueron obtenidos a partir de datos capturados durante los primeros 60 segundos de muestreo en intervalos de una hora. La altura del aparato fue de 80 centímetros sobre el fondo. La primera celda comenzó 50 centímetros sobre la cabeza del ADCP y continuó hacia la superficie la cantidad exacta de celdas escogidas para cada localidad. Para el caso de la medición de oleaje, las velocidades orbitales en la dirección este ( $u$ ) y norte ( $v$ ) y su presión dinámica asociada ( $p$ ), fueron obtenidas cada hora con un total de 1024 muestras a un intervalo de muestreo de 2 Hz. Las velocidades orbitales fueron medidas en una celda de tamaño de 2 metros.



Figura 4.- *Izq.* Perfilador Acústico Nortek de 0.6 Mhz. *Der.* Instalación del ADCP por medio de la técnica de fluidización de arena. Ambas fotografías son del instrumento localizado en Playa del Carmen.

El instrumento localizado en **PC** empezó a operar el 16 de Abril del 2005 y el de **AK** el 15 de Abril del 2005. Dejaron de funcionar (por falta de baterías) el 26 de Junio del 2005 y el 25 de Junio del 2005 respectivamente. A principios de agosto se llevó a cabo un viaje de trabajo de campo para recuperar los instrumentos, darles servicio y re-colocarlos dentro del programa de muestreo de corrientes y oleaje. Este viaje, originalmente planeado a mediados del mes de Julio, tuvo que ser pospuesto por la entrada del huracán Emily. Afortunadamente los instrumentos pudieron ser rescatados sin daño, recuperando la información registrada y volviéndolos a instalar el 3 de Agosto del 2005. Esta visita se aprovechó para reforzar los anclajes con peso muerto, cadenas y boyas sub-superficiales para el caso de eventos como el huracán Emily. En este periodo de medición las baterías tuvieron una duración poco mayor a un mes, de manera que se recuperaron los instrumentos el 9 y 10 de Septiembre para la localidad de **PC** y **AK**. Durante esa semana se realizó el servicio acostumbrado y se instalaron nuevamente el 22 y 23 de Septiembre en **AK** y **PC**. La época de huracanes se hacía presente, a principios de Octubre y a varios cientos de kilómetros al sur se presentó la tormenta tropical Stan, que fue registrada por los instrumentos de **PC** y **AK** sin ser afectados. Poco tiempo después durante la segunda semana de Octubre se recibió un comunicado de la aproximación de la tormenta tropical Wilma. Para el 18 de Octubre la tormenta tropical Wilma se había convertido en huracán (categoría 5 en base a la escala Saffir-Simpson) con vientos hasta de 150 nudos por hora (Pasch *et al.*, 2006); a partir de este momento se tomo la decisión de recuperar los instrumentos. Sin embargo, solo el instrumento de **PC** pudo ser rescatado y el de **AK** quedó a merced del embate del huracán Wilma. Después del evento catastrófico, se emprendió un viaje en búsqueda del instrumento en **AK** sin obtener buenos resultados. Un mes después, se recibió una llamada del Centro Ecológico de Akumal (CEA) en donde se informó que buzos de la localidad hallaron el instrumento con daños mínimos y fue enviado al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología estación Pto. Morelos en donde se pudo rescatar la información registrada antes y durante el huracán Wilma. Esta información es parte medular del presente trabajo en cuanto a la modelación numérica del oleaje para condiciones extremas; sin embargo, solo se cuenta con información para la localidad de **AK**. Por último, debido a los daños que sufrió el instrumento de **AK**, solo se reinstaló el instrumento de **PC** el 16 de Febrero del 2006 y se recupero el 17 de Mayo del mismo año (Tabla I).

**Tabla I.-Periodos de medición para PC (arriba) y AK (abajo) para el 2005 y parte del 2006. Las semanas en las cuales se registraron datos de oleaje y corrientes se enumeran en las casillas correspondientes a cada mes.**

Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
2 3 4	1 2 3 4	1 2		1 2 3 4	1 4	1 2				2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
2 3 4	1 2 3 4	1 2		1 2 3 4	1 4	1 2 3						

La base de datos analizada en el presente trabajo consta de un total de 8677 datos de oleaje y corrientes, de los cuales 5328 corresponden a la localidad de **PC** y 3349 a **AK**. Los aparatos fueron programados para medir cada hora.

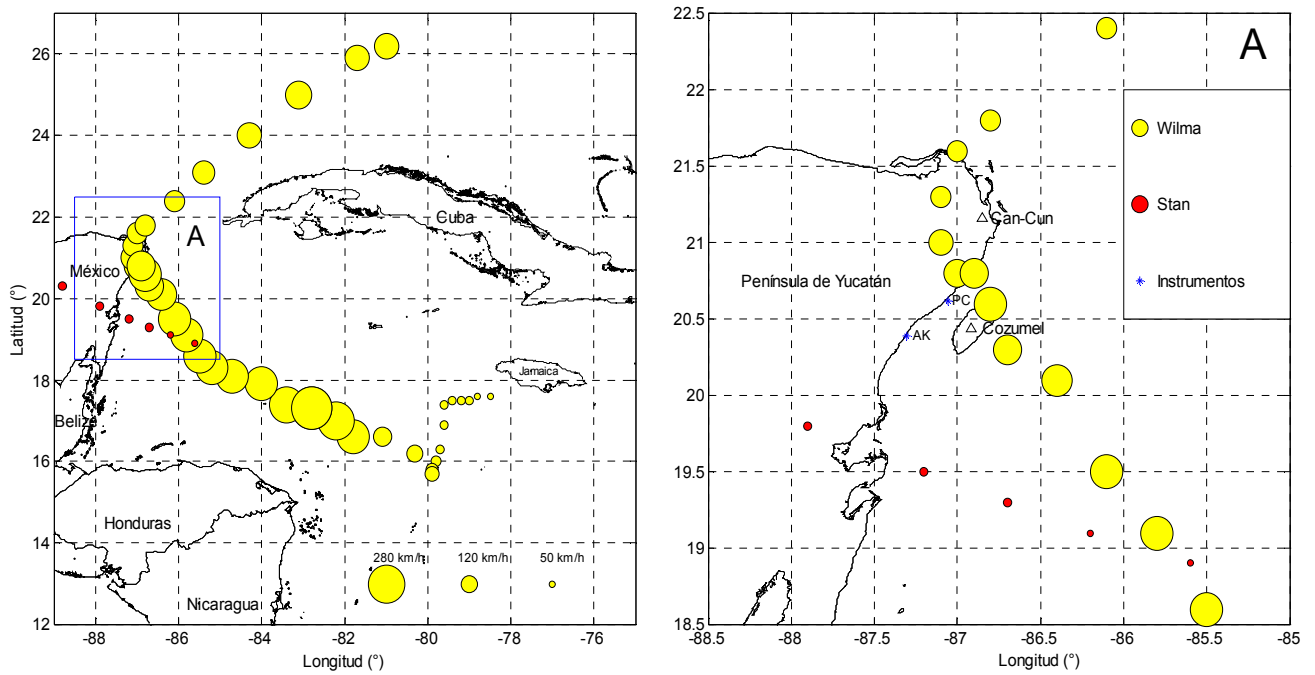
### **IV.3 Descripción del huracán Wilma.**

La siguiente descripción del huracán Wilma es un resumen generado a partir de las descripciones realizadas por Pasch *et al* (2006) pertenecientes a la NHC (*National Hurricane Center*) de la NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*) y de los comunicados diarios de la CFE (Comisión Federal de Electricidad, 2006). Solo se describe el comienzo y posteriormente los días de mayor importancia para el área de estudio. Todas las horas se encuentran en GMT - 6. La figura 4 representa la trayectoria y la intensidad del viento del Huracán Wilma (Fig. 5).

El 15 de octubre se generó la depresión tropical No. 24 del Océano Atlántico, Golfo de México y Mar Caribe ocasionada por un sistema de baja presión localizado al suroeste de las costas de Jamaica. Esta depresión se encontraba el 16 de Octubre a una distancia de 870 km al este de la ciudad de Cancún, Q. Roo, México y llevaba un desplazamiento lento con dirección noroeste. A las 04:00 horas, esta depresión tropical se transformó en la tormenta tropical “Wilma”, a una distancia de 850 kilómetros al sureste de la ciudad de Cancún, con vientos máximos sostenidos y cercanos a su centro de 65 km/h. Durante el resto de este día, la tormenta tropical Wilma tuvo un desplazamiento lento de aproximadamente 8 km/h con dirección noroeste (normalmente un ciclón tropical se desplaza entre 15 a 20 km/h) debido a la presencia de un sistema de alta presión sobre el noreste de México. A las 10:00 horas, se intensificó a huracán categoría 1 con respecto a la escala Saffir-Simpson a una distancia de 835 km al sureste de Cancún con vientos máximos sostenidos cerca de su centro de 120 km/h y rachas de 150 km/h. A las 19:00 horas alcanzó la categoría de huracán escala 2 a una distancia aproximada de 720 km al



sureste de Cancún y vientos de 155 km/h. Rápidamente, ese mismo día cerca de las 23:00 horas Wilma alcanzó la categoría 4 con vientos máximos de 240 km/hr y aproximadamente a 690 km al sureste de Cancún, convirtiéndose en una gran amenaza para la Península de Yucatán. Cuatro horas después y a una distancia de 630 km de Cancún, Wilma se intensificó a categoría 5 (máxima) con vientos máximos sostenidos de 280 km/h. La periferia del huracán en estos momentos empezaba a afectar la zona costera del estado de Quintana Roo. El 19 de Octubre mantuvo las mismas condiciones hasta que el 21 de Octubre a las 07:00 horas, Wilma se localizaba muy cerca de la Isla de Cozumel y aproximadamente a 125 km al sureste de Cancún, con vientos máximos de 230 km/h y rachas de 295 km/h. Pocas horas después, el ojo de 45 km de diámetro del intenso huracán Wilma se localizaba exactamente sobre la isla de Cozumel, Q. Roo y a 58 km al sureste de Cancún con vientos máximos de 220 km/h y rachas de 270 km/h. A las 19:00 horas la parte noroeste del ojo comenzó a afectar la parte norte de la zona Costera de Q. Roo y 3 horas después se encontraba en la localidad de Pto Morelos con vientos máximos de 220 km/h y rachas de 270 km/h y continuó su desplazamiento lento sobre tierra en dirección noroeste de la Península de Yucatán a una velocidad aproximada de 6 km/h. El 22 de Octubre a las 01:00 horas, el huracán Wilma se localizaba sobre Punta Maroma y a 55 km al suroeste de Cancún Q. Roo con vientos de 215 km/h; 3 horas después perdió intensidad hasta convertirse en huracán categoría 3 con vientos sostenidos de 205 km/h y pasó a 25 km al oeste de la ciudad de Cancún como huracán categoría 2 con vientos sostenidos de 175 km/h. A las 19:00 horas ya se encontraba sobre las aguas del Golfo de México con vientos máximos de 160 km/h y gradualmente se empezó a alejar de la Península de Yucatán, sin embargo su periferia continuaba afectando la parte noroeste de la misma.



**Figura 5.- Der. Trayectoria de la tormenta tropical Stan (rojo) y el huracán Wilma (amarillo) en donde se presenta la intensidad de viento en km/h (máximo de 280 km/hr). Izq. Acercamiento del recuadro A (izq.) para observar la posición de los instrumentos al paso del huracán (solamente se registraron datos en el instrumento de Akumal). Los datos de posición y velocidad del viento fueron obtenidos de Pasch *et al* (2006).**

#### IV.4 Estadística de Oleaje.

Se realizaron histogramas de frecuencia para conocer las alturas significantes y los periodos típicos (más frecuentes) de cada región, así como una rosa direccional del oleaje a partir de la dirección asociada al pico espectral para mostrar la propagación predominante del oleaje en ambas localidades para todo el periodo de muestreo. Debido a que la mayor concentración de alturas significantes en la región es menor a 1 m, se utilizó un intervalo de clase de 0.1 m.

Con la finalidad de obtener un parámetro estadístico para identificar el intervalo de alturas significantes extremas (tormentas y huracanes), se utilizó el método de obtención de valores extremos o comúnmente llamados *outliers*. En términos estadísticos un *outlier* es una medición atípica o anómala que no suele seguir la distribución del resto de los datos obtenidos por medio de una representación de la distribución (Moore y McCabe 1999). En términos de mediciones de oleaje, un *outlier* puede representar una ola extrema causada por un huracán o un evento de tormenta; más no necesariamente una medición errónea. Una manera de obtener estos datos extremos en una distribución de mediciones de oleaje, es por medio de la representación de los datos a través de cuartiles (tres valores que dividen al conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentualmente iguales). De forma que la adición del tercer cuartil (75% de los datos) más cierto múltiplo del rango intercuartil (distancia que existe entre el primer y tercer cuartil) nos podría indicar el valor mínimo a partir del cual se consideran los datos extremos. Comúnmente en la estadística, existen 2 tipos de *outliers*, los *outliers* medios y los *outliers* lejanos. Un *outlier* medio es aquel que se puede representar por medio de la siguiente ecuación:

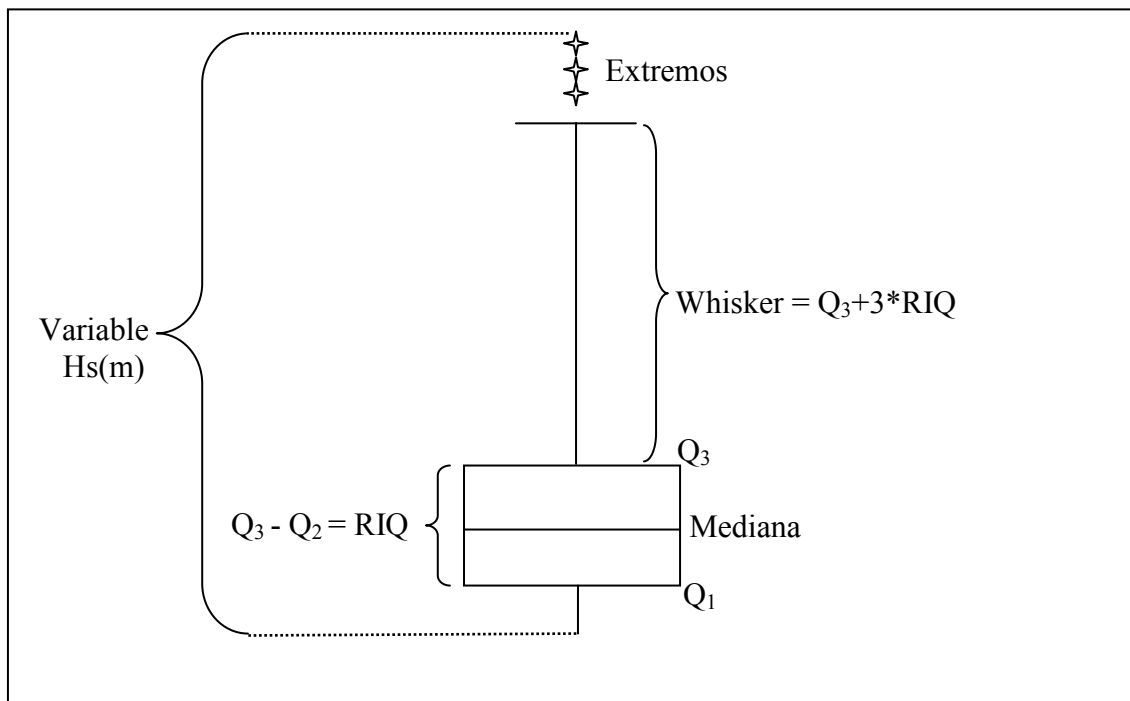
$$Q_3 + 1.5 * RIQ$$

y un *outlier* lejano es aquel que satisface la siguiente ecuación:

$$Q_3 + 3.0 * RIQ$$

donde  $Q_3$  representa el tercer cuartil o el valor por debajo del 75% de la totalidad de los datos y  $RIQ$  representa el rango intercuartil.

Una forma gráfica para representar este proceso (Fig. 6), es por medio de la utilización del diagrama de cajas (Tukey 1977). Las características esenciales del diagrama de cajas es (a) una caja rectangular que se extiende del primer cuartil hasta el tercer cuartil del conjunto de datos con una línea divisoria denotando la posición de la mediana y (b) dos líneas adicionales llamadas *whiskers* que se extienden a partir de ambos límites de la caja. En el diagrama de cajas de Tukey (1977), cada *whisker* se extiende hasta cierto múltiplo del rango intercuartil, delimitando así los datos extremos. En este caso, se multiplicó por 3 el rango intercuartil para obtener los *outliers* lejanos según la definición de Moore y McCabe (1999).



**Figura 6.-** Diagrama de cajas o *boxplot* en donde se identifican los datos extremos.  $Q_1$  y  $Q_3$  representan el primer y tercer cuartil y RIQ el rango intercuartil. En este caso la variable es la altura significativa.

Con la finalidad de distinguir los eventos de mayor energía (tormentas y huracanes) y sus periodos asociados (los cuales son de gran importancia para el estudio del impacto costero), así como para visualizar las propiedades físicas del oleaje durante los períodos de mediciones antes descritos, se realizaron gráficas en el dominio del tiempo de la altura significativa ( $H_s$ ), el periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ), así como del espectro de frecuencia ( $E(\sigma)$ ). En la series de tiempo de  $H_s$  se delimitó el valor mínimo a partir

del cual comienzan los valores extremos (*outliers*) los cuales se asocian a eventos de lluvias extremas, tormentas tropicales o inclusive huracanes.

#### **IV.5 Modelación de oleaje.**

El modelo SWAN utilizó como condición de frontera la estadística del oleaje observado y se alimentó con las batimetrías de **PC** y **AK**. Se realizaron simulaciones estacionarias en (1) el caso de mayor porcentaje de ocurrencia del oleaje y en (2) casos extremos. En la sección **IV.5.2** se detalla la obtención de los parámetros que describen estos dos casos.

##### **IV.5.1 Determinación de la malla batimétrica.**

Se utilizó una ecosonda GARMIN, con posicionamiento por GPS, para realizar muestreos de la batimetría en cada localidad desde una embarcación pequeña. En **PC** la embarcación fue de la comunidad pesquera y en **AK** fue proporcionada por el CEA (Centro Ecológico de Akumal). Los muestreos sirvieron para generar las mallas batimétricas que usa el modelo SWAN.

La malla batimétrica en **PC** se encuentra comprendida entre las coordenadas  $-87.076$  y  $-87.062^\circ$  de longitud oeste y los  $20.612^\circ$  y  $20.626^\circ$  de latitud norte. Cuenta con una extensión aproximada de  $1.6 \text{ km}^2$  y su profundidad máxima es de 17 metros.

La malla batimétrica en **AK** se encuentra comprendida entre las coordenadas  $-87.3209^\circ$  y  $-87.3014^\circ$  de longitud oeste y los  $20.38^\circ$  y  $20.398^\circ$  de latitud norte. Cuenta con una extensión aproximada de  $2 \text{ km}^2$  y su profundidad máxima es de 22 metros.

El procesamiento de los datos de profundidad adquiridos en campo se compone principalmente de dos fases, (1) la lectura de archivos en bloque correspondiente al protocolo de adquisición de datos NMEA (*National Marine Electronics Association*) para el cual se escribió un programa de lectura y escritura en MATLAB (*Matrix Laboratory*) el cual transforma el bloque de datos a posiciones geográficas: longitud, latitud y profundidad (x,y,z) y (2) la visualización de los datos (x,y,z) por medio de un programa escrito también en MATLAB, obteniendo así, el mapa de contornos

bidimensional y tridimensional de la batimetrías de las zonas mencionadas, así como la matriz de datos de profundidades que corresponde a los datos de entrada que alimentan el modelo SWAN.

Las dimensiones de la matriz correspondiente a la batimetría generada en MATLAB, se proporcionaron al modelo SWAN durante su programación, al momento de definir las características de la malla batimétrica. La malla incluye zonas de tierra con valor numérico igual a cero. Las características de las mallas batimétricas en **PC** y **AK** se muestran en las tablas II y III.

**Tabla II.-Dimensiones de la malla batimétrica para Playa del Carmen.**

Longitud en X (metros)	1708
Longitud en Y (metros)	1708
$\Delta X$ (metros)	28
$\Delta Y$ (metros)	28
# de nodos (dirección X y Y)	61

**Tabla III.-Dimensiones de la malla batimétrica para Akumal.**

Longitud en X	1920
Longitud en Y	2280
$\Delta X$	30
$\Delta Y$	30
# de nodos (dirección X y Y)	64, 76

#### **IV.5.2 Determinación de las condiciones de frontera y descripción de la propagación del error con fronteras laterales abiertas.**

Dentro del espacio geográfico en el modelo SWAN, existen dos tipos de fronteras, (1) líneas de costa y (2) fronteras expuestas al mar abierto. Ambas fronteras absorben totalmente (sin reflexión) la energía que abandona la malla computacional. En las fronteras de mar abierto, la energía del oleaje puede salir o entrar de la malla computacional. En aplicaciones costeras dicha información es usualmente provista en la frontera paralela a la costa (de donde se aproxima generalmente el oleaje) pero no en las fronteras laterales, en donde se asume que la energía entrante es igual a cero. Esto

implica una propagación errónea de las condiciones de frontera laterales hacia el área computacional y provoca perturbaciones en las esquinas entre la frontera lateral y la frontera con información de oleaje, dispersándose hacia la costa en ángulo aproximado de 30° con respecto a la dirección del oleaje (Booij *et al.*, 2004). Por esta razón la fronteras laterales deben quedar lo suficientemente lejos del área de estudio o en su defecto se debe indicar el área afectada por esta propagación del error mencionado.

Las componentes de entrada en la frontera con la información del oleaje en el modelo SWAN son especificadas por un espectro bidimensional  $E(\sigma, \theta)$ , -el cual se expresa en términos de su frecuencia relativa y su dirección- o por un espectro unidimensional  $E(\sigma)$ , con una distribución direccional impuesta. El espectro unidimensional se utilizó como condición de frontera en el presente trabajo. Existen diversas opciones disponibles para el caso del espectro unidimensional: (a) de tipo Gauss, (b) Pierson-Moskowitz (1964) y (c) de tipo JONSWAP (*Joint North Sea Wave Atmosphere Program*, Hasselmann *et al.*, 1973). Este último espectro unidimensional fue el que se escogió para la modelación descrita en este trabajo debido a que representa a un espectro en un mar totalmente desarrollado. Además de proporcionar la forma del espectro en el modelo SWAN; se utilizaron los parámetros estadísticos del oleaje (en casos frecuentes y en condiciones extremas) como la altura significativa, el periodo y la dirección asociados al pico espectral y la dirección de difusión (*directional spreading*,  $\theta_S$ ), los cuales se obtuvieron a partir de los datos medidos por los perfiladores acústicos **ADCP**.

Para obtener las condiciones de frontera en el primer caso (condiciones frecuentes) se utilizó como parámetro estadístico de referencia, la altura significativa con mayor porcentaje de ocurrencia (adquirida en el tratamiento estadístico de los datos por medio de histogramas de frecuencia), de forma que para la  $H_s$  más frecuente (durante todo el periodo de medición) existe un intervalo de  $T_p$  y  $\theta$  correspondientes. La media del intervalo de  $T_p$  y  $\theta$  asociadas a la  $H_s$  de mayor porcentaje de ocurrencia se utilizaron para las condiciones de frontera.

El modelo SWAN utiliza diferentes parametrizaciones físicas en los términos fuente como se ha explicado anteriormente. Debido a que el área computacional es muy pequeña (1-2 km de longitud) y el régimen frecuente de viento en la región es débil (9-

14 m/s), no se considera generación de oleaje por forzamiento del viento, ya que el área correspondería a un *fetch* demasiado pequeño para generar olas de tamaño significativo para la región ( $H_s > 0.1\text{m}$ ). Por lo tanto solo se consideran la entrada del oleaje en la frontera espectral (donde se adquirieron los datos) junto con los diversos parámetros de oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta$  y  $\theta_s$ ) y su propagación hacia la costa. Se consideró solamente la disipación de energía por rompimiento del oleaje inducido por cambios en el fondo y la disipación de energía por fricción con el fondo.

La modelación además de proporcionar un plano general acerca de los parámetros estadísticos en toda el área de estudio –el cual muestra zonas de convergencia y divergencia de energía de oleaje- tiene como propósito revelar el espectro direccional  $E(\sigma, \theta)$ , la altura significativa y la dirección del oleaje en diversos puntos de interés socioeconómicos (muelles, hoteles, comercios y embarcaciones) a lo largo de la costa de **PC** y **AK**, en comparación con las características de oleaje en la frontera. De esta forma se puede observar la evolución del espectro direccional y de los demás parámetros estadísticos antes mencionados. Los puntos de interés socioeconómicos se muestran en las tablas IV y V.

**Tabla IV.- Puntos de interés socioeconómico para Playa del Carmen.**

Nombre	Posición
Muelle Fiscal (embarcaciones)	(-87.07241, 20.61966)
Playa Centro (comercios)	(-87.07056, 20.62192)

**Tabla V.- Puntos de interés socioeconómico para Akumal.**

Nombre	Posición
Punta Norte (hoteles)	(-87.31505, 20.391039)
Bahía de Akumal (embarcaciones y CEA)	(-87.31753, 20.390706)
Punta Sur ( viviendas)	(-87.32186, 20.383685)



### **IV.5.3 Determinación de la malla computacional.**

La malla computacional se determinó en base a las dimensiones de la malla batimétrica. Debido a que los datos de oleaje proporcionados por los **ADCP** fueron los que se utilizaron como condiciones de frontera, se plantearon de forma que fueran constantes a lo largo de la isóbata en donde fueron instalados los instrumentos; de manera que se rotó la malla computacional para que la frontera espectral fuera paralela y comenzara sobre la isóbata en donde se obtuvieron los datos de oleaje para cada una de las localidades. De esta forma la frontera espectral es la isóbata de los 11 metros para **PC** y de los 16 metros para **AK**.

### **IV.6 Corrientes.**

Se obtuvieron valores de velocidad y dirección de las corrientes en la columna de agua para todo el periodo de muestreo en las localidades **PC** y **AK**, con los cuales se realizaron diagramas de contornos de dichas variables en función del tiempo y la profundidad. Para cada localidad se realizó un promedio diario de la serie de datos obtenidos, de forma que se puedan visualizar las diferencias de velocidad y dirección con un rango de 24 horas.

## **V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

Los resultados se encuentran descritos en dos fases principales para cada una de las localidades de estudio (**PC** y **AK**). La primer fase consiste en el análisis e interpretación de los datos y las graficas acerca de la estadística del oleaje; en donde se incluyen: (1) histogramas de frecuencia ( $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ ), (2) identificación de extremos ( $H_s$ ) y (3) series de tiempo ( $E(\sigma, \theta)$ ,  $H_s$  y  $T_p$ ). Los datos obtenidos en el primer bloque, además de puntualizar los parámetros estadísticos más importantes del oleaje y su evolución en el tiempo de medición, fueron utilizados para obtener los resultados descritos en la segunda fase, los cuales se utilizan para la modelación del oleaje como condiciones de frontera para obtener la evolución del espectro direccional, de la altura significativa y de la dirección en el espacio (desde la frontera espectral hacia los puntos de interés sobre la costa).

### **V.1 Estadística de oleaje para Playa del Carmen.**

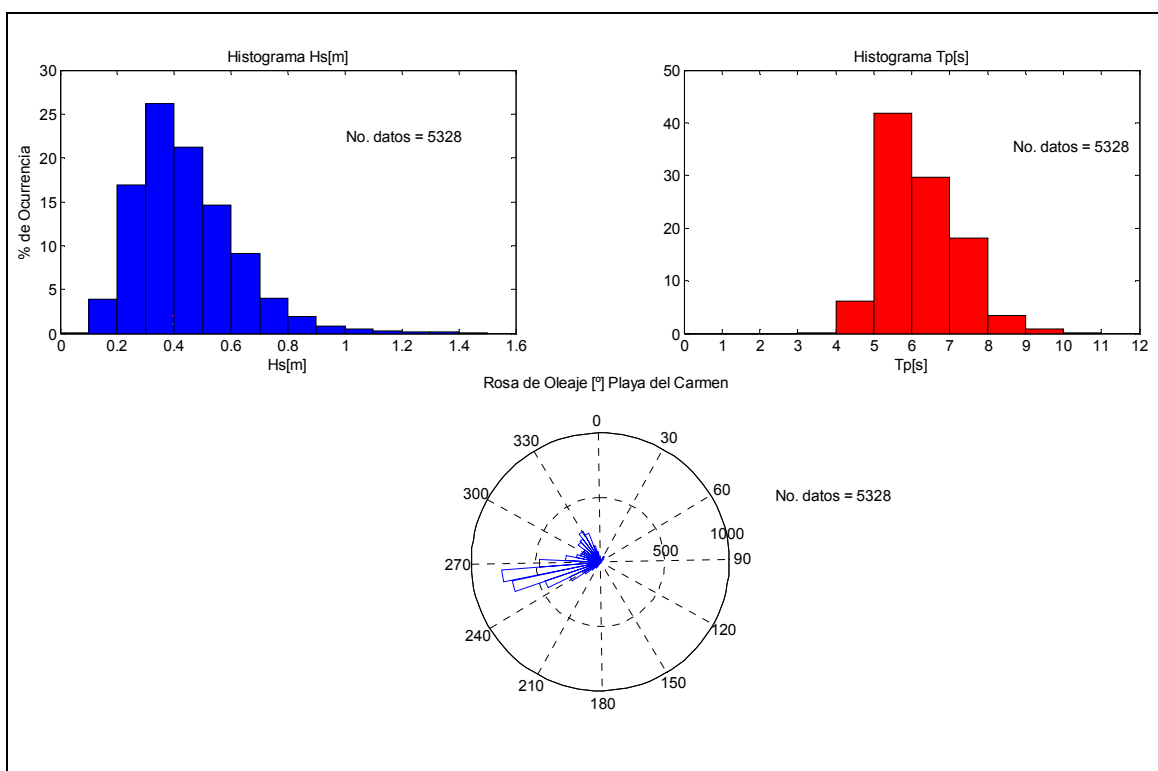
#### **V.1.1 Histogramas de mayor porcentaje de ocurrencia.**

A partir de los histogramas de frecuencia (Fig. 7) de las variables  $H_s$  y  $T_p$  y del histograma integrado en la rosa de oleaje del parámetro  $\theta$ , se pueden distinguir los valores más frecuentes durante todo el periodo de medición. El intervalo de altura significativa más frecuente fue de los 0.3 a 0.4 m con poco más del 25 % de los datos, lo que representa un total de 1332 datos de oleaje dentro de ese intervalo en todo el periodo de medición (5328 datos). No se registraron alturas significantes mayores a 1.5 m y el porcentaje de ocurrencia disminuye considerablemente de los 0.7 a los 1.4 m, indicando que más del 85 % de las olas registradas fueron menores a este último valor.

En el caso del periodo asociado al pico espectral, se obtuvieron dos intervalos con altos porcentajes de ocurrencia: (1) olas de 5 a 6 segundos de periodo representando el 40% del registro total (5328 datos) y (2) olas de 6 a 7 segundos un intervalo con un porcentaje de ocurrencia del 30 %. De forma que más del 70 % de las olas registradas en **PC** van de 5 a 7 segundos. No se registraron valores mayores a 11 segundos en todo el periodo de medición y tampoco menores a 3 segundos, este último es debido

posiblemente a la limitación del perfilador acústico con respecto a la lectura de frecuencias altas en la profundidad de instalación.

Las direcciones predominantes se encontraron dentro de los  $240^\circ$  y  $270^\circ$  azimutales con un porcentaje de ocurrencia de 75 % de todas las olas registradas; indicando que las olas con mayor porcentaje de ocurrencia son aquellas que logran pasar por arriba de la punta norte de la isla de Cozumel y no son reflejadas por la misma. El resto de los eventos de oleaje registrado se encontraron dentro del intervalo direccional de los  $270^\circ$  a los  $330^\circ$  de azimut; indicando oleaje proveniente del sur.

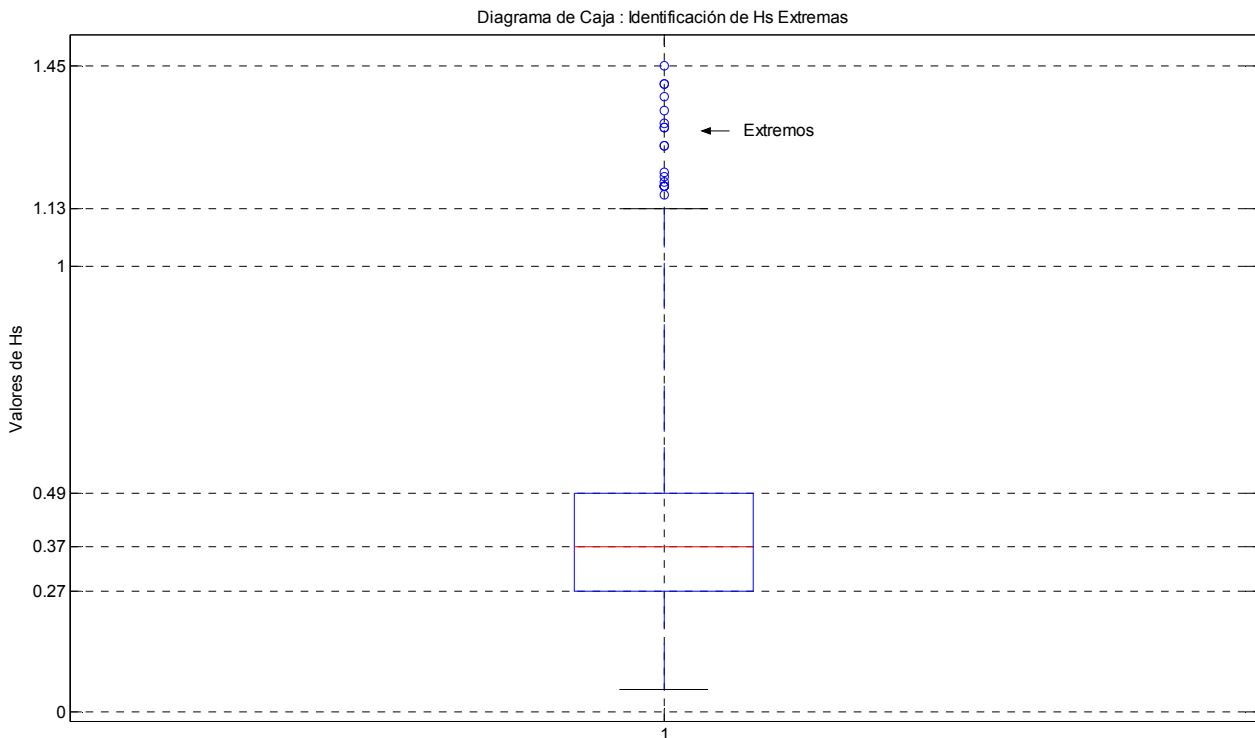


**Figura 7.- Histogramas de frecuencia para la altura significativa (en azul), periodo (en rojo) y rosa de oleaje de la dirección asociados al pico espectral para Playa del Carmen.**

### V.1.2 Diagrama de cajas para la selección de eventos extremos.

Como se mencionó anteriormente, en el capítulo IV.4 dentro de la metodología, se implementó la técnica de Moore y McCabe (1999) para la obtención de datos extremos lejanos (Fig. 8). El primer cuartil se define como el valor que se encuentra justo por debajo del 25% de los datos y corresponde a una altura significativa de 0.27 m, el segundo cuartil (50% de los datos) en 0.37 m (mediana), y el tercero (75% de los datos) en 0.49 m. Por lo tanto el rango intercuartil fue de 0.22 m. El *whisker* superior se

extiende tres veces este valor hasta la altura de 1.13 m, indicando así el límite inferior de los valores extremos. El valor máximo de altura significativa encontrada en todo el registro de oleaje fue de 1.45 m.



**Figura 8.- Diagrama de cajas para la localización de los valores extremos o outliers (puntos azules) para la localidad de Playa del Carmen, la caja representa los tres cuartiles, en donde la línea roja (segundo cuartil) representa la mediana de los datos. La línea que se extiende desde el tercer cuartil hasta los datos extremos es llamada *whisker*.**

## V.2 Estadística de oleaje para Akumal.

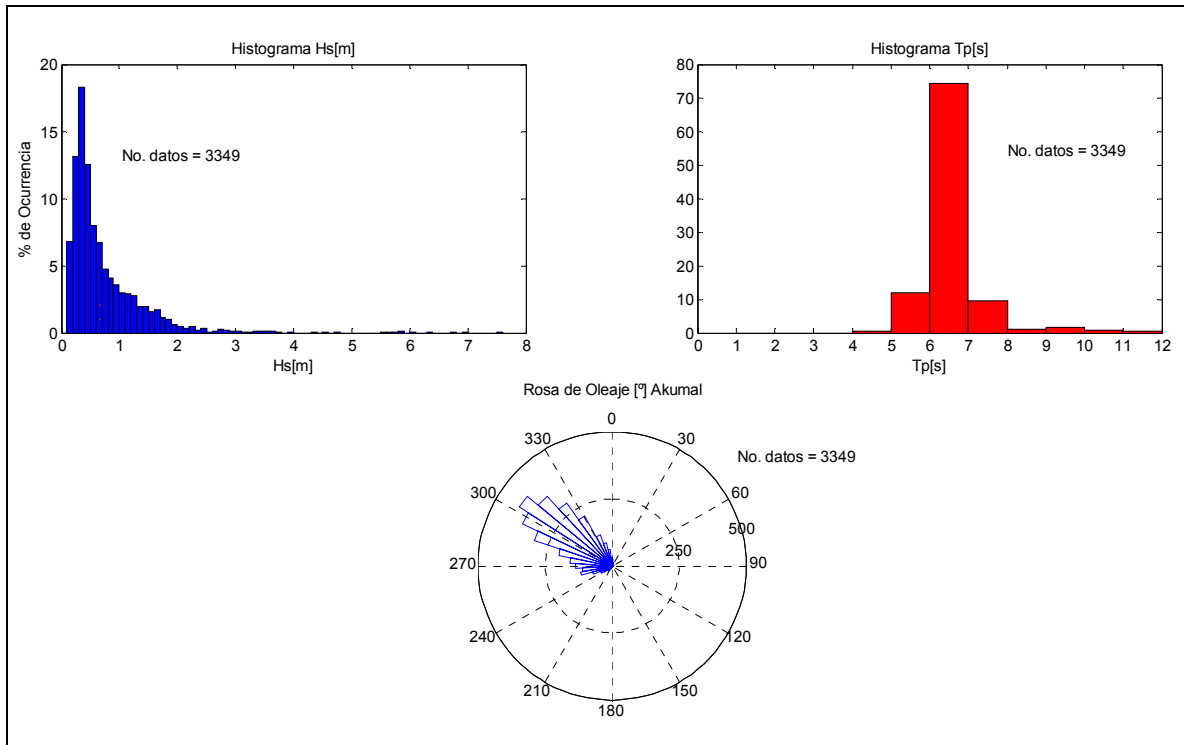
### V.2.1 Histogramas de mayor porcentaje de ocurrencia.

El histograma de mayor porcentaje de ocurrencia para Akumal (Fig. 9) presenta un rango más extenso para las alturas significantes que en PC, en donde se encuentran alturas desde los 0.1 m hasta los 8 m de altura significativa, debido a la que se registró oleaje durante la presencia del huracán Wilma. De igual forma que en PC, la altura significativa con mayor porcentaje de ocurrencia para todo el registro, se encontró dentro del intervalo de los 0.3 a los 0.4 m con aproximadamente el 18% de todo el registro (3349 datos). De forma que las condiciones son prevalecientes para ambas zonas de estudio; aunque hay que notar que en AK se presentaron mayor cantidad de olas mayores a 1 m que en PC debido probablemente a la posición geográfica y/o a la

profundidad de instalación del instrumento comparada con PC (16 m, menor disipación de energía). Las olas mayores de 2 m corresponden a poco menos del 5% de todo el registro, quedando así el 95% de los datos por debajo de este valor de Hs.

Sin lugar a dudas, el periodo de mayor porcentaje de ocurrencia se encontró entre los 6 y 7 segundos, con poco más del 70% de los datos. No se registraron periodos mayores a 12 segundos y menores a 4.

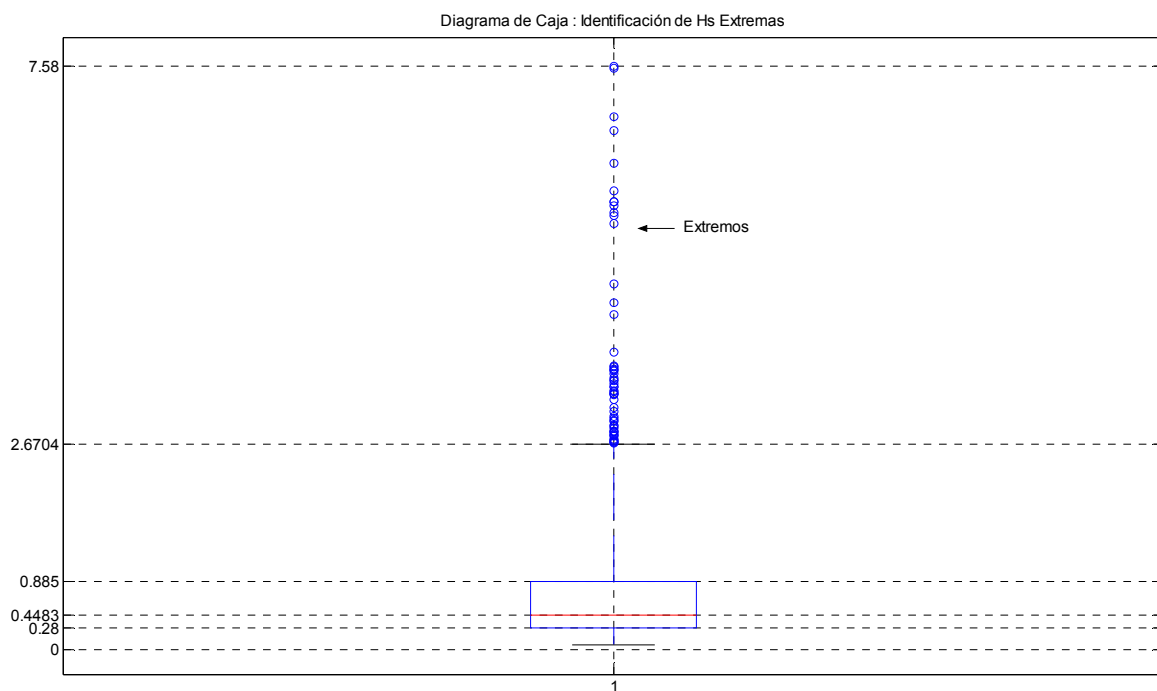
Otro intervalo dominante durante todo el periodo de muestreo se presentó para la rosa de oleaje en donde la mayor cantidad de las olas registradas se encontraron dentro de los 270° a 330° azimutales con aproximadamente el 90 % de todo el registro. La distribución de los datos de dirección es muy parecida a la de tipo Gauss, indicando que la mediana y la media son muy similares y son representadas por un valor cercano a los 300°. Esta predominancia en dirección demuestra el efecto de sombreado que produce la isla de Cozumel para las olas que provienen del este franco y del noreste, siendo registradas solamente las olas provenientes del sureste.



**Figura 9.- Histogramas de frecuencia para la altura significativa (en azul), periodo (en rojo) y rosa de oleaje de la dirección asociados al pico espectral para Akumal.**

## V.2.2 Diagrama de cajas para la selección de eventos extremos.

Para el caso de AK, se puede notar claramente que los valores de los cuartiles corresponden a valores más grandes en Hs (Fig. 10). El primer cuartil correspondió a una altura significativa de 0.28 m seguido por una Hs de 0.4483 m y por último, el tercer cuartil se ubicó en una posición de Hs igual 0.885 m. Por lo tanto el rango intercuartil fue de 0.605 m. Aplicando la teoría de extremos lejanos, el *whisker* se extendió hasta 2.67 m. A partir de este valor se consideraron los eventos extremos hasta un máximo registrado de 7.58 m.



**Figura 10.-** Diagrama de cajas para la localización de los valores extremos o *outliers* (puntos azules) para la localidad de Akumal, la caja representa los tres cuartiles, en donde la línea roja (segundo cuartil) representa la mediana de los datos. La línea que se extiende desde el tercer cuartil hasta los datos extremos es llamada *whisker*.

### V.1.2 Series de tiempo.

La serie de tiempo de **PC** (Fig. 11) muestra cuatro periodos intermitentes de mediciones. Es importante notar que el espacio intermedio entre una medición y otra no permitió que los resultados pudieran ser descritos con respecto a las estaciones del año y marcar diferencias entre el oleaje característico de una estación y otra. Por ejemplo, entre el tercer y el cuarto periodo de medición, existe una ausencia importante de datos correspondiente a toda la época de invierno del año 2005. También entre la primer y segunda medición se presenta una ausencia de datos (aunque no tan grande como la de invierno) correspondiente a todo el mes de Julio. Sin embargo, el total de los datos contenidos dentro del registro de oleaje se consideró suficiente para obtener los parámetros estadísticos que cumplan con los objetivos específicos del presente trabajo, así como para llevar a cabo la modelación numérica del oleaje en condiciones normales y extremas.

El espectro de frecuencia dentro del primer periodo de medición muestra dos eventos energéticos importantes a finales del mes de Abril. El primer registro importante sucedió el día 26 y el segundo el día 30, con valores respectivos de 0.7 y 1.2 m<sup>2</sup>/Hz, siendo este último el evento más energético de toda la serie del espectro de frecuencias para la localidad de **PC**. Ambos espectros muestran valores significativos dentro del intervalo de las bandas de frecuencia de 0.1 a 0.2 Hz (periodos asociados al pico espectral de 5 a 10 segundos), sin embargo, la energía máxima se concentró en los 0.15 Hz (periodo asociado al pico espectral de 6.6 segundos). Posteriormente, dentro del segundo periodo, no se observaron aumentos significativos de energía si no hasta día 2 de Octubre (el cual pertenece al tercer periodo de medición) en donde se alcanzó un valor de 0.6 m<sup>2</sup>/Hz dentro del intervalo de las bandas de frecuencia de 0.2 y 0.3 Hz y concentrando su máximo en la banda de los 0.2 Hz. Se plantea la hipótesis de que este último evento registrado fue ocasionado por el paso de la tormenta tropical Stan a una distancia aproximada de 130 km al sur de **PC**. Algunas características particulares dentro del registro de oleaje la sustentan: (1) La fecha del paso de la tormenta tropical en una posición exacta de 19.5° LN, 87.2° LW y con una intensidad de 72 km/hr y la fecha del registro de oleaje (dos horas después) coinciden; y (2) la dirección de aproximación del oleaje es aproximadamente de 160° lo que indica que este oleaje

proviene del cuadrante sur-sureste por donde pasó la trayectoria de la tormenta tropical Stan.

En el año 2006 durante finales del mes de Febrero y comienzos del mes de Marzo, se registraron dos aumentos considerables en la energía del oleaje, con valores de  $0.6 \text{ m}^2/\text{Hz}$  para ambos casos.

Al observar la grafica de Hs (Fig. 11) se puede ver que los eventos de mayor energía del espectro de frecuencia concuerdan con las máximas alturas significantes registradas y también con la selección de eventos extremos, el cual fue calculado por medio de la obtención de datos extremos lejanos (capítulo IV.4). Estos eventos se muestran dentro de bandas amarillas y son separados por medio de una línea divisoria horizontal posicionada en el valor de 1.13 m de altura significativa.

El primer evento extremo se presentó el 30 de Abril a las 16 horas con 44 minutos y tuvo una altura significativa de 1.35 m, el segundo ocurrió el 2 de Octubre a las 8 horas con 55 minutos y alcanzó una Hs de 1.3 m, el tercero ocurrió el 27 de Febrero a las 10 horas con 23 minutos con una Hs de 1.21 m y por último, el cuarto evento extremo se registró el 11 de Marzo a las 11 horas 23 minutos con una Hs de 1.33 m.

La serie de tiempo del periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ) no muestra tan claramente la misma tendencia que la serie de tiempo de Hs tiene con la de  $E(\sigma)$ , por lo que algunos periodos largos no necesariamente corresponden a las olas más altas o energéticas. Es más, el valor de  $T_p$  más largo registrado fue de 10.06 segundos (30 de Agosto a las 9 horas con 29 minutos) y correspondió a una Hs de 0.58 m.

Prácticamente los valores de  $T_p$  se mantuvieron alrededor de los 4 a 7 segundos con escasos incrementos cercanos a 8 segundos. Sin embargo, para el tercer periodo se encuentra cierta correspondencia entre las tendencias de la serie de tiempo de Hs y  $T_p$  en donde las olas extremas corresponden a periodos de 8 y 9 segundos. Inclusive en este periodo de medición, el intervalo de  $T_{p_{min}}$  a  $T_{p_{max}}$  aumenta de 4 a 8 segundos.

En algunos casos se puede distinguir el registro de periodos largos seguido (algunos días después) por un registro de periodos cortos; lo cual podría indicar la presencia del



*swell*. Sin embargo, este efecto debería verse de forma inversa en el espectro de energía conforme pasa el tiempo, de frecuencias bajas hacia frecuencias altas; pero no fue el caso. Esto nos puede llevar a la conclusión de que el oleaje que se está registrando en el **ADCP** proviene de tormentas no tan lejanas por lo que no pertenece a un mar totalmente desarrollado como para notar la típica dispersión de periodos o frecuencias del *swell*.

La serie de tiempo de **AK** (Fig. 12) presenta los mismos espacios en blanco que en **PC** (sin tomar en cuenta el último periodo de medición en **PC**), por lo que hay que tomar en cuenta la misma restricción con respecto a la descripción estacional de los datos de oleaje. Las fechas de los eventos energéticos observados en el espectro de frecuencia de **AK** coinciden con los observados en **PC**. Sin embargo, la cantidad de energía ( $\text{m}^2/\text{Hz}$ ) es mucho mayor en **AK** que en **PC** (hasta 5 veces mayor). Esta asociación condujo a un análisis específico en la dirección predominante del oleaje en ambas localidades para el mismo periodo; con la finalidad de comprobar si el oleaje medido en **PC** es el mismo que **AK** pero con menor energía debido a su disipación por procesos físicos. Para **PC**, este evento energético (con un valor de  $1.2 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ) se registró del 30 de Abril a las 16 horas con 44 minutos, y se obtuvo una dirección de aproximación del oleaje de  $153^\circ$  ( $333^\circ$ ). En el caso de **AK**, el evento energético (con un valor de  $6.1 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ) se adquirió el mismo día pero a las 10 horas con 4 minutos (6 horas 40 minutos antes) con una dirección asociada al pico espectral de  $135^\circ$  ( $315^\circ$ ). Lo que nos lleva a suponer que en efecto son las mismas olas las que se están registrando en ambas localidades, pero con una sustracción de energía que se pierde en el trayecto desde **AK** hacia **PC**. También hay que considerar la diferencia entre las profundidades de instalación de los instrumentos en cada localidad, ya que puede contribuir significativamente a la diferencia de energía encontrada entre los espectros de frecuencia de ambas zonas de estudio.

El segundo periodo de medición no muestra aumentos significativos de energía al igual que en **PC**. Posteriormente, en el tercer periodo, se registraron los dos eventos más energéticos de toda la serie, en donde se incluyen olas extremas provocadas por los vientos del huracán Wilma. El primer evento fue registrado el 2 de Octubre a las 4 horas con 23 minutos alcanzando un máximo de  $6.8 \text{ m}^2/\text{Hz}$  ( $3.85 \text{ m de Hs}$ ).

El oleaje inducido por los vientos del huracán Wilma se registro por tres días consecutivos a partir del 19 de Octubre, alcanzando la máxima energía el 21 de Octubre a las 2 horas con 23 minutos con un valor de  $40 \text{ m}^2/\text{Hz}$  (7.58 m). Este espectro se encuentra definido en su mayoría dentro del intervalo de 0.08 a 0.15 Hz indicando la presencia de periodos de los 7 a los 12 segundos.

Al igual que en PC, la serie de tiempo de Hs y de  $E(\sigma)$ , muestran la misma tendencia. De forma que las fechas de los eventos de mayor energía y las máximas alturas registradas coinciden. La selección de eventos extremos (bandas amarillas) queda definida a partir de la línea horizontal en los 2.67 m de Hs. La primer banda amarilla muestra dos eventos extremos importantes, sin embargo, debido a su similitud en  $T_p$  y  $\theta$  se utiliza solamente el de mayor Hs para la modelación numérica. Este evento se registro el 30 de Abril a 10 horas con 4 minutos con un valor de 2.84 m de Hs. El segundo evento extremo se registró el 5 de Junio a las 12 horas con 4 minutos con un valor de 2.83 m de Hs. El cuarto y quinto evento fueron los que presentaron mayores alturas dentro de todo el periodo de medición. De igual forma que sucedió en PC, el cuarto evento corresponde a oleaje inducido por los vientos ocasionados por la tormenta tropical Stan, con la distinción de presentar alturas significantes de mayor tamaño, alcanzando un valor máximo de 3.83 m de Hs el 2 de Octubre a las 4 horas con 23 minutos. La dirección asociada al pico espectral correspondiente a esta Hs fue de  $130^\circ$  ( $310^\circ$ ) lo que corrobora la hipótesis planteada de la tormenta tropical Stan. El quinto evento y el más importante de todo el oleaje registrado en ambas zonas de estudio, pertenece al huracán Wilma. Como se mencionó anteriormente, este evento fue registrado durante 72 horas aproximadamente, en donde la altura máxima registrada fue de 7.58 m de Hs el día 21 de Octubre a las 0:00 horas con 21 minutos. A partir del 23 de Octubre a las 21 horas con 23 minutos ya no se consideraron válidos los registros de oleaje debido a que el instrumento fue levantado y arrastrado por el huracán.

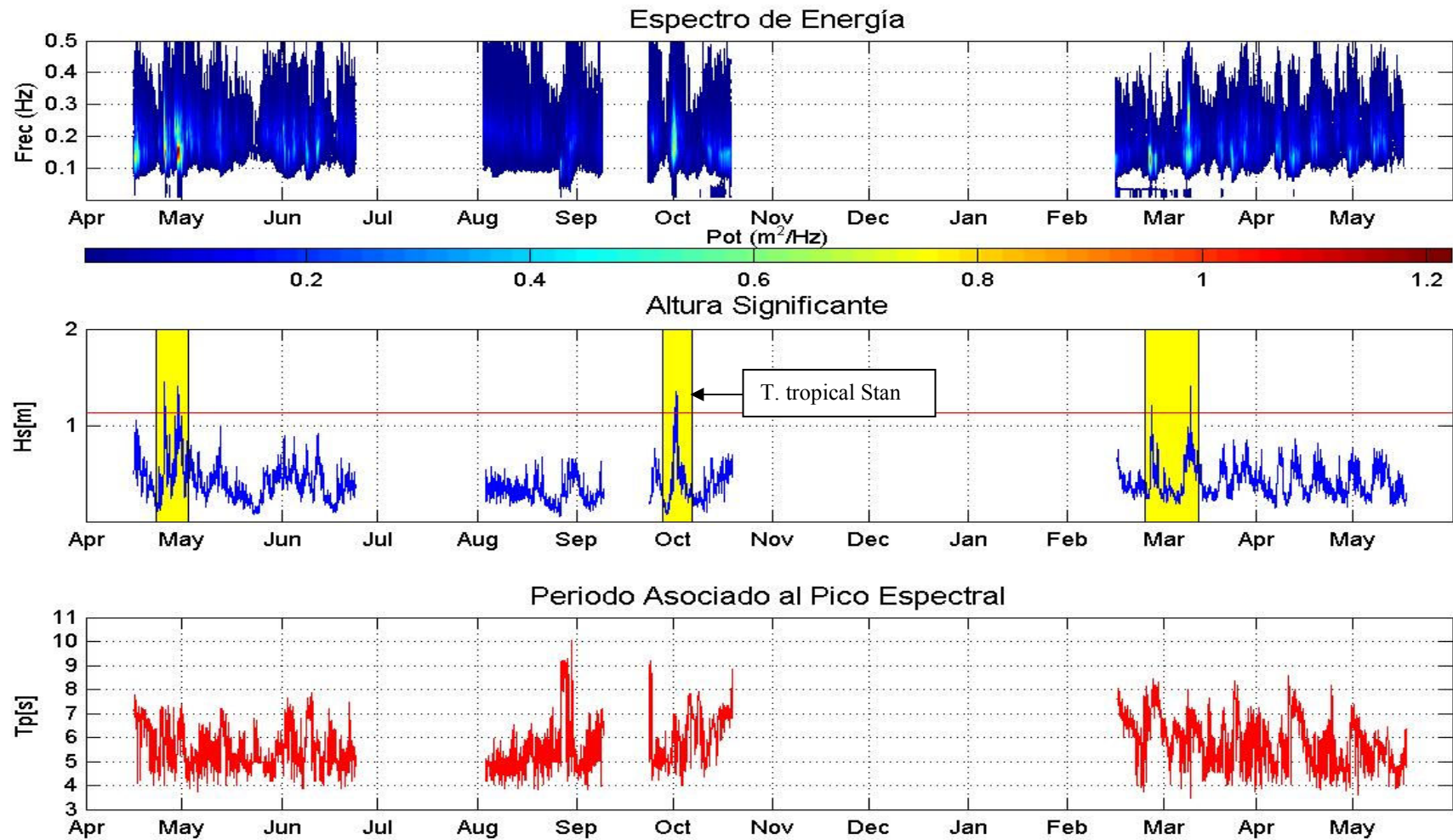


Figura 11.- Series de tiempo de los parámetros estadísticos del oleaje para Playa del Carmen. De arriba hacia abajo: Serie de tiempo del espectro de frecuencias, serie de tiempo de la altura significativa, la línea horizontal muestra el mínimo valor a partir del cual se consideró al oleaje extremo (bandas amarillas) y serie de tiempo del periodo asociado al pico espectral.

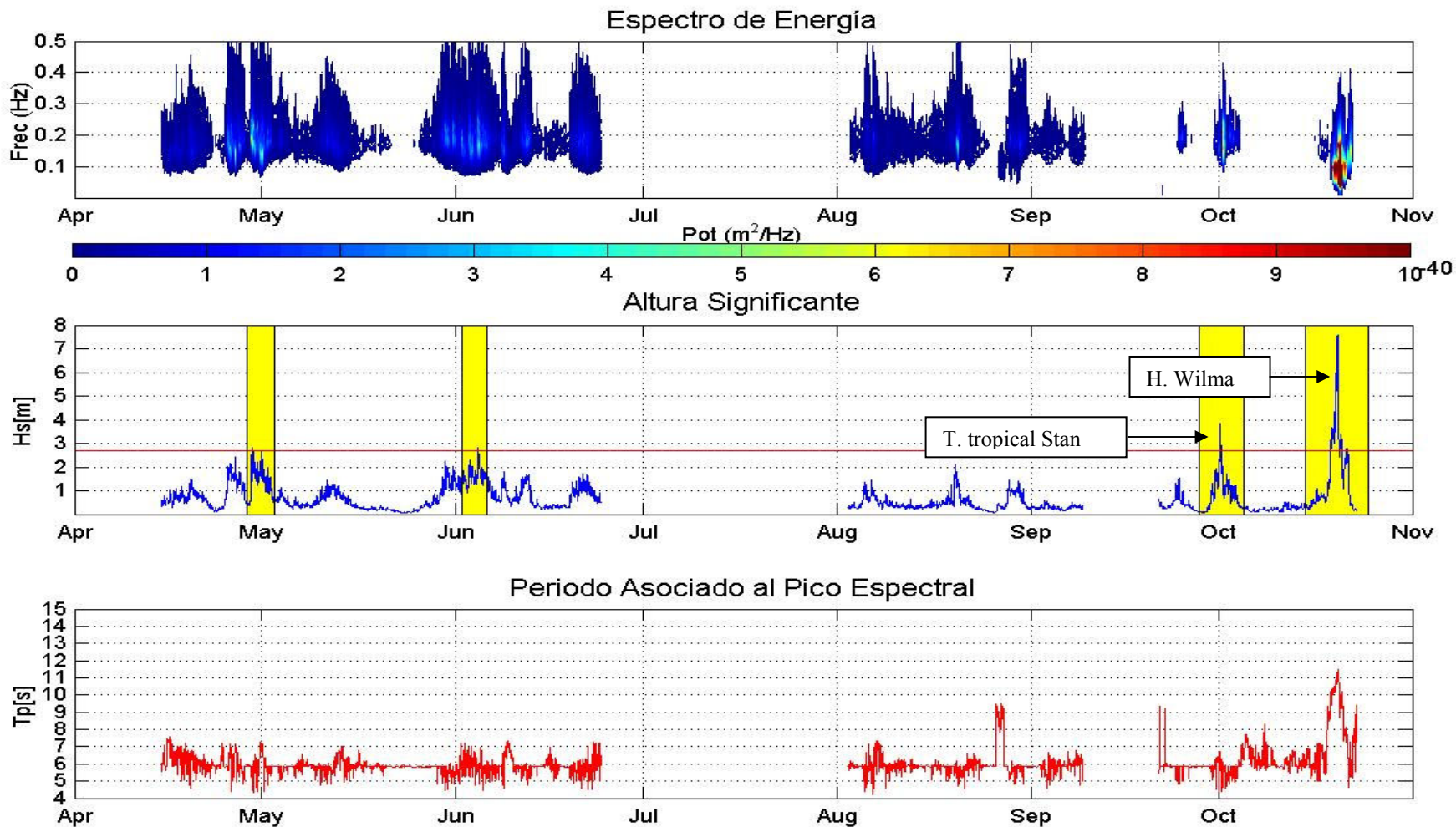
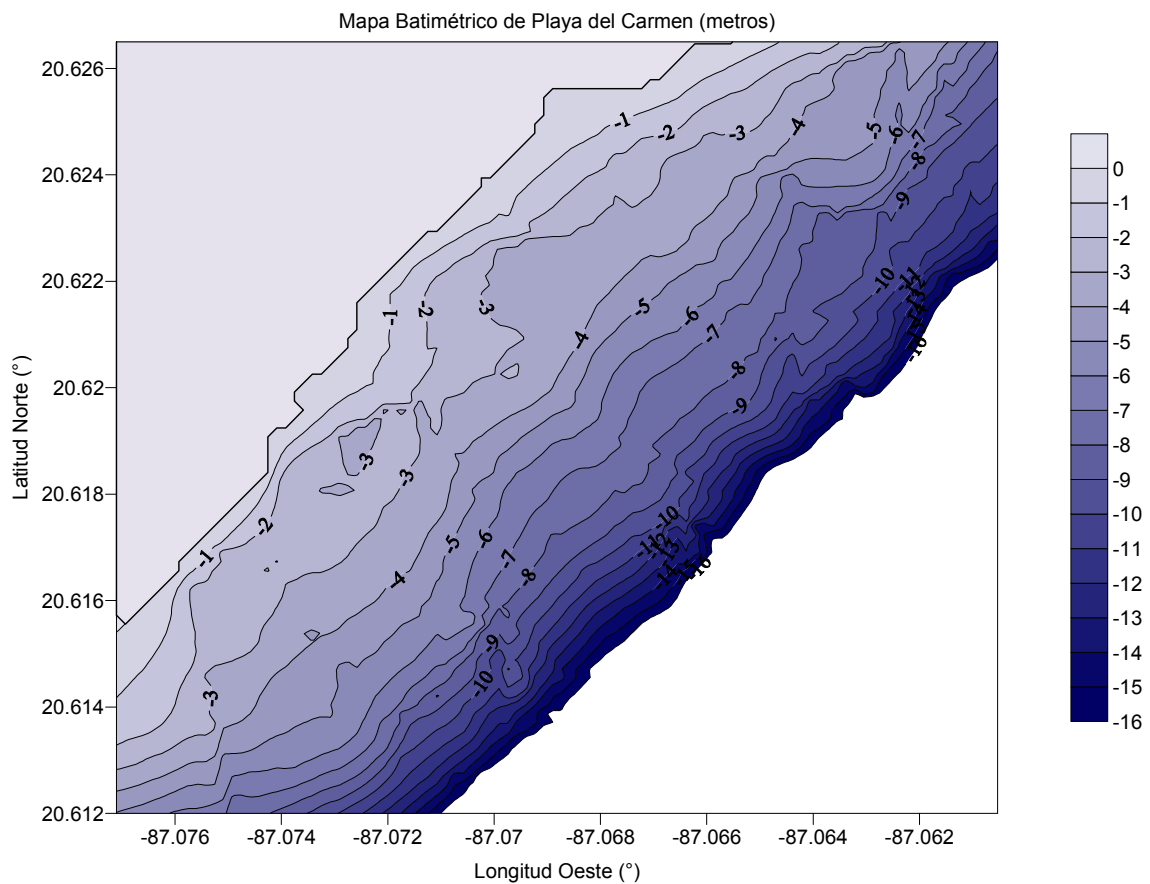


Figura 12.- Series de tiempo de los parámetros estadísticos del oleaje para Akumal. De arriba hacia abajo: Serie de tiempo del espectro de frecuencias, serie de tiempo de la altura significativa, la línea horizontal muestra el mínimo valor a partir del cual se consideró al oleaje extremo (bandas amarillas) y serie de tiempo del periodo asociado al pico espectral.

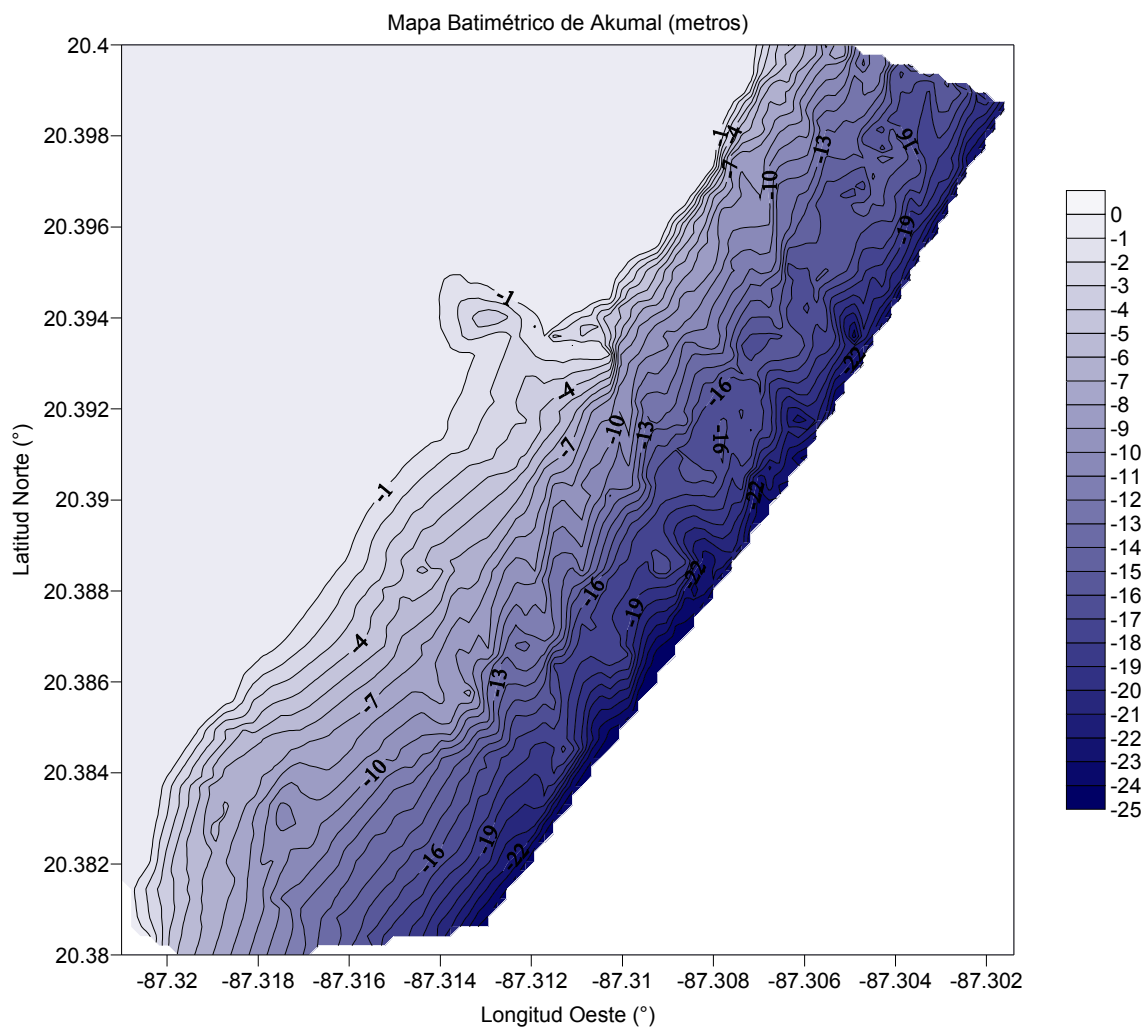
## V.2 Batimetrías.

La batimetría de Playa del Carmen (Fig. 13) muestra una configuración sencilla con una pendiente suave en donde la mayoría de las isóbatas son líneas poco curvadas y paralelas a la costa. Se puede notar que a partir de los 7 metros hacia la profundidad, la batimetría comienza a tener una pendiente más pronunciada. Es aquí donde los cambios del oleaje con respecto a los cambios en la batimetría pueden tener mayor influencia en la disipación de energía.



**Figura 13.-** Mapa de contornos representando la batimetría de Playa del Carmen, la escala de colores tiene unidades en metros. Los datos de batimetría fueron adquiridos por medio de una ecosonda GARMIN y por medio de un protocolo de transferencia de la NMEA (*National Marine Electronics Association*).

A diferencia de PC, la batimetría de AK muestra una configuración más complicada (Fig. 14), con una pendiente pronunciada en la profundidad e inclusive en las zonas someras. Las isóbatas presentan una forma curvada hacia la costa y hacia mar adentro, debido a la presencia de los conglomerados de carbonato de calcio, pertenecientes a la barrera arrecifal Mesoamericana. En la parte norte de la costa de AK, entre los 20.394° y 20.4° de LN, se puede observar lo abrupto de la pendiente en la zona somera; en donde en menos de 200 m de longitud (perpendicular a la costa) cambia de 7 metros de profundidad a 1 m. En contraste, la parte somera (4 a 1 m de profundidad) al sur de la bahía de AK, la pendiente se torna más suave.



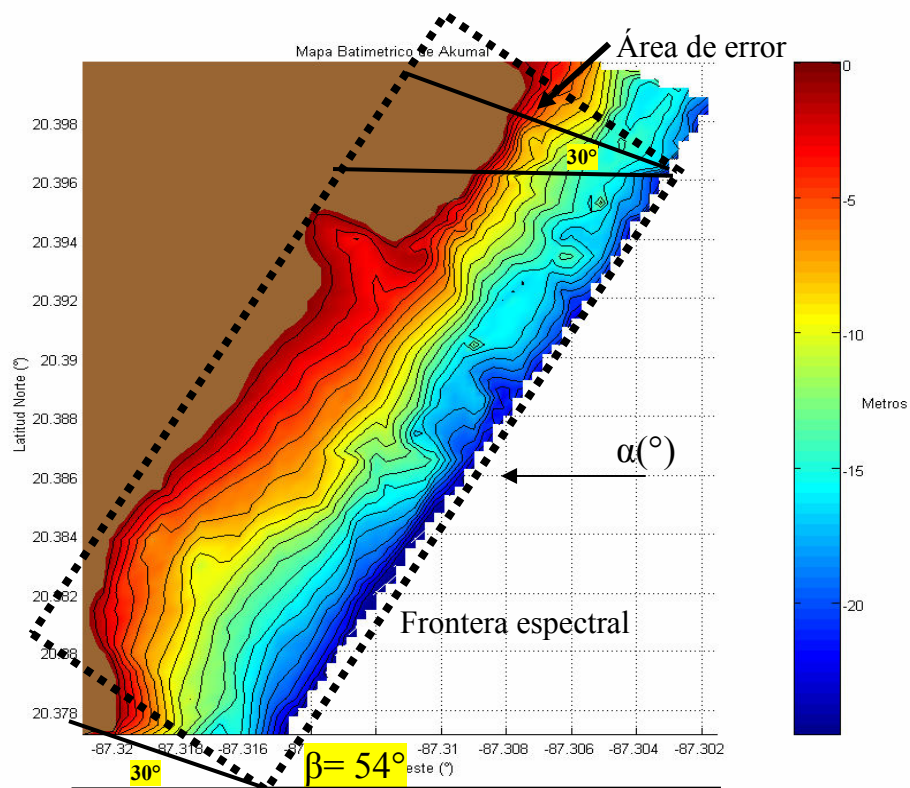
**Figura 14.-** Mapa de contornos representando la batimetría de Akumal, la escala de colores tiene unidades en metros. Los datos de batimetría fueron adquiridos por medio de una ecosonda GARMIN y por medio de un protocolo de transferencia de la NMEA (*National Marine Electronics Association*).

### V.3 Modelación de oleaje.

Como se mencionó en la sección IV.5.3 la malla computacional se rotó cierto ángulo con respecto al eje x de la malla batimétrica para que la frontera espectral coincidiera con la isóbata correspondiente a la instalación de cada ADCP. La figura 15 muestra un ejemplo de rotación en el caso de Akumal, en donde el origen, las dimensiones de la malla y el ángulo de rotación con respecto a la batimetría se muestra en la tabla VI. También se muestra la zona de propagación del error inducido por las fronteras abiertas y con respecto a la dirección de aproximación del oleaje ( $\alpha$ ).

**Tabla VI.-Ejemplo de dimensiones y rotación de la malla computacional para el caso de la zona costera de Akumal.**

Longitud X (metros)	2610
Longitud Y (metros)	810
Origen X,Y (metros)	400
Rotación ( $\beta^\circ$ )	54



**Figura 15.- Rotación de la malla computacional con respecto a la isóbata de los 16 metros en Akumal y área de propagación de error.**

### V.3.1 Condiciones Frecuentes para Playa del Carmen

La selección de las condiciones de frontera para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia para PC se explica en la sección IV.5.2 y se describen en la tabla VII.

Tabla VII.-Condiciones de frontera para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia observadas en PC.

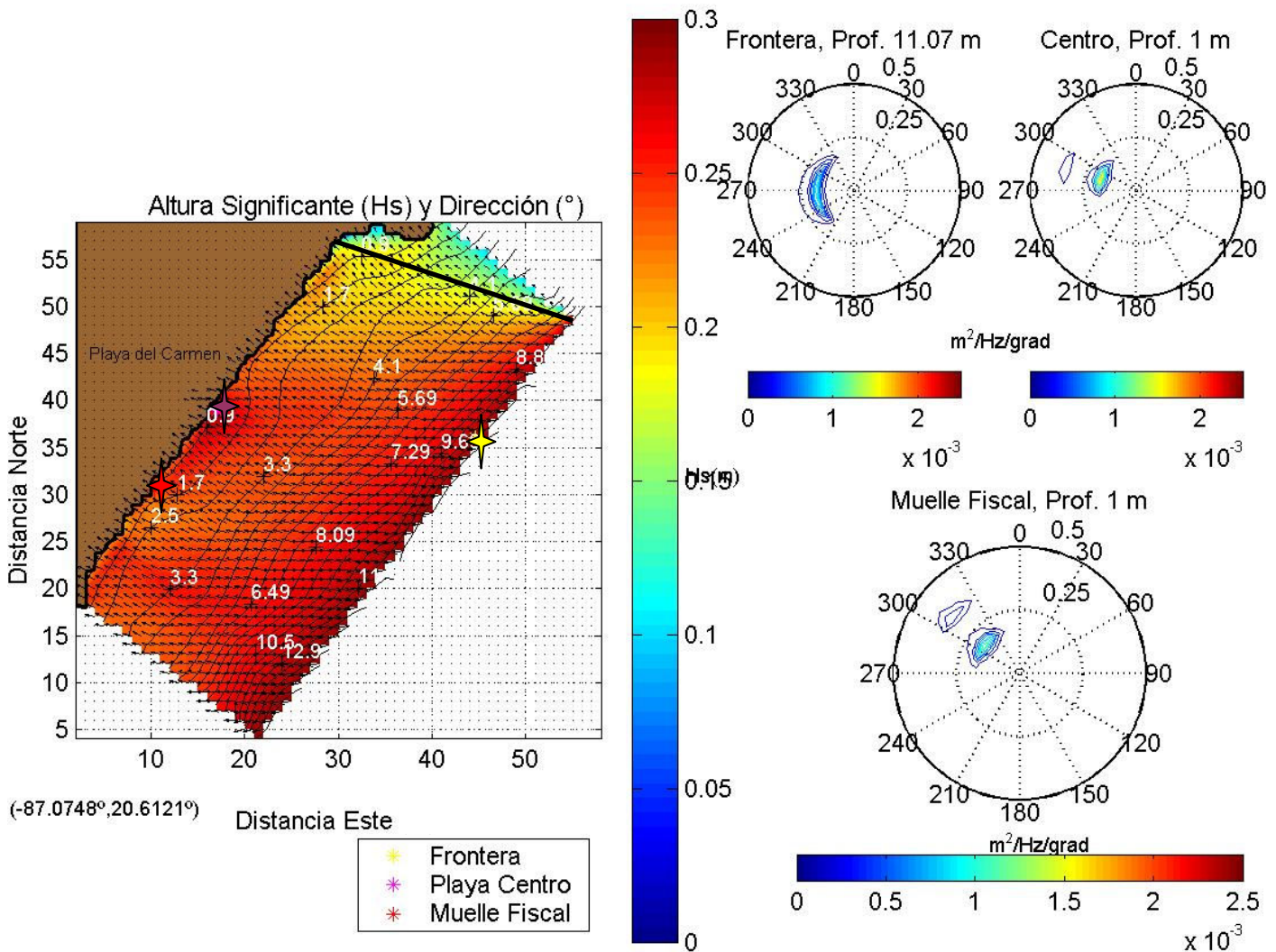
Hs (m)	0.3
Tp (s)	5.6
$\theta$ (°)	259
$\theta_s$ (°)	30

La figura 16 muestra los resultados de la modelación del oleaje de mayor porcentaje de ocurrencia en PC. Pueden verse zonas de convergencia de oleaje y mayores valores de Hs para la zona centro y el Muelle Fiscal de PC y zonas de menor Hs para la parte norte (sin contar la zona de propagación del error). Los espectros direccionales de energía en el Muelle Fiscal y en la P. Centro (a un metro de profundidad) presentan valores similares al observado en la frontera (a 11 metros de profundidad), con valores máximos aproximados a los  $0.025 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$ . Por lo tanto se puede inferir que estas olas tan pequeñas no sufren disipación de energía por rotura y por lo tanto conservan su energía desde la frontera espectral hasta las partes más someras de la costa (sin contar la parte norte donde se produce una disminución de Hs debida a la propagación del error ocasionado por la ausencia de condiciones iniciales en la frontera norte). Como se mencionó en la metodología del modelo SWAN (ec. 4) el término  $D_{tot}$  (incluido en la formulación de la disipación de energía inducida por cambios en la batimetría) depende críticamente en el parámetro de rotura ( $\gamma=0.73$ ). Es por esto que las olas pequeñas (0.3 m) en condiciones frecuentes (de mayor porcentaje de ocurrencia) en una batimetría poco accidentada como la de Playa de Carmen, no rompen si no hasta encontrar valores muy pequeños de profundidad (0.479 m, con respecto al parámetro  $\gamma$ ). Sin embargo, la dirección del oleaje en los diferentes puntos de interés en la costa es diferente al proporcionado en las condiciones de frontera debido a los cambios en la velocidad de la cresta de la ola por los efectos de refracción. Los valores de Hs y  $\theta$  en los puntos de interés en comparación a las condiciones de frontera se muestran en la tabla VIII.



**Tabla VIII.-Comparación de los valores de los parámetros de oleaje en los puntos de interés con respecto a la frontera para las condiciones de mayor porcentaje de ocurrencia.**

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1248	1008	11	0.3	259
P.centro	470	1092	1	0.263	283
M.fiscal	265	840	1	0.241	307



**Figura 16.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. La línea negra delimita la zona de error. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m).**

### V.3.2 Condiciones Extremas para Playa del Carmen.

Se analiza un total de cuatro casos extremos para PC; indicados en la serie de tiempo de Hs y utilizados como condiciones de frontera (capítulo IV.5.2) para la obtención de los parámetros estadísticos del oleaje en los puntos de interés a lo largo de la costa. Los valores de Tp y  $\theta$  asociados a la Hs extrema se muestran en la tabla IX.

**Tabla IX.- Condiciones de frontera para los casos extremos observados en PC.**

Caso 1	
Hs (m)	1.35
Tp (s)	7.15
$\theta$ (°)	352.3
$\theta_s$ (°)	56.26
Caso 2 (T. tropical Stan)	
Hs (m)	1.3
Tp (s)	7.00
$\theta$ (°)	264.13
$\theta_s$ (°)	31.61
Caso 3	
Hs (m)	1.21
Tp (s)	8.1
$\theta$ (°)	268.49
$\theta_s$ (°)	14.39
Caso 4	
Hs (m)	1.34
Tp (s)	7.98
$\theta$ (°)	325.92
$\theta_s$ (°)	39.86

Debido a la similitud encontrada en las condiciones de frontera que se presentan entre los casos (a) 1 y 4 y (b) 2 y 3; la modelación numérica a lo largo de la malla computacional y los resultados obtenidos de Hs,  $\theta$  y del espectro direccional en los puntos de interés, son muy parecidos; de forma que solamente se discuten de manera detallada los resultados obtenidos en el caso 1 y en el caso 2. Sin embargo, se presentan

las gráficas y las tablas de los resultados numéricos obtenidos en los cuatro casos. El caso 1 y el caso 2 representan las modelaciones del oleaje extremo proveniente del sur y del este respectivamente.

### V.3.2.1 Caso 1.

Con respecto al caso extremo no. 1, (Fig. 17), se puede observar claramente que el valor de la  $H_s$  en la frontera espectral (1.35 m) se mantiene constante dentro de la malla computacional, hasta llegar a la isóbata de los 2.51 m. A partir de esta profundidad, el oleaje empieza a sufrir los efectos de disipación por cambios en la batimetría y fricción con el fondo. Las zonas de mayor altura a lo largo de la costa de PC se encuentran en (1) cerca del muelle fiscal y (2) en la parte central de la playa; con valores de  $H_s$  de hasta 0.9 metros para ambos casos. La parte norte de la costa sigue presentando los valores más pequeños de altura significativa, alrededor de los 0.2 metros con excepción de los valores mostrados en la punta saliente (0.9 metros de  $H_s$ ). A diferencia del caso de mayor porcentaje de ocurrencia (capítulo V.3.1), la energía de los espectros direccionales muestran una disminución significativa desde la frontera espectral hacia los puntos de interés. En la frontera se obtuvieron valores de energía de  $0.025 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  mientras que para el muelle fiscal y el centro de la playa, se obtuvieron valores de 0.01 a  $0.005 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  respectivamente. En consecuencia, la  $H_s$  en los puntos de interés (tabla X) también se encuentra disminuida con respecto al valor en la frontera; debido a que la disipación de energía por cambios en el fondo (determinada por  $D_{tot}$ ) es mucho mayor para este valor de  $H_s$  que para las  $H_s$  pequeñas como se observó en el caso anterior. De forma que la  $H_s$  de frontera no rompe si no hasta encontrar la profundidad de 1.98 m (con respecto al parámetro  $\gamma$ ). También hay que tomar en cuenta la disipación de energía ocasionada por la fricción con el fondo y la transferencia de energía de frecuencias bajas a frecuencias altas por los efectos no lineales (triadas) lo cual explica que los espectros obtenidos en los puntos de interés sean bimodales a diferencia del espectro unimodal obtenido en la frontera espectral. Sin embargo, a pesar de la gran disipación energética que sufre el oleaje durante su trayectoria a la costa, los valores obtenidos en los puntos de interés (Playa Centro y Muelle Fiscal) son mayores que los encontrados en el caso de condiciones frecuentes.

Tabla X.- Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 1. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof.(m)	Hs (m)	$\theta(^{\circ})$
Frontera	1248	1008	11	1.35	352.3
P.centro	470	1092	1	0.57	319
M.fiscal	265	840	1	0.61	319

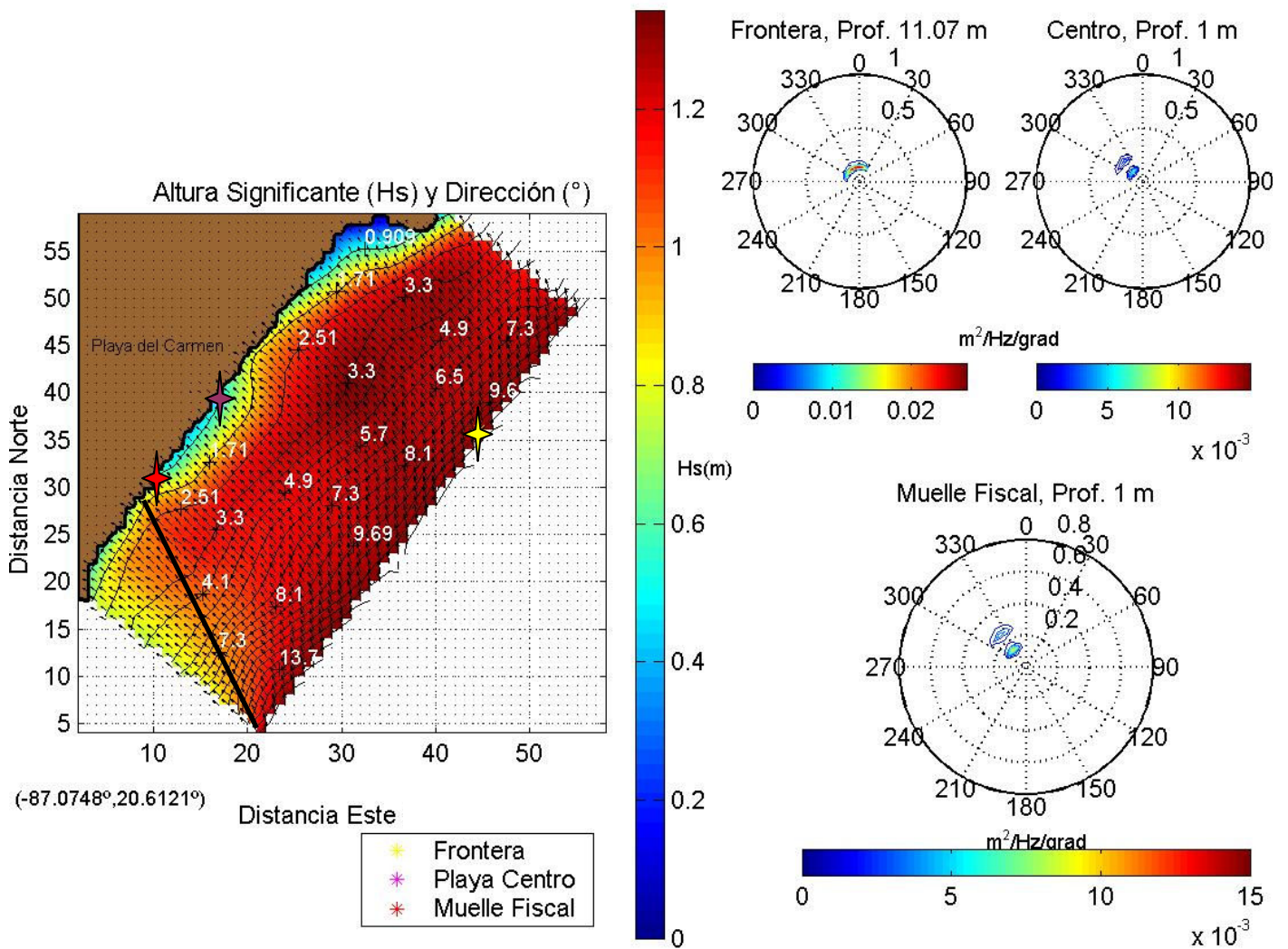


Figura 17.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso extremo 1. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m).

### V.3.2.1 Caso 2.

Este caso (Fig. 18) muestra una distribución de  $H_s$  similar al caso extremo anterior; sin embargo, se muestran diferencias considerables con respecto a la dirección del oleaje  $\theta$ . La diferencia en ángulo de aproximación, causa que la propagación del error se proyecte a lo largo de la frontera norte (igual que en caso 3) y no del sur (caso 1 y 4), como lo fue en el caso anterior. Cabe mencionar que el área de propagación del error es mucho menor en este caso ( $10^\circ$  aproximadamente) debido a la dirección de aproximación del oleaje. Se puede observar que la altura significativa se propagó de forma constante a partir de la frontera espectral hasta aproximarse a una profundidad de 2.51 metros. A partir de este punto comienzan a ser mayores los efectos de disipación de energía; en donde los cambios de profundidad y fricción con el fondo afectan de manera considerable. Con respecto a la distribución de  $H_s$  en toda el área computacional, se encontraron dos zonas de convergencia; (1) desde el muelle fiscal hacia el sur con una extensión aproximada de 400 metros y (2) del centro de la playa hacia el norte con una extensión aproximada de 270 metros. Dentro de estas dos zonas de convergencia, se encontraron valores elevados de  $H_s$  dentro de un intervalo de los 0.6 a 0.8 metros. En contraste a lo anterior, la zona norte de la playa mantiene valores bajos de  $H_s$  con valores cercanos a los 0.2 metros con una extensión aproximada de 200 metros.

La energía del espectro direccional en los dos puntos de interés disminuyó considerablemente con respecto a la observada en la frontera, ya que pasó de  $0.025 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  a  $0.005 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  para la zona centro y de  $0.025 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  a  $0.007 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  en el muelle fiscal. Al igual que el caso anterior, se puede ver la transferencia de energía de frecuencias altas a frecuencias bajas por las interacciones no lineales. El ángulo en la dirección del oleaje que se muestra en los espectros direccionales en los puntos de interés en comparación a la frontera, presentan cambios bruscos debidos al efecto de refracción, con diferencias de  $30^\circ$  para el punto definido como playa centro y hasta de  $43^\circ$  para el punto localizado en el muelle fiscal. Los valores obtenidos en los puntos de interés se muestran en la tabla XI.

Tabla XI.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 2. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1248	1008	11	1.3	264.13
P.centro	470	1092	1	0.58	295
M.fiscal	265	840	1	0.60	308

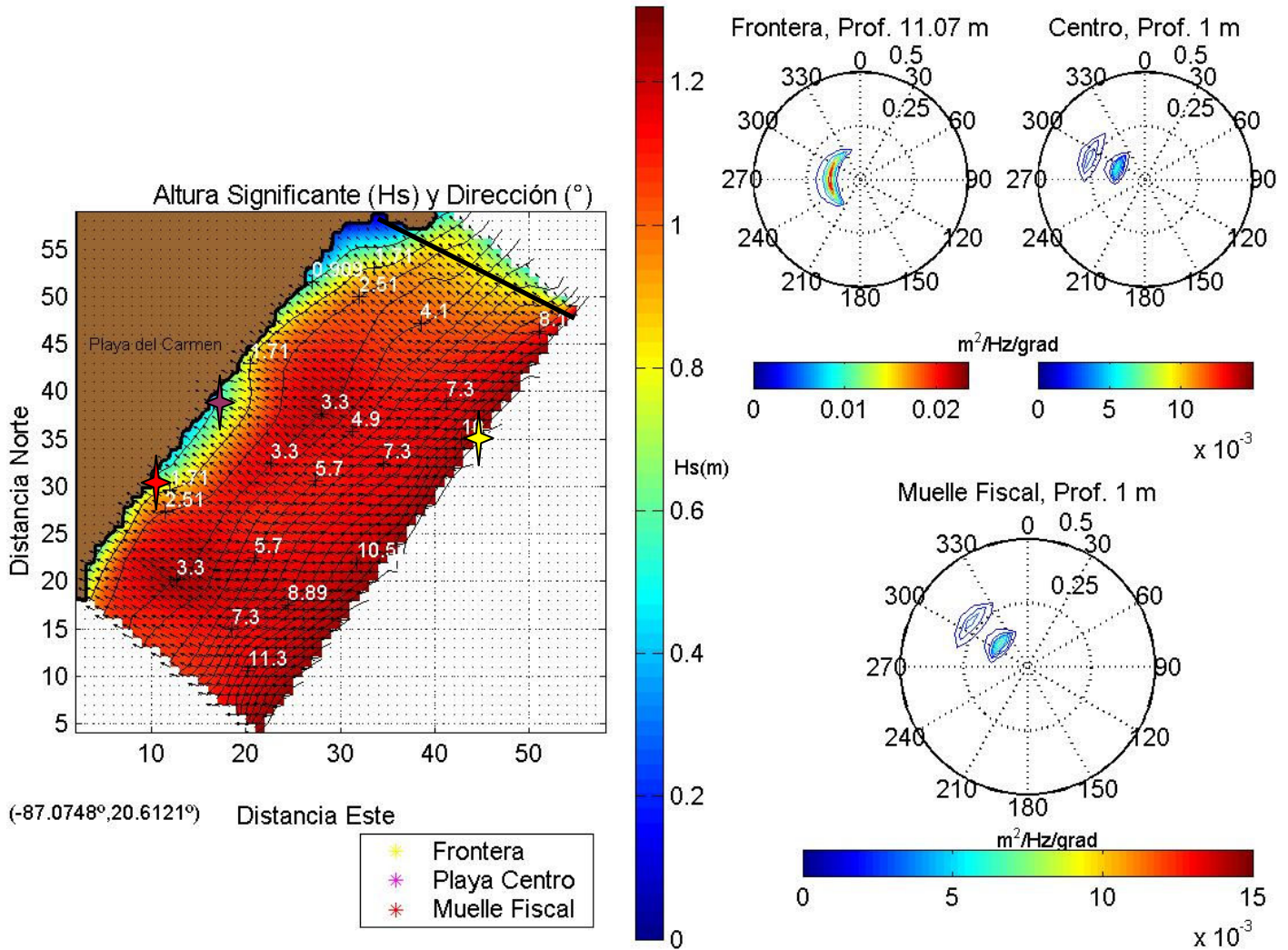


Figura 18.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso extremo 2. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m).

### V.3.2.1 Caso 3.

Como se mencionó anteriormente (cap. V.3.2), este caso es muy similar al caso 2, con diferencias mínimas en la  $H_s$ , en la dirección de aproximación de oleaje y en el  $\theta_s$ . Por lo que los valores obtenidos en los puntos de interés (tabla XII) se asemejan bastante. Sin embargo, hay que notar que el área de la propagación del error aumentó un poco más que en el caso anterior (Fig. 19). Debido a esto, los valores de  $H_s$  en la parte norte de la playa (del nodo 51 a 60 en dirección  $yp$ ) pierden su validez y por lo tanto no pueden ser interpretados de la misma forma que en el caso 2 donde el área del error propagado era menor. Cabe mencionar que existe una zona de convergencia de oleaje en la isóbata de 3.3 metros al sur de la playa, en donde por conservación de energía, la ola tiende a un aumento en la  $H_s$ .

Tabla XII.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 3. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1248	1008	11	1.21	268.49
P.centro	470	1092	1	0.59	283
M.fiscal	265	840	1	0.60	295

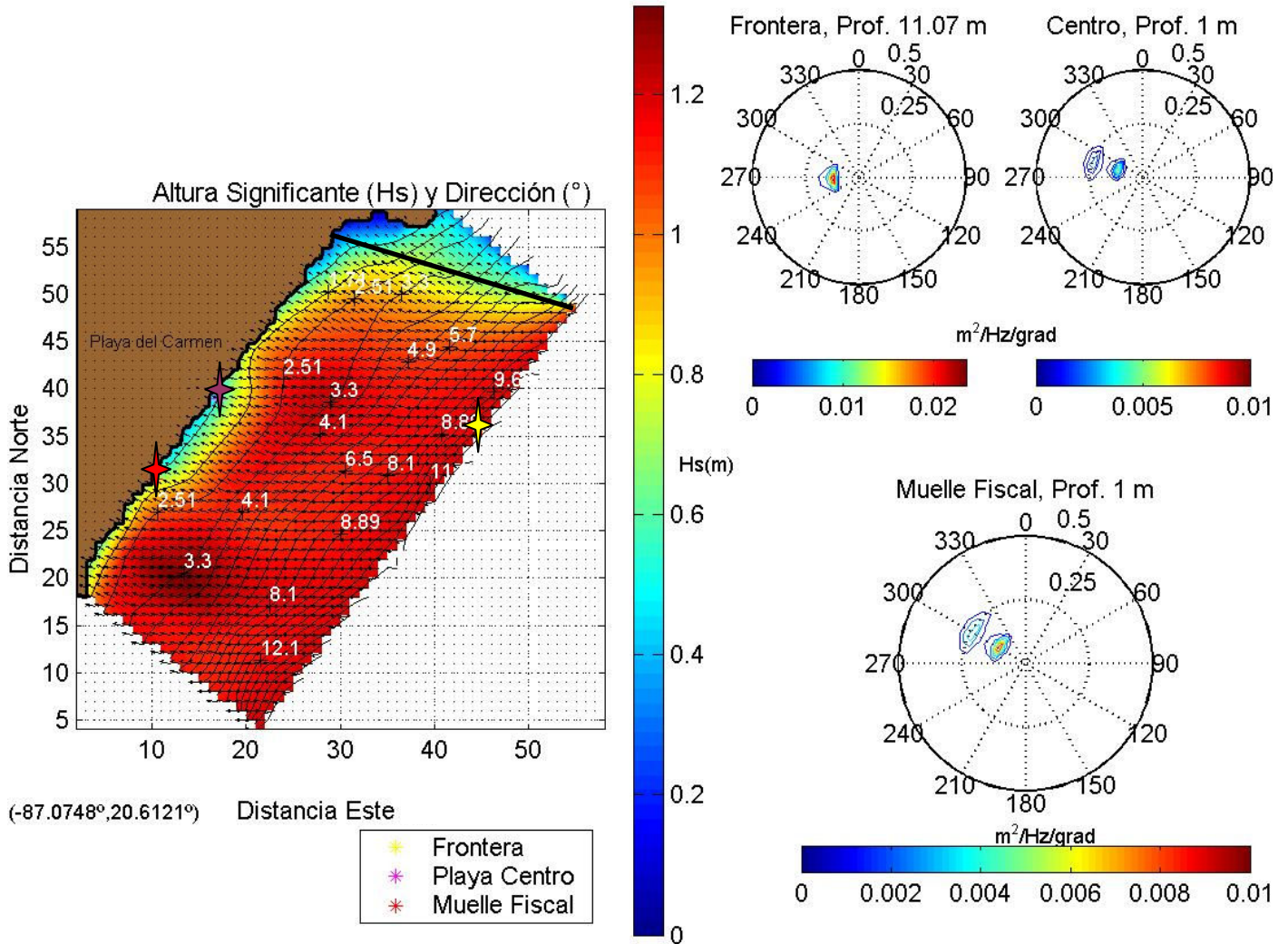


Figura 19.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso extremo 3. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m).



#### **V.3.2.1 Caso 4.**

A diferencia del caso 1, este caso muestra la poca refracción que sufre el oleaje durante su recorrido hacia la costa (Fig. 20), debido a que la dirección de aproximación del oleaje es casi perpendicular a las isóbatas, por lo tanto las crestas de las olas se encuentran prácticamente paralelas a las isóbatas y no sufren cambios significativos en sus velocidades. La diferencia entre los ángulos de la frontera y los ángulos de los puntos de interés son de aproximadamente  $7^\circ$ . Los valores de los parámetros estadísticos obtenidos en los puntos de interés se muestran en la tabla XIII.

Tabla XIII.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 4. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1248	1008	11	1.34	325.92
P.centro	470	1092	1	0.59	319
M.fiscal	265	840	1	0.63	319

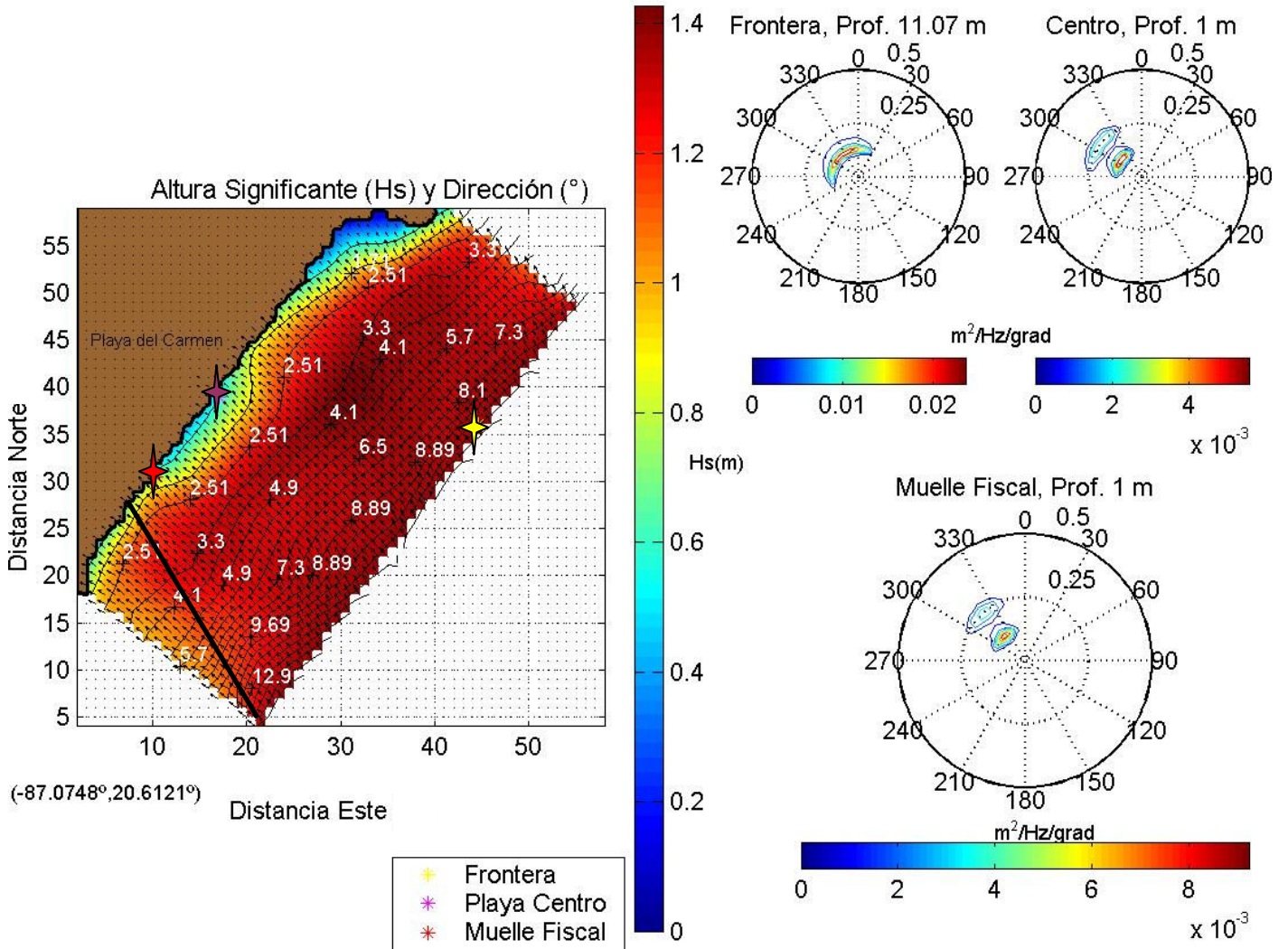


Figura 20.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso extremo 4. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=28 m).

### V.3.3 Condiciones Frecuentes para Akumal.

Las condiciones de frontera en el caso de mayor porcentaje de ocurrencia se muestran en la tabla XIV.-

**Tabla XIV.- Condiciones de frontera para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia observados en AK.**

Hs (m)	0.34
Tp (s)	6
$\theta$ (°)	300
$\theta_s$ (°)	34.5

A diferencia de la configuración costera que presenta **PC**, la costa de **AK** presenta una Bahía con dos puntas salientes en donde la más protuberante es la punta norte (Fig. 14). También presenta cambios bruscos en la batimetría sobre todo para la parte norte de la playa. Esta diferencia en la configuración costera puede ocasionar patrones muy diferentes en la distribución de la energía y por lo tanto en la distribución de la Hs a las observadas en **PC**. Como se verá más adelante, las zonas de convergencia en Akumal se muestran bastante más concentradas que en **PC**.

La figura 21 muestra los resultados de la modelación del oleaje de mayor porcentaje de ocurrencia en **AK**. Se presentan tres zonas importantes de convergencia de oleaje, con valores aproximados a los 0.37 metros de Hs para (1) la punta norte de la Bahía (punto muy cercano a los Hoteles), (2) la punta sur de la Bahía y (3) la parte sur de playa de **AK** (punto sur). Para este caso, además del efecto de someramiento, el aumento de la Hs de las olas cercanas a la costa se debe principalmente a la convergencia de los rayos ortogonales del oleaje inducida por el efecto de refracción. De manera más explícita, la energía total de la cresta de una ola entre una ortogonal y otra permanece constante mientras la ola avanza; por lo tanto, si dos rayos ortogonales convergen (puntas salientes), la misma cantidad de energía es contenida dentro de una cresta con longitud más pequeña, por lo tanto la altura de la ola tiende a incrementarse. Mientras que para zonas de divergencia (bahía) tiende a disminuir. Es por esto que la zona correspondiente a la Bahía de Akumal es la que presenta los menores valores de Hs (alrededor de los 0.15 metros). A excepción de esta zona, la distribución de la Hs se mantiene más o

menos constante sobre la malla computacional. Esto se puede asociar a la poca influencia que presentan los efectos de disipación de la energía del oleaje para olas tan pequeñas (0.34 m), de forma que la  $H_s$  se mantiene similar a la  $H_s$  observada en la frontera espectral hasta encontrar zonas de convergencia y/o valores muy pequeños en la profundidad (de 0.5 metros según el parámetro de rotura  $\gamma$ ). Por esta razón el valor de energía mostrado en el espectro direccional correspondiente a la frontera espectral es similar aunque poco menor a los obtenidos en los puntos de interés a excepción del valor obtenido en la Bahía de **AK**. La razón por la cual los espectros direccionales en Hoteles y Sur son poco más energéticos que en la frontera es porque fueron obtenidos en puntos entre ortogonales convergentes. Los parámetros estadísticos del oleaje obtenidos en los puntos de interés cercanos a la costa se muestran en la tabla XV.

Tabla XV.- Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1200	1140	17.2	0.34	300
Hoteles	1096	1770	1	0.33	306
Bahía	820	1740	1	0.19	342
Sur	339	960	1	0.33	318

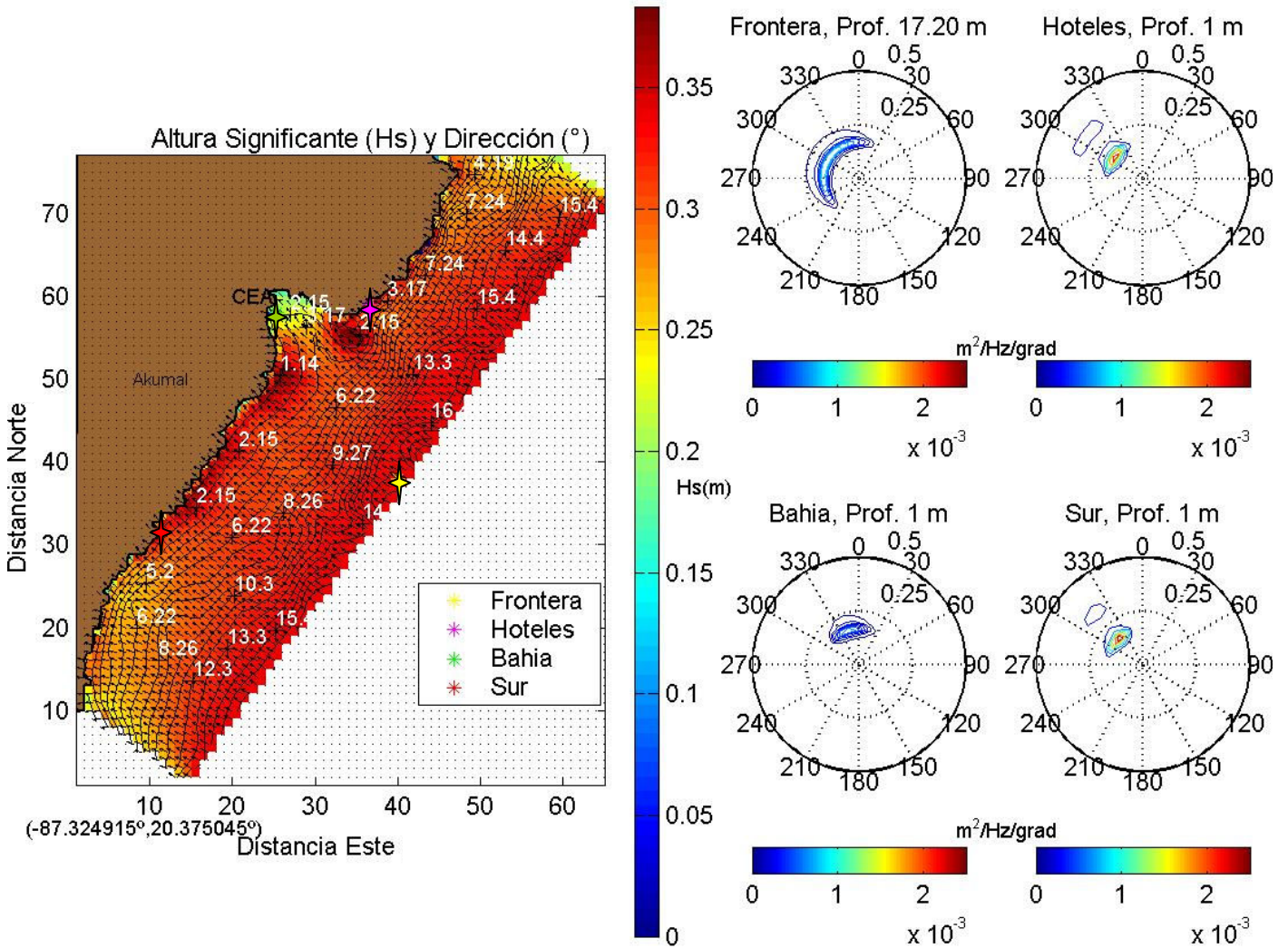


Figura 21.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso de mayor porcentaje de ocurrencia. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m).

### V.3.4 Condiciones Extremas para Akumal.

Se consideraron cuatro casos extremos para la modelación de oleaje en la región de Akumal, en donde el último caso corresponde a la máxima altura significativa registrada durante el huracán Wilma. Las condiciones de frontera para los cuatro casos se muestran en la tabla XVI.-

**Tabla XVI.- Condiciones de frontera para los casos extremos observados en AK.**

Caso 1	
Hs (m)	2.84
Tp (s)	6.00
$\theta$ (°)	314
$\theta_s$ (°)	55.5
Caso 2	
Hs (m)	2.83
Tp (s)	7.00
$\theta$ (°)	308.2
$\theta_s$ (°)	42.81
Caso 3 (T. tropical Stan)	
Hs (m)	3.86
Tp (s)	7.00
$\theta$ (°)	303.3
$\theta_s$ (°)	14.39
Caso 4 (Huracán Wilma)	
Hs (m)	7.58
Tp (s)	11.28
$\theta$ (°)	295.19
$\theta_s$ (°)	50.54

Para el caso de las condiciones de frontera en **AK**, solo se asemejan los valores entre el caso 1 y caso 2, por lo que el caso 1, el caso 3 y el caso 4 son los que se explican más detalladamente. El caso 4 corresponde a una serie de modelaciones estacionarias del huracán Wilma (Anexo III.- CD-ROM) como se detalla más adelante.

### V.3.4.1 Caso 1.

En contraste con la modelación en el caso de mayor porcentaje de ocurrencia, la distribución de Hs se vuelve menos uniforme (Fig. 22), presentando cambios significativos (con respecto a la frontera espectral), a partir de la isóbata de los 4.19 metros. A partir de esta profundidad, los procesos de disipación de energía por fricción con el fondo y por la rotura de la ola (ambos inducidos por el cambio en la batimetría) comienzan a ser más notables. Según el parámetro de rotura  $\gamma$ , una ola de 2.84 metros rompe al encontrarse en una profundidad de 3.89 metros, lo cual coincide con la zona de mayor disipación de energía mostrada en la figura. La parte norte de la playa, después de la Bahía, es la que se encuentra más expuesta al oleaje intenso presentando valores desde 0.9 hasta 1.7 metros de Hs. La Bahía de AK y parte de la zona sur de la costa, muestran los valores más bajos que van desde 0.1 a 1 m de Hs. Posteriormente, en la punta sur se vuelven a incrementar los valores de 1 a 1.5 m de Hs. Como era de esperarse, los espectros direccionales muestran un comportamiento similar a la distribución de las alturas, donde la energía obtenida en el punto Hoteles y la Punta Sur es similar y mayor a la obtenida en la Bahía. El valor de energía en el espectro direccional en la frontera es de  $0.06 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  y disminuye a  $0.01 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  en el punto Hotel y la Punta Sur. En la Bahía se obtuvo un valor muy pequeño de  $0.005 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$ . En los tres puntos de interés, se observó un espectro direccional bimodal, con valores de energía en frecuencias cercanas a 0.5 Hz; debido a la transferencia de energía de frecuencias bajas a frecuencias altas por las interacciones no lineales (triadas) en aguas someras.

Se mostró poco cambio en la dirección de propagación del oleaje (refracción) debido a la orientación cuasi-paralela de la cresta de la ola con respecto a las isóbatas. Sin embargo debido a la curvatura pronunciada de las isóbatas en ciertas zonas; se mostraron algunos cambios notorios en la dirección del oleaje, sobre todo para el punto Bahía. Los valores de los parámetros estadísticos se muestran en la tabla XVII.

Tabla XVII.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 1. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1200	1140	17.2	2.84	314
Hoteles	1096	1770	1	0.91	306
Bahía	820	1740	1	0.53	342
Sur	339	960	1	0.78	318

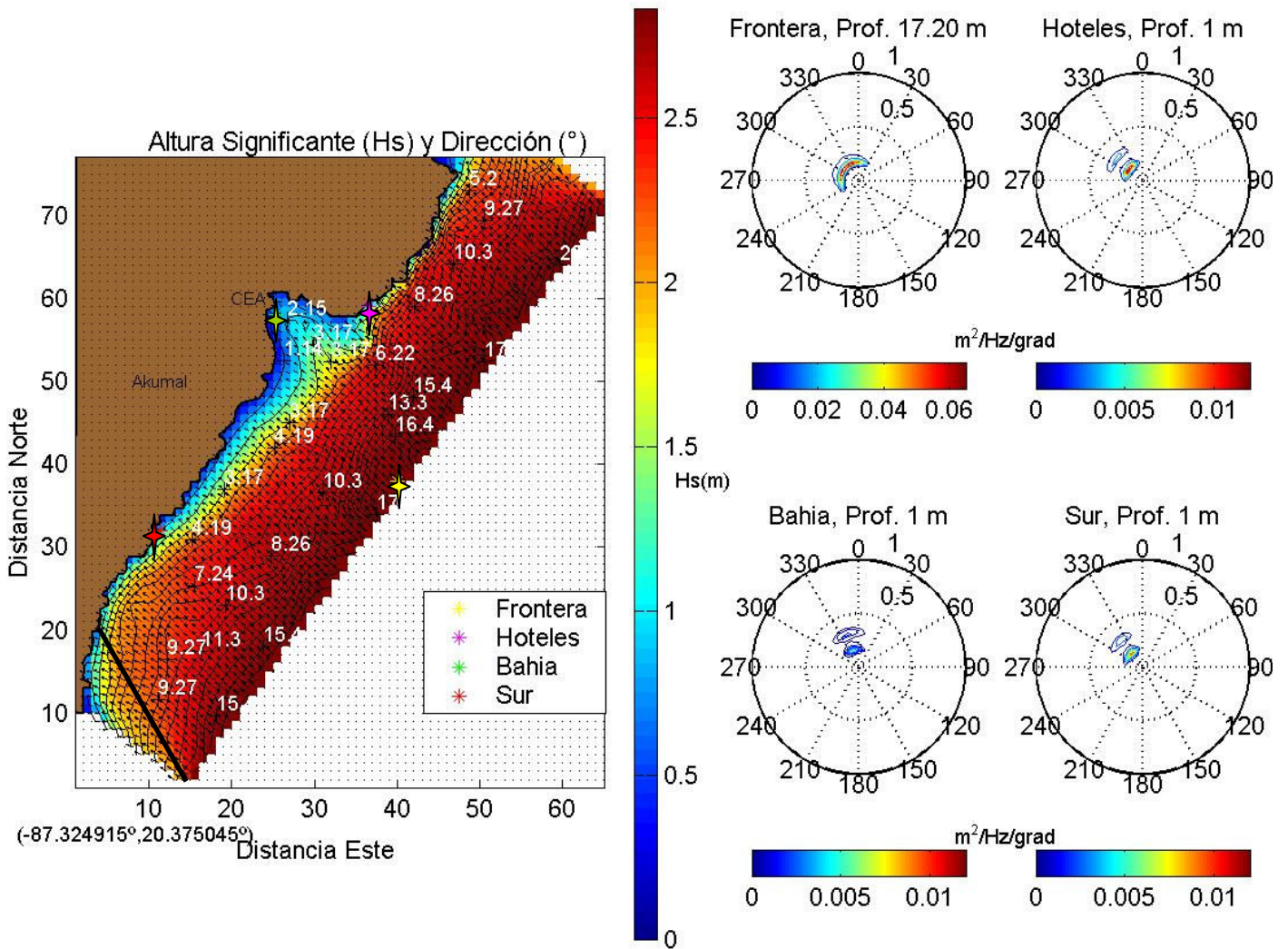


Figura 22.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso extremo 1. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m).



### V.3.4.2 Caso 2.

Tabla XVIII.-Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 2. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1200	1140	17.2	2.83	308.2
Hoteles	1096	1770	1	0.98	306
Bahía	820	1740	1	0.55	342
Sur	339	960	1	0.82	318

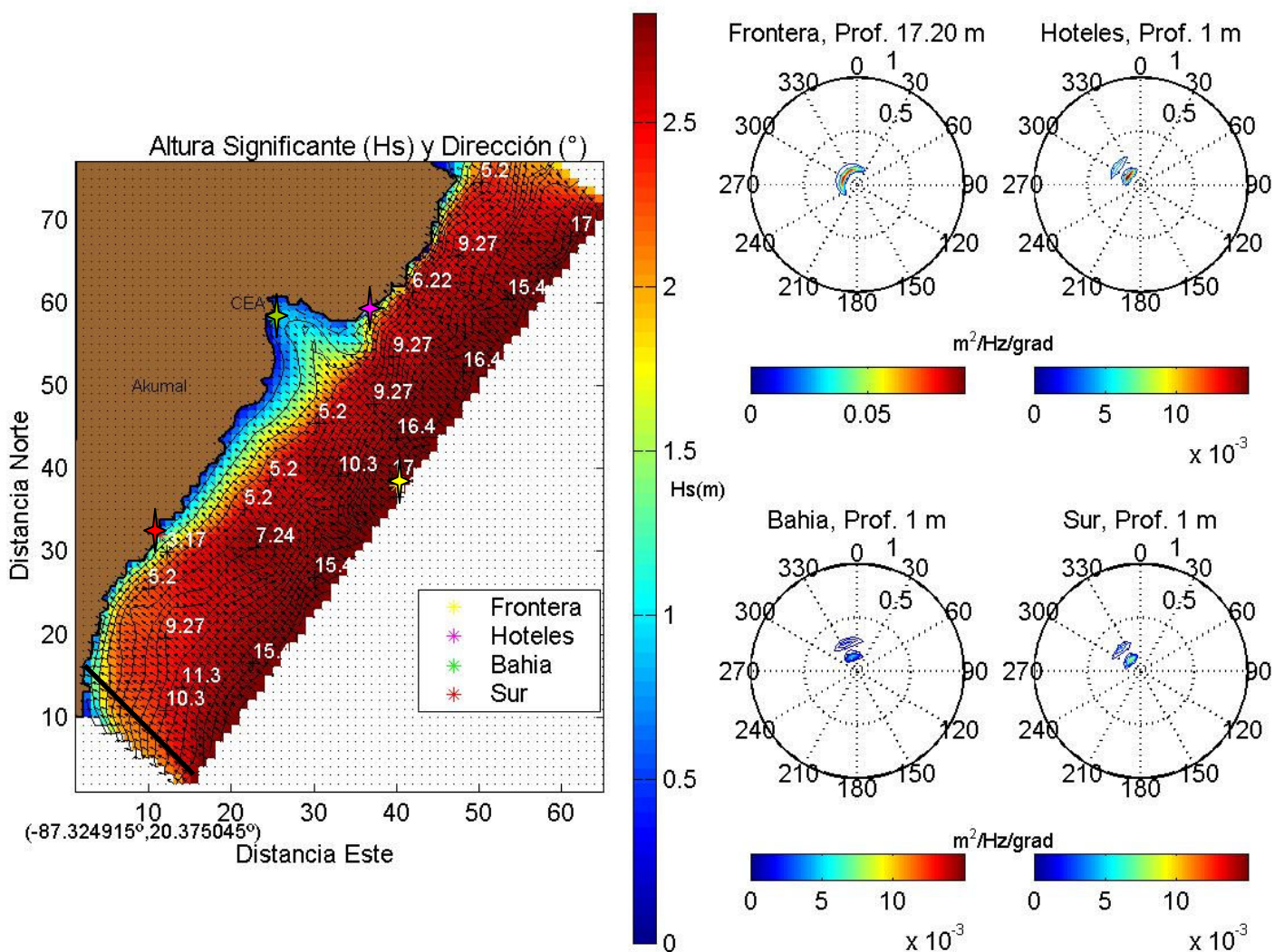


Figura 23.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso extremo 2. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m).

### V.3.4.3 Caso 3.

Tabla 19.- Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 3. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1200	1140	17.2	3.85	303.3
Hoteles	1096	1770	1	1.05	306
Bahía	820	1740	1	0.55	330
Sur	339	960	1	0.84	318

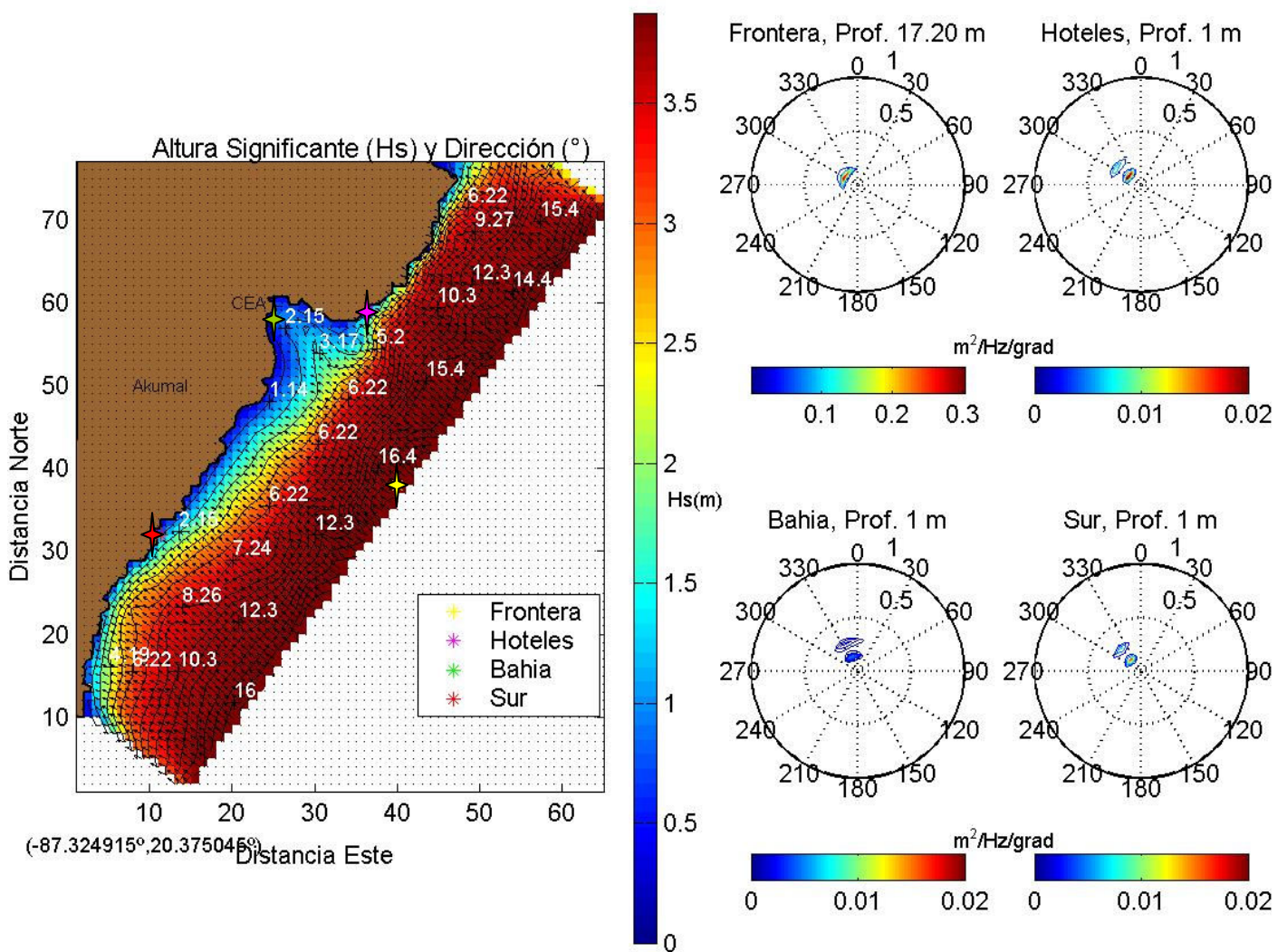


Figura 24.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso extremo 3. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m).

#### V.3.4.4 Caso 4 (Huracán Wilma).

Este caso representa la modelación con condiciones de frontera más extremas en todas las modelaciones, en donde el ADCP registró una Hs de 7.58 metros con un Tp de 11.28 segundos durante el paso del huracán Wilma (tabla XX).

La gran ola de 7.58 metros de Hs, se mantiene más o menos constante hasta la isóbata de los 12.5 metros (Fig 25), en donde la fricción con el fondo es mayor y posteriormente comienza a romper. Como se ha venido definiendo en los casos pasados, la profundidad de rotura según el parámetro  $\gamma$  debe ser de 10.38 metros, lo cual coincide con la zona de mayor dispersión de energía mostrada en la grafica de la modelación numérica. La costa norte de la playa sigue siendo la más expuesta al oleaje, en donde se muestran valores entre los 1.5 y 3 metros de altura. La Bahía de AK sigue presentando valores bajos aunque cercanos al metro de altura y la punta sur presentó valores de Hs entre los 1.5 y 2.5 metros. De forma que para este caso extremo, la zona norte y parte de la zona sur de la costa de AK resultaron ser las más vulnerables al oleaje extremo. Sin embargo, hay que notar la gran disipación de energía que sufre la ola a través de su recorrido a la costa y que es provocada en su mayoría por su rotura inducida por cambios en el fondo varias decenas de metros atrás. El valor máximo de la energía del espectro direccional en la frontera fue de aproximadamente  $1 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  y disminuyó cerca de veinte veces hasta un valor  $0.07 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  en el punto Hoteles y  $0.05 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$  en la punta sur. El valor de energía encontrado en el punto de la bahía fue de  $0.03 \text{ m}^2/\text{Hz}/^\circ$ . Aunque a simple vista parezcan bajos estos valores de energía en los puntos de interés, son muy similares a los obtenidos en el punto de frontera de los casos extremos 1 y 2. Esto sería como tomar la energía en la frontera de los 2 primeros casos extremos y transportarla directamente a los puntos de interés en la costa.

Tabla XX.- Comparación de los valores de los parámetros estadísticos de oleaje en los puntos de interés socioeconómico con respecto a la frontera para el caso extremo 4. Xp y Yp representan la distancia total en metros de la malla computacional.

Puntos	Xp (m)	Yp (m)	Prof. (m)	Hs (m)	$\theta$ (°)
Frontera	1200	1140	17.2	7.58	295.19
Hoteles	1096	1770	1	1.66	306
Bahía	820	1740	1	0.81	330
Sur	339	960	1	1.26	318

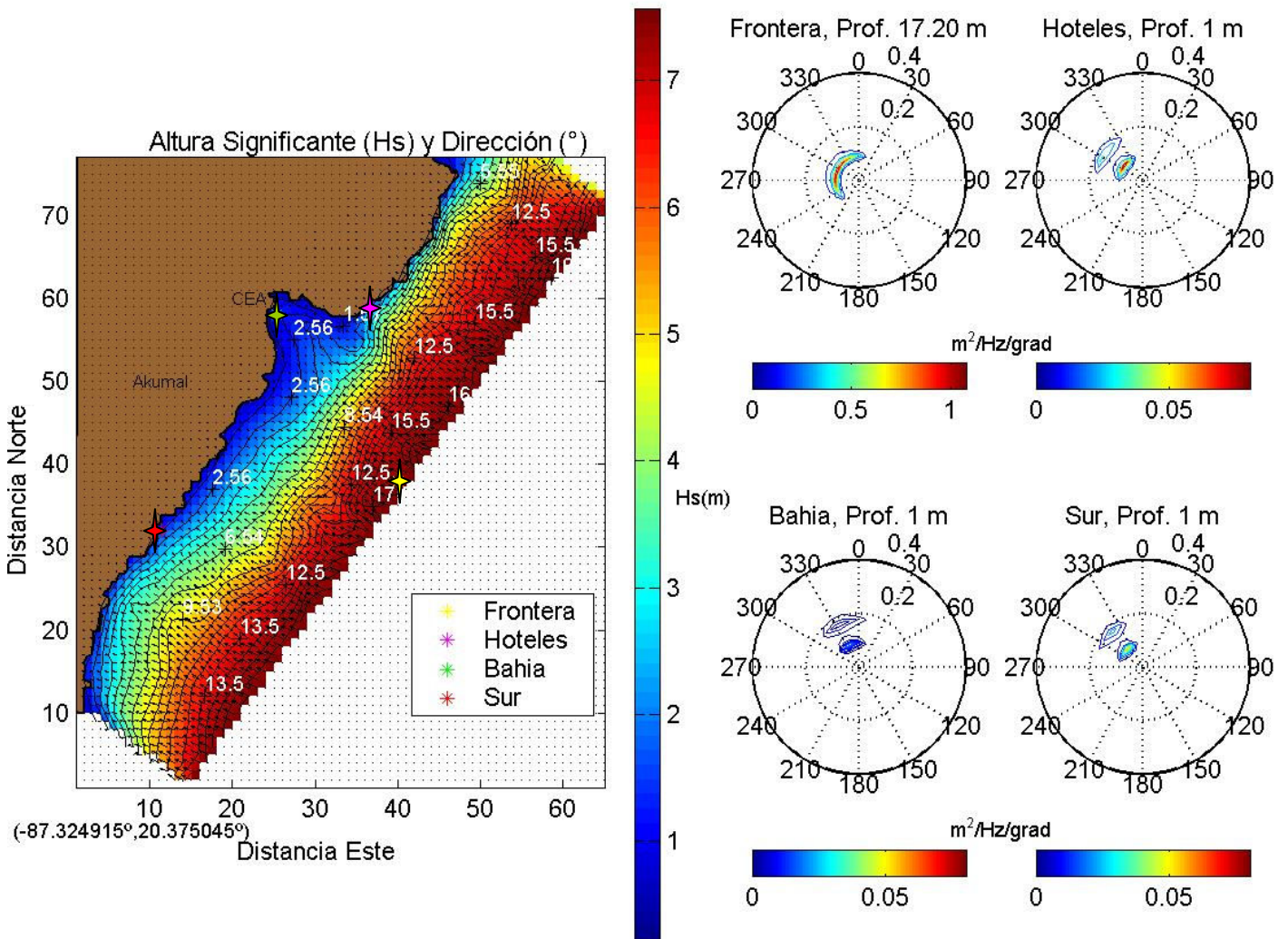


Figura 25.- Der. Modelación de la Hs y  $\theta$  asociada al pico espectral para el caso extremo 4. Izq. evolución del espectro direccional de la frontera espectral hacia los puntos de interés en la costa. Las distancias N y E se encuentran representadas en nodos de malla (1 nodo=30 m).

### V.3.5 Modelación del Huracán Wilma en la costa de Akumal.

Se realizó una secuencia de modelaciones estacionarias con las condiciones de frontera registradas por el ADCP en las aguas costeras de Akumal durante el huracán Wilma (Anexo III.- CD-ROM). La fecha de inicio fue el 16 de Octubre a las 00:00 horas y la fecha final de la modelación fue el 21 de Octubre a las 16:00 horas (GMT -6), lo que corresponde a 5 días bajo la influencia del huracán Wilma. El intervalo de tiempo entre una modelación estacionaria y la otra fue de 2 horas. Por razones de visualización de las alturas significantes cercanas a la costa, la escala de colores se encuentra truncada a los 5 metros de Hs, en donde el valor máximo alcanzado fue de 7.58 m el 21 de Octubre a las 0:00 horas. La secuencia puede ser visualizada en cualquier *software* que pueda leer archivos con extensión tipo \*.gif.

La distribución de Hs en los primeros 2 días de modelación (16 a 18 de Octubre) se muestra cuasi-uniforme a lo largo de la malla computacional y se mantiene por debajo de 1 m tanto en la Bahía como la Punta Norte y Sur. En este momento el ojo del huracán se encuentra a una distancia de 500 km por lo que la influencia del huracán en el oleaje observado en el área de estudio es mínima. 48 horas después se observa un incremento en la altura del oleaje y un cambio notorio en la distribución de Hs a lo largo de la malla presentando valores de 2 a 3 metros en Punta Norte y Sur y de 1 m en la Bahía. Este patrón de distribución de Hs a lo largo de la malla continúa durante las siguientes horas de modelación. Los valores de Hs aumentan aproximadamente un metro cada 8 horas conforme se aproxima el huracán hasta alcanzar el valor máximo registrado por el perfilador acústico de 7.58 metros. Para la mayoría de modelaciones, la zona de error es pequeña, debido a que el intervalo de las direcciones asociadas al pico espectral del oleaje se encuentra dentro de los 270° y los 290° las cuales generan un ángulo muy pequeño de error con las fronteras abiertas. Para la mayoría de los casos este ángulo es de aproximadamente 10° para la frontera norte. Se puede observar que las partes más vulnerables al oleaje extremo son la costa Norte y la costa Sur. Desde la Bahía hasta la Punta Sur, se observan los valores más pequeños de Hs. La evolución de las alturas conforme el progreso del huracán Wilma se muestra en la tabla XXI.

**Tabla XXI.-Evolución de la Hs en los puntos de interés en Akumal durante la presencia del huracán Wilma.**

Fecha (m/d/h)	Distancia (km)	Bahía (m)	P. Norte (m)	P. Sur (m)	Front. (m)
10/16/00	500	0.5	0.5	0.5	0.5
10/18/06	450	0.5	1	1	1
10/19/06	350	1	2	1.5	2.5
10/19/18	300	1.5	2.5	2	3.5
10/20/00	250	1.5	2.5	2.5	4
10/20/14	130	1.5	3	3	5
10/20/20	70	1.5	3	3	5.5
10/21/00	30	1.5	4	3.5	7.5

## VI CONCLUSIONES

- El periodo, la altura y la dirección predominantes durante el tiempo de medición en **PC** se encontraron dentro de los intervalos de 4 a 5 segundos, de 0.3 a 0.4 m y de 240° a 270° respectivamente.
- El periodo, la altura y la dirección predominantes durante el tiempo de medición en **AK** se encontraron dentro de los intervalos de 5 a 6 segundos, de 0.3 a 0.4 m y de 270° a 330°.
- Debido a la predominancia del intervalo de las direcciones encontradas en ambas localidades, se puede inferir que la isla de Cozumel proporciona un área de sombreado para las olas que llegan del sur y del sureste en el caso de **PC** y para las olas que llegan del norte y del noreste en el caso de **AK**.
- El oleaje que se midió en ambas localidades es oleaje que proviene del Mar Caribe al este de la isla de Cozumel, de tipo *swell* pero cercano a la fuente de generación, lo que provoca que la serie de tiempo (asociada al espectro de oleaje) no muestre claramente un desplazamiento de frecuencias bajas a frecuencias altas con respecto al tiempo.
- Las características del oleaje en ambas localidades ( $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ ), se mantienen constantes desde la frontera espectral hacia la costa siempre y cuando la  $H_s$  en la frontera se encuentre dentro del intervalo de 0 a 1 m (debido a que existe poca disipación de energía por rompimiento con el fondo). Por otro lado para los casos extremos ( $H_s > 1.5$ ), las condiciones de oleaje son constantes desde la frontera espectral hasta la isóbata de los 3.3 m en **PC** y desde la frontera espectral hasta la isóbata de los 5 m en **AK**.
- Las zonas de mayor convergencia de  $H_s$  en **PC** se observaron en la isóbata de los 3.3 metros y entre los puntos de Playa Centro y Muelle Fiscal.
- Las zonas de mayor convergencia de  $H_s$  en **AK** se observaron en las puntas norte y sur de la Bahía y entre esta última y el punto de interés P. Sur.
- En todos los casos extremos de ambas localidades se observó una transferencia de energía de frecuencias bajas (0.125 Hz) a frecuencias altas (0.25 Hz) por efectos no lineales (triadas).
- La  $H_s$  en los puntos de interés en **PC** disminuye aproximadamente entre un 30% y un 40% con respecto al valor de  $H_s$  observado en la frontera para los casos extremos.
- La  $H_s$  en los puntos de interés en **AK** disminuye aproximadamente entre un 67% y un 80% para el caso de P. Norte y P. Sur y hasta un 95% en el caso de la Bahía de **AK** con respecto al valor de  $H_s$  observado en la frontera (para los casos extremos), indicando que el arrecife funciona como un rompeolas natural el cual protege a la costa. Sin embargo, la zona norte y sur de esta playa se encuentra más expuesta al oleaje que la parte central.

- Debido a lo concluido en los dos puntos anteriores se puede decir que la costa **AK** es una zona menos expuesta al oleaje que la costa de **PC**, debido que la primera presenta un arrecife el cual funciona como barrera natural al oleaje; por lo que la erosión debida al oleaje en casos extremos puede ser mayor en la costa de **PC** que en la costa de **AK**.



## VII Notas de Tesis: Errores, soluciones y futuras líneas de investigación.

### VII.1 Anclajes.

Se diseñaron unos anclajes de concreto con el propósito de brindar peso y soporte a los tubos de aluminio que sujetan a los perfiladores acústicos (Fig. 26). A cada uno de los anclajes se le añadieron 6 costales de grava (los cuales se sujetaron a la estructura) durante su instalación con el fin de aumentar el peso del anclaje en el fondo marino. Se pensó que este sistema brindaba la seguridad y el peso suficiente para resistir las corrientes de fondo; sin embargo, nunca fueron diseñados para soportar el paso de una tormenta tropical y mucho menos un huracán, convirtiéndose este anclaje en uno de los primeros y posiblemente el más grave de los errores cometidos durante la elaboración de este proyecto; ya que no soportaron: (1) el paso del huracán Emily en Tulum, en donde se perdió por completo el funcionamiento de un instrumento y (2) el paso del huracán Wilma en Akumal, en donde el anclaje fue arrastrado por las fuertes corrientes 1.5 km de su posición original hacia el arrecife. Afortunadamente la instrumentación interna del perfilador resistió y los datos se pudieron descargar sin ningún problema. Sin embargo el instrumento sufrió daños en la capa externa (Fig. 26).

En resumen, los problemas que presentan las losetas de concreto son los siguientes:

- El diseño ofrece resistencia al empuje del agua.
- La densidad del concreto no proporciona el peso adecuado al volumen del anclaje.
- En caso de desprendimiento del suelo el diseño no ofrece protección para el instrumento.
- Si se pierde el anclaje no existe forma de rastrear el instrumento.

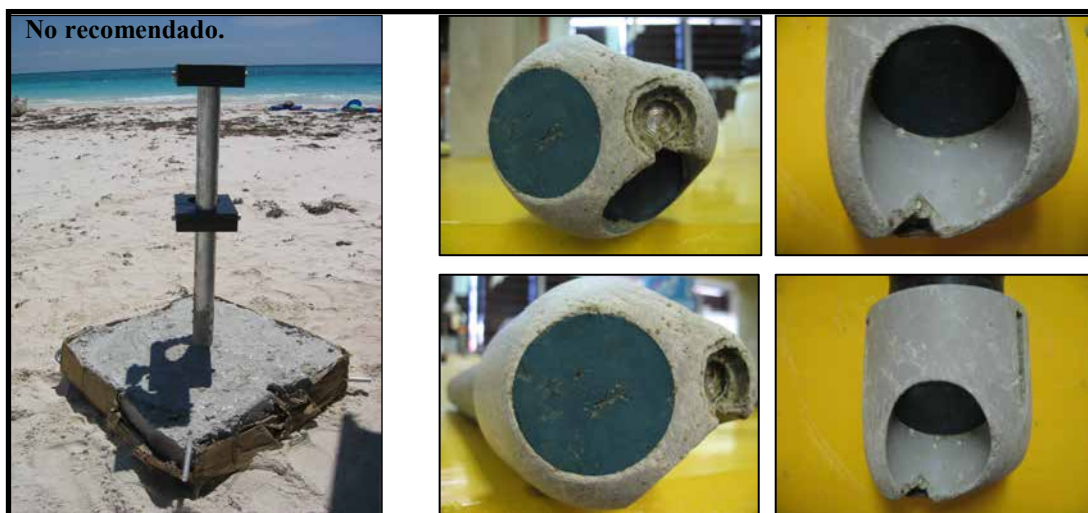


Figura 26.- *Izq.* Anclaje de loseta de concreto antes de su instalación en Tulum. *Der.* Daños que sufrió el ADCP.

Durante la tercer campaña de medición que solamente se realizó en Playa del Carmen se utilizó el método de enterrar un tubo de 2.5 metros por fluidizado de arena (Fig. 4), el cual funciono bastante bien pero nunca fue probado durante condiciones de huracán; por lo que tampoco se recomienda para las campañas intensivas de medición en la zona del Caribe que frecuentemente es impactado por huracanes. Debido a esto, surgió la

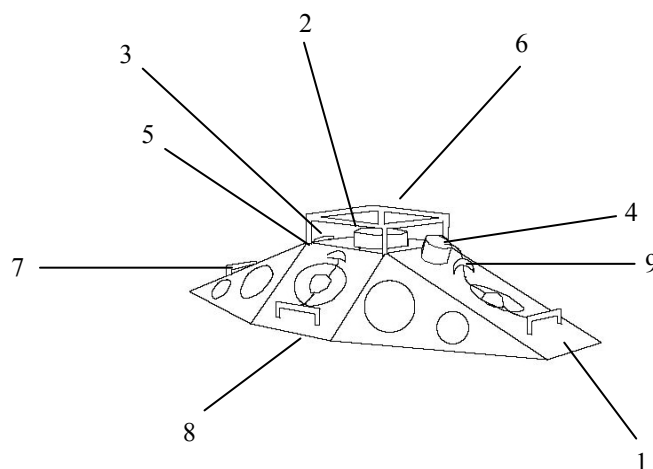
inquietud de proponer un prototipo de anclaje que tenga buen desempeño durante las condiciones marinas generadas por tormentas y huracanes.

El diseño del se propone a continuación es un prototipo de anclaje que necesita ser perfeccionado, sin embargo se muestran las características principales (a desarrollar) que este debe de tener para soportar la dinámica marina bajo condiciones extremas como tormentas y huracanes a 30 m de profundidad y con un suelo arenoso el cual se presenta en Playa del Carmen y en algunas zonas de Tulum. La estructura principal del anclaje es una reproducción similar a los que se han utilizado alrededor del mundo en diferentes campañas de medición y también a los que han sido fabricados por empresas privadas como *Flotation Technologies*. Algunos ejemplos similares a esta estructura y otras se puede observar en las siguientes ligas:

- <http://www.flotec.com/flo12.html>.
- <http://nortekal.iserver.net/hardware/frame%20gallery/>.

Esta estructura de tipo anti-arrastre o *trawl resistant* (Fig. 27), brinda soporte a la instrumentación, ofrece poca resistencia al empuje del agua y proporciona el peso adecuado con respecto al volumen de la estructura. Las características principales se enlistan a continuación y se muestran en la figura 27:

- (1) Estructura antiarrastre.- Compuesta de aluminio fundido (no afecta la brújula del instrumento).
- (2) Instrumentos.- Diseñado para RDI y AWAC (ADCP's con valor entre \$250,000 y \$1,000,000 de pesos).
- (3) Batería.- Litio o alcalina (grandes).
- (4) Housing y GPS.- Housing construido especialmente para un GPS sencillo.
- (5) Boyas de inflado automático.- Se utilizan 4 boyas con una fuerza de 90 kg.
- (6) Estructura de protección.- Estructura tubular que protege la instrumentación.
- (7) Soporte tipo 1.- Soporte tubular para anclar las boyas de inflado automático así como para maniobrar y/o cargar la estructura.
- (8) Picos antiarrastre.- Dificulta el arrastre.
- (9) Soporte tipo 2.- Soporte en forma de arco para anclar las boyas de inflado automático y para facilitar las maniobras de carga.



**Figura 27.- Esquema del anclaje propuesto para instalaciones en suelos arenosos y mediciones bajo eventos meteorológicos extremos.**

### VII.1.1 Dimensiones y costos.

Se calculo un costo total aproximado del anclaje a partir de las dimensiones de la estructura, las partes mecánicas y eléctricas, tales como el sistema de inflado automático y el GPS. La tabla XXII muestra tanto las dimensiones del anclaje como los costos de las partes, los cuales se obtuvieron por medio de una investigación de mercado vía red ([www.mercanautic.com](http://www.mercanautic.com), <http://www.underwater-gps.com>, [www.rolyanbuoys.com](http://www.rolyanbuoys.com), [www.subprof.com](http://www.subprof.com), [www.maptown.com](http://www.maptown.com), [www.thesextonco.com](http://www.thesextonco.com), [www.azom.com](http://www.azom.com), [www.goodfellow.com/csp/active/gfHome.csp](http://www.goodfellow.com/csp/active/gfHome.csp)).

Tabla XXII.- Dimensiones y costos del anclaje propuesto.

<b>Dimensiones</b>	<b>Valor</b>
Peso (en aire)	530 kg(f)
Volumen interior	0.55 m <sup>3</sup>
Volumen exterior	0.020 m <sup>3</sup>
Alto	0.5 m
Ancho	0.7 m
Longitud	2 m
<b>Parte</b>	<b>Costo (m.n)</b>
Estructura de aluminio (1 ton Al = \$ 31,042)	\$ 16,450.00
4 Boyas (132 kg de boyancia c/u)	\$ 15,000.00
4 sistemas de inflado automático (tanques de Co <sub>2</sub> , relojes y válvulas)	\$ 15,000.00
GPS y housing	\$ 12,000.00
Accesorios (pintura antifouling, cabos y cadenas)	\$ 1,550.00
Mano de obra (corte y soldadura)	\$ 5,000.00
<b>Total</b>	<b>\$ 65, 000.00</b>

### VII.1.2 Desempeño del anclaje.

#### VII.1.2.1 Ventajas.

- (1) Antiarrastre.
- (2) Estabilidad.
- (4) No magnético.
- (5) Recuperación por inflado automático.
- (6) Localización por GPS.
- (7) Pintura antifouling resistente a la corrosión.

#### VII.1.2.2 Desventajas.

- (1) Mediano costo (25% al 6 % del valor total del instrumento)
- (2) La instalación requiere de una embarcación mediana con winche y 2 buzos lo que resulta en un aumento a los costos de instalación.

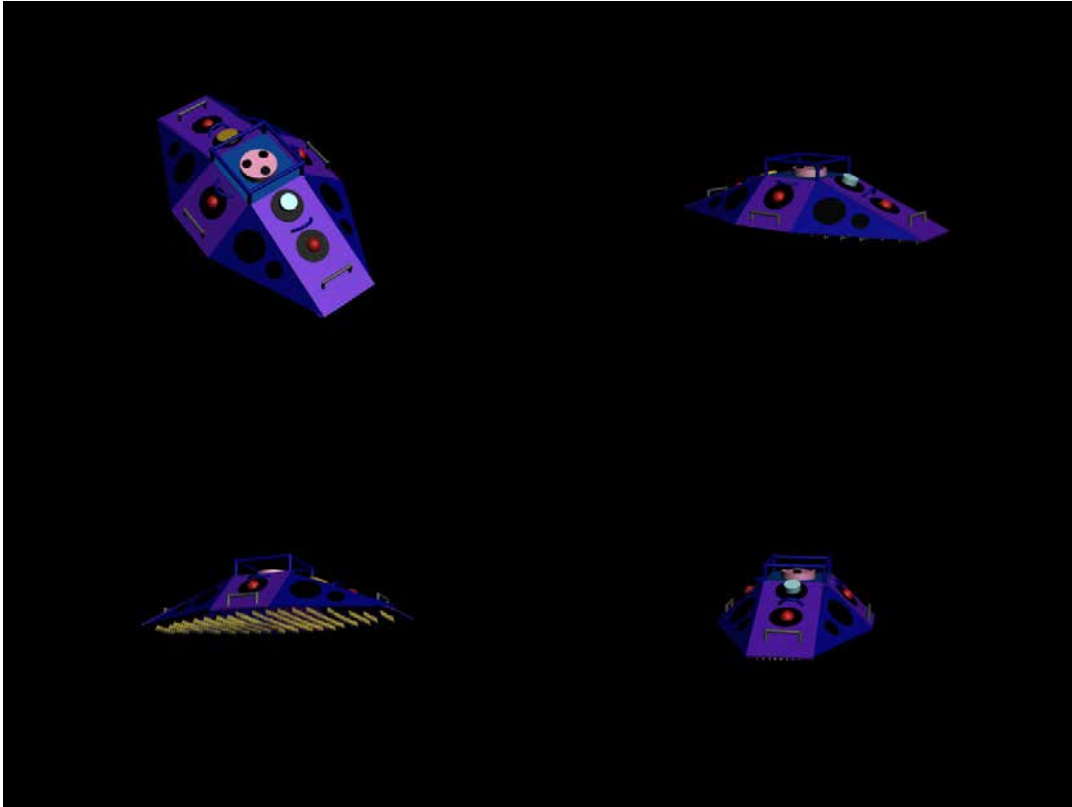


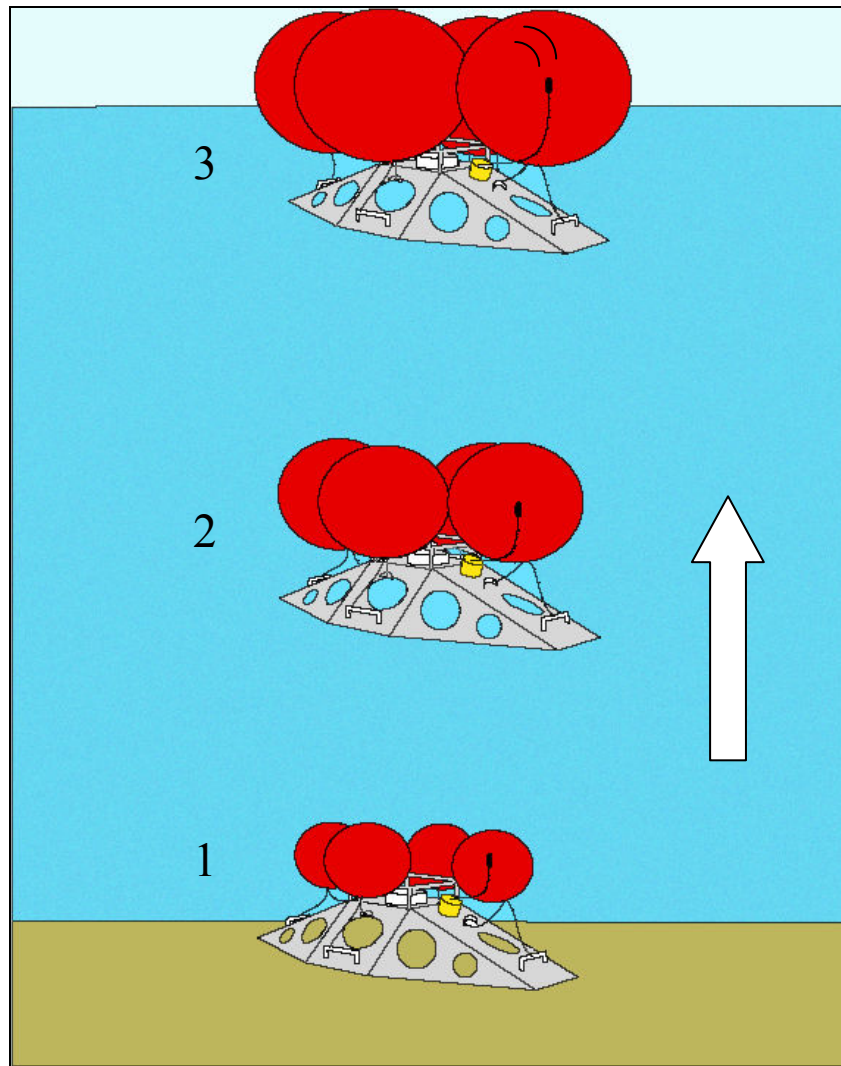
Figura 28.- Esquema tridimensional del anclaje propuesto en diferentes vistas.

### VII.1.2 Recuperación.

Si el anclaje permanece en el mismo lugar una vez concluida la campaña de medición y se desea seguir capturando datos, el instrumento puede ser retirado y reinstalado por un buzo sin la necesidad de recuperar el anclaje. De lo contrario, si se desea retirar por completo el anclaje o este no es encontrado en la posición original al principio de la campaña, se aplica el sistema de recuperación por boyas de inflado automático y localización por geoposicionador (Fig. 29). En este caso se desea utilizar un rastreador pequeño y sencillo como los que se utilizan para rastrear automóviles o barcos robados.

El proceso de recuperación (Fig. 29) consiste en:

- (1) Se activa el sistema automático de inflado por medio de relojes programados conectados a las válvulas de los tanque de  $\text{CO}_2$ .
- (2) El anclaje viaja hacia superficie una vez que se haya alcanzado la flotación positiva.
- (3) El rastreador GPS, manda la señal al satélite el cual transmite nuevamente a la embarcación.



**Figura 29.- Esquema que representa la simulación de la recuperación del anclaje por medio del sistema de inflado automático de boyas.**

Este anclaje desea brindar la seguridad necesaria durante las campañas de medición (ya sea tanto en condiciones normales como extremas) en donde la función del anclaje es garantizar la protección de los perfiladores acústicos de forma que se obtengan series de tiempo completas de oleaje y corrientes para el usuario.

## VII.2 Series de Tiempo.

Una de las características ideales que debe tener una serie de tiempo de oleaje es que sea ininterrumpida y con una duración mínima de un año lo que nos pueda determinar estacionalidad. Desafortunadamente es difícil realizar series de tiempo sin interrupciones y de tan larga duración debido a diversos factores que afectan el proceso como la duración de las baterías y las áreas de estudio frecuentadas por huracanes, los cuales pueden arrastrar o enterrar los anclajes. La duración de las baterías depende críticamente de la configuración del muestreo del instrumento, mientras mayor resolución temporal y espacial se requiera, menor será la duración de la batería. Los factores que afectan a la duración de la batería deben de ajustarse a un rendimiento alto de la batería sin que se vean afectadas las mediciones. A continuación se muestran los factores de configuración que alteran la duración de una batería:

Para medir corrientes:

- a) Intervalo de muestreo.
- b) Cantidad de celdas.
- c) Tamaño de cada celda.
- d) Distancia de blanqueo.
- e) Actualización del compás.

Para medir oleaje:

- a) Tamaño de celda.
- b) Número de muestras.
- c) Frecuencia de muestreo.
- d) Intervalo de muestro.

Existen dos tipos de baterías que el proveedor de NORTEK *instruments* vende para este instrumento: (1) las alcalinas y (2) las de litio. Dentro de cada categoría existen tres tamaños y por lo tanto tres rendimientos diferentes. Las baterías de litio duran más tiempo que las alcalinas pero son menos económicas, sin embargo, las baterías de litio se recomiendan para campañas de medición con una duración de 3 hasta 8 meses aproximadamente (dependiendo de la configuración de los factores mencionados).

Otro factor determinante en la obtención de series de tiempo completas es la facilidad tanto económica como logística que otorga el proyecto para realizar viajes frecuentes a la zona de estudio y así poder realizar supervisiones visuales y mantenimiento del equipo cada vez que se requiera.

## **VII.2 Batimetrías.**

Una característica básica de los modelos de oleaje, son los datos de entrada como la batimetría; mientras mayor resolución exista en el mapa de fondo obtenido, lo resultados serán mejores. Las batimetrías que se realizaron para este proyecto de tesis, tuvieron el defecto de no ser lo suficientemente grandes de forma que la propagación del error por el efecto que causan las fronteras laterales abiertas (sin información de oleaje) tuvo influencia en el área de estudio como se muestra en los resultados. Para evitar este tipo de error siempre hay que considerar las limitaciones del modelo que se pretende utilizar y extenderse uno o dos kilómetros más del área de estudio por protección. Otra consideración importante al realizar las batimetrías es la distancia entre un transecto y otro, debido a que mientras mayor sea la distancia entre transectos, mayor será el espacio de interpolación, por lo que se recomiendan transectos poco distanciados, aunque se requiera de más tiempo y esfuerzo al realizar la batimetría.

## **VII.3 Futuras líneas de trabajo.**

A partir de los datos obtenidos en la tesis, se proyecta la realización de un artículo científico, la colaboración con organizaciones gubernamentales y no gubernamentales y el desarrollo de instrumentación oceanográfica.

### **VII.3.1 Artículo científico.**

A partir de los datos de oleaje obtenidos por los ADCP durante el presente proyecto surgió la idea de preparar un artículo científico con objetivos similares a los expuestos en el capítulo III pero con una metodología totalmente distinta; en donde los datos crudos de oleaje funcionen para validar el modelo SWAN en una región que abarque la mayor parte del Caribe Mexicano bajo condiciones de huracán. Una vez validado el modelo se pretende estudiar la evolución del espectro direccional a lo largo de la malla computacional y en zonas costeras de interés. La gran diferencia que tendrá este artículo con el presente trabajo es que se podrá validar el modelo SWAN en la zona de estudio y este funcionará con el viento como término fuente principal. Para llevar a cabo la simulación de oleaje, se pretende alimentar al modelo con una batimetría detallada de la zona entre las coordenadas  $-88.9833^{\circ}$  a  $-64^{\circ}$  de longitud oeste y de  $6.5026^{\circ}$  a  $23.2526^{\circ}$  de latitud norte por medio de datos de altimetría del ETOPO-2 proporcionados por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) con una resolución de 2 minutos de grado. Posteriormente, para suministrar las condiciones iniciales de los procesos de generación de oleaje, se obtendrán los campos de viento en el tiempo en el cual ocurrió el huracán Wilma por medio de datos de reanálisis proporcionados por la NARR (North American Regional Reanalysis) con una resolución espacial de 32 km y temporal de cada 6 horas.

### **VII.3.2 Información útil.**

Las batimetrías, obtenidas en Akumal y en Playa del Carmen pueden ser útiles para organizaciones tanto gubernamentales como no gubernamentales para complementar información y para la realización de diversos proyectos de desarrollo y conservación.

#### **VII.3.2.1 Organizaciones gubernamentales.**

Las batimetrías de Playa del Carmen y Akumal puede ser información útil para diversas instituciones y secretarías del gobierno. Por el momento, los dos planos batimétricos están en proceso de revisión por parte de la Dirección General Adjunta de Hidrografía y Cartografía de la Secretaría de la Armada de México (SEMAR), ya que se requiere de cierto control de calidad establecido por la SEMAR para que los planos batimétricos puedan ser incluidos dentro de las cartas náuticas. Una vez aceptada la metodología, estas batimetrías pretenden completar la zona más costera de la plataforma continental de Akumal y Playa del Carmen.

#### **VII.3.2.2 Organizaciones no gubernamentales.**

Los datos crudos que incluyen la posición geográfica y la profundidad del mar fueron enviados al Centro Ecológico de Akumal (CEA) con la intención de contribuir a su base de datos actual como la primer batimetría de Akumal, en donde se utilizará por primera vez para el proyecto titulado “Plan de ordenamiento de Akumal” bajo la dirección del Dr. Paul Sánchez Navarro. Cabe repetir que el CEA facilitó en tres diversas ocasiones, las embarcaciones con las cuales se realizó la instalación del instrumento y la batimetría.

### **VII.3.3 Desarrollo de instrumentación.**

Para desarrollar, probar y perfeccionar el prototipo de anclaje propuesto en la sección **VII.1** se pretende solicitar una beca de apoyo al desarrollo de tecnología otorgada todos los años por la compañía NORTEK *instruments*. En caso de obtener el financiamiento, se buscarán las facilidades y el personal más apropiado de la UNAM en colaboración con el CICESE para su debida construcción.



## VIII Anexos.

### VIII.1 Anexo I.- Funciones de transferencia para la obtención del espectro direccional de oleaje, altura, dirección y periodo.

Las funciones de transferencia relacionadas a la transformación de los valores medidos en aguas medias a valores en la superficie son las siguientes:

$$T_p = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad \text{para la presión,}$$

$$T_v = \frac{W \sinh k(h+z)}{\cosh kh} \quad \text{para la velocidad.}$$

Donde  $h$  es la profundidad,  $z$  es la posición en la columna de agua,  $W$  es la frecuencia angular y  $k$  es el número de onda ( $k=2\Pi/\lambda$ ). El número de onda se calcula en función de la frecuencia angular o la longitud de onda utilizando las siguientes expresiones:

$$W^2 = gk \tanh kh \quad \text{y} \quad \lambda = \frac{gT^2}{2\Pi} \tanh\left(\frac{2\Pi h}{\lambda}\right).$$

El espectro cruzado se expresa como  $C_{xy} = S_x S_y^*$  en donde \* indica el conjugado. El espectro cruzado se usa principalmente para estimar la dirección y el auto espectro es utilizado para calcular la altura y el periodo. Las siguientes relaciones se utilizan para transferir el espectro medido en aguas medias hacia la superficie.

$$C_{\eta\eta} = \frac{C_{pp}}{T_p^2} = \frac{C_{vv}}{T_v^2}$$

La altura significativa se obtiene a partir del espectro de la superficie del mar. Una expresión generalizada que se aproxima al valor de  $H_s$  es:  $H_{m0} = 3.8\sqrt{m0}$ , en donde  $m0$  representa el primer momento espectral. El  $k$ -ésimo momento se define a partir de la ecuación:  $m_k = \int f^k C(f)df$ , en donde  $C$  es el espectro de energía y  $f$  la frecuencia.

El periodo de pico espectral  $T_p$  se define como el periodo asociado al pico de mayor energía del espectro. El periodo medio  $T_m$  se obtiene utilizando el primer y segundo momento espectral:

$$T_m = \sqrt{\frac{m0}{m2}}$$

La distribución de energía en el dominio de la frecuencia y de la dirección (espectro direccional) se calcula mediante la expresión:

$$E(f, \theta) = S(f)D(f, \theta).$$

Donde  $S$  es la distribución en el dominio de las frecuencias y  $D$  es la distribución normalizada de las direcciones. Este último término debe de cumplir con las siguientes condiciones:

$$\int_0^{2\pi} D(f, \theta) d\theta = 1,$$

$$D > 0 \text{ para } [0, 2\pi].$$

La distribución de las direcciones  $D$  puede calcular por una expansión de Fourier (Longuet-Higgins, 1963):

$$D(f, \theta) = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \sum_n \{a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta\} \right]$$

Generalmente los dos parámetros que definen a la distribución de las direcciones son: (1) la media direccional,  $\theta_1$  y la dispersión de la distribución,  $\sigma$ . La dirección media se expresa en términos del primer par de coeficientes de Fourier:

$$\theta_1(f) = \arctan(b_1(f)/a_1(f))$$

La dispersión de las direcciones se expresan en términos de los coeficientes de Fourier como:

$$\sigma = \sqrt{2(1-r_1)}, \quad \text{donde } r_1 = \sqrt{(a_1^2 - b_1^2)}.$$

Los dos primeros pares de los coeficientes de Fourier pueden ser expresados en términos del espectro cruzado (Krogstad, 1991):

$$a_1(f) = \frac{C_{pu}}{|C_{pp}(C_{uu} + C_{vv})|^{1/2}} \quad b_1(f) = \frac{C_{pv}}{|C_{pp}(C_{uu} + C_{vv})|^{1/2}}$$

$$a_2(f) = \frac{C_{uu} - C_{vv}}{C_{uu} + C_{vv}} \quad b_2(f) = \frac{2C_{vu}}{C_{uu} + C_{vv}}$$

## VIII.2 Anexo II.- Descripción de los comandos utilizados en la programación del SWAN y su aplicación en DOS.

Antes de correr cualquier archivo \*.swn en el símbolo de sistema de DOS, es muy importante verificar que dentro del archivo *swanrun.bat* (debe estar en la misma carpeta donde se encuentra el \*.swn que se desea correr) se especifique la ruta correcta a la carpeta donde se encuentra el archivo *swan.exe* (e.g. C:\SWAN4041\code\swanexe\swan.exe). Si la ruta es incorrecta, al momento de intentar correr el archivo aparecerá en pantalla el siguiente mensaje: *archivo no se reconoce como comando interno o externo, programa o archivo por lotes ejecutable*. El siguiente ejemplo muestra el lugar específico (línea 43) en donde debe especificar la ruta correcta dentro del *swanrun.bat* :

---

```
línea 42: if not %nprocs%==1 goto PARALLEL1
línea 43: C:\SWAN4041\code\swanexe\swan.exe
línea 44: OK5
```

---

### VIII.2.1 Programa.-

El programa consta de cuatro partes principales, (1) la cabecera en donde se especifica el nombre del proyecto, (2) las entradas en donde se introduce la batimetría, las dimensiones de la malla computacional y las condiciones iniciales; (3) los datos de salida que incluyen tablas y bloques numéricos con los resultados y (4) la configuración de la corrida. Este archivo se puede configurar en cualquier editor de texto como *wordpad* o el block de notas y se guarda con extensión \*.swn. Los comandos que se desean ejecutar se especifican en cada reglón y son leídos por el programa si no presentan un símbolo \$ al comienzo de cada línea. El ejemplo que se muestra a continuación es el archivo que se utilizó para modelar el oleaje para condiciones de mayor porcentaje de ocurrencia en Akumal (*akumalmaypor.swn*):

```
$*****CABECERA*****
$
PROJ 'akumalmaypor' '1'
MODE STAT TWOD
COORD CART
$MODELACION CON NUEVA BATIMETRIA NMEA
$MODELACION DE PORCENTAJE DE MAYOR OCURRENCIA DE HS
$
$*****ENTRADAS DEL MODELO*****
$
$
CGRID REG 400. 0. 54. 2610. 810. 87 27 CIRCLE 30 0.05 1
$
$
INP BOT REG 0. 0. 0. 64 76 30. 30.
READ BOT 1. 'akumperfecta3.bot' 1 0 FREE
BOUN SHAPE JON 3.3 PEAK DSPR DEGR
BOUN SIDE E CLOCKWS CON PAR 0.34 6. 150. 34.5
$
$
TRIAD
OFF QUAD
FRIC
BRE
DIFFRAC
```

```

$
$***** SALIDAS DEL MODELO *****
POINT 'PUNTOS' FILE 'akpoints.txt'
TABLE 'PUNTOS' HEAD 'akpuntos.txt' XP YP DEP HS PDIR DIR
BLOCK 'BOTTGRID' NOHEAD 'akmayporc.mat' LAY 4 HS DIR PDIR TDIR DEP
SPEC 'PUNTOS' SPEC1D 'sp1d.out'
SPEC 'PUNTOS' SPEC2D 'sp2d.out'
$***** CONFIG. DE LA CORRIDA *****
COMPUTE
STOP

```

## VIII.2.2 Descripción de los comandos.

Los comandos que se describen a continuación se encuentran divididos en cuatro secciones y son solamente algunos de los varios comandos que se pueden utilizar en el programa SWAN

### VII.2.2.1 Cabecera

1. **PROJ.-** Título de la modelación.
2. **MODE.-** Especifica si la modelación va a ser estacionaria o no estacionaria y cuantas dimensiones de plantean para resolver el problema.
  - 2.1 **STAT.-** Modelación estacionaria.
  - 2.1 **TWOD.-** Modelación bidimensional (x,y).
3. **COORD .-** Establece el tipo de coordenadas.
  - 3.1 **CART.-** Coordenadas cartesianas.

### VIII.2.2.2 Entradas del Modelo

4. **CGRID** Define las dimensiones de la malla computacional:
  - 4.1 **REG .-** Define a la malla computacional como regular (rectangular):

[xpc]= origen de la malla computacional en la dirección x.  
 [ypc]= origen de la malla computacional en la dirección y.  
 [alpc]= rotación de la malla computacional.  
 [xlenc]= longitud de la malla en dirección x.  
 [ylenc]= longitud de la malla en dirección y.  
 [mxc]= número de nodos en dirección x.  
 [myc]= número de nodos en dirección y.

- 4.2 **CIRCLE.-** Esta opción indica que las direcciones espectrales cubren todo el círculo:

[mdc]= Incremento en grados del espectro direccional.  
 [flow]= Filtro de bajas frecuencias.  
 [fhigh]= Filtro de altas frecuencias.

5. **INP.-** Con esta opción, el usuario define la localización geográfica, el tamaño y la orientación de una malla de entrada (batimetría, corrientes y viento).
  - 5.1 **BOT** Define a la malla de entrada como la batimetría.
  - 5.2 **REG.-** Define a la batimetría como una malla rectangular.
6. **READ BOT.-** Define el archivo donde se encuentra la malla de batimetría y la forma de leerla, el archivo puede ser *\*.bot*, *\*.txt* o *\*.dat*

**6.1 FREE.-** Indica que los valores de la malla vana a ser leídos de forma libre (formato estándar FORTRAN).

**7. BOUN SHAPE.-** Define la forma del espectro en la frontera de la malla geográfica.

**7.1 JON.-** Espectro JONSWAP.

**7.2 PEAK.-** Utiliza el periodo de pico espectral.

**7.3 DSPR.-** Define el ancho de la distribución de direcciones en el espectro.

**7.4 DEGR.-** Determina que el DSPR está expresado en términos de la desviación estándar de la distribución de las direcciones.

**8. BOUN SIDE.-** Indica el lado en donde se aplican las condiciones iniciales

**8.1 E.-** Este

**8.2 CLOCKWS.-** Determina que las direcciones van a favor de las manecillas del reloj.

**8.3 CON.-** Define al espectro constante a lo largo de la frontera donde se aplican las condiciones iniciales.

**8.4 PAR.-** Establece las condiciones iniciales:

[hs] = altura significativa (metros).

[per] = periodo del pico espectral (segundos).

[dir] = dirección asociada al pico espectral.

[dd] = anchura del espectro direccional.

**9. TRIAD.-** Define las interacciones no lineales por triadas

**10. OFF QUAD.-** Apaga las cuádrupletas.

**11. FRIC.-** Establece a la fricción con el fondo como termino disipativo de energía

**12. BRE.-** Establece a la rompiente del oleaje como termino disipativo de energía.

**13. DIFFRAC.-** Toma en cuenta la difracción durante el computo.

### VIII.2.2.3 Salidas del modelo

**14 POINT.-** Define puntos de análisis dentro de la malla computacional.

**14.1 FILE.-** Nombre del archivo que contiene las posiciones geográficas (metros) de los puntos.

**15. TABLE.-** Indica que los resultados deben presentarse en forma de tabla

**15.1 HEAD.-** Indica que la tabla debe llevar cabecera de los siguientes resultados:

XP = componente x del punto de análisis (metros).

YP = componente y del punto de análisis (metros).

DEP= profundidad (metros).

HS = altura significativa (metros).

PDIR = periodo asociado al pico espectral (segundos)

DIR = dirección del pico (grados)

**16. BLOCK.-** Indica que se deben obtener los resultados anteriores pero ahora en forma de bloque para el procesamiento numérico.

**16.1 NOHEAD.-** Indica que el bloque no debe llevar cabecera.

**16.2 LAY.-** Determina el formato del bloque de acuerdo al *software* que se desea utilizar para el procesamiento de datos. El número 4 es para *Matlab*.

**17. SPEC.-** Comando para la obtención de espectros en los puntos de análisis.

**17.1 SPEC1D.-** Espectro unidimensional.

**17.2 SPEC2D.-** Espectro bidimensional.

#### **VIII.2.2.4 Configuración de la corrida**

**18. COMPUTE.-** Ordena al programa que empiece los cálculos.

**19. STOP.-** Marca el final del archivo, cualquier comando después de este será ignorado por el programa.

#### **VII.3 Anexo III.- Animación de la modelación del Huracán Wilma (CD-ROM).**

## VII.4 Anexo V.- Complemento: Corrientes observadas por el ADCP en las dos localidades.

### V.4.1 Playa del Carmen.

En la figura II, se puede observar que las velocidades de la corriente a lo largo de la columna de agua no varía de forma significativa, manteniendo valores cercanos a los que se encuentran en superficie, disminuyendo de forma tenue hacia la profundidad.

Esta atenuación con la profundidad pudiera interpretarse como una influencia del viento local, ya que los valores máximos se encuentran en la superficie.

En contraste, la variación de las velocidades a lo largo del tiempo es significativa, mostrando un rango con valores desde los 0.05 m/s hasta los 0.4 m/s. Los meses de Mayo, Junio y parte de Septiembre presentan mayor variación de velocidades que en el mes de Agosto.

Con respecto a la dirección, se puede observar que la mayor parte del tiempo las corrientes viajan hacia el Norte, con algunas variaciones hacia el suroeste que no duran más de 4 días. Comparando las gráficas de velocidad y de dirección se puede observar cierta correlación entre las corrientes con velocidades altas con las que viajan hacia el norte y corrientes de velocidades bajas con las que van hacia el suroeste.

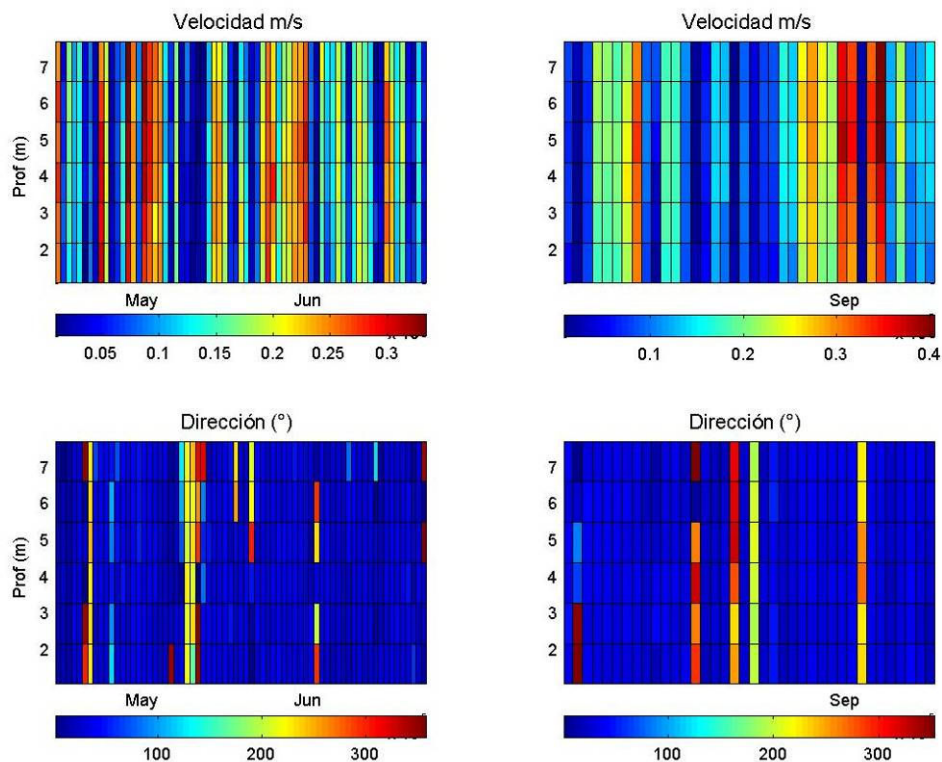
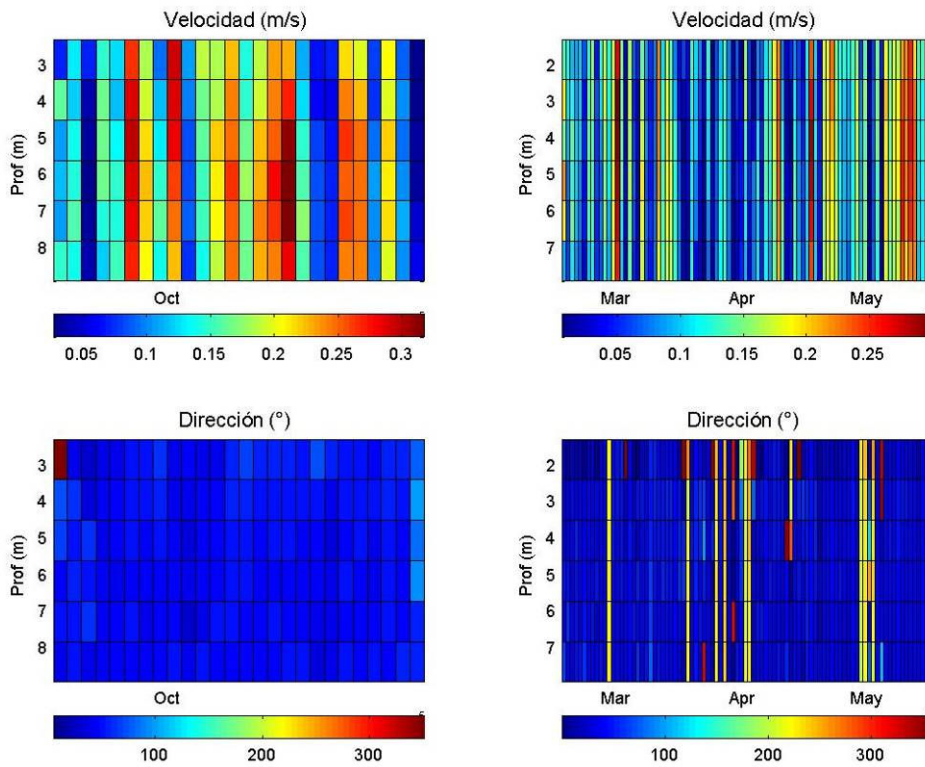


Figura 30.- Velocidad y dirección de las corrientes observadas en PC durante la primera y segunda campaña de medición.



**Figura 31.-Velocidad y dirección de las corrientes observadas en PC durante la tercera y cuarta campaña de medición.**

#### V.4.1 Akumal.

A diferencia del comportamiento cuasi-uniforme de la velocidad de las corrientes a lo largo de la columna de agua en PC, en AK (figura IV) se puede observar una variación significativa, en donde las velocidades superficiales se atenúan de forma considerable hacia la profundidad. En este caso, el instrumento se encuentra más lejano de la costa y a mayor profundidad. Existen eventos de corrientes fuertes a lo largo del mes de Mayo y Septiembre con velocidades que van de 0.2 m/s hasta 0.4 m/s y épocas de corrientes débiles en los meses de Junio y Agosto. La dirección predominante de las corrientes a diferencia de PC es hacia el suroeste, aunque se observan algunas inversiones hacia el Norte.



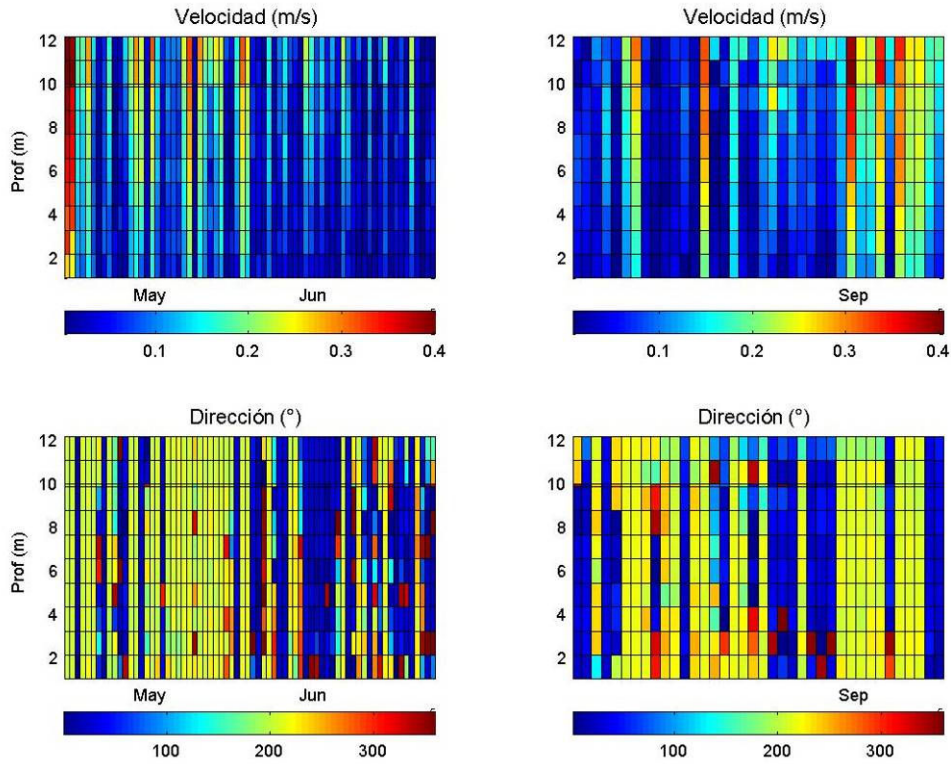


Figura 32.-Velocidad y dirección de las corrientes observadas en AK durante la primera y segunda campaña de medición.

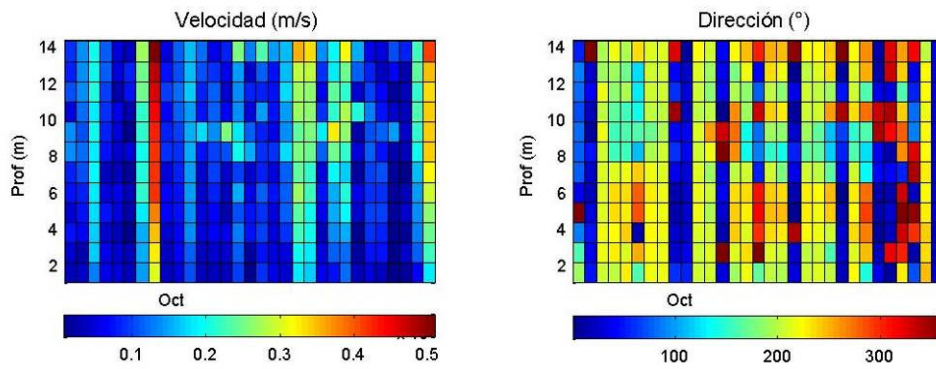


Figura 33.-Velocidad y dirección de las corrientes observadas en AK durante la tercera campaña de medición.

## IX Bibliografía.

Booij, N.C., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., (1999). A third-generation wave model for coastal regions. Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research* **104** (C4), 7649–7666.

Booij, N.C., Haagsma IJ. G., Holthuijsen L.H., Kieftenburg A.T.M.M. Kieftenburg, Ris, R.C., van der Westhuysen, A.J., Zijlema, M. (2004). SWAN Cycle III version 40.41 User Manual. Delft Univesrity of Technology. DELFT Netherlands. pp. 115.

Castro, R. (1976) Inscripción de las arenas carbonatadas y de su ámbito submarino al noreste de la península de Yucatán, México. Tesis profesional, Esc. Sup. Ingeniería, I. P. N. 74 pp.

Dykes, J. D., Y. L. Hsu, and W. E. Rogers, (2002). The Development of an Operational SWAN Model for NGLI. Submitted to: *Proc. MTS/IEEE Oceans 2002*, Biloxi, Mississippi.

Elderberky, Y., J.A. Battjes (1995). Parametrization of triad interactions in wave energy model, paper presented at Coastal Dynamics Conference. Am. Soc. Of Civ. Eng. Gdansk, Poland.

G.J Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, P.A.E.M. Janssen, (1994), "Dynamics and Modelling of Ocean Waves", Cambridge University Press, UK.

De la Lanza-Espino, G. Evaluación de la calidad ambiental y dinámica de la zona costera (playas) para la certificación Bandera Azul del Mpio. Solidaridad, Q. Roo, México. Influencia de la calidad del agua en el estado de conservación de los arrecifes coralinos de la Riviera Maya. *Proyecto CQ017, CONABIO*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Agosto 30, 2004 a Junio 22, 2006.

Lizano, O.G. (2000). Hurricane wave simulation in the Caribbean coast of Central America using models of the Third Generation. Coastal Waves Meeting. International Centre for Coastal Resources Research. Barcelona, España. 4 pp.

Lizano, O.G. and W. Fernández. (1996). Algunas características de las tormentas tropicales y de los huracanes que atravesaron o se formaron en el Caribe adyacente a Costa Rica durante el período 1886-1988. *Top Meteorol. y Oceanog.* 3(1): 3-10.

López Ramos, E. (1974). Estudio geológico de la península de Yucatán. *Biol. Asoc. Méx. Geol. Petr.* 25-76 1-3 15

Merino-Ibarra M, Otero-Dávalos L (1991). Atlas ambiental costero: Puerto Morelos, Quintana Roo. Centro de Investigaciones de Quintana Roo, Chetumal, Q.Roo. México.

Miles, J.W. (1975). On the generation of surface waves by shear flows. *J of Fluid Mech.* 3:185-204.

Monbaliu, J.W. Defevere (2000). The use of spectral wave models in a region with complicated bathymetry. Coastal Waves Meeting. Barcelona, España.

Moore, McCabe (2003). Introduction to the Practice of Statistics, Fourth Edition, W. H. Freeman & Co. 300 pp.

Hasselmann, K. (1962). On the nonlinear energy transfer in a wave spectrum, in Ocean Wave Spectra. Englewood Cliffs, Nueva York. Prentice- Hall, Inc. p 191-197.

Padilla-Hernández R., Perrie W., Toulany B., Smith P.C., Zhang, W. and Jiménez-Hernández S. (2004). Intercomparison of modern operational wave models. Session 1: Model Systems for Hindcasts I. 8<sup>th</sup> International Workshop on wave Hindcasting and forecasting. Onahu, Hawaii.

Padilla-Hernández, R., Osuna, P., Monbaliu and Holthuijsen L., (1998). Intercomparing third-generation wave model nesting, 5<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, Melbourne, Florida, 102-112.

Palmsten, M. L. (2001). Application of the SWAN wave model to a high-energy continental shelf, Master thesis, University of South Florida.

Pash, J. R., Blake, S.E., Hugo, D. C., Roberts, P. D., (2006). Tropical cyclone report of hurricane Wilma (15-25 October 2006). National Hurricane Center.

Pash, J.R., Roberts, P.D., (2006). Tropical cyclone report hurricane Stan (1-5 October 2005). National Hurricane Center.

Perelló Reina, D. (2002). Estimación del campo de oleaje en la Bahía de Todos Santos mediante el uso de un modelo de predicción de oleaje en aguas someras. Tesis de Licenciatura. UABC. FCM. 74 pp.

Phillips, O.M. 1957 On the generation of waves by turbulent wind. J. Fluid Mech. 2:417-445.

Herbers, T. H. C., S. Elgar and R. T. Guza, (1999). Directional spreading of waves in the nearshore, *J. Geophys. Res.*, 104(4), 7683-7693,1999.

Kuik, A. J., G. Ph. van Vledder and L. H. Holthuijsen (1988) A method for the routine analysis of pitchand-roll buoy wave data, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1020-1034, 1988.

Krogstad, H., Reliability and Resolution of Directional Wave Spectra from Heave, Pitch, and Roll Data Buoys, *Directional Ocean Wave Spectra*, 66-71, 1991.

Ris, R.C., L.H. Holthuijsen y N. Booji (1999) A third generation wave model for coastal regions, 2. Verfication. *J. Geophys. Res.* 104(C4):7667-7681.

Soares, V.C., Rusu E., Santos, L.Q., Silva, P.A., Makarynskyy, O. (2002) Coastal wave modeling validation using new field techniques. 7<sup>th</sup> Internattional Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. October 21-25 pp. 12.

H.L., Tolman (1999): User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note **151**, 97 pp.

WAMDI Group., (1988). The WAM model — a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Geophysical Research*,**18**(12), 1775–1810.

Whitham, G.B., 1974: *Linear and nonlinear waves*, Wiley, New York, 636 pp.

Tukey, J.W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. McGraw- Hill Reading., MA. 300 pp.

Zhang D., Liu H., Lin P. The application of SWAN to the simulation of a storm surge. *International Conference on Estuaries and Coasts* November 9-11, 2003, Hangzhou, China. Pp. 756-762.