

01162



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“Interacción Oleaje – Corriente en la Boca de Puerto
Real de la Laguna de Términos, Campeche”**

T E S I S

Como requisito para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Civil
(Hidráulica)

Presenta

MANTILLA TEMPAKU MEGUMI INGRID

DIRECTOR DE TESIS

Dr. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA



MÉXICO, D.F.

MARZO 2004

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 mi tío

RAÚL T. MANTILLA JIMÉNEZ †

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por contribuir a lo largo de todo este tiempo en mi formación académica. Te compensaré eternamente

A la División de General de Estudios de Posgrado (DGEP) por el apoyo económico otorgado durante mis estudios

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI) y a todos sus profesores, por promover y creer en la formación de nuevos investigadores

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el financiamiento y apoyo otorgado al proyecto PAPIIT IN106101

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la aportación que permitió culminar con mis estudios

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por acercarme al mundo de la investigación

Al Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida, por la paciencia, amistad, dedicación y constancia que hizo posible este trabajo. Muchas gracias Paulo, te agradezco de corazón

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por la oportunidad y confianza depositada en mí, así como por siempre impulsarme hacia nuevos horizontes. Muchas gracias Rodolfo por todos estos años

Al M. en I. Víctor Franco por su gran calidad humana con todos nosotros, los becarios del Instituto

A todos los miembros del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, por sus valiosos consejos, sus críticas y por todos los encuentros y desencuentros que tuvimos. Gracias, porque finalmente soy producto de lo que he vivido con ustedes

A mi familia, amigos y todas aquellas persona que de alguna manera, directa o indirecta, estuvieron involucrados en esta etapa de mi vida

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
LISTA DE FIGURAS.....	3
LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE SÍMBOLOS	8
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.2. OBJETIVOS.....	11
1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES	12
1.4. METODOLOGÍA	12
1.5. DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	13
2. PARÁMETROS FÍSICOS	15
2.1. OLEAJE.....	15
2.1.1. Introducción.....	15
2.1.2. Parámetros característicos del oleaje	16
2.1.3. Mecanismo de generación	17
2.1.4. Tipos de oleaje generado por viento.....	18
2.1.5. Descripción estadística y espectral de un estado de mar.....	18
2.2. MAREA	19
2.2.1. Introducción.....	19
2.2.2. Mareas Astronómicas	19
2.2.2.1. Efectos de la fase lunar.....	20
2.2.2.2. Tipos de mareas astronómicas	22
2.2.3. Mareas de Tormenta	23
2.3. CORRIENTES	23
2.3.1. Introducción.....	23
2.3.2. Tipos de corrientes	24
3. MODELO DE INTERACCIÓN OLEAJE – CORRIENTE EN LA CAPA LÍMITE	27
3.1. INTRODUCCIÓN.....	27
3.2. ANTECEDENTES	29
3.3. LIMITACIONES.....	29
3.4. DERIVACIÓN DE LAS ECUACIONES DE GOBIERNO.....	30
3.4.1. Aproximación de la capa límite.....	30
3.4.2. Rugosidad y velocidad al cortante en la capa límite.....	35

4.	DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE CAMPO.....	40
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	40
4.2.	UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	41
4.2.1.	Batimetría y sedimento.....	43
4.2.2.	Clima y vegetación.....	43
4.2.3.	Hidrografía.....	44
4.3.	CAMPAÑA DE CAMPO.....	45
4.3.1.	Equipo de medición.....	45
4.3.2.	Plataforma.....	46
4.3.3.	Localización del equipo de medición.....	48
4.3.4.	Configuración previa.....	49
4.3.4.1.	Mediciones de corriente.....	50
4.3.4.2.	Mediciones de oleaje.....	51
4.3.5.	Recuperación del equipo de medición.....	51
4.3.6.	Recuperación de los datos medidos.....	52
5.	REDUCCIÓN DE DATOS, ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	55
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	55
5.2.	DATOS REQUERIDOS PARA EL ANÁLISIS.....	56
5.3.	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS.....	56
5.4.	REDUCCIÓN DE DATOS.....	62
5.4.1.	Primera campaña de campo.....	62
5.4.1.1.	Datos de corriente obtenidos con el WinADCP.....	63
5.4.1.2.	Corrección de la desviación magnética.....	67
5.4.2.	Segunda campaña de campo.....	70
5.4.2.1.	Datos obtenidos con el programa WinADCP.....	70
5.4.2.2.	Corrección de la desviación magnética.....	75
5.5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
5.5.1.	Primera y segunda campaña de campo.....	79
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
6.1.	CONCLUSIONES.....	100
6.2.	RECOMENDACIONES.....	102
A.	ANEXO: PROGRAMAS DEL ADCP.....	103
A.1.	WinSC.....	103
A.2.	PlanADCP.....	105
A.3.	WavesMon.....	112
	REFERENCIAS.....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. Descripción de los parámetros de oleaje	16
Figura 2. 2. Ejemplo de un registro de nivel de superficie libre	17
Figura 2. 3. Sistema Tierra – Luna y Tierra - Sol.....	20
Figura 2. 4. Fases Lunares, fuerzas de atracción y efectos de las fuerzas sobre los océanos	21
Figura 2. 5. Vista en planta de la trayectoria del sedimento.....	25
Figura 2. 6. Vista de planta de la trayectoria de las corrientes de retorno	26
Figura 3. 1. Ejemplo de la velocidad orbital en la capa límite	28
Figura 3. 2. Estructura del perfil de velocidad para flujo turbulento en la capa límite	37
Figura 3. 3. Perfil logarítmico de velocidad.....	38
Figura 3. 4. Curvaturas del perfil logarítmico	39
Figura 4. 1. Localización geográfica de la Laguna de Términos, Campeche	42
Figura 4. 2. Fotografía y esquema con dimensiones del ADCP (Perfilador de Corrientes Acústico Doppler).....	46
Figura 4. 3. Giróscopo de la plataforma del ADCP	47
Figura 4. 4. Proceso de construcción de la plataforma del ADCP	47
Figura 4. 5. Localización del equipo de medición en la Boca de Puerto Real de la Laguna de Términos, Campeche	49
Figura 4. 6. Plataforma y ADCP una vez terminada la campaña de campo	52
Figura 5. 1. Diagrama de flujo de la metodología	57
Figura 5. 2. Rangos de los ángulos para el criterio de selección	59
Figura 5. 3. Ejemplo de la rugosidad en la capa y de la relación para el cálculo de la velocidad al cortante donde z es la profundidad y u_c la velocidad de la corriente	61
Figura 5. 4. Series de tiempo de las velocidades Este y Norte de la primera campaña.....	64
Figura 5. 5. Acercamiento a las series de tiempo de las velocidades Este y Norte de la primera campaña durante el paso de Isidore.....	65
Figura 5. 6. Acercamiento a las series de tiempo de la magnitud de la primera campaña durante el paso de Isidore	66
Figura 5. 7. Acercamiento a las series de tiempo de la dirección de la magnitud de la primera campaña durante el paso de Isidore.....	66

Figura 5. 8. Corrección de la serie de tiempo de la velocidad Este de la primera campaña 67

Figura 5. 9. Corrección de la serie de tiempo de la velocidad Norte de la primera campaña 68

Figura 5. 10. Velocidad Este y Norte en las capas 1, 5, 10 y 15 de la primera campaña .. 69

Figura 5. 11. Series de tiempo de las velocidades Este y Norte de la segunda campaña (primera parte)..... 71

Figura 5. 12. Series de tiempo de las velocidades Este y Norte de la segunda campaña (segunda parte)..... 72

Figura 5. 13. Series de tiempo de la magnitud de la segunda campaña 73

Figura 5. 14. Series de tiempo de la dirección de la velocidad de la segunda campaña ... 74

Figura 5. 15. Corrección de la serie de tiempo de la velocidad Este y Norte de la segunda campaña (primera parte)..... 76

Figura 5. 16. Corrección de la serie de tiempo de la velocidad Este y Norte de la segunda campaña (segunda parte)..... 77

Figura 5. 17. Velocidad Este y Norte en las capas 1, 4, 7 y 10 de la segunda campaña... 78

Figura 5. 18. Perfiles de velocidad de la primera campaña: (a) Oleaje y corriente propagándose en la misma dirección y (b) Oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta..... 80

Figura 5. 19. Perfiles de velocidad de la segunda campaña: (a) Oleaje y corriente propagándose en la misma dirección y (b) Oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta..... 81

Figura 5. 20. Comparación de la velocidad al cortante en misma dirección y en dirección opuesta y la cantidad de eventos que se presentaron en la primera campaña 83

Figura 5. 21. Comparación de la velocidad al cortante en misma dirección y en dirección opuesta y la cantidad de eventos que se presentaron en la segunda campaña 84

Figura 5. 22. Comparación de la rugosidad en la capa límite en misma dirección y en dirección opuesta y la cantidad de eventos que se presentaron en la primera campaña 85

Figura 5. 23. Comparación de la rugosidad en la capa límite en misma dirección y en dirección opuesta y la cantidad de eventos que se presentaron en la segunda campaña 86

Figura 5. 24. Velocidad al cortante, rugosidad en la capa límite, ángulos de propagación del oleaje y la corriente, magnitud de la corriente, nivel de superficie libre, periodo pico y altura de ola significativa para el caso de oleaje y corriente propagándose en la misma dirección de la primera campaña 89

Figura 5. 25. Velocidad al cortante, rugosidad en la capa límite, ángulos de propagación del oleaje y la corriente, magnitud de la corriente, nivel de superficie libre, periodo

pico y altura de ola significativa para el caso de oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta de la primera campaña..... 90

Figura 5. 26. Velocidad al cortante, rugosidad en la capa límite, ángulos de propagación del oleaje y la corriente, magnitud de la corriente, nivel de superficie libre, periodo pico y altura de ola significativa para el caso de oleaje y corriente propagándose en la misma dirección de la segunda campaña 91

Figura 5. 27. Velocidad al cortante, rugosidad en la capa límite, ángulos de propagación del oleaje y la corriente, magnitud de la corriente, nivel de superficie libre, periodo pico y altura de ola significativa para el caso de oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta de la segunda campaña 92

Figura 5. 28. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de misma dirección de la primera campaña 94

Figura 5. 29. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de dirección opuesta de la primera campaña..... 95

Figura 5. 30. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de misma dirección de la segunda campaña 96

Figura 5. 31. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de dirección opuesta de la segunda campaña (primera parte) 97

Figura 5. 32. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de dirección opuesta de la segunda campaña (segunda parte) 98

Figura 5. 33. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de dirección opuesta de la segunda campaña (tercera parte) 99

Figura A. 1. Esquema de conexión del ADCP a la computadora..... 104

Figura A. 2. Ventana de inicio del WinSC 104

Figura A. 3. Selección del tipo de ADCP 106

Figura A. 4. Selección de frecuencia 106

Figura A. 5. Selección de batería..... 107

Figura A. 6. Selección de uso del ADCP 107

Figura A. 7. Tipo de colocación 108

Figura A. 8. Rango de profundidad..... 108

Figura A. 9. Tamaño de capas 109

Figura A. 10. Capacidad de memoria interna..... 109

Figura A. 11. Tiempo e intervalo de muestreo 110

Figura A. 12. Lecturas en cada muestreo 110

Figura A. 13. Duración de las mediciones..... 111

Figura A. 14. Resumen de configuración..... 111

Figura A. 15. Inicio de programa y selección de procesamiento 112

Figura A. 16. Localización del archivo crudo 113

Figura A. 17. Ventana o etiqueta Processing 114
Figura A. 18. Ventana o etiqueta Expert 2 115
Figura A. 19. Selección del inicio de procesamiento 115
Figura A. 20. Programa WavesMon ejecutándose 116

LISTA DE TABLAS

Tabla 4. 1. Coordenadas de localización del ADCP	48
Tabla 4. 2. Datos de configuración para mediciones de corriente	50
Tabla 4. 3. Datos de configuración para las mediciones de oleaje	51
Tabla 5. 1. Frecuencia de muestreo de la campaña 1	58
Tabla 5. 2. Frecuencia de muestreo de la campaña 2	58
Tabla 5. 3. Criterios para oleaje y corriente en una misma dirección	59
Tabla 5. 4. Criterio para oleaje y corriente en dirección opuesta	60

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Amplitud
b	Ordenada al origen
c	Celeridad
δ	Espesor de la capa límite
δ'	Espesor de la capa viscosa
g	Aceleración de la gravedad
h	Profundidad
η	Nivel de superficie libre
H	Altura de ola
H_s	Altura de ola significativa
κ	Constante de von Karman (0.4)
k	Número de onda
L	Longitud de onda
m	Pendiente de la recta
ν	Viscosidad cinemática
ν_T	Viscosidad de remolino
π	Constante matemática (3.14159)
p	Presión
p_∞	Presión externa en el borde de la capa límite
p_δ	Presión en el borde de la capa límite

θ_C	Dirección de la corriente
θ_W	Dirección del oleaje
ρ	Densidad del fluido
τ_{ij}	Esfuerzo cortante
τ_b	Esfuerzo cortante cerca del fondo
t	Tiempo
T	Periodo
T_p	Periodo pico
u	Componente de velocidad horizontal en dirección x
u_C	Velocidad de la corriente (magnitud)
u^*	Velocidad al cortante
u_b	Velocidad orbital cerca del fondo
u_∞	Velocidad externa en el borde de la capa límite
U	Componente de velocidad en dirección x
ω	Frecuencia
w	Componente de velocidad vertical en dirección z
z	Elevación de un punto en la capa límite
z_0	Rugosidad en la capa límite

Falta página

N° 10

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La hidrodinámica costera es compleja en aguas muy poco profundas y es el resultado de la interacción no lineal que se genera entre el oleaje, las corrientes y el fondo. Estudios previos realizados sobre la interacción oleaje - corriente se han enfocado en la influencia de las corrientes sobre el rompimiento del oleaje en la vecindad de una boca (e.g., Briggs et al, 1996; McKee Smith et al, 1996). Sin embargo, en zonas donde no se presenta rotura del oleaje, dada la profundidad y altura de ola, dicha interacción no es bien comprendida.

Cuando el oleaje se propaga sobre una zona en la que existe una corriente, cambian las características cinemáticas y dinámicas del oleaje y de la corriente. Lo anterior hace que la rugosidad experimentada por la corriente y el esfuerzo cortante ejercido por la columna de agua en movimiento sobre el fondo sean cambiantes por la presencia del oleaje. El estudio de la interacción del oleaje y la corriente es un problema complejo ya que se trata de analizar la propagación del oleaje en un medio no homogéneo, anisótropo, dispersivo, disipativo y en movimiento. (Ortega, M y Losada, M. A., 2002).

Es de particular interés el análisis de las repercusiones de dichas interacciones en ambientes costeros donde tanto el oleaje como las corrientes son cambiantes. Por ejemplo en desembocaduras, bocas de lagunas o entradas a puertos, las corrientes cambian de dirección frecuentemente, en función de la marea reinante. En cambio, considerando escalas de tiempo similares a las de la marea (horas, días), el oleaje suele tener direcciones más estables. Por lo tanto, en esos escenarios el oleaje y la corriente viajan en la misma dirección, o aproximadamente la misma, parte del tiempo, y en direcciones opuestas el resto del tiempo. Eso hace que las características de la interacción flujo - fondo cambien también con ritmos similares a la marea. Es importante comprender esos cambios, para fines de morfología y estabilidad, dragado, erosión o azolvamiento en canales de navegación, etc.

De hecho, el intercambio de agua y sedimento entre cuerpos semi-cerrados (lagunas, puertos, ensenadas,...) y el mar, así como la estabilidad de las bocas al mar en dichos cuerpos, depende de la manera en que la corriente se ve afectada por la presencia del oleaje y viceversa.

Con el fin de comprender dichas interacciones, una de las principales motivaciones en este trabajo es determinar la rugosidad y capacidad al cortante en la capa límite, datos necesarios para poder comprender la capacidad de transporte de sedimento y para determinar el grado de influencia del oleaje sobre las corrientes a través de mediciones realizadas en campo. Por tanto, se diseñaron una serie de campañas de campo para medir el oleaje y las corrientes en un ambiente natural en el que ambos fenómenos coexistieran.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es comprender la interacción oleaje – corriente en situaciones de propagación en la misma dirección y en dirección opuesta, y determinar las posibles repercusiones en el transporte de sedimentos.

Los objetivos particulares de este trabajo de investigación son los siguientes:

- Identificar los principales parámetros físicos que caracterizan las interacciones
- Seleccionar un caso de estudio y realizar mediciones

- Reducir y proponer una metodología para analizar datos de oleaje y corrientes obtenidos en campo.
- Estimar la rugosidad en la capa límite y el esfuerzo cortante cerca del fondo
- Analizar cualitativamente en qué medida y de qué manera el oleaje influye sobre las corrientes cuando estos se propagan en una misma dirección o cuando se propagan en dirección opuesta

1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances de esta tesis son determinar la influencia del oleaje sobre las corrientes presentes en un sitio en particular, la boca de Puerto Real de la Laguna de Términos, por medio de los perfiles de velocidad, con los cuales a partir de la variación de la velocidad al cortante y la rugosidad se determina de forma cualitativa la capacidad de transporte de sedimentos en la zona de estudio.

Las principales limitaciones se asocian a la cantidad y calidad de los datos obtenidos del equipo de medición durante dos campañas y a la relativa pequeña altura de ola que se registró en la zona de estudio.

1.4. METODOLOGÍA

Con la finalidad de llevar a cabo todos los objetivos propuestos, se ha elegido la metodología que a continuación se describe:

- Determinar los parámetros físicos del oleaje y las corrientes así como plantear los efectos de las mareas en las corrientes
- Establecer las condiciones de frontera para el análisis de los perfiles de velocidad para los diferentes casos
- Obtener mediciones en campo para analizar datos de rugosidad en la capa límite y velocidad al cortante para determinar la influencia del oleaje sobre las corrientes

- Determinar cualitativamente la capacidad de transporte de sedimentos en la zona de estudio

1.5. DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

De acuerdo con la metodología enunciada, se ha organizado el presente trabajo en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Introducción

Se muestra una breve introducción, la importancia, los objetivos, los alcances y limitaciones del trabajo

Capítulo 2: Parámetros físicos

Se presentan los parámetros característicos del oleaje en donde se describe su principal mecanismo de generación. Por otro lado, se muestran los conceptos de mareas astronómicas y mareas de tormenta que servirán en el análisis de los resultados. También se hace referencia a los diferentes tipos de corrientes y cómo éstas juegan un papel importante en el transporte de sedimentos cerca de la costa

Capítulo 3: Modelo de Interacción oleaje – corriente en la capa límite

Se presenta el modelo analítico para el cálculo de perfiles de velocidades tanto del perfil acelerado como del perfil desacelerado que sirven para determinar cómo las corrientes se ven afectadas por la presencia del oleaje, y cómo las fuerzas friccionantes actúan para determinado caso.

Capítulo 4: Descripción de las campañas de campo

Se presenta la ubicación de la zona de estudio (boca de Puerto Real de la Laguna de Términos, Campeche). Se hace la descripción del diseño de las campañas de campo que se llevaron a cabo en dos épocas diferentes del año para efectuar las mediciones requeridas para el análisis. Asimismo, se explica el funcionamiento del equipo de medición (ADCP) y la plataforma de protección utilizados durante la ejecución de las mediciones. También se hace referencia a la configuración del equipo de medición para el muestreo.

Capítulo 5: Reducción, análisis y resultados

Se muestra la metodología para el análisis de los datos aplicando el modelo analítico del tercer capítulo, de igual manera se presentan los resultados preliminares utilizando programas del equipo y programas de apoyo creados con programación en Matlab con el objeto de realizar correcciones necesarias para la reducción de los datos. Se establecen los criterios de selección de los datos para llevar a cabo el análisis de los resultados después de aplicar la metodología.

Capítulo 6: Conclusiones y Futuras líneas de investigación

Se presentan las principales conclusiones del trabajo y se indican algunas recomendaciones de trabajo adicional sobre el tema

Falta página

N° 16

CAPÍTULO 2

PARÁMETROS FÍSICOS

2.1. OLEAJE

2.1.1. Introducción

En la naturaleza, rara vez se puede hallar un cuerpo de agua abierto a la atmósfera donde no se presente oleaje sobre su superficie. Estas olas son el resultado de las fuerzas que tienden a deformar la superficie libre del fluido y las que tratan de restituirla. Estas fuerzas interactúan en tal forma que generan variaciones generalmente periódicas en la superficie del fluido provocando así que el oleaje se propague.

Por lo tanto, para generar el oleaje se requiere una fuerza generadora, como la causada por el viento, por el impacto o movimiento de algún cuerpo en la superficie, por la atracción de cuerpos celestes o por el movimiento abrupto del fondo. Una vez que éstas están presentes, la fuerza gravitatoria, la tensión superficial y la viscosidad del fluido, todas ellas fuerzas restauradoras, amortiguan su propagación para justamente contribuir a la restauración del estado inicial. El oleaje se manifiesta en diversos tamaños y formas, dependiendo de la magnitud de las fuerzas que lo generan.

2.1.2. Parámetros característicos del oleaje

Para conocer las características físicas del oleaje es necesario desarrollar un modelo conceptual y clasificar los parámetros que se utilizan para describirlo. Los principales parámetros (ver Figura 2. 1) en la descripción del oleaje son:

- a) Longitud de onda (L), es la distancia horizontal entre dos crestas o valles sucesivos de la onda. También puede definirse como la distancia entre dos pasos ascendentes o descendentes por el nivel medio.
- b) Altura de ola (H), se define como la diferencia, en vertical, entre una cresta y un valle.
- c) Periodo (T), es el tiempo transcurrido entre dos crestas al pasar por un punto fijo.
- d) Nivel de superficie libre (η), es el desplazamiento vertical de la superficie libre del agua con respecto a un nivel de referencia (por ejemplo el nivel medio del mar, N.M.M.).
- e) Profundidad (h), es la distancia entre el nivel medio del mar y el fondo.
- f) Amplitud (a), se define como la distancia entre una cresta o valle y el nivel medio del mar.

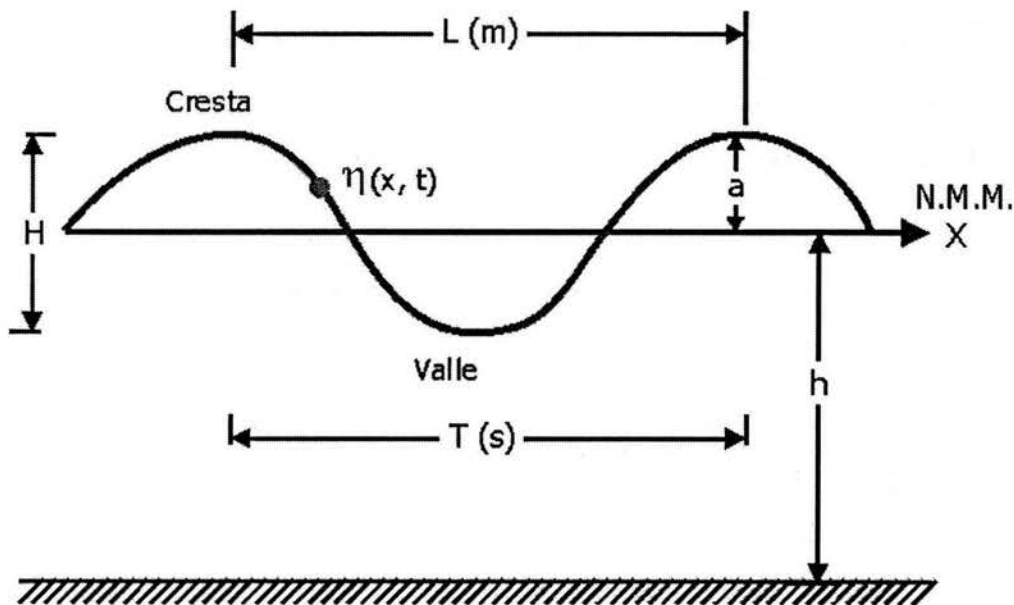


Figura 2. 1. Descripción de los parámetros de oleaje

2.1.3. Mecanismo de generación

Frecuentemente el oleaje que se presenta en el océano es caótico y con muchos cambios en las crestas y valles de la superficie del agua. Esto se debe tanto a las irregularidades con que es generado, como a las variaciones en la dirección de propagación. Por otro lado, también se puede afirmar que rara vez en la naturaleza las olas se presentan exactamente iguales, esto se debe a la influencia del viento, el cual, al actuar sobre la superficie del mar, genera ondas de diversos periodos y alturas. En la Figura 2. 2 se puede observar un ejemplo de un registro real del nivel de superficie libre en función del tiempo, el cual puede ser percibido como una superposición de un gran número de ondas sinusoidales viajando en diferentes direcciones. Esta superposición de componentes permite utilizar técnicas espectrales y temporales para analizar el estado de mar.

Ya que el oleaje se propaga en diferentes direcciones, la dirección dominante puede ser considerada como el promedio de las direcciones de las olas individuales. La superficie del mar es difícil de describir debido a la interacción entre las olas, puesto que algunas veces se fortalecen o contrarrestan una a la otra como resultado de esta interacción. Algunas veces colisionan una con la otra y son transformadas en turbulencia, otras veces se agrupan, disminuyendo la dispersión de sus frecuencias, y otras se agrupan y rompen por adquirir un peralte inestable.

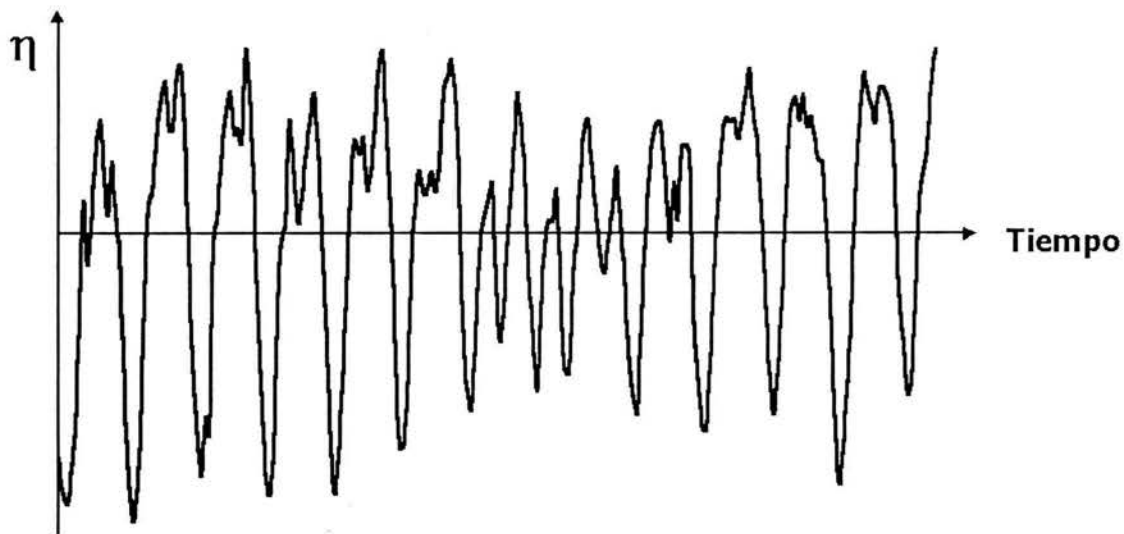


Figura 2. 2. Ejemplo de un registro de nivel de superficie libre

En las zonas costeras, el mecanismo de generación del oleaje que más energía le transfiere a la totalidad del oleaje presente es el viento.

2.1.4. Tipos de oleaje generado por viento

Los tipos de oleaje generados por viento suelen ubicarse entre dos extremos que se distinguen, entre otras características, por su posición respecto de la zona de generación. Esta zona se define como la región en la que la transferencia de energía del viento a la superficie del mar es el principal causante del movimiento. De esta manera, el oleaje puede ser clasificado por sus términos en Inglés en:

- a) Oleaje SEA, el cual se presenta en la zona de generación. Este tipo de oleaje carece de periodicidad y pocas veces se aprecian crestas de cierta longitud. Se caracteriza por su irregularidad y gran aperlamiento (gran altura relativa a su longitud de onda).
- b) Oleaje SWELL, el cual ocurre cuando las olas se propagan y abandonan el área de generación, sufriendo transformaciones como el decaimiento, agrupamiento o soldadura, difracción, refracción, someramiento y rotura, conforme se va acercando a la costa.

2.1.5. Descripción estadística y espectral de un estado de mar

El estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en el cual se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen en el movimiento oscilatorio de la superficie libre (Silva, 2002).

El tratamiento del oleaje puede realizarse bajo dos puntos de vista:

- a) Análisis temporal, estudia los parámetros y las distribuciones del nivel de superficie libre y demás parámetros que definen el oleaje, en función de su variación temporal.
- b) Análisis espectral, a partir del espectro de energía, en el dominio de la frecuencia, se deducen los parámetros del oleaje.

2.2. MAREA

2.2.1. Introducción

El movimiento de las mareas es el resultado de la atracción gravitatoria que ejercen el Sol y la Luna sobre la Tierra. Las mareas provocan movimientos de ascenso y descenso del nivel medio del mar así como un flujo horizontal conocido como corrientes de mareas. No obstante, el movimiento que se genera resulta complejo debido a la distribución irregular del fondo marino y a los efectos retardatorios que son provocados por la fricción y la inercia.

Comúnmente se piensa que un cuerpo de agua sigue el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra, sin embargo, el movimiento de la marea se compone de zonas oscilatorias que se denominan ondas estacionarias. Dichas ondas pueden superponerse y traslaparse unas con otras de tal manera de que se generan movimientos progresivos. Las mareas se clasifican básicamente en dos tipos: en las mareas astronómicas y en las mareas meteorológicas o también conocidas como mareas de tormenta.

Hay diversas razones por las cuales el estudio de las mareas es importante, entre las que más destacan se encuentran el transporte de sedimento (estabilidad de playas, la apertura o cierre de bocas lagunares o estuarinas debido al movimiento de la marea a través de las mismas), calidad del agua debido a variaciones de las corrientes de marea (eutrofización, intrusión salina,...).

2.2.2. Mareas Astronómicas

Las mareas astronómicas son el resultado de una combinación de las fuerzas gravitatorias y centrífugas de los sistemas Tierra – Luna y Tierra – Sol. (ver Figura 2. 3)

Considerando que la fuerza gravitatoria en la superficie de la Tierra actúa en dirección al centro de masa de la Tierra, se distingue que los océanos se encuentran confinados a ésta. Sin embargo, las fuerzas gravitatorias de la Luna y el Sol actúan externamente sobre los océanos, de tal manera que sus efectos se combinan con la atracción gravitacional de la Tierra y atraen masas de agua a posiciones en la superficie terrestre, directamente en el eje entre la tierra y dicho cuerpo celeste.

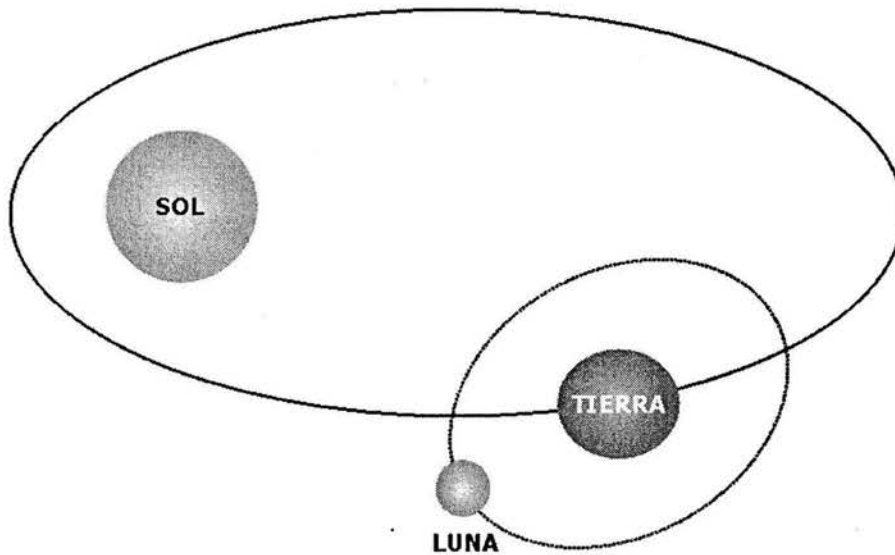


Figura 2. 3. Sistema Tierra – Luna y Tierra - Sol

2.2.2.1. Efectos de la fase lunar

Se ha establecido que las fuerzas de gravedad de la Luna y el Sol actúan externamente sobre los océanos de la Tierra. Estas fuerzas tienden a deformar la esfericidad de la Tierra en un elipsoide de revolución cuyo eje de simetría pasa por los centros de la Tierra y la Luna.

Debido a que los cambios de posición de la Luna con respecto a la Tierra y el Sol durante un ciclo mensual varían, se pueden observar dos principales tipos de mareas astronómicas.

- a) Marea Viva, la cual se genera cuando la Luna se encuentra en fase de Luna nueva y en fase de Luna llena (ver Figura 2. 4). La combinación de estas fuerzas provoca que se presenten las máximas pleameares y bajamares de un ciclo mensual.
- b) Marea Muerta, la cual se genera cuando la Luna se encuentra en fase de cuarto creciente y en fase de cuarto menguante (ver Figura 2. 4). Las fuerzas de atracción

que ejercen el Sol y la Luna sobre la Tierra resultan en sentidos diferentes. En esta marea se presentan las pleamares y bajamares más bajas del ciclo mensual.

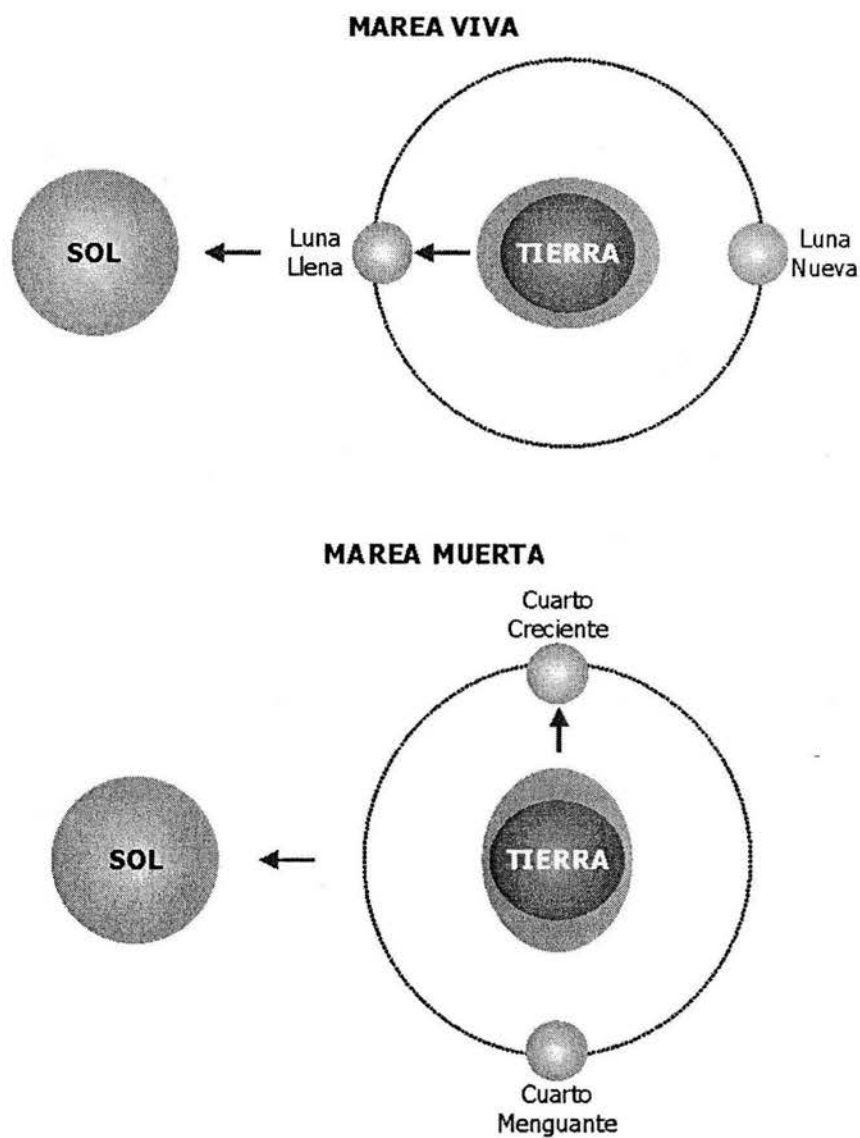


Figura 2. 4. Fases Lunares, fuerzas de atracción y efectos de las fuerzas sobre los océanos

2.2.2.2. Tipos de mareas astronómicas

Los tipos de mareas astronómicas pueden ser:

- a) Diurna, en donde se presenta una pleamar y una bajamar por ciclo, en un período de 24 h 50 min. (valor promedio).
- b) Semidiurna, en donde se presentan dos pleamares y dos bajamares en un período de 24 h 50 min (valor promedio) cuyas amplitudes son sensiblemente semejantes.
- c) Mixta, que es una combinación de las anteriores, y donde se presentan dos pleamares y dos bajamares en un período de 24 h 50 min (valor promedio), las amplitudes de ambas presentan diferencias notorias (desigualdad horaria o diurna).

Dependiendo del tipo de marea, los planos de marea que se generan son los siguientes:

- a) Altura máxima registrada, que es el nivel histórico más alto registrado en una estación.
- b) Pleamar máxima registrada, que es el nivel más alto registrado debido a la marea periódica o bien debido a la influencia de factores meteorológicos.
- c) Nivel de pleamar media superior, que es el promedio de las dos pleamares diarias durante el periodo considerado en la estación (mareas semidiurna y mixta).
- d) Nivel de pleamar media, que es el promedio de todas las pleamares durante el período considerado en cada estación; cuando el tipo de marea es diurna. Este plano se calcula haciendo el promedio de la pleamar más alta diaria, lo que equivale a que la pleamar media en este caso sea equivalente a la pleamar media superior.
- e) Nivel de media marea, que es un plano equidistante entre la pleamar media y la bajamar; es decir se obtiene promediando estos dos valores.
- f) Nivel medio del mar, es el promedio de las alturas durante el periodo de registro.
- g) Nivel de bajamar media, que es el promedio de todas las bajamares durante el período considerando la estación; cuando el tipo de marea es diurna, este plano se calcula haciendo el promedio de la bajamar más baja diaria, lo que equivale a que la bajamar media en este caso sea el mismo que el de la bajamar media inferior.

- h) Nivel de bajamar media inferior, que es el promedio de la más baja de las dos bajamares diarias, durante el período considerado en la estación (Marea semidiurna y mixta).
- i) Bajamar mínima registrada, que es el nivel más bajo registrado debido a la marea periódica o bien debido a la influencia de factores meteorológicos.
- j) Altura mínima registrada, que es que es el nivel histórico más bajo registrado en una estación.

2.2.3. Mareas de Tormenta

La marea de tormenta o marea meteorológica se puede definir como la sobrelevación del nivel del mar debido a factores meteorológicos, como pueden ser los frentes fríos, las tormentas tropicales y los huracanes.

La magnitud que puede llegar a tener la sobrelevación del nivel del mar depende de varios factores, como son la velocidad del viento sostenido, la velocidad de desplazamiento del fenómeno, el ángulo de incidencia sobre las costas, la forma de la playa, la presión mínima central en el ciclón y la pendiente de la playa en la zona de incidencia. En zonas con pequeñas amplitudes de marea meteorológica y frecuente incidencia de fenómenos meteorológicos, la amplitud de la marea meteorológica puede ser mayor que la de la marea astronómica.

2.3. CORRIENTES

2.3.1. Introducción

Las corrientes existentes en las costas influyen de forma significativa en el transporte de sedimentos y por ende en la conformación morfológica de las costas (playas, bocas, entradas a puertos, canales de navegación,...). Son flujos persistentes de agua de componente predominantemente horizontal y cuya importancia radica, entre otras, en la capacidad de transportar el sedimento que previamente, o simultáneamente, se ha hecho disponible por la acción del oleaje.

Este sistema de corrientes generalmente se ha considerado de gran complejidad y se le ha relacionado como una causa fundamental de la erosión y/o acreción en las zonas costeras debido al sedimento que tiende a estar en constante movimiento.

2.3.2. Tipos de corrientes

Se distinguen los siguientes tipos de corrientes:

- a) Corrientes debidas al oleaje
- b) Corrientes debidas a la marea
- c) Corrientes debidas al viento
- d) Corrientes debidas a los ríos
- e) Corrientes asociadas a sistemas circulatorios
- f) Corrientes asociadas a oscilaciones de estuarios

En función de su dinámica de generación y de la región en que se presenten, las corrientes pueden ser motores o promotoras de diversos fenómenos físicos. Así, por ejemplo, si en una zona estuarina con poca profundidad se presentan corrientes generadas por marea, éstas pueden alcanzar velocidades hasta de 4 m/s, con las que seguramente se provocarán cambios importantes en la morfología local.

Otro tipo de corrientes importantes en la ocurrencia de fenómenos físicos son las generadas por el oleaje, las cuales favorecen enormemente la capacidad de transporte de sedimentos.

Las corrientes debidas al oleaje se pueden clasificar como:

- a) Corriente de deriva litoral, la cual se produce en virtud de que las olas llegan a playa con un ángulo diferente de cero (e inferior a 10° , dado que el ángulo nunca puede ser mayor debido a la refracción) con respecto de la línea de costa. Esta oblicuidad da origen a una corriente paralela al litoral, entre la zona de rompiente y

la orilla. La velocidad de la deriva es mínima fuera de la zona de rompiente, lo que demuestra claramente que es inducida por el oleaje.

En la Figura 2. 5 se presenta un esquema donde se describe cómo el sedimento cerca de la línea de costa es transportado, describiendo una trayectoria en forma de zig - zag. Esto se debe a que cuando llega el oleaje con un cierto ángulo de incidencia, el flujo toma dicho ángulo para su trayectoria, sin embargo, el ángulo de reflujos que se origina posteriormente es perpendicular a la línea de costa y el sedimento toma esa nueva dirección. La magnitud de esta corriente puede ser calculada en función de su altura de ola, el periodo, el ángulo de incidencia, la pendiente del fondo y la rugosidad de la zona litoral.

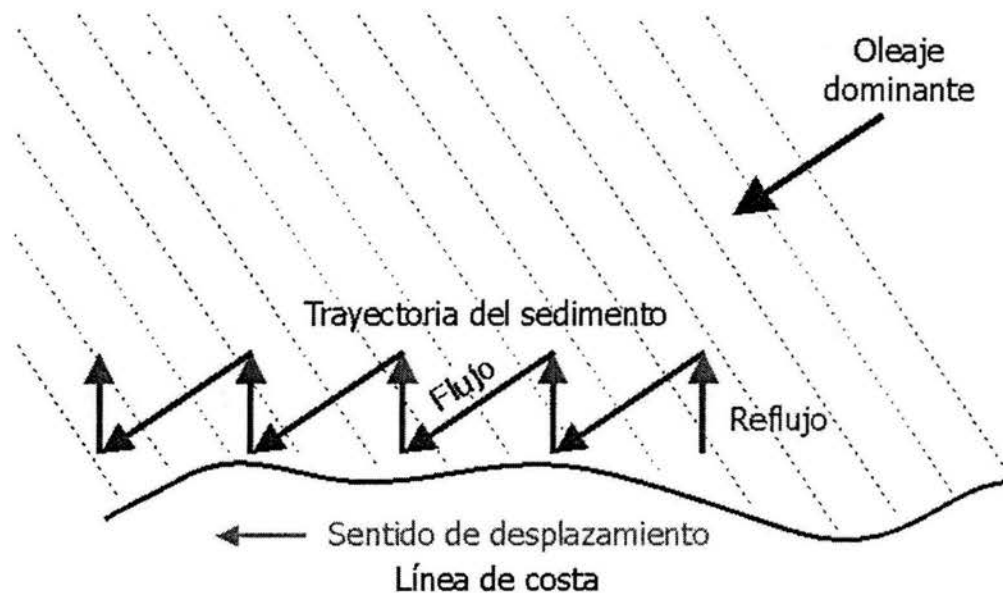


Figura 2. 5. Vista en planta de la trayectoria del sedimento

- b) Corriente de retorno, la cual es generada por el flujo durante su proceso de descenso, el cual ha generado canales de salida en los que convergen corrientes de deriva litoral, de ahí que sean corrientes muy potentes y que sus efectos alcancen a llegar mas allá de la zona de rompiente. Se caracterizan por ser muy turbulentas y con altas concentraciones de materiales finos en suspensión.

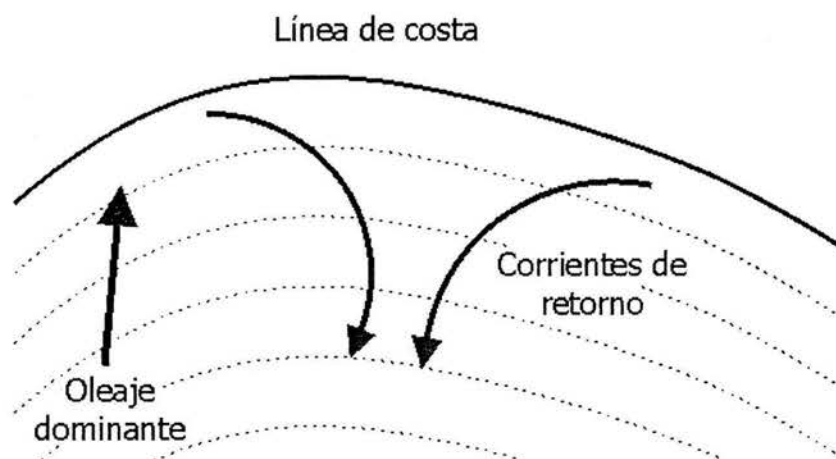


Figura 2. 6. Vista de planta de la trayectoria de las corrientes de retorno

Como se ha visto a lo largo de este capítulo, los parámetros tanto del oleaje y su forma de generación así como los tipos de mareas y de corrientes que intervienen en la hidrodinámica costera, son parámetros necesarios para poder llevar a cabo un análisis sobre la influencia que tiene el oleaje sobre las corrientes.

CAPÍTULO 3

MODELO DE INTERACCIÓN OLEAJE - CORRIENTE EN LA CAPA LÍMITE

3.1. INTRODUCCIÓN

En las zonas costeras, el oleaje y las corrientes se presentan simultáneamente. El movimiento combinado del oleaje y las corrientes es tal vez la característica de flujo más común que se puede encontrar en estas zonas donde se reconoce a dicho movimiento como el mayor iniciador de la suspensión y del transporte de sedimento.

Tanto en la zona de rompiente como en la zona de generación del oleaje, así como durante eventos de tormentas extremas que se presentan en el mar, el flujo cerca del fondo puede ser determinado por la interacción no lineal del oleaje y la lenta variación de las corrientes que se van originando. Esta superposición de flujos de diferentes escalas de tiempo y por tanto con diferentes escalas de capas límite, dan como resultado la combinación de la capa límite del oleaje en el fondo la cual se va anidando dentro de la capa límite de las corrientes.

La alta intensidad de la turbulencia, originada por la capa límite del oleaje cerca del fondo, es causante de que la corriente experimente una alta resistencia en el fondo.

Consecuentemente, el flujo de la capa límite del oleaje cerca del fondo también se ve afectado por la presencia de las corrientes, aunque en un menor grado.

Por ejemplo, un oleaje con periodo de 10 segundos y altura de ola de 1 m, produce una velocidad orbital máxima horizontal cerca del fondo de más de 0.17 m/s a una profundidad de 30m (ver Figura 3. 1). Debido a la naturaleza oscilatoria de la velocidad orbital del oleaje, la capa límite tiene un tiempo limitado para crecer, de aproximadamente la mitad de tiempo del periodo del oleaje (del orden de segundos). Esto da lugar al desarrollo de una capa delgada, con algunos centímetros de espesor inmediatamente sobre el fondo. Esta capa, es conocida como la capa límite del oleaje cerca del fondo en donde la velocidad del flujo cambia su valor tendiendo a cero en el límite inferior. Por otro lado, dado que el esfuerzo es proporcional al gradiente de la velocidad, la alta magnitud de la velocidad al cortante (u_*) dentro de la capa límite del oleaje produce niveles altos en la intensidad de la turbulencia así como del esfuerzo cortante en el fondo.

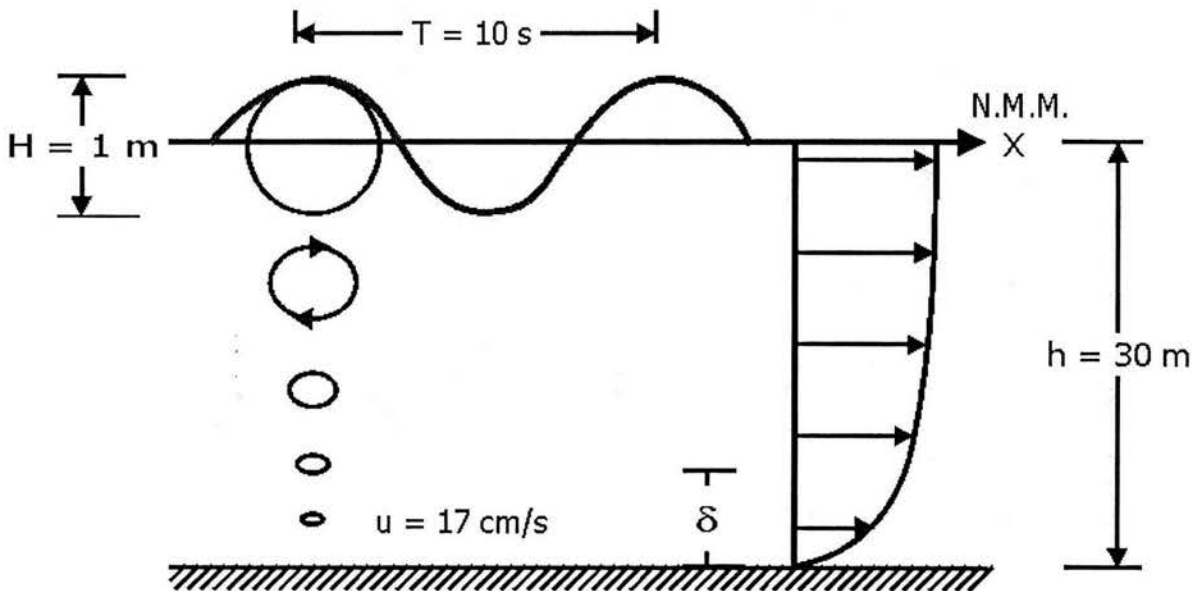


Figura 3. 1. Ejemplo de la velocidad orbital en la capa límite

En contraste, con el movimiento del oleaje, las corrientes generadas por viento o marea varían en una escala de tiempo mayor, del orden de horas. Así pues, aunque las corrientes tienen una variación lenta, la capa límite de las corrientes cerca del fondo puede llegar a tener una escala vertical mayor que la capa límite del oleaje cerca del fondo. Consecuentemente la velocidad al cortante, la intensidad de la turbulencia y el esfuerzo cortante en el fondo van a tender a ser menores para la corriente en comparación con los

efectos que produce el oleaje. Sin embargo, a pesar de que es el oleaje el que principalmente levanta el sedimento del fondo, dado el relativamente gran esfuerzo cortante que genera en el fondo, son las corrientes las que efectivamente transportan el sedimento, puesto en suspensión por el oleaje.

3.2. ANTECEDENTES

En las últimas décadas se han desarrollado numerosos estudios y modelos para el análisis de la interacción entre el oleaje y la corriente. Entre ellos destaca, por el uso y aceptación que ha tenido en la comunidad científica, el modelo de viscosidad de remolino que fue propuesto por Grant y Madsen (1986 y 1993) y que resuelve analíticamente el flujo de la interacción del oleaje y la corriente en la capa límite cerca del fondo.

Existen también otros modelos alternativos los cuales emplean conocimientos más sofisticados de turbulencia, como es el propuesto por Madsen y Wikramanayake (1991). Por otro lado, están aquellos modelos de interacción oleaje – corriente aplicables al transporte de sedimento como lo son la distribución de mezcla larga (Bijker 1967) y la energía cinética turbulenta (Davies et al. 1988), por mencionar algunos.

3.3. LIMITACIONES

Existen dos limitaciones importantes de la teoría del análisis de la interacción entre el oleaje y las corrientes:

- a) La hidrodinámica se limita a las condiciones de no rotura del oleaje descritas por la teoría lineal y por las corrientes constantes unidireccionales cercanas al fondo.
- b) Sólo los sedimentos que pueden ser caracterizados como no cohesivos son considerados.

3.4. DERIVACIÓN DE LAS ECUACIONES DE GOBIERNO

En este apartado se presentan la ecuación de cantidad de movimiento en la capa límite asociado a la propagación del oleaje. Además, se especifican las propiedades del fondo por medio de la rugosidad equivalente para determinar la condición de no deslizamiento.

3.4.1. Aproximación de la capa límite

La ecuación de gobierno en dos dimensiones para flujo incompresible y homogéneo sobre la capa límite puede definirse por las ecuaciones de cantidad de movimiento (3.1) y (3.2), y la ecuación de continuidad (3.3) de la siguiente manera

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xx}/\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{zx}/\rho)}{\partial z} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{\partial(\tau_{xz}/\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{zz}/\rho)}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

donde

u es la componente horizontal de velocidad, dirección x

w es la componente vertical de velocidad, dirección z

ρ es la densidad del fluido

p es la presión

τ_{ij} es el esfuerzo cortante

Para simplificar las ecuaciones se procede a hacer un análisis del orden de magnitud de cada término, y se asume que

$$u = O(U), \quad w = O(W) \quad (3.4)$$

y

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = O(U_*^2) \quad (3.5)$$

Mientras tanto, el tiempo y las distancias horizontales son escaladas por el movimiento del oleaje, es decir, por la frecuencia

$$\omega = 2\pi/T, \quad (3.6)$$

por el número de onda

$$k = 2\pi/L, \quad (3.7)$$

y por el espesor en la capa límite del oleaje, δ . Por lo tanto,

$$\frac{\partial}{\partial t} = O(\omega) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = O(k) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = O\left(\frac{1}{\delta}\right) \quad (3.10)$$

Al introducir dichas escalas en la ecuación de continuidad, (3.3), se obtiene que

$$O\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + O\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right) = kU + \frac{W}{\delta} = 0 \quad (3.11)$$

Multiplicando la ecuación (3. 11) por ρ y analizando los términos por separado

$$W = O(w) = (k\delta)U \ll U \quad (3. 12)$$

dada la suposición de que el espesor de la capa límite es mucho menor que la longitud de onda ($k\delta \ll 1$).

Por otro lado, comparando el orden de magnitud de los términos no lineales que representan la aceleración convectiva y la aceleración local en las ecuaciones (3.1) y (3.2), se tiene que la aceleración convectiva está relacionada con el número de onda, mientras que la aceleración local con la frecuencia, tal como se observa en las siguientes ecuaciones

$$O\left(u \frac{\partial u}{\partial x}\right) = kU^2 \quad (3.13)$$

$$O\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) = \omega U \quad (3.14)$$

$$O\left[\frac{u \partial u / \partial x}{\partial u / \partial t}\right] = \frac{kU}{\omega} \quad (3.15)$$

El segundo término de la ecuación (3.15) queda en función de la longitud de onda y la frecuencia, al sustituir los valores correspondientes de dichos parámetros se obtiene la ecuación (3.16), la cual está en función de la celeridad

$$\frac{kU}{\omega} = \frac{U}{c} \quad (3.16)$$

y donde la relación (U/c) es menor que 1 por debido a que $c \gg U$.

Realizando la estimación para los términos que representan la variación en "z", la ecuación (3.2) puede ser definida como

$$\frac{\partial(p/\rho)}{\partial z} - \frac{\partial(\tau_{zz}/\rho)}{\partial z} + \frac{\partial gz}{\partial z} = O(\omega W + kU_*^2) \quad (3.17)$$

Dicha ecuación (3.17), puede ser integrada desde cualquier punto de "z" dentro de la capa límite hasta el borde de la capa límite en donde $z = \delta$, $p = p_\infty$ y $\tau_{zz} = 0$, obteniendo así la presión dentro de la capa límite

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{\tau_{zz}}{\rho} + g(\delta - z) + O\left[(\omega W + kU_*^2)(\delta - z)\right] \quad (3.18)$$

A su vez, diferenciando la ecuación anterior con respecto de x, y tomando en cuenta (3.9), se tiene

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial(p)}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{zz} + p_\infty)}{\partial x} + O\left[(\omega W + kU_*^2)k\delta\right] \quad (3.19)$$

Despejando el número de onda de la ecuación (3.16) y sustituyéndolo en el segundo término de la ecuación (3.19) y el valor de W obtenido en la ecuación (3.12), se obtiene

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial(p)}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{zz} + p_\infty)}{\partial x} + O\left[(\omega U k \delta + kU_*^2)k\delta\right] \quad (3.20)$$

Una vez que se tiene el valor de la variación de la presión en la dirección del eje x, se sustituye en la ecuación (3.1), con lo que se obtiene la ecuación de gobierno en la frontera de la capa límite en función de las velocidades y los esfuerzos

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xx} - \tau_{zz})}{\partial x} \quad (3.21)$$

El último término de la ecuación (3.21) involucra la diferencia que hay entre dos términos de una misma magnitud. Este término debe ser considerado en función kU_*^2 , no obstante, éste a su vez está en función de $k\delta$, por lo que la aceleración convectiva disminuye. Por consiguiente, la aproximación linealizada de la capa límite está dada por

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_\infty}{\partial x} + \frac{\partial(\tau/\rho)}{\partial z} \quad (3.22)$$

En la frontera externa de la capa límite, el esfuerzo cortante se simplifica y la ecuación anterior queda expresada como

$$\frac{\partial u_{\infty}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{\infty}}{\partial x} \quad (3.23)$$

Esta ecuación (3.23), es idéntica a la ecuación de gobierno de velocidad orbital para la teoría lineal de ondas.

$$u_{\infty} = \frac{a\omega}{\operatorname{senh}(kh)} \cosh(k\delta) \cos(\omega t - kx) \quad (3.24)$$

en donde a es la amplitud de la onda y h es la profundidad del agua. En principio, el valor del espesor de la capa límite δ debe ser especificado con la finalidad de obtener el valor del gradiente de presión dentro de la capa límite. Sin embargo, realizando una expansión del coseno hiperbólico alrededor de $z = 0$, la ecuación (3.24) se modifica, resultando en

$$u_{\infty} = \frac{a\omega}{\operatorname{senh}(kh)} \cos(\omega t - kx) \quad (3.25)$$

De la ecuación (3.25) al término $\frac{a\omega}{\operatorname{senh}(kh)}$ se le conoce como la velocidad estimada cerca del fondo, u_b , y es la velocidad calculada por medio de la teoría lineal. Por otro lado, muy cerca del fondo, el término correspondiente a la aceleración local se anula al aplicar la condición de deslizamiento, por lo que

$$\delta = O\left(\frac{U_*^2}{\omega U}\right) \quad (3.26)$$

y el valor de U_* se espera que sea del orden de las velocidades horizontales U . Por tanto la ecuación (3.27) resulta

$$O(k\delta) \cong O\left(\frac{U}{c}\right) \quad (3.27)$$

Las condiciones de frontera para la ecuación (3.22) están dadas por las condiciones de no deslizamiento cerca del fondo, las cuales, requieren que la velocidad u dentro de la capa límite se aproxime a la velocidad externa u_∞ en el borde de la capa límite.

Las condiciones de no deslizamiento impuestas en dicha frontera son:

1. $u = 0$ en $z = z_0$, en donde z_0 es la rugosidad y representa la resistencia al flujo en el fondo
2. $u \rightarrow u_\infty$ cuando $z \rightarrow \infty$ donde z es tomada como la coordenada vertical escalada por el espesor de la capa límite δ

3.4.2. Rugosidad y velocidad al cortante en la capa límite

Para flujo turbulento sobre una superficie rugosa, la resistencia de la frontera sobre el flujo es producido por la fricción debido a las formas de fondo y el esfuerzo cortante asociado al flujo en la proximidad individual de los elementos rugosos. Por tanto, el flujo en la vecindad del fondo rugoso es, en principio, no uniforme. Esta condición es también válida para el llamado flujo turbulento constante sobre una frontera rugosa que consiste en granos de arena inmóviles, si se hace un análisis microscópico del flujo en una capa dentro de la frontera rugosa. Sin embargo, lejos de la frontera, el movimiento turbulento ya no se puede asociar con un elemento individual de rugosidad, y se vuelve aleatorio por naturaleza y debe ser interpretado como "remolinos turbulentos".

La mayoría de los flujos que son turbulentos transportan el sedimento debido a las fuerzas propias de la turbulencia. Sobre un fondo horizontal, estos flujos son caracterizados por una escala grande de variación en el plano horizontal que a su vez se encuentra relacionada con la pequeña escala de variación en dirección vertical. Esta disparidad de

escalas de longitud hace posible eliminar la aceleración vertical dentro de la capa límite (Schlichting, 1968).

Para un flujo horizontal en dos dimensiones en el plano xz , donde x es el eje horizontal y z el eje vertical, la linealización de la capa límite está dada por la ecuación aproximada (3.22) definida de la siguiente manera

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p_\delta}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3.28)$$

en donde ρ es la densidad del fluido, u es la velocidad horizontal, p_δ es la presión en el borde de la capa límite, τ es el esfuerzo cortante y t es el tiempo. Puesto que el gradiente de presión se presume que se conoce a partir del nivel de superficie libre, η , la ecuación (3.28) puede ser establecida como una ecuación que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad. Consecuentemente, recordando que cerca del fondo el flujo turbulento tiene una tendencia a ser constante, esta relación puede ser modelada por el flujo laminar en la capa límite

$$\tau = \rho \nu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.29)$$

donde ν es la viscosidad cinemática ($\nu \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para el agua de mar). Para flujo turbulento en la capa límite el modelo de esfuerzo cortante se puede adoptar del modelo de la ecuación (3.29), donde el valor de la constante ν que se emplea para este caso es la viscosidad de remolino ν_T , de tal forma que se vea reflejado el incremento de mezclado asociado al flujo turbulento.

$$\tau = \rho \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.30)$$

donde

$$\nu_T = \kappa u_* z$$

donde κ es la constante de von Karman y $u_* = \sqrt{\tau_b/\rho}$ es la velocidad al cortante. El término τ_b , es el esfuerzo cortante cerca del fondo cuando $z = 0$ (Madsen, 1993).

En la Figura 3. 2 se observa la estructura de la capa límite turbulenta para el perfil de velocidad. Esta capa está conformada por tres subcapas: la subcapa viscosa, la capa turbulenta de generación y la capa externa.

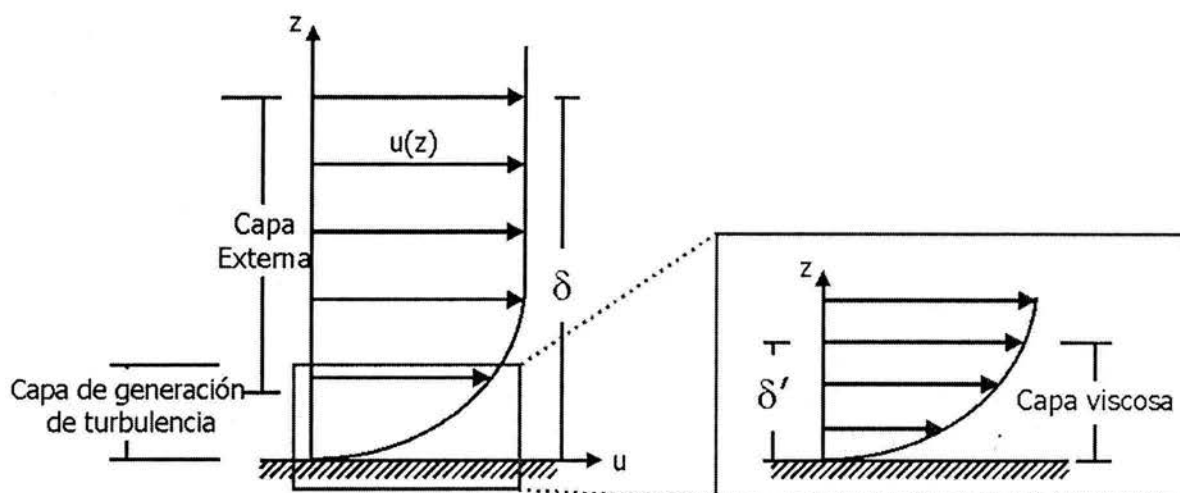


Figura 3. 2. Estructura del perfil de velocidad para flujo turbulento en la capa límite

La capa turbulenta de generación es caracterizada por tener una escala pequeña de turbulencia y alta escala en el esfuerzo cortante. Los remolinos turbulentos que se producen en esta región van hacia fuera de esta capa y hacia dentro de la capa viscosa. Si los elementos rugosos del fondo tienen una altura mayor que la capa viscosa, estos se extienden de la capa turbulenta de generación hacia el fondo.

La capa externa se ubica desde el límite de la capa turbulenta de generación. Se caracteriza por remolinos mucho más grandes que transportan grandes cantidades de sedimentos. Este alto transporte de sedimento produce que el perfil de velocidades sea mejor apreciado en esta zona que en la capa turbulenta de generación.

Por otro lado se sabe que para distancias más lejos de la frontera de la escala física, las características aceptadas para flujo turbulento son válidas, y el flujo medio puede entonces expresarse a través de un perfil logarítmico (Schlichting, 1968) dado por

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \tag{3.31}$$

donde

$$u_* = \sqrt{\tau_b / \rho} \text{ velocidad al cortante en el fondo}$$

τ_b es el esfuerzo cortante en el fondo

κ es la constante de von Karman ($\kappa = 0.4$)

z es la profundidad

z_0 es la rugosidad en la capa límite

El perfil de velocidad puede ser representado gráficamente como se muestra en la Figura 3. 3.

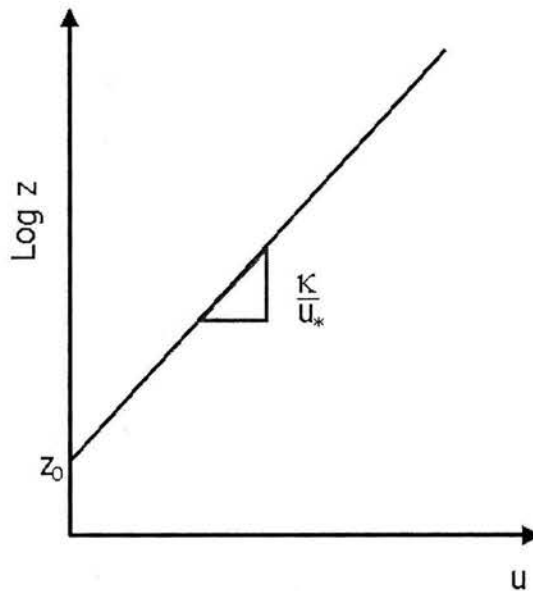


Figura 3. 3. Perfil logarítmico de velocidad

Otro aspecto importante en el estudio de los perfiles de velocidad es que el oleaje puede producir aceleraciones y/o desaceleraciones en las corrientes, produciendo perfiles con una forma curvada. Lejos del fondo, la relativa importancia de la inercia sobre los efectos de fricción que se generan es mayor a las que se presentan cerca del fondo.

Por lo tanto, cuando las corrientes se aceleran, el flujo lejos de la frontera conservará mayores fuerzas impulsoras que las del fondo y en consecuencia, el perfil del flujo será cóncavo descendente (ver Figura 3. 4). Para este caso en particular, la corriente es mayor que la determinada por el perfil logarítmico conforme z se incrementa. Por el contrario, en una corriente que desacelera, el perfil es convexo ascendente. Estos perfiles reflejan el hecho de que el esfuerzo cortante en el fondo provoca ligeras oscilaciones en el flujo.

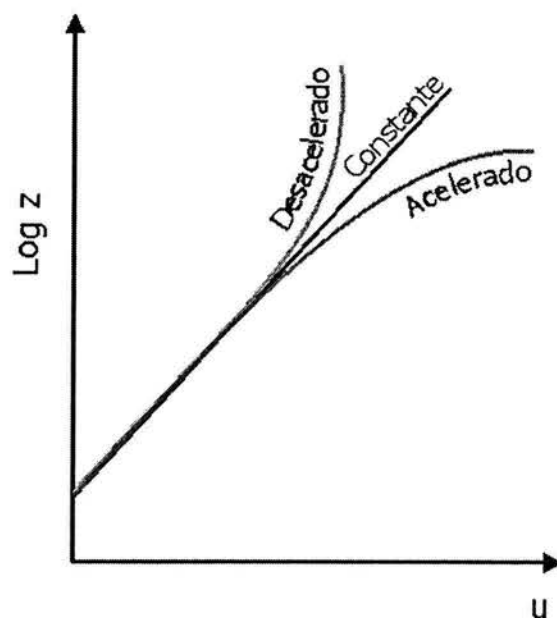


Figura 3. 4. Curvaturas del perfil logarítmico

Con base en lo anterior, se determina que cuando las corrientes se encuentran aceleradas es debido a que el oleaje se propaga en el mismo sentido que las corrientes. Caso contrario, es decir, cuando una corriente se encuentra desacelerada es debido a que la corriente y el oleaje se propagan en sentidos opuestos. Por tanto, a partir de estas teorías se puede determinar la influencia que se genera cuando el oleaje y las corrientes interactúan frecuentemente con los mismos ángulos y en ángulos opuestos.

Falta página

N° 42

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE CAMPO

4.1. INTRODUCCIÓN

En las zonas costeras, y en particular en el litoral Mexicano, los estuarios y sistemas lagunares son geoformas frecuentes. Estos sistemas se comunican con el mar con una o más bocas a través de las cuales tiene lugar una parte muy importante de la circulación, intercambio y renovación del agua que alimenta dichos sistemas. Sus formas y extensiones son constantemente alteradas por la erosión y depositación del sedimento, así como por los efectos drásticos causados por la variación del nivel medio del mar. Por tanto, durante su etapa de formación, se convierten en grandes trampas de sedimento, que se van llenando hasta que alcanzan un equilibrio, en el que la profundidad y la circulación de corrientes que las caracteriza se mantienen. No obstante, es conveniente insistir en que los estuarios y sistemas lagunares continuamente evolucionan, adecuándose a los cambios de flujo en los ríos que los alimentan y adaptándose a los eventos climatológicos que se presentan en su entorno.

Generalmente, estos sistemas tienen alta afluencia de alimentos proveniente de las regiones que los rodean, sin embargo, debido a la evolución antes citada, tienden a tener poca diversidad de vida comparadas con otros ambientes acuáticos. Esta variabilidad es distinta para cada sistema y depende del modo en que responde a los cambios físicos y de la escala de tiempo.

En las bocas de los sistemas lagunares es donde se lleva a cabo el mayor intercambio de sedimentos por arrastre de fondo y suspensión, generado por las corrientes de ríos, la marea y el oleaje. Con frecuencia éste último no es considerado para la estimación del transporte de sedimentos, dado que en muchas bocas existen bajos de reflujos que absorben la energía del oleaje, lo que provoca que la zona de rompiente se encuentre lejos de la boca. En las bocas del Carmen y de Puerto Real en la Laguna de Términos no es posible despreciar los efectos del oleaje, ya que las condiciones batimétricas permiten que se propague hacia la boca sin perder toda su energía, cambiando así las características dinámicas y cinemáticas del oleaje y de la corriente, y contribuyendo activamente al transporte de sedimentos.

Con la finalidad de validar lo expuesto en el párrafo anterior, se llevaron a cabo una serie de campañas de campo para contar con los elementos necesarios para analizar la interacción del oleaje y las corrientes con dichas bocas.

4.2. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Laguna de Términos se encuentra ubicada en el sureste del Golfo de México, dentro del Estado de Campeche. Geográficamente se localiza entre los meridianos 91°10' y 92°00' de longitud oeste y entre los paralelos 18°20' y 19°00' de latitud norte.

Esta laguna costera tiene aproximadamente una longitud de 70 km y en su parte más ancha alcanza alrededor de 30 km (Amezcuca, F. Y Yáñez-Arancibia, A., 1980). El área aproximada que cubre la superficie de la planicie costera es de 2,500 km² y se comunica al Golfo de México por medio de tres bocas, dos de ellas naturales y una artificial. Debido al gran intercambio de sedimentos que existe a través de dichas bocas y a que no existe un delta de reflujos importante en una de ellas (Puerto Real, ver Figura 4. 1), esta laguna se convierte en una zona ideal para analizar la interacción que existe entre el oleaje y la corriente.

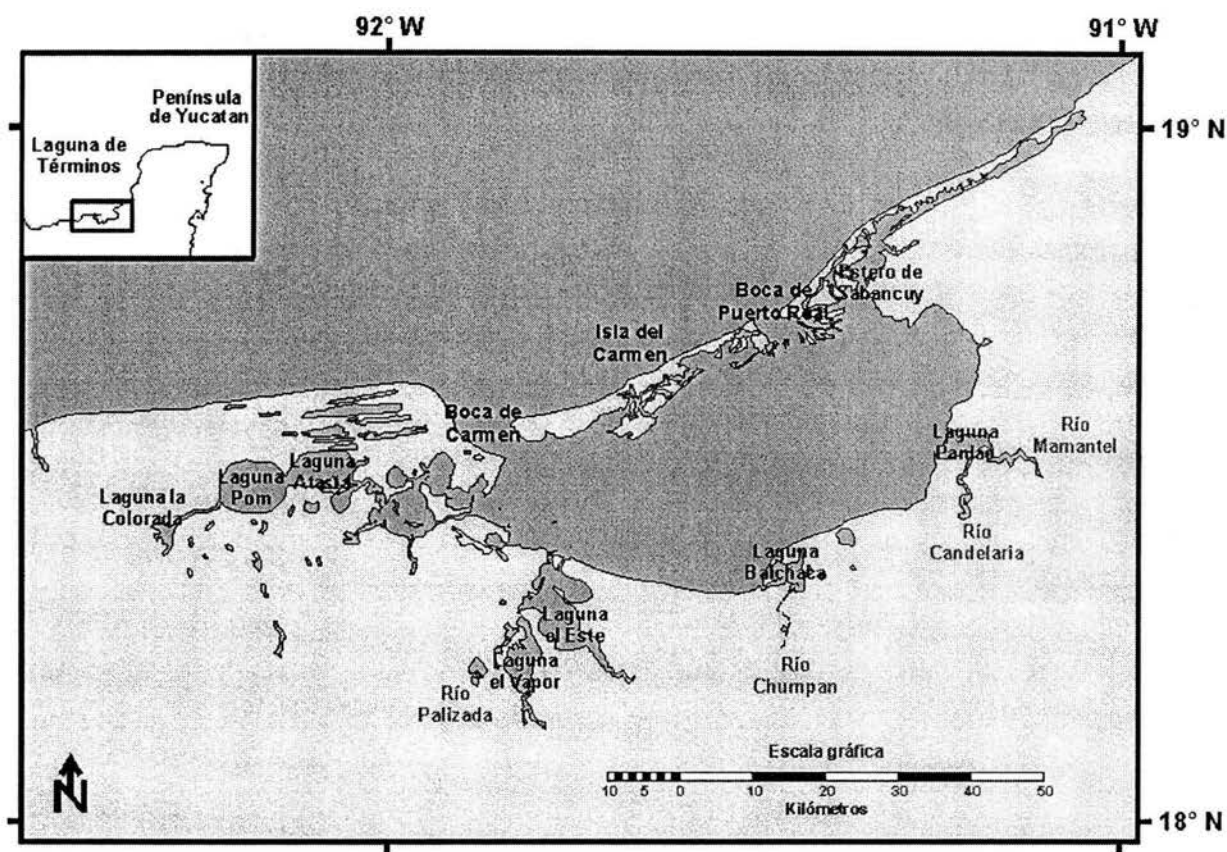


Figura 4. 1. Localización geográfica de la Laguna de Términos, Campeche

Las dos bocas naturales con las que cuenta esta laguna son Puerto Real y Carmen que se ubican al Este y al Oeste de la Isla del Carmen, respectivamente y la boca artificial es la Boca de Sabancuy, la cual fue abierta para aumentar el intercambio de agua con el mar en el estero con el mismo nombre y se encuentra aproximadamente 40 km al Noreste de la boca de Puerto Real.

La boca de Puerto Real tiene un ancho promedio de 3.2 km y un notable delta interior. En cuanto la boca del Carmen, con un ancho promedio de 3.8 km, es influenciada por las descargas de sedimento fino en suspensión del Río Palizada, las cuales producen turbidez y forman un delta exterior.

4.2.1. Batimetría y sedimento

El área que comprende la Laguna de Términos y sus alrededores, pertenece a la planicie costera del Golfo; la cual, como su nombre lo indica, es sumamente plana y casi no presenta elevaciones.

El perfil batimétrico de la laguna es bastante homogéneo y, en general, tiene una profundidad de 4 m debido a que se encuentra saturada por la gran cantidad de sedimentos aportados por los ríos y por el oleaje proveniente del exterior de la laguna. Por tanto, en la región de esta laguna se distinguen tres unidades geohidrológicas donde la unidad predominante está constituida por materiales no consolidados de origen lacustre y palustre, entre los que predominan las arcillas de baja permeabilidad, la cual restringe mucho la posibilidad de almacenamiento de agua (INE).

En el caso particular de las bocas principales de esta laguna, se ha observado que sus profundidades varían de 7 a 12 m en la sección mínima transversal de la boca del Carmen y en la boca de Puerto Real las profundidades en su sección mínima transversal varían de 2 a 11 m (Morán, 2004), lo que favorece la generación de zonas de bajos al interior de la laguna. Por tal motivo, esta última boca es considerada como importadora de sedimentos.

4.2.2. Clima y vegetación

El clima en la zona de Laguna de Términos es de tipo tropical húmedo y presenta dos temporadas de lluvia, una con poca precipitación que dura aproximadamente cuatro meses, entre Febrero y Mayo, y otra con una alta precipitación que dura generalmente siete meses a partir de Junio y llega en algunas ocasiones hasta Enero (Yáñez) cuando también se presentan vientos fuertes (nortes) con velocidades mayores de los 8 m/s, llegando a rebasar los 12.5 m/s (Mancilla y Vargas, 1980). Durante esta época es cuando el aporte fluvial se incrementa y la salinidad disminuye en el cuerpo de agua.

Los vientos juegan un papel importante en la circulación del agua de la laguna debido a que soplan sobre la superficie del agua generando ciertas corrientes superficiales que esparcen los sedimentos del fondo debido a la poca profundidad que tiene la laguna, haciendo que el agua llegue a ser bastante turbia en la mayor parte de la superficie.

Debido a las características del tipo de suelo, al agua salobre de pantano y a los aportes de los ríos que tienen en sus desembocaduras y en las lagunas adyacentes, esta laguna

cuenta con una vegetación muy abundante del tipo selva tropical, con abundancia de manglares, típicos de un clima húmedo tropical.

4.2.3. Hidrografía

En cuanto a la hidrografía que se presenta en la zona de la laguna, ésta se encuentra drenada principalmente por cuatro ríos: Río Palizada, Río Chumpan, Río Candelaria, y Río Mamantel. De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua correspondientes a diferentes años, el Río Palizada, que forma parte de la red hidrológica de los ríos Mezcalapa, Grijalva y Usumacinta es el de mayor caudal, con un promedio anual de 288 m³/s y rango de variaciones mensuales de 115 a 510 m³/s. El río Candelaria, conjuntamente con el río Mamantel desembocan a la laguna de Panlau, la cual a su vez desemboca en la Laguna de Términos por medio de la boca de Pargos con un caudal promedio anual de 72 m³/s (David y Kjerfve, 1998) con un mínimo registrado de 23 m³/s y máximo de 197 m³/s. Por último, el río Chumpán aporta un caudal promedio de 18 m³/s, mínimo de 0.32 m³/s y máximo de 50 m³/s. (Espinal, 2002).

Otra característica importante en la Laguna de Términos es que se encuentra rodeada por un grupo de pequeñas lagunas, y en conjunto, constituyen el sistema lagunar más importante del país. Se destacan cuatro sistemas fluvio – lagunares principales:

- a) Sistema Pom – Atasta, el cual forma un conjunto de lagunas satelitales que se comunican a la Laguna de Términos por medio de la boca de Atasta. Este sistema tiene gran aporte de sedimentos terrígenos y en su formación posee varias series de cordones de playa.
- b) Sistema Palizada – Del Este, el cual está constituido por la porción terminal del Río Palizada. Los ramales de este río, junto con otros ríos menores anexos dan origen a las lagunas El Vapor, El Este y Del Viento desembocando en la laguna por medio de las bocas San Francisco y Chica.
- c) Sistema Chumpán – Balchacah, el cual incluye la porción terminal del Río Chumpán y la Laguna de Balchacah (Sitio Viejo), donde desemboca a la Laguna de Términos.
- d) Sistema Candelaria – Panlau, el cual corresponde a la porción terminal de los ríos Candelaria y Mamantel, así como a la Laguna de Panlau.

4.3. CAMPAÑA DE CAMPO

Con el propósito de analizar la interacción oleaje-corriente, se diseñaron y efectuaron una serie de campañas de campo en la Boca de Puerto Real en diferentes épocas del año, de tal forma que se pudiesen obtener mediciones de oleaje, corrientes y transporte de sedimento en suspensión para los distintos climas que se presentan en la zona.

La primera campaña de campo se efectuó del 1 de septiembre de 2002 al 5 de octubre de 2002 en una época en donde se pueden presentar ciclones o huracanes cerca de la zona. La segunda campaña de campo, se llevó a cabo del 13 de Diciembre de 2002 al 27 de Enero de 2003 en una época de fuerte actividad del oleaje, considerada como una época de nortes.

De acuerdo con análisis preliminares de cartas batimétricas y estudios anteriores (e.g., Yáñez - Arancibia y Sánchez – Gil, 1983) se seleccionó la Boca de Puerto Real para realizar las mediciones debido a que, como se mencionó antes, no existe un delta de reflujo importante, por lo que el oleaje se propaga a través de la misma, interactuando significativamente con las corrientes y el sedimento de la zona costera.

Las mediciones de campo se realizaron instalando un equipo en el fondo de la boca en un punto previamente seleccionado por medio de la batimetría que se tenía de la zona, dejándolo en operación durante ciclos de marea y bajo diferentes condiciones de oleaje, esto con el objetivo de obtener simultáneamente el perfil de velocidad en la columna de agua, incluida la capa límite, para poder estimar la magnitud del esfuerzo cortante y la rugosidad cerca del fondo, así como obtener datos del oleaje direccional de la zona.

4.3.1. Equipo de medición

El equipo de medición que se utilizó fue un perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés), el cual mide la magnitud y dirección de las corrientes en toda la columna de agua así como el oleaje direccional. Dicho aparato es un estándar para este tipo de mediciones y se ha utilizado exitosamente en estudios previos (e.g., Salles, 2000). El ADCP funciona emitiendo señales con frecuencia de 1200 kHz por medio de sus cuatro transductores (ver Figura 4. 2), la cual, al reflejarse en partículas en suspensión en la columna de agua, cambia de frecuencia de tal forma que al ser captadas por el ADCP

nuevamente puede conocerse la velocidad de la corriente en varias capas, así como el oleaje direccional en la capa superficial.

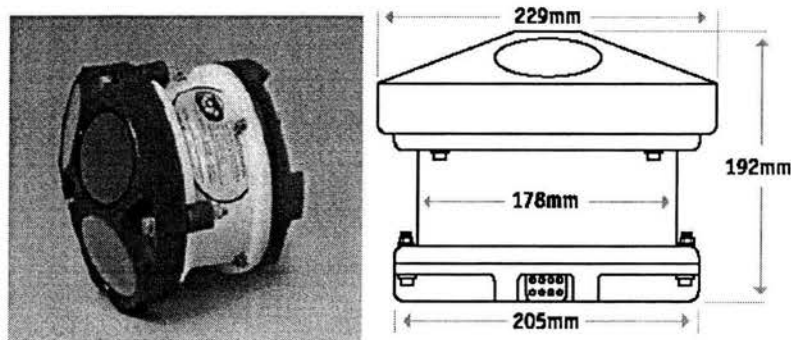


Figura 4. 2. Fotografía y esquema con dimensiones del ADCP (Perfilador de Corrientes Acústico Doppler)

El ADCP tiene la característica de funcionar de forma autónoma por medio de baterías y memoria interna o bien, conectándolo a una computadora y a la corriente eléctrica a través de cables de forma que se puedan ir haciendo las mediciones en tiempo real. Para efectos de las campañas en la boca de Puerto Real, se utilizó el funcionamiento autónomo.

4.3.2. Plataforma

Con el objeto de proteger el ADCP, así como situarlo en el fondo del mar de tal manera que quedara fijo y en posición vertical, independientemente de la pendiente del fondo, fue necesario diseñar y construir una plataforma en la cual el ADCP quedaría sujetado por medio de un giróscopo (ver Figura 4. 3), esto con la intención de que el ADCP siempre pudiera realizar las mediciones sin distorsionar la señal debido a una inclinación. El rango de giro que comprende el giróscopo es de aproximadamente 15° con respecto a la vertical.

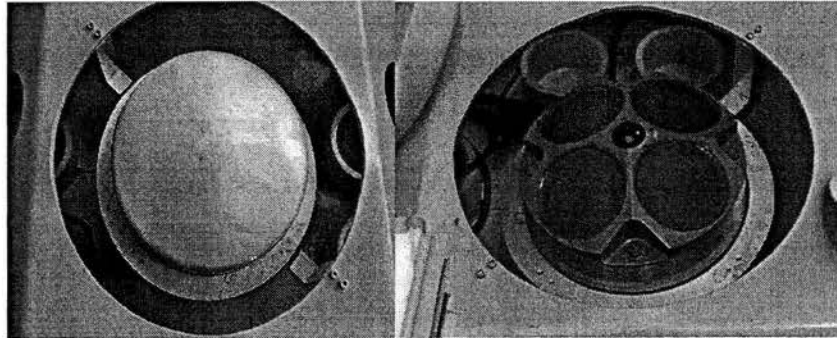


Figura 4. 3. Giróscopo de la plataforma del ADCP

La plataforma fue diseñada de forma piramidal y construida con aluminio cubierto de pintura anticorrosiva (ver Figura 4. 4). La estructura consta de dos piezas unidas con tornillos de acero inoxidable y de diez cilindros desmontables, los cuales no tienen otra función que la de servir como lastres. Estos cilindros pueden ser colocados por los orificios que se observan sobre la parte de arriba de la plataforma.

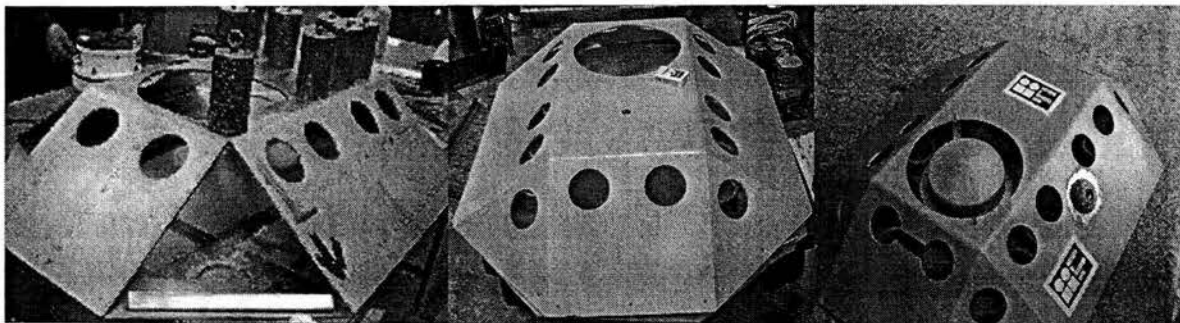


Figura 4. 4 Proceso de construcción de la plataforma del ADCP

Las dimensiones con las que se diseñó la plataforma estuvieron en función del recipiente de las baterías, buscando éste se encontrara separado del ADCP lo suficiente como para no generar un campo magnético entre el equipo y las baterías. Por otro lado, también se

consideró el tipo de mediciones que se pretendían obtener, es decir, se trató de que la altura de dicha plataforma fuera lo más cercana al fondo. Las dimensiones de la plataforma son de base inferior de 128 x 94 cm, de base superior de 72 cm x 38 cm y de altura de 23.5 cm.

Con el fin de que el equipo quedara asegurado en el fondo, se ancló con dos granpines, cada uno colocado con cabos y cadenas a cada extremo de la plataforma en direcciones opuestas.

4.3.3. Localización del equipo de medición

Una vez realizada la inspección de la zona de estudio se llevaron a cabo los levantamientos batimétricos necesarios para seleccionar el sitio exacto de ubicación del ADCP, el cual sería muy similar en ambas campañas. El equipo de medición se colocó en las coordenadas que se muestran en la Tabla 4. 1 a una profundidad aproximada de 7.2 m para la primera campaña de campo y a 5.75 m para la segunda campaña de campo. Esta diferencia de profundidades entre una y otra campaña es la consecuencia en la variación estacional en el nivel medio del mar y el fondo.

Tabla 4. 1. Coordenadas de localización del ADCP

COORDENADAS (UTM)		COORDENADAS (GRADOS)	
NORTE	ESTE	LATITUD	LONGITUD
2,077,350.32	657,420.69	N 18° 46' 47"	W 91° 30' 26"

En la Figura 4. 5 se muestra la batimetría de la Boca de Puerto Real y el puente que une a isla del Carmen con isla Aguada. Es importante mencionar que debido a los pilotes que soportan dicho puente, el equipo de medición tuvo que ser colado a una distancia tal que las velocidades generadas en las cercanías del puente no afectaran las mediciones que se pretendían tomar con el equipo.

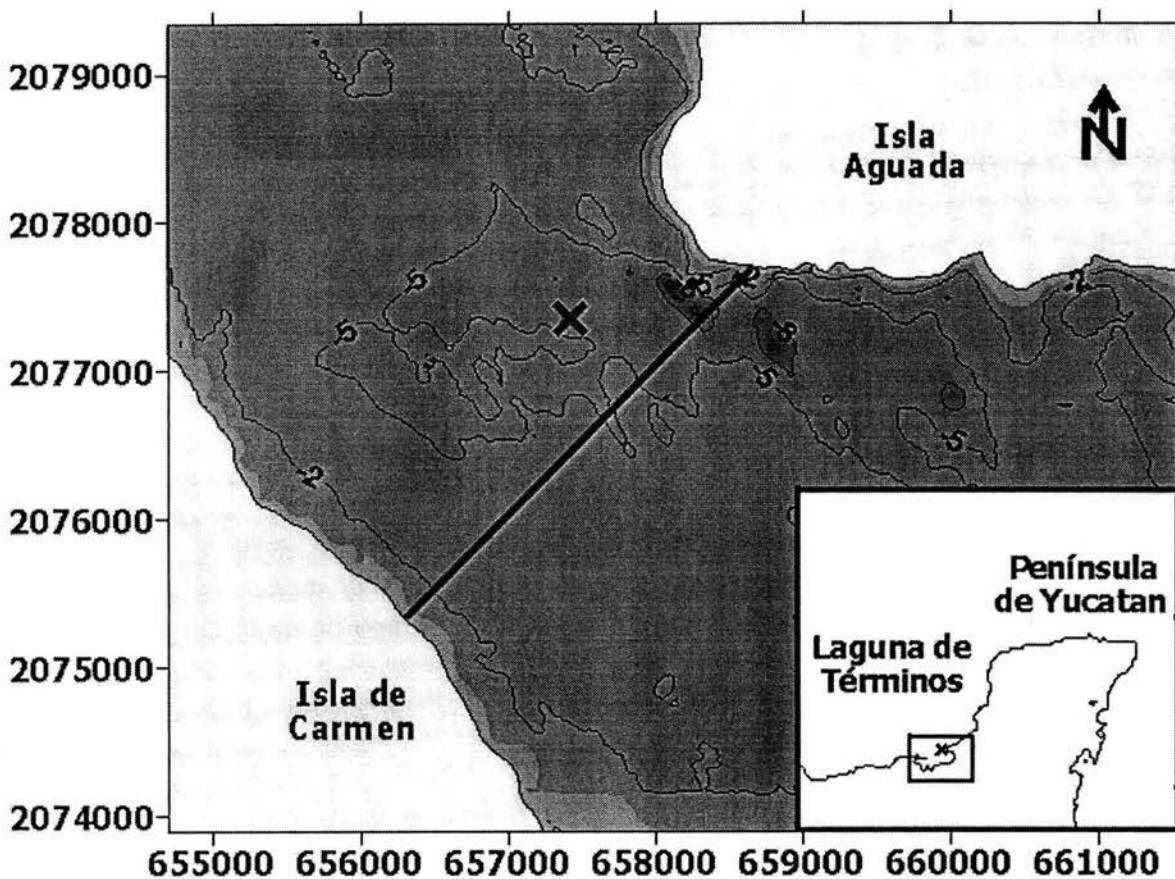


Figura 4. 5. Localización del equipo de medición en la Boca de Puerto Real de la Laguna de Términos, Campeche

4.3.4. Configuración previa

Antes de que se introdujera el equipo de medición en la boca de Puerto Real, fue necesario ingresarle una programación inicial para que se llevara a cabo las mediciones apropiadas de corriente y de oleaje. Para ello, se utilizó el software de configuración para funcionamiento autónomo (batería y memoria) del equipo de medición, en el cual se realizaron una serie de pruebas con el fin de calibrarlo y suministrarle la información requerida para efectuar las instrucciones de programación. Los programas y procedimientos que se utilizaron para configurar el equipo se describen en el Anexo A en el apartado WinSC y WavesPlan.

A continuación se muestran las características principales de la programación del ADCP para las dos campañas. Debido a que las mediciones tanto del oleaje como de la corriente tienen disposiciones diferentes, se le ingresaron configuraciones por separado, es decir, una configuración para el oleaje y otra configuración para el de corrientes. Cabe señalar que el archivo que se crea y almacena en la memoria del ADCP es uno solo. Sin embargo, al momento de recuperarlos por medio de otro programa, éste separa los datos de oleaje de los de corriente. Por otra parte, es importante mencionar que la configuración horaria que le fue ingresada al equipo para ambas campañas fue referido al meridiano de Greenwich (GMT por sus siglas en inglés). Por tanto, para la primera campaña la hora de inicio será aquella que registre el equipo menos 5 horas (GMT -5, horario de verano) y para la segunda campaña la hora de inicio será aquella que registre el equipo menos 6 horas (GMT -6, horario de invierno).

Por otra parte, la diferencia en la cantidad de datos entre una campaña y otra se debe a la distinta capacidad de memoria interna con que disponía el equipo. Cabe mencionar, entonces, que para la segunda campaña de campo se adquirió más memoria interna para poder realizar las mediciones con menos intervalos de muestreo y más tiempo de monitoreo.

4.3.4.1. Mediciones de corriente

En la Tabla 4. 2 se muestran los datos previos necesarios para realizar la configuración inicial de las mediciones de corriente.

Tabla 4. 2. Datos de configuración para mediciones de corriente

	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
Fecha y hora de inicio	01/Sep/2002 - 14:00	13/Dic/2002 - 18:00
Número de capas	20	30
Tamaño por capa	0.35 m	0.35 m
Número de muestras	3326	6389
Intervalo de muestreo	15 min = 900 s	10 min = 600 s
Número de lecturas en cada muestreo	240	270
Profundidad	7.20 m	5.75 m
Primera celda del fondo	0.86 m	0.86 m
Tiempo por lectura	3.75 s	2.22 s

4.3.4.2. Mediciones de oleaje

Como en el apartado anterior, en la Tabla 4. 3 se indica la configuración para efectuar las mediciones de oleaje.

Tabla 4. 3. Datos de configuración para las mediciones de oleaje

	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
Fecha y hora de inicio	01/Sep/2002 - 14:00	13/Dic/2002 - 18:00
Número de capas	20	30
Tamaño por capa	0.35 m	0.35 m
Número de muestras	540	1597
Duración de muestreo	90 min = 5400 s	40 min = 2400 s
Número de lecturas en cada muestreo	2160	2160
Profundidad	7.20 m	5.75 m
Primera celda del fondo	0.86 m	0.86 m
Frecuencia	2 Hz = 0.5 s	2 Hz = 0.5 s

4.3.5. Recuperación del equipo de medición

Finalizado los periodos de recolección de los datos de oleaje y corriente en la boca de Puerto Real, se llevó a cabo la recuperación de la plataforma y el equipo de medición del fondo marino. Para tal efecto, se localizó nuevamente el sitio de medición y se diseñó la maniobra de extracción, la cual resultó diferente para ambas campañas.

Una vez que se extrajo del fondo tanto la plataforma como el equipo de medición, se pudo observar (Figura 4. 6) que se les incrustó una especie de conchuelas características de la zona, alrededor de sus superficies. Esto se debe a que la zona del Golfo de México carece de estructuras rocosas, por tanto, cuando un material duro es ingresado al mar, los organismos que habitan tienden a adherirse sobre su superficie.

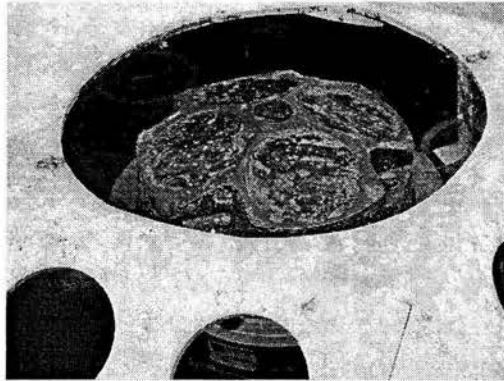


Figura 4. 6. Plataforma y ADCP una vez terminada la campaña de campo

Debido a que ya se esperaba la incrustación de estos organismos, antes de colocar el equipo de medición se le untó a todos los transductores una mezcla de chile piquín con silicón con el propósito de que estos organismos no se adhirieran e interfirieran con las señales emitidas por el ADCP para obtener las mediciones.

4.3.6. Recuperación de los datos medidos

Para obtener los datos almacenados en la memoria interna del ADCP, se utilizó un software que por medio de una computadora conectada al equipo de medición, descargó los archivos generados durante las mediciones. Una vez finalizada la extracción de los archivos se recurrió a otro programa de recuperación de datos, el cual, tiene como función separar tanto los datos de las corrientes como datos de oleaje.

Para ejecutar este programa, fue necesario ingresarle información referente a la configuración inicial, asimismo, datos como la elevación a la que se encontraba los transductores desde el fondo del mar y la desviación magnética para las fechas en que se realizaron las campañas de campo. Este último dato fue importante calcularlo debido a que las direcciones tanto de oleaje como de corriente medidos por el equipo dependieron de la brújula con la que cuenta el ADCP y por tanto, estuvieron referidos al norte magnético y no al norte geográfico. Por tales efectos, las desviaciones magnéticas que se obtuvieron fueron de 2.8914° para la primera campaña y de 2.8619° para la segunda campaña.

Otro punto importante que hay que mencionar, es que el programa que realiza la separación entre los datos de oleaje y de corrientes, sólo hace la corrección de la desviación magnética a los datos de oleaje. En cuanto a la corrección de la desviación magnética para los datos de corrientes se generó un programa en MatLab para llevar a cabo dichas correcciones.

Los pasos y procedimientos de recuperación de los datos por medio del software antes mencionado, se muestran en el Anexo A de este documento en el apartado WavesMon.

En este capítulo se mostró la zona de estudio en la que se llevaron a cabo las mediciones para poder analizar los perfiles de velocidad como se muestra en los resultados del siguiente capítulo.

CAPÍTULO 5

REDUCCIÓN DE DATOS, ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones obtenidas en las campañas de campo realizadas en la Boca de Puerto Real de la Laguna de Términos. Para tales efectos se desarrolló una metodología para el análisis de los perfiles de velocidad para determinar la influencia del oleaje sobre las corrientes.

En consecuencia fue necesario determinar los datos requeridos para el análisis y las condiciones en los que se llevaría a cabo el análisis de las mediciones. Por tanto, para ambas campañas se estableció el análisis de las corrientes y el oleaje cuando se propagan en una misma dirección y cuando se propagan en dirección opuesta con los criterios de selección que se muestran en la metodología.

Por otro lado, cabe mencionar que para poder aplicar la metodología propuesta para el análisis se tuvo que reducir, y en algunos casos corregir, las mediciones realizadas por el equipo de medición (ADCP).

5.2. DATOS REQUERIDOS PARA EL ANÁLISIS

Los datos requeridos para llevar a cabo el análisis de los resultados son los siguientes:

- La batimetría de la Boca de Puerto Real se realizó en el mes de Agosto de 2002. Esto con la intención de identificar, previo a la instalación del equipo, el sitio idóneo para realizar las mediciones.
- Las coordenadas de localización del ADCP que se utilizaron para realizar las correcciones de las direcciones de los ángulos del oleaje y las corrientes debido a la desviación magnética que se mencionó en el capítulo anterior
- Los datos de altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p), la dirección del oleaje (θ_w), el tiempo de muestreo y la profundidad registrada en cada muestreo que se obtuvieron del archivo de los datos medidos del oleaje
- Los datos de magnitud de la corriente en cada capa (profundidad), la velocidad Este y Norte (velocidades en un plano xy), la dirección de la corriente (θ_c), el tiempo de muestreo y la cota (z) a la que se realizó la medición en cada capa que se obtuvieron del archivo de los datos medidos de corrientes

5.3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE DATOS

La metodología propuesta para el análisis de los datos tanto de oleaje como de corrientes de ambas campañas de campo consta de varios puntos que a continuación se describen. En la Figura 5. 1 se muestra un resumen de dicha metodología por medio de un diagrama de flujo:

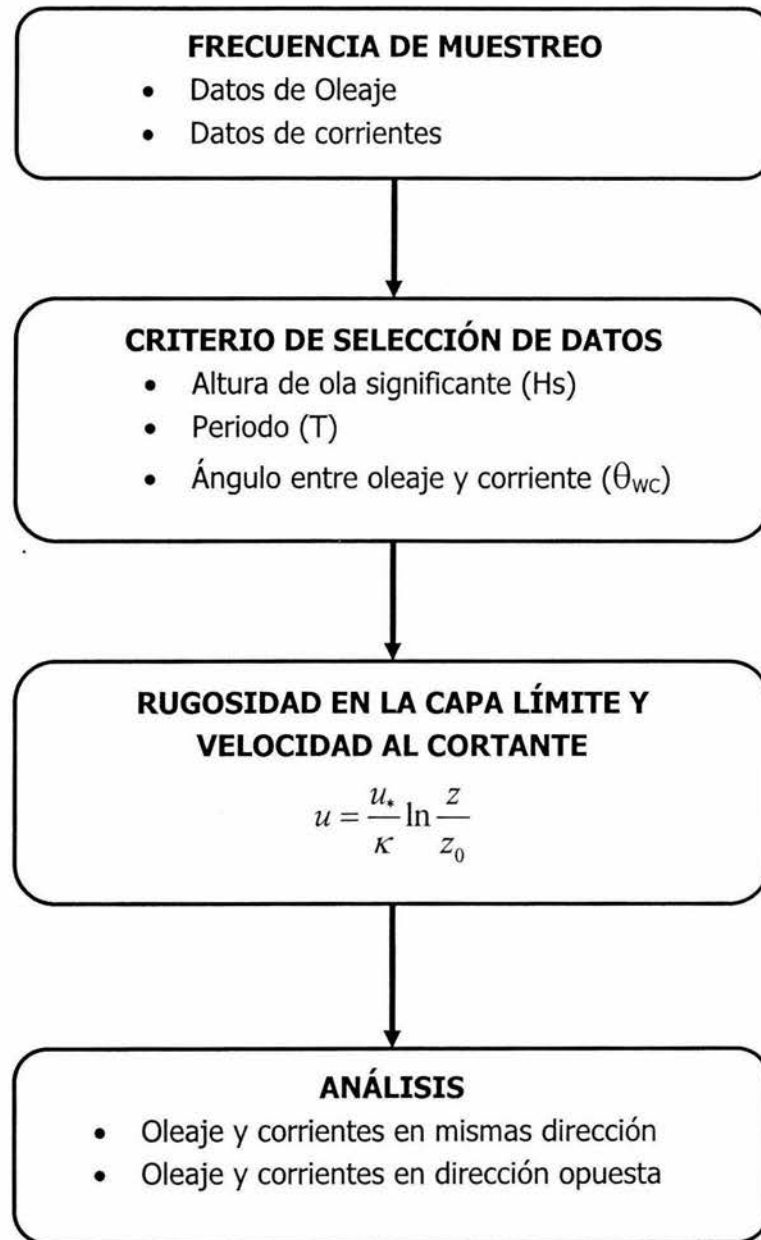


Figura 5. 1. Diagrama de flujo de la metodología

1. Frecuencia de muestreo

Dada la capacidad de memoria, la autonomía de energía y la duración de las campañas de campo, se determinó el intervalo de tiempo para recolectar las

mediciones. Por lo tanto, cada muestreo registró un número específico de lecturas. En las siguientes tablas se muestran los intervalos de muestreo y la cantidad de datos obtenidos en ambas campañas.

Tabla 5. 1. Frecuencia de muestreo de la campaña 1

CAMPAÑA 1	Corrientes	Oleaje
Intervalo de recolección	15 min	90 min
Número de datos obtenidos	3326	540

Tabla 5. 2. Frecuencia de muestreo de la campaña 2

CAMPAÑA 2	Corrientes	Oleaje
Intervalo de recolección	10 min	40 min
Número de datos obtenidos	6389	1597

2. Criterio de selección de los datos

Debido a que el objetivo es analizar el fenómeno físico de la interacción que existe entre el oleaje y la corriente cuando viajan en dirección opuesta o en la misma dirección, se adoptaron varios criterios de filtrado o selección de datos. Para tales efectos, se utilizaron únicamente los datos que cumplieran con los criterios que se describe en la Tabla 5. 1 para el caso de oleaje y corriente propagándose en la misma dirección, y los datos que cumplieran con los criterios de la Tabla 5. 2 para el caso de oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta.

Por tanto, para la altura de ola significativa (H_s) se tomaron aquellos valores que fueran mayores a 0.25 m. Lo anterior se debe a que el oleaje de muy pequeña amplitud no fue medido con la confiabilidad deseada.

Para el caso del periodo, se tomaron aquellos valores que estuvieran debajo de los 11 segundos, ya que periodos mayores a este rango tampoco eran confiables debido a que olas de pequeña amplitud van asociados a periodos largos.

Finalmente, para poder analizar cuando la corriente y el oleaje se propagan en una misma dirección, los ángulos que deben existir entre ellos es de -30° y 30° (ver Figura 5. 2). Cualquier otro dato fuera de este rango tuvo que ser descartado para el análisis. En cuanto al criterio de oleaje y corriente propagándose en direcciones opuestas, el rango de ángulos propuesto fue de entre 150° y 210° . Estos ángulos están en función de la inclinación que presenta la boca de Puerto Real con respecto al Norte geográfico.

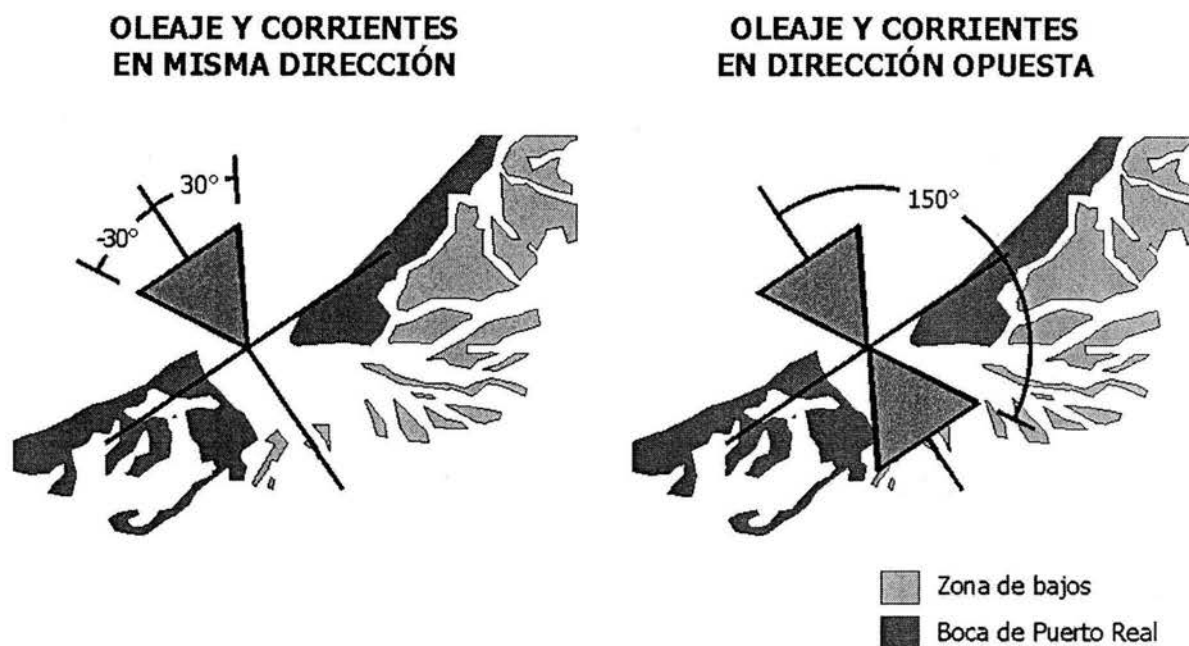


Figura 5. 2. Rangos de los ángulos para el criterio de selección

Tabla 5. 3. Criterios para oleaje y corriente en una misma dirección

Altura de ola significativa	Hs (m)	Todos aquellos valores mayores de 0.25 m
Periodo	Tp (s)	Todos aquellos valores menores de 11 s
Angulo entre oleaje y corriente	θ ($^\circ$)	Todos aquellos valores entre -30° y 30°

Tabla 5. 4. Criterio para oleaje y corriente en dirección opuesta

Altura de ola significativa	Hs (m)	Todos aquellos valores mayores de 0.25 m
Periodo	Tp (s)	Todos aquellos valores menores de 11 s
Angulo entre oleaje y corriente	θ (°)	Todos aquellos valores entre 150° y 210°

3. Obtención de la rugosidad en la capa límite (z_0) y la velocidad al cortante (u_*)

Una vez realizada la selección de los datos utilizando los criterios mencionados en el punto anterior, se recurrió a calcular los perfiles logarítmicos de velocidad, esto con el objeto de obtener los valores de las rugosidades en la capa límite y de las velocidades al cortante.

Por medio de una regresión lineal en los perfiles de velocidad se dedujeron los valores de la pendiente y de la ordenada al origen aplicando la ecuación (3.31)

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (3.31)$$

donde

$u_* = \sqrt{\tau_b / \rho}$ velocidad al cortante en el fondo

τ_b es el esfuerzo cortante en el fondo

κ es la constante de von Karman ($\kappa = 0.4$)

z es la profundidad

z_0 es la rugosidad en la capa límite

De la ecuación anterior, se despeja el término z_0 aplicando las propiedades de los logaritmos.

$$u = \frac{u_*}{\kappa} (\ln z - \ln z_0) \quad (5.1)$$

Despejando el logaritmo de la elevación ($\ln z$), se obtiene

$$\ln z = \frac{\kappa}{u_*} u + \ln z_0 \quad (5.2)$$

Donde la ecuación (5.2) se puede homologar con la ecuación de una recta del tipo pendiente y ordenada al origen, la cual está dada en su forma general por

$$y = mx + b \quad (5.3)$$

Por lo tanto, al graficar $\ln z$ en función de la velocidad de la corriente, (u_c), como se muestra en la Figura 5. 3 se puede obtener de la línea de regresión el valor de la rugosidad en la capa límite, z_0 , representado por la ordenada al origen y el valor de la velocidad al cortante, u_* , el cual se deduce de la pendiente κ/u_* .

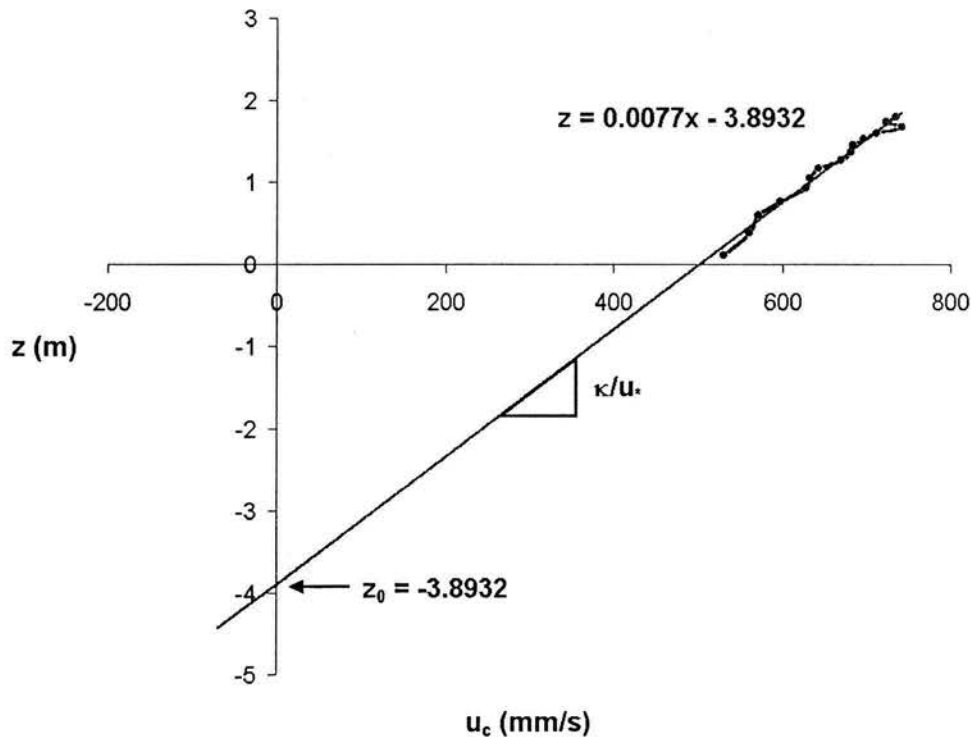


Figura 5. 3. Ejemplo de la rugosidad en la capa y de la relación para el cálculo de la velocidad al cortante donde z es la profundidad y u_c la velocidad de la corriente

4. Análisis de los valores de z_0 y u_* para cada uno de los casos

Finalmente, después de haber obtenido los valores de la rugosidad en la capa límite y la velocidad al cortante a partir de la ecuación (5.2), se analizan los resultados para cada uno de los perfiles cuando el oleaje y la corriente se propagan en una misma dirección y cuando el oleaje y la corriente se propagan en direcciones opuestas.

5.4. REDUCCIÓN DE DATOS

Antes de poder aplicar la metodología mencionada, fue necesario reducir los datos. Para tal efecto se utilizaron los programas del ADCP (WavesMon y WinADCP) y programas de apoyo creados con programación en MatLab:

- Para los datos de corrientes se utilizó el programa WinADCP, el cual, exporta en archivos de MatLab las velocidades Este y Norte, la magnitud y la dirección de las corrientes de cada capa (la profundidad está dividida por capas). Una vez obtenido el archivo, se realizó la corrección de la desviación magnética por medio de un programa creado en MatLab
- Para los datos de oleaje se extrajo el archivo procesado por el programa WaveMon. Del cual se obtuvieron los datos de altura de ola significativa (H_s), la profundidad, el periodo pico (T_p), la dirección del oleaje, la magnitud de la corriente y la dirección de la corriente

A continuación se muestran los resultados preliminares de las corrientes donde se hizo el procesamiento de datos antes y después de incluir la desviación magnética. Para el caso de los datos de oleaje, no fue necesario hacerle ninguna corrección ya que al realizar el procesamiento de los datos con el WaveMon se corrigió la desviación magnética.

5.4.1. Primera campaña de campo

La primera campaña de campo se llevó a cabo del 1 de septiembre de 2002 al 5 de octubre de 2002. Cabe mencionar que en esta campaña se tuvo la presencia de un evento extraordinario (Huracán Isidore) cerca de la zona donde se hallaba colocado el ADCP y por

tanto, en los resultados se aprecia el cambio de condiciones normales a condiciones extraordinarias debido a este fenómeno (oleaje, corrientes y marea de tormenta; ver Figura 5. 4). Este huracán empezó como una depresión tropical en el mar Caribe del 15 de septiembre de 2002 fue adquiriendo fuerza hasta llegar a la península de Yucatán el 22 de septiembre de 2002 con una clasificación de huracán clase 3 quedando ahí estacionado durante 2 días hasta que fue perdiendo su energía convirtiéndose en una tormenta tropical y cambiando su rumbo hacia el Norte del Golfo de México.

5.4.1.1. Datos de corriente obtenidos con el WinADCP

En la Figura 5. 4 se muestran las series de tiempo de las velocidades horizontales (Norte – Sur y Este – Oeste) que se obtuvieron con el programa WinADCP. La escala de los colores corresponde a las intensidades de las corrientes en mm/s, donde la intensidad de color rojo representa las velocidades Este y Norte y la intensidad de color azul representa las velocidades Oeste y Sur. Dado que se aprecian las fluctuaciones entre valores positivos y negativos de las velocidades en la Boca de Puerto Real, se comprueba que las corrientes se ven regidas de acuerdo al ritmo del flujo (entrante) y reflujo (saliente) de las mareas a través de la boca. Otro aspecto importante es que entre los días 20 y 26 se aprecian cambios en las condiciones de los flujos, esto debido al efecto de la presencia del huracán Isidore cerca de la zona. Por otro lado, en esta figura, también se observa el número de capas y la profundidad a la que el equipo estuvo realizando las mediciones, así como el número de muestras y las fechas en que se realizaron.

Haciendo un acercamiento a la figura anterior durante el paso del huracán Isidore, como se muestra en la Figura 5. 5, se observa que las intensidades que en general fueron dominantes en este periodo son las velocidades Oeste y Norte, por lo que se establece que durante ese periodo de tiempo se presentó más el reflujo a través de la boca. Este se debe a que también se generaron descargas en los ríos, durante el evento climatológico, que hicieron que el nivel de superficie en la boca de Puerto Real aumentara más de un metro.

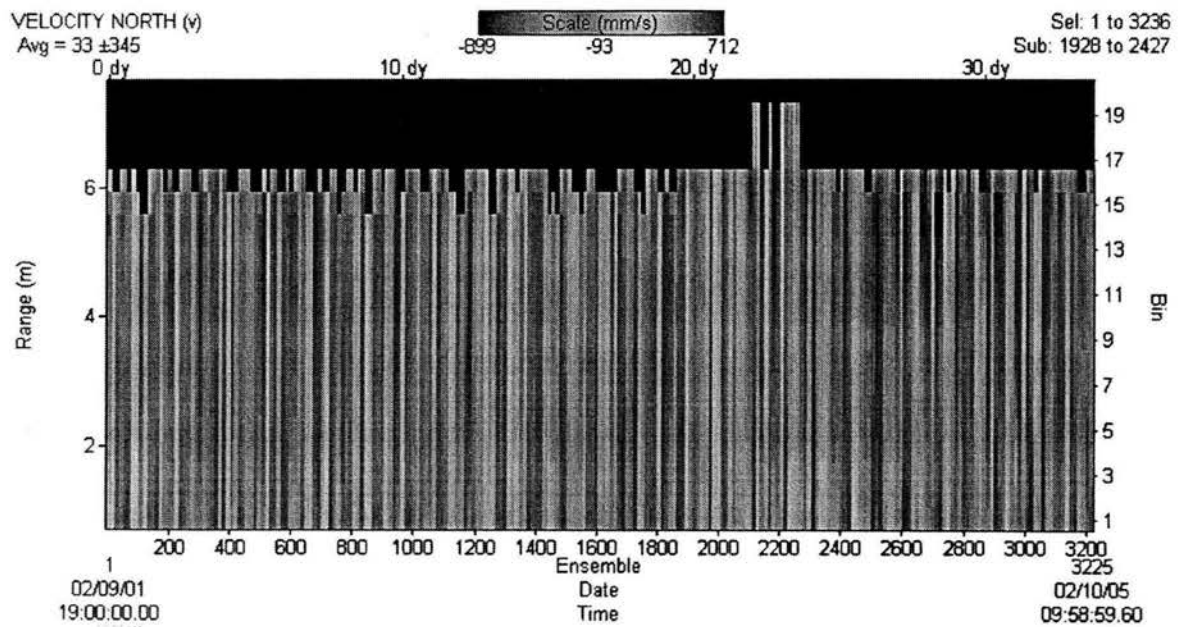
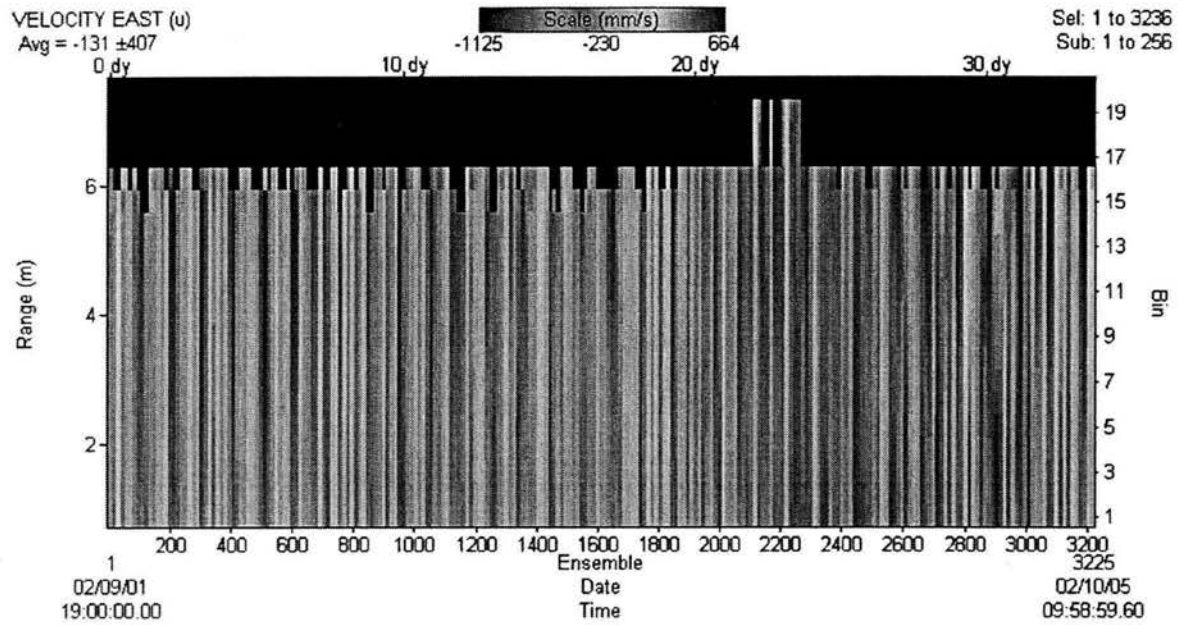


Figura 5. 4. Series de tiempo de las velocidades Este y Norte de la primera campaña

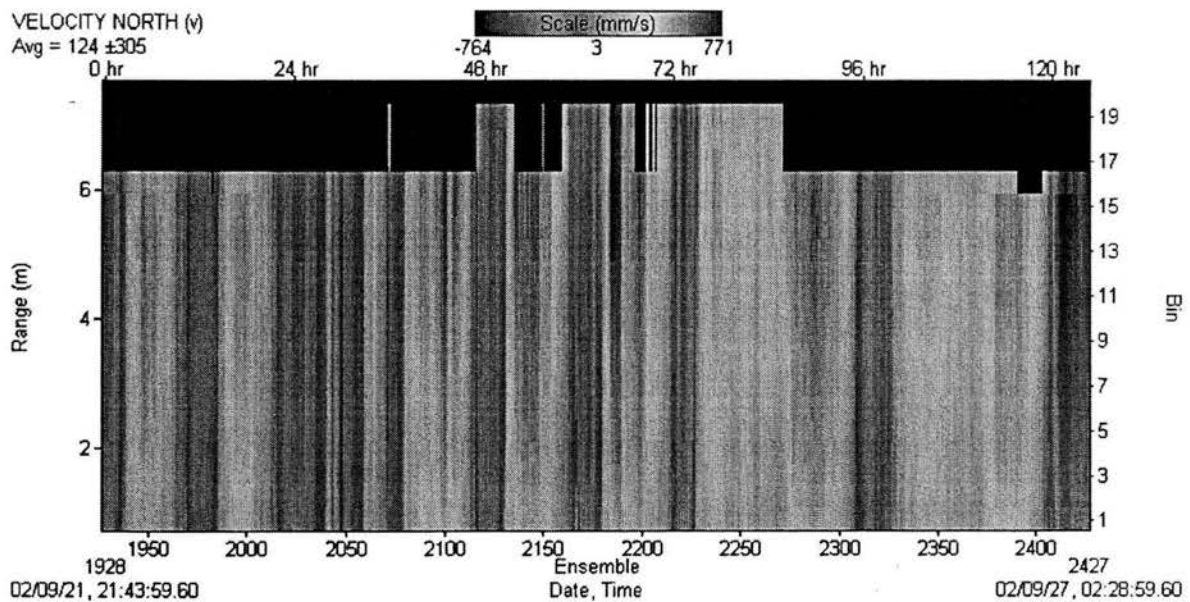
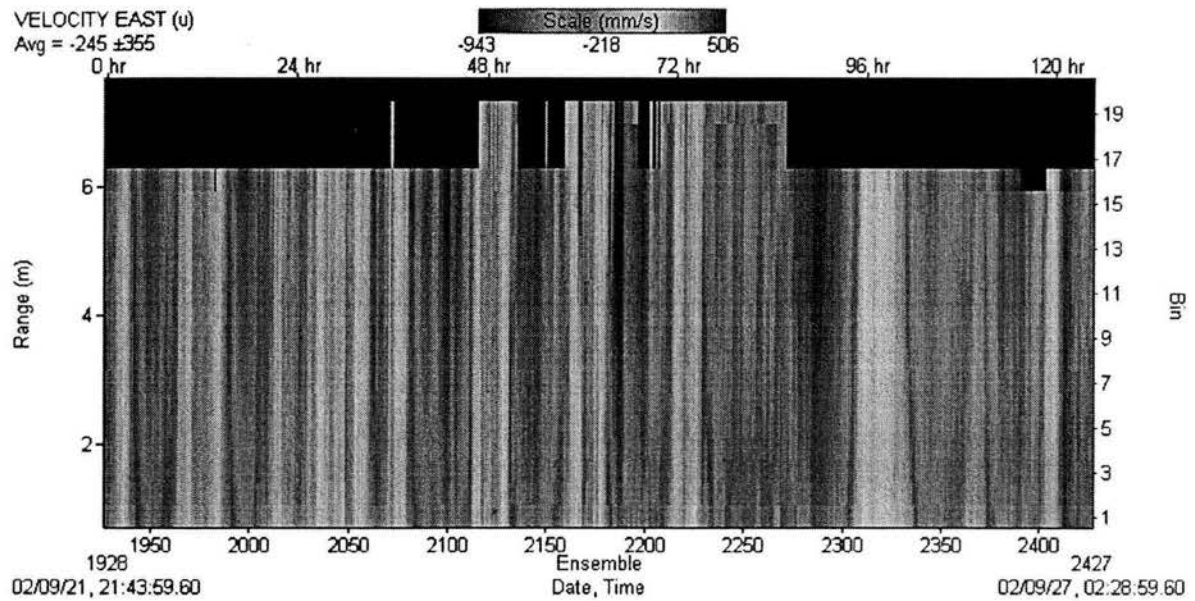


Figura 5. 5. Acercamiento a las series de tiempo de las velocidades Este y Norte de la primera campaña durante el paso de Isidore

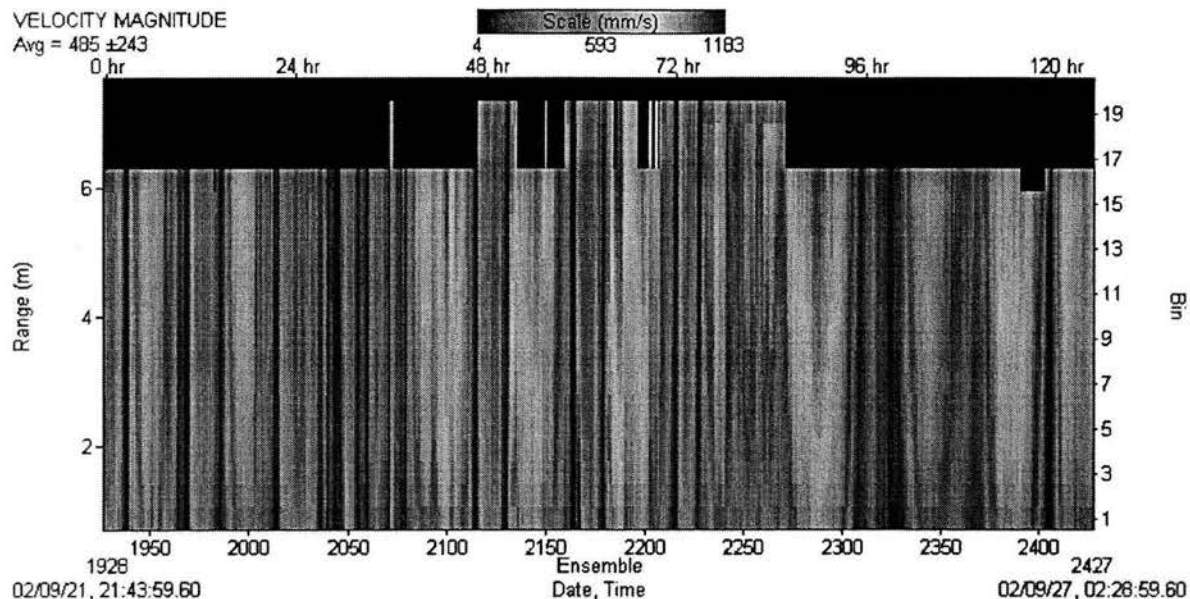


Figura 5. 6. Acercamiento a las series de tiempo de la magnitud de la primera campaña durante el paso de Isidore

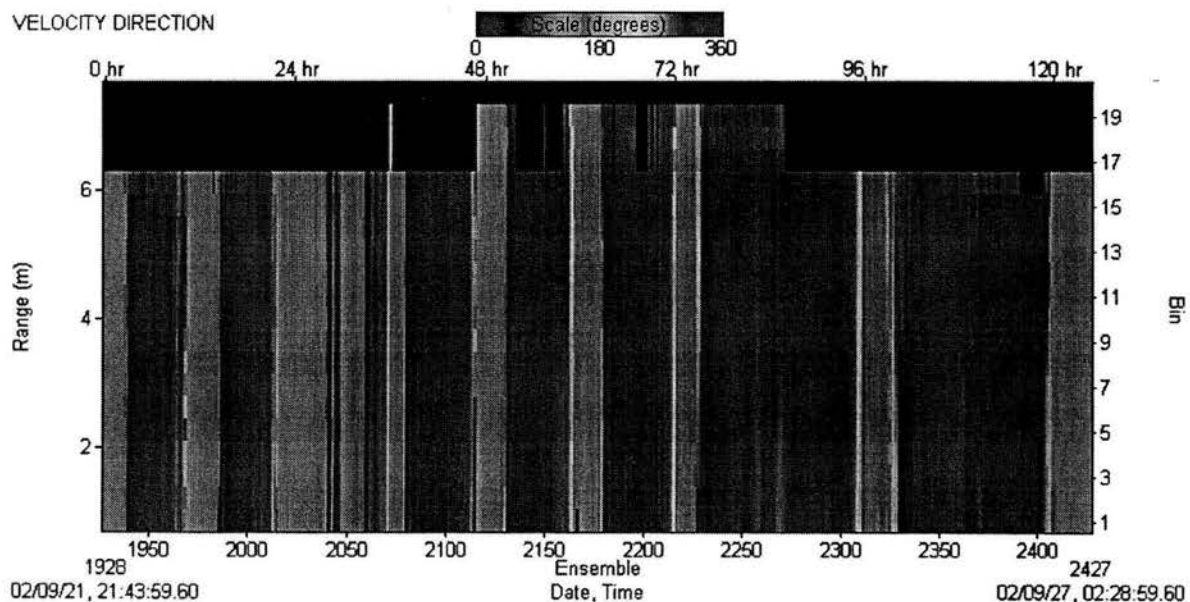


Figura 5. 7. Acercamiento a las series de tiempo de la dirección de la magnitud de la primera campaña durante el paso de Isidore

Se pueden apreciar también las intensidades en mm/s de las magnitudes de velocidad que se muestran en la Figura 5. 6, donde la escala de colores es azul para intensidades de pequeña magnitud y rojo para intensidades de gran magnitud. Por tanto, en el acercamiento durante la presencia del huracán Isidore, se observan que sus magnitudes oscilaron entre tonalidades verdes y rojas, lo cual representa que éstas estuvieron entre 593 mm/s y 1183 mm/s.

Así mismo, en la Figura 5. 7 se observan los ángulos de las direcciones predominantes. Nuevamente se establece un ritmo del flujo (entrante) y reflujos (saliente) por medio de la escala de colores, en la que el flujo está representado por las tonalidades verdes (180°) y el reflujos por las tonalidades rojas (360°). Una vez más se confirma por medio de esta figura, que durante el paso del huracán Isidore, el reflujos fue el dominante.

5.4.1.2. Corrección de la desviación magnética

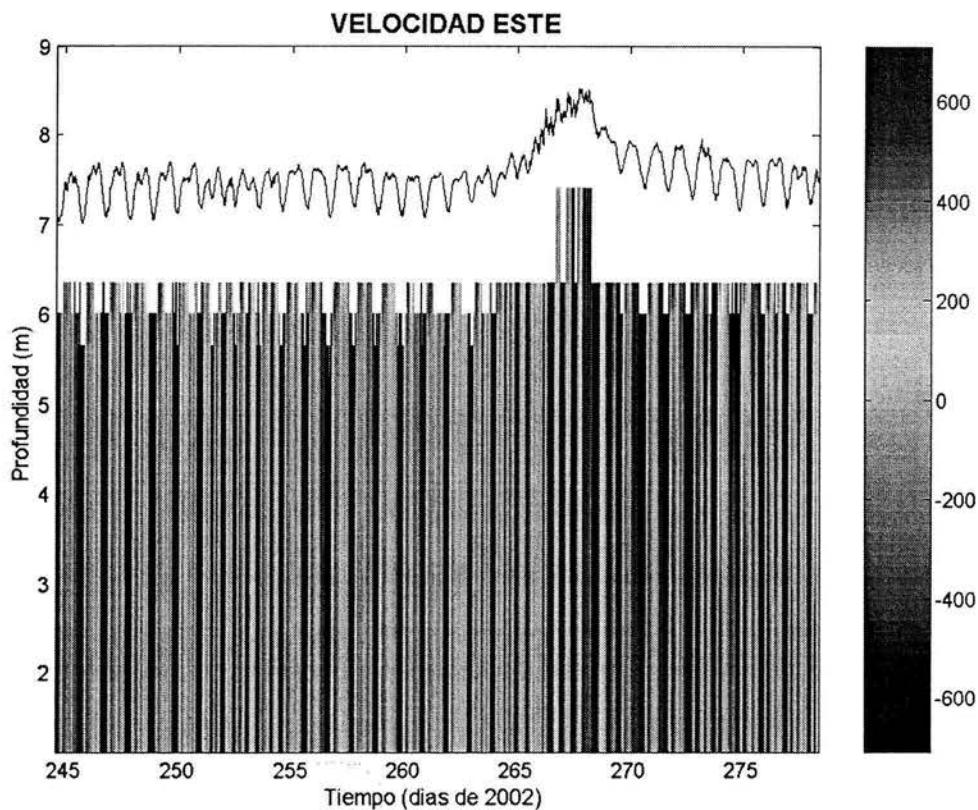


Figura 5. 8. Corrección de la serie de tiempo de la velocidad Este de la primera campaña

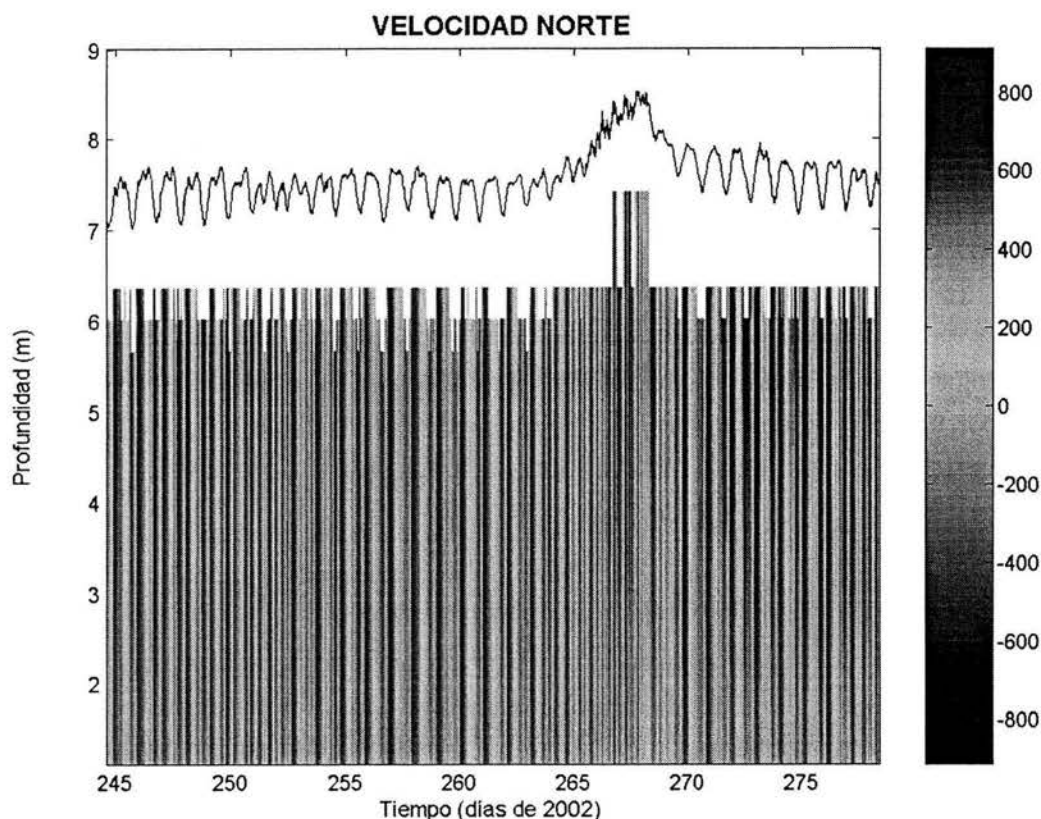


Figura 5. 9. Corrección de la serie de tiempo de la velocidad Norte de la primera campaña

Como se mencionó en el capítulo 4, para llevar a cabo la corrección de la desviación magnética de los datos se utilizó un programa que agregó por medio de formulaciones dicho ángulo en los valores de las velocidades Este y Norte que se obtuvieron del WinADCP. Por tanto, en las Figura 5. 8 y Figura 5. 9 se muestran gráficas similares a las que se ejecutaron con el otro programa. Nuevamente se observa el cambio de las condiciones normales a condiciones extraordinarias debido a los efectos del huracán Isidore. Por otro lado, también se puede observar que durante ese intervalo de tiempo, el nivel de superficie libre aumentó hasta alcanzar alrededor de 1 m .

En la Figura 5. 10 se muestran las gráficas de las velocidades Este en el eje x y las velocidades Norte en el eje y para diferentes capas las cuales representan la profundidad desde el fondo hasta la superficie dividido por secciones en donde el equipo de medición registró los datos. En estas capas se aprecian que la dirección de las velocidades del flujo

y el reflujos no necesariamente son coincidentes, es decir, que el ángulo que existe entre una velocidad y otra no es de 180°. Esto se observa sobre todo conforme las velocidades se alejan del fondo como es el caso en la capa 10 y 15.

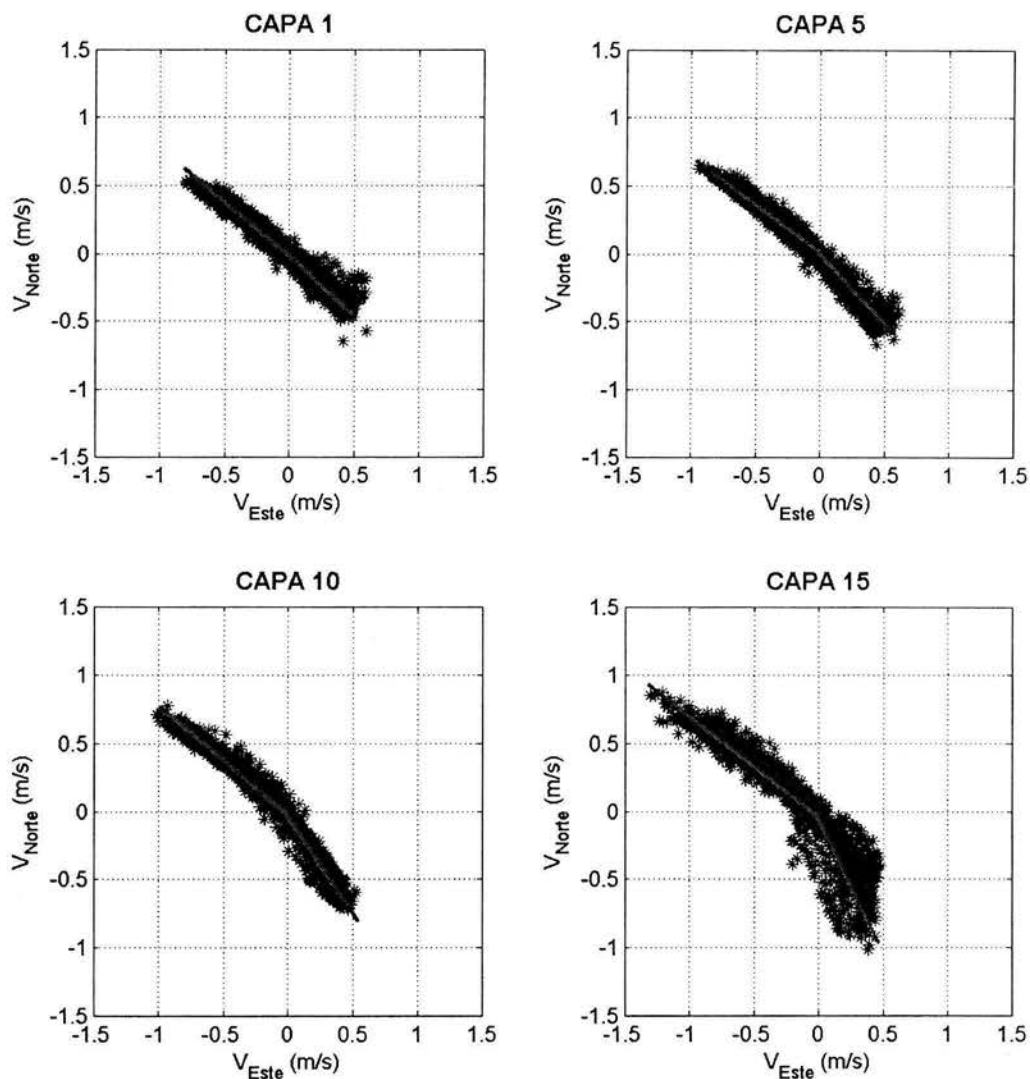


Figura 5. 10. Velocidad Este y Norte en las capas 1, 5, 10 y 15 de la primera campaña

5.4.2. Segunda campaña de campo

La segunda campaña de campo se llevó a cabo del 13 de diciembre de 2002 al 27 de enero de 2003. Debido a que la duración de la campaña fue más larga, los datos que se obtuvieron de corrientes se crearon en dos archivos. Por tanto, se muestran en las siguientes figuras por partes los resultados preliminares de los datos

5.4.2.1. Datos obtenidos con el programa WinADCP

De forma similar que los datos de la primera campaña, se utilizó el programa WinADCP para crear las series de tiempo de las velocidades horizontales que se muestran en las y . A diferencia de las gráficas de la primera campaña, en éstas es más visible el cambio en las fluctuaciones de flujo y reflujos. En parte se debe a que el rango en las variaciones de las intensidades no es tan grande como se dio para el caso de la primera campaña. Hay que recordar que en dicha campaña de campo se tuvo la presencia de un evento climatológico y por tanto las intensidades que se generaron durante dicho evento y días después fueron las de mayor magnitud, creando así un rango mayor en la escala de las intensidades. Por otro lado, para estos casos, se aprecian claramente los ciclos de marea viva y marea muerta por medio de las intensidades en las velocidades de cada número de muestra (representado por Ensemble en las figuras).

Para el caso de la serie de tiempo de las magnitudes que se muestra en la Figura 5. 13 también verifican que cuando hay marea viva las intensidades de sus magnitudes son mayores que cuando se presenta marea muerta. Estas intensidades se encuentran en un rango de 2 mm/s a 1229 mm/s. De igual manera, en la serie de tiempo de las direcciones también se observan los cambios de dirección por flujo y reflujos (ver Figura 5. 14).

Por otra parte, cabe señalar que durante las series de tiempo de las figuras que se han mostrado para la segunda campaña, existen algunos periodos en donde la corrección del nivel de superficie libre no se pudo efectuar correctamente. Por tanto, estas correcciones se efectuaron posteriormente utilizando programación en Matlab.

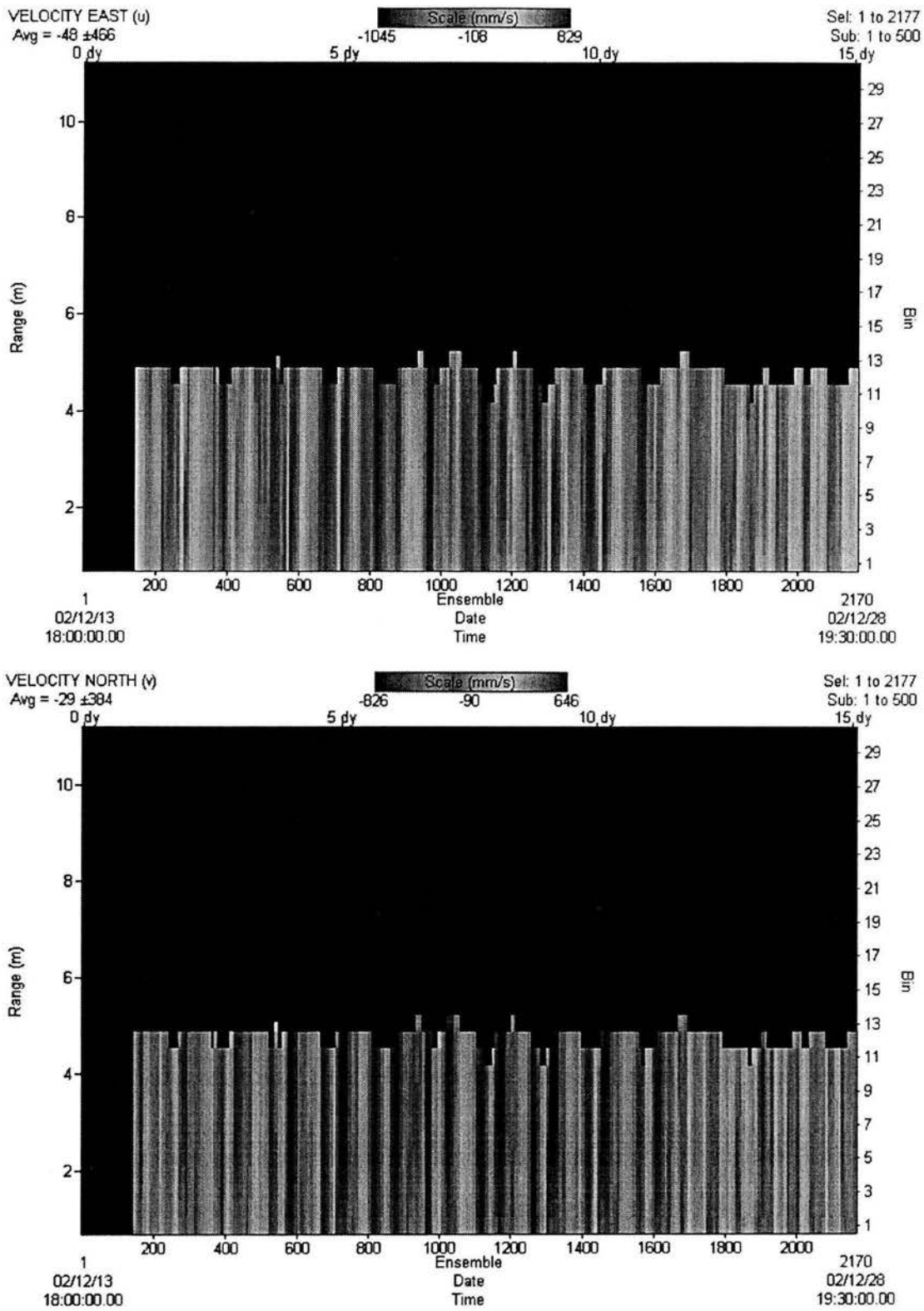


Figura 5. 11. Series de tiempo de las velocidades Este y Norte de la segunda campaña (primer parte)

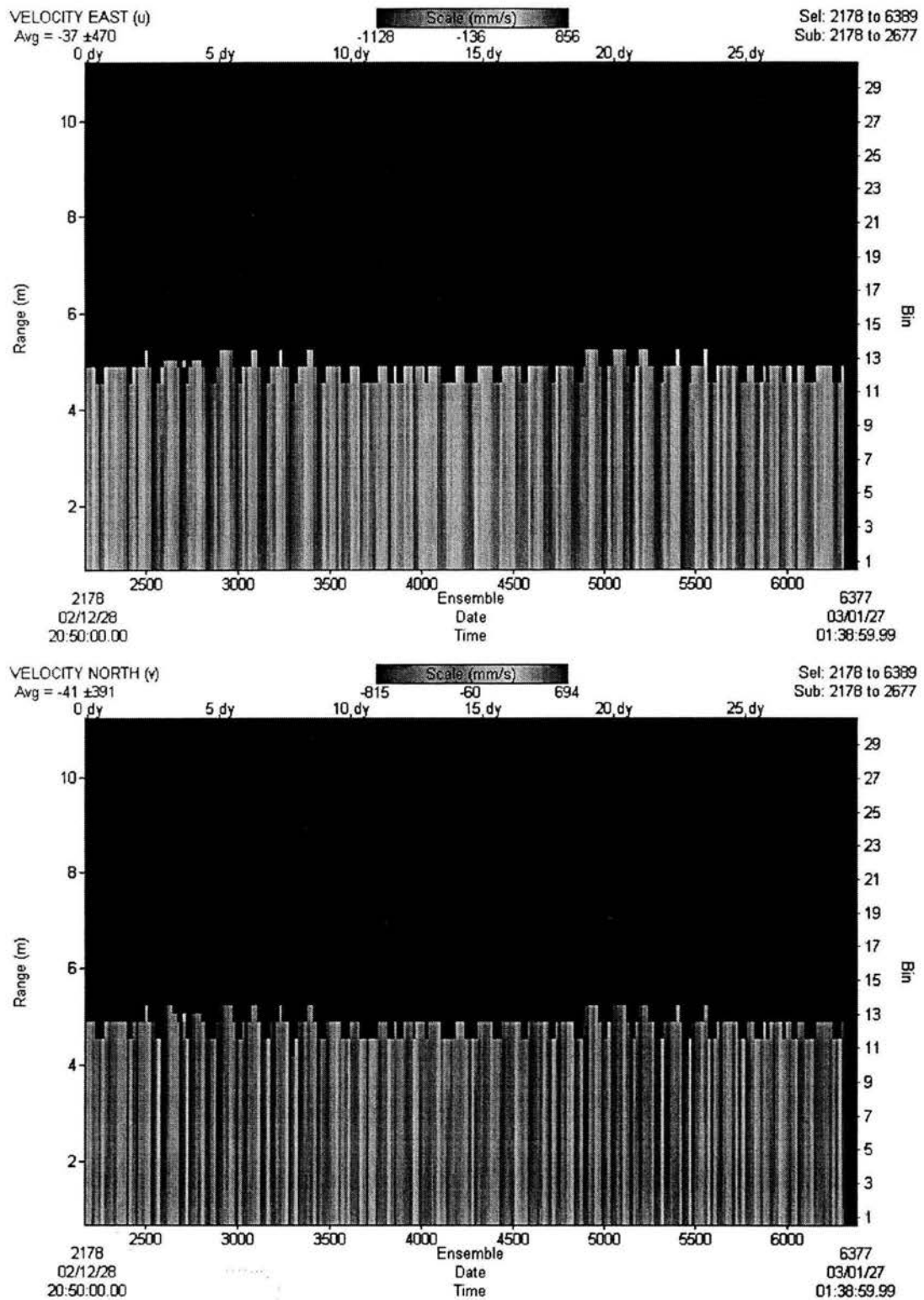


Figura 5. 12. Series de tiempo de las velocidades Este y Norte de la segunda campaña (segunda parte)

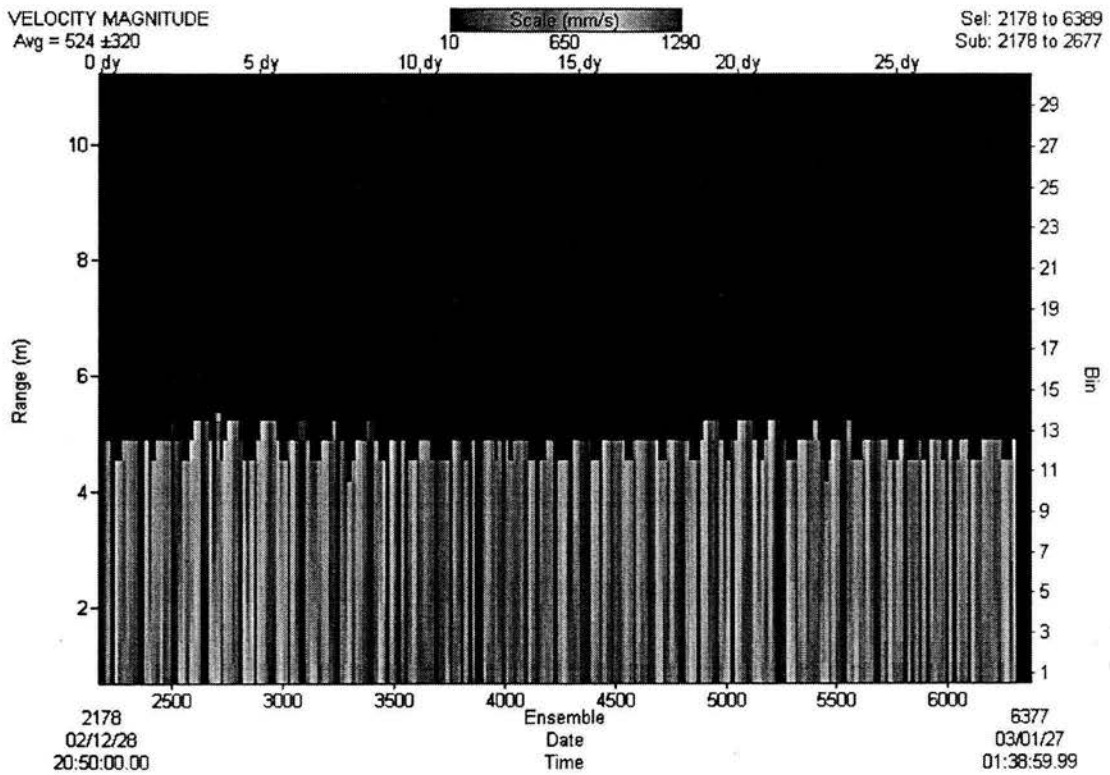
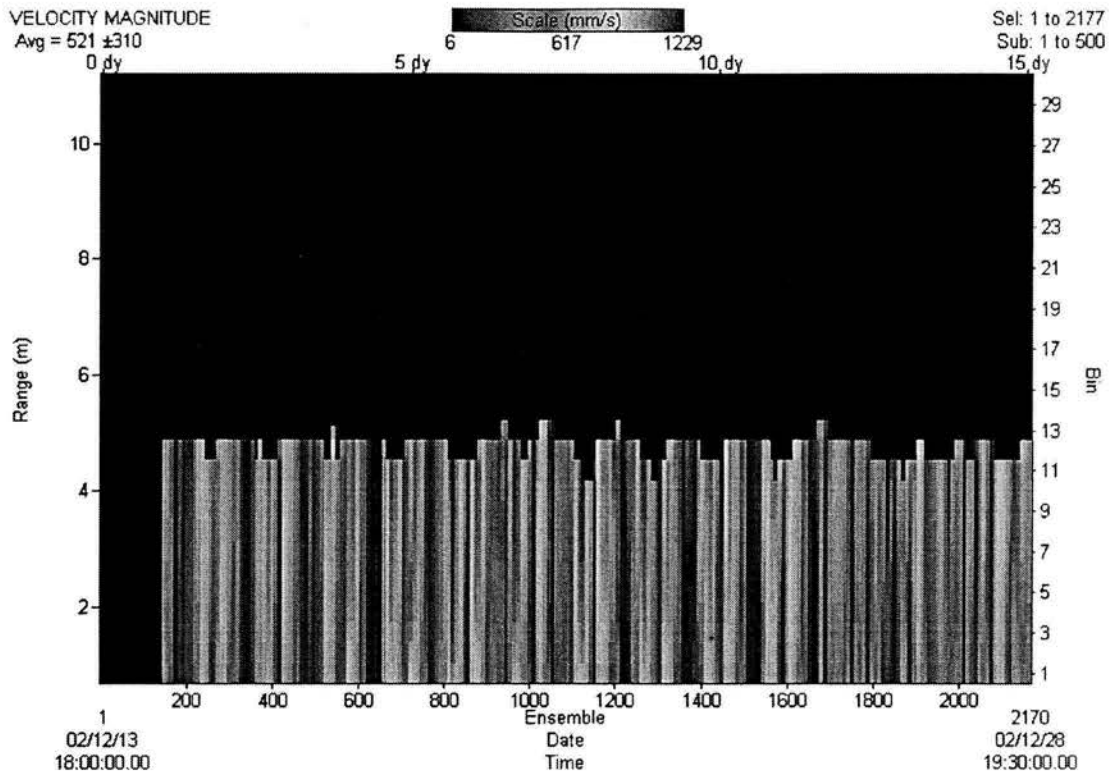


Figura 5. 13. Series de tiempo de la magnitud de la segunda campaña

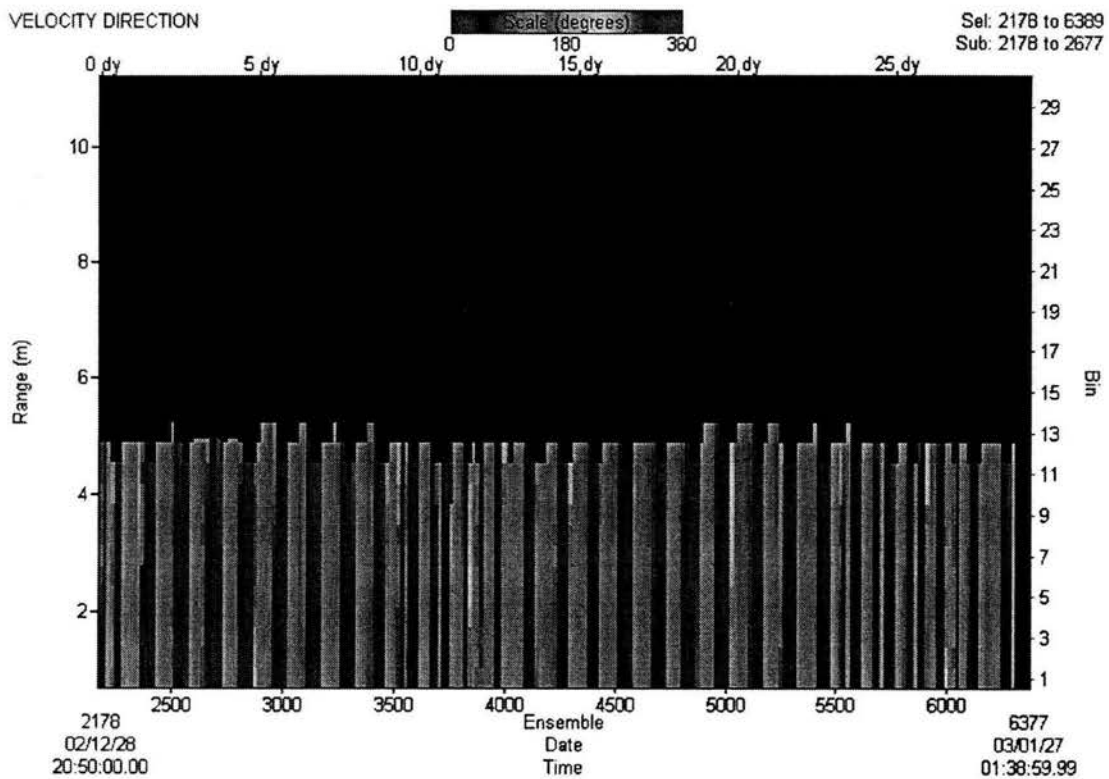
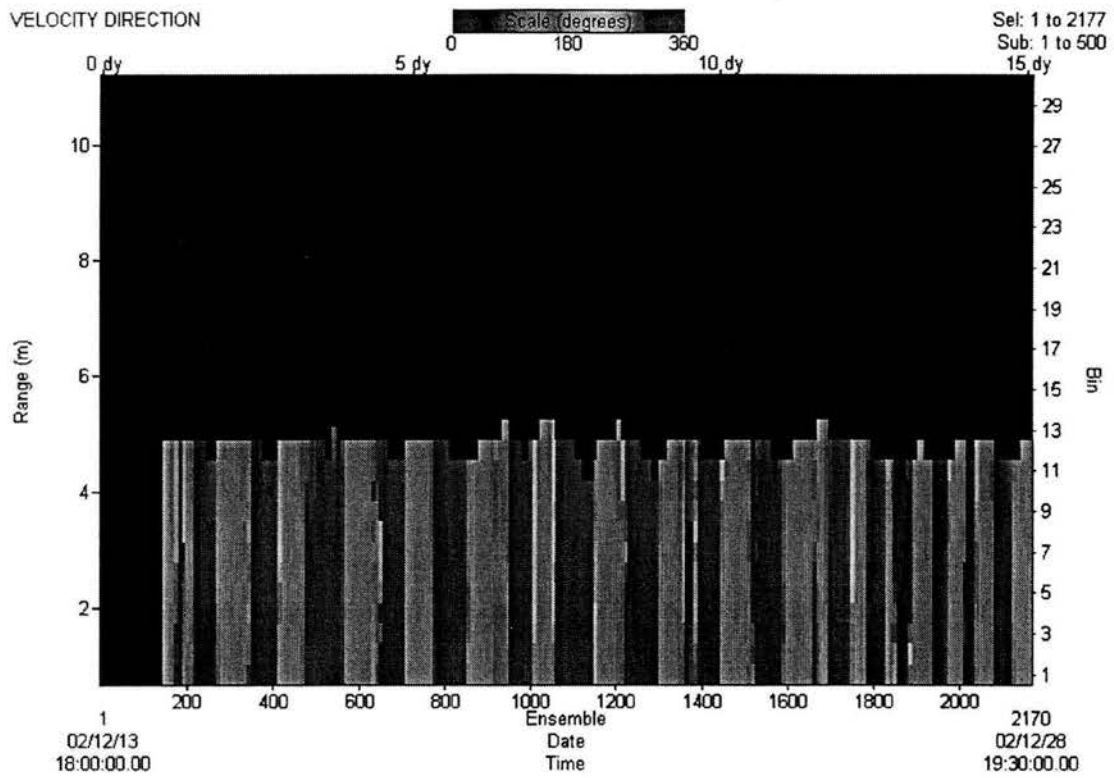


Figura 5. 14. Series de tiempo de la dirección de la velocidad de la segunda campaña

5.4.2.2. Corrección de la desviación magnética

Por medio del mismo programa utilizado para la primera campaña, se realizó la corrección de la desviación magnética de las corrientes. Lo que hay que tomar en cuenta para ambas campañas es que la desviación magnética varía en el tiempo, por tanto los valores son diferentes según la fecha en la que se hayan realizado las mediciones.

En la Figura 5. 15 y Figura 5. 16 se muestran las intensidades de las velocidades Este y Norte de la segunda campaña de campo donde ya fue incluida la corrección de la desviación magnética y la corrección del nivel de superficie libre. Por otro lado, debido a que en la segunda campaña se realizaron más mediciones durante ciclos de marea completos, en las figuras de las velocidades se pueden apreciar los ciclos en los que la marea es viva y es muerta. Mostrando así que cuando la marea es viva, presentan las mayores intensidades en las velocidades y cuando es marea muerta esas intensidades son bajas.

En la Figura 5. 17 se muestran las velocidades Este (eje x) y las velocidades Norte (eje y) para diferentes capas. En estas gráficas se aprecian que generalmente las velocidades Este y Norte existe un ángulo entre ellos de 180° que perdura sin presentar cambios en su dirección en la mayoría de sus capas.

Haciendo una comparación entre las direcciones de ambas campañas, el cambio que se va presentando para el caso de la primera campaña (ver Figura 5. 10) conforme las capas se van acercando a la superficie fueron variando en su dirección debido a la presencia de una marea de tormenta que sobreelevo el nivel de la superficie libre. En cambio, para el caso de la segunda campaña (ver Figura 5. 17) donde se presentan una gran cantidad de nortes en la zona de la laguna, se puede apreciar que el cambios en las direcciones del flujo y reflujos en la columna de agua no son tan amplios.

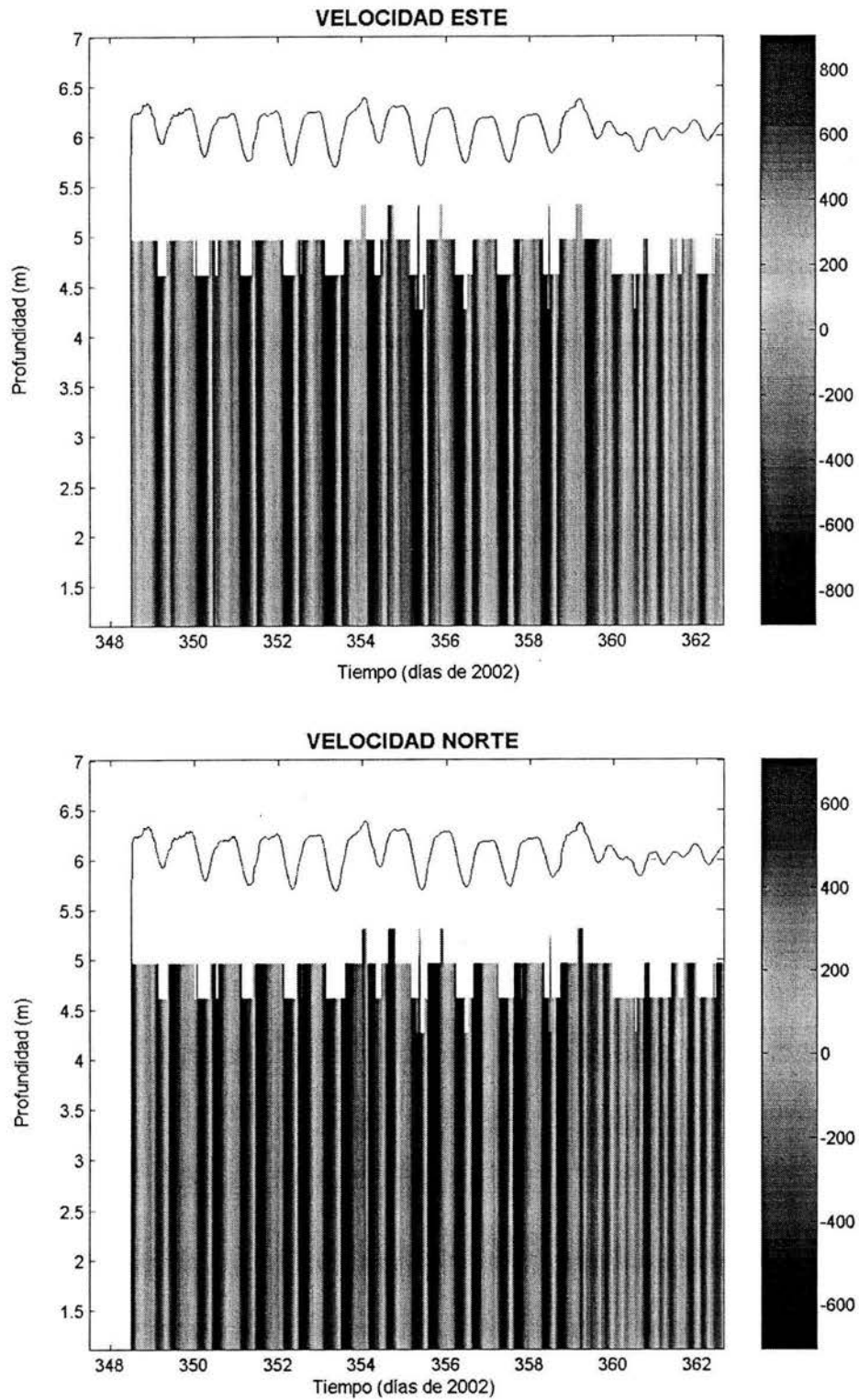


Figura 5. 15. Corrección de la serie de tiempo de la velocidad Este y Norte de la segunda campaña (primera parte)

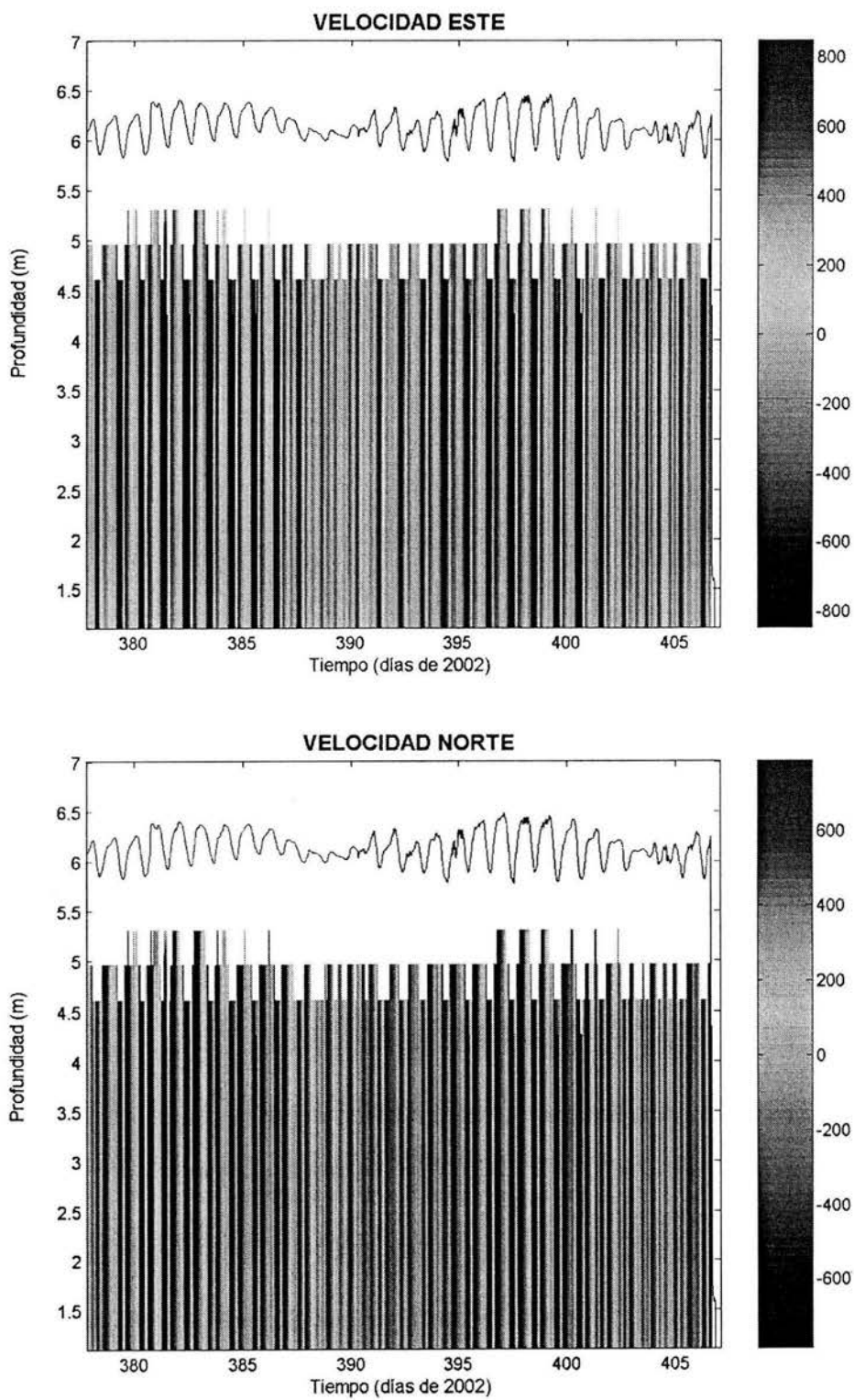


Figura 5. 16. Corrección de la serie de tiempo de la velocidad Este y Norte de la segunda campaña (segunda parte)

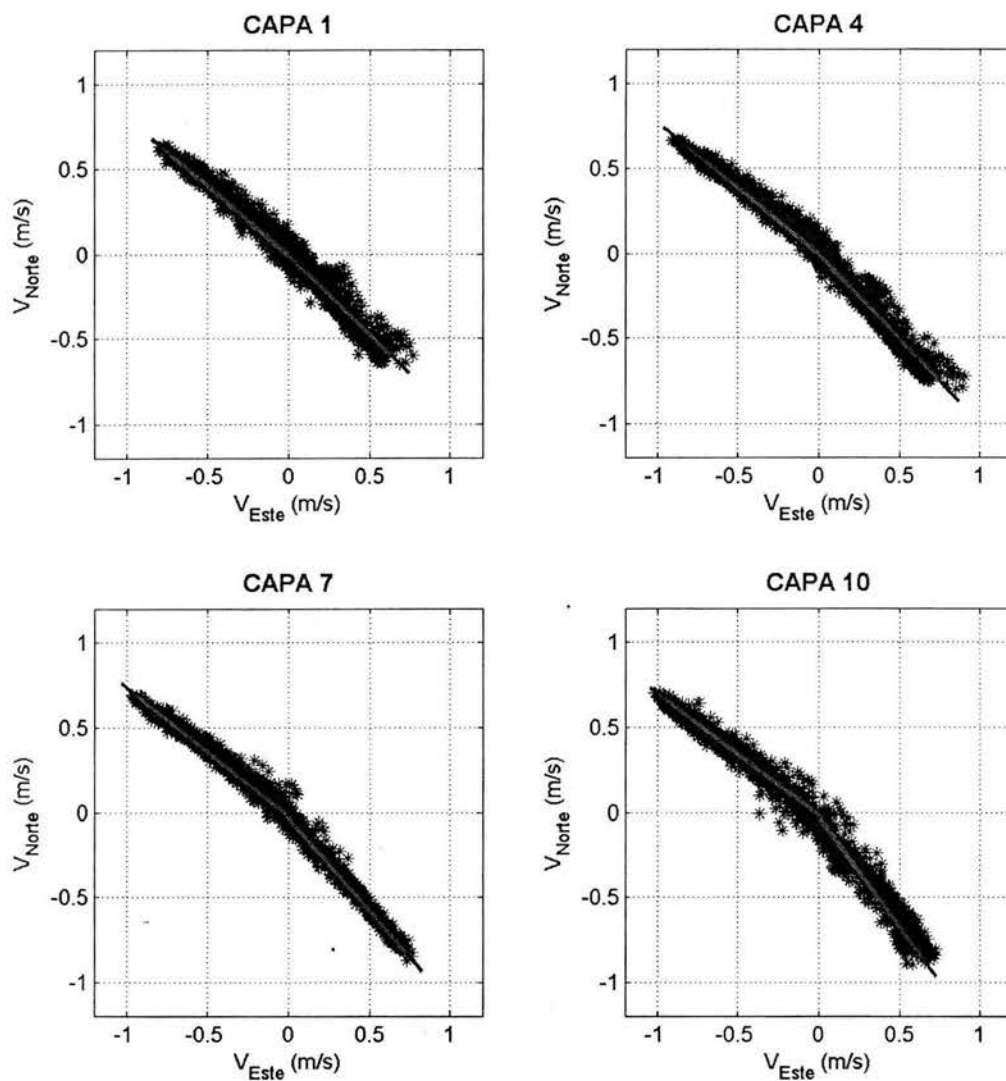


Figura 5. 17. Velocidad Este y Norte en las capas 1, 4, 7 y 10 de la segunda campaña

5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de las mediciones que se presentan en este apartado son las recolectadas durante las dos campañas de campo realizadas en la boca de Puerto Real de la Laguna de Términos entre los meses de septiembre y octubre (primera campaña) y los meses de diciembre y enero (segunda campaña). El análisis de resultados que a continuación se

describe son los datos de corriente y de oleaje que se obtuvieron del equipo de medición una vez que se aplicó la metodología del análisis de datos descrita en el apartado anterior.

5.5.1. Primera y segunda campaña de campo

Para poder determinar la influencia que se genera cuando el oleaje y la corriente se encuentran en una misma dirección o en dirección contraria, han sido seleccionados previamente los datos que se utilizaron para cada uno de estos análisis. Así pues, los datos que se muestran en la Figura 5. 18 son los datos de las mediciones del perfil de velocidades para estas dos condiciones para cada serie de tiempo de la primera campaña. Es decir, cada perfil representa la magnitud de las velocidades (mm/s) en cada una de las capas de toda la columna de agua para un tiempo dado.

Haciendo una comparación entre los dos casos que se presentan, se puede determinar que en la primera campaña, en la boca de Puerto Real parece haber una mayor incidencia de oleaje y corriente viajando en misma dirección. En otras palabras, y dado tanto la posición de la trayectoria del Isidoro con respecto a la boca de Puerto Real (al Noreste de Laguna de Términos) como la diferencia entre direcciones de flujo y reflujos (ver Figura 5. 10), el ángulo del flujo coincide más frecuentemente con el ángulo de incidencia del oleaje, y el ángulo de la corriente de reflujos coincide un menor número de veces con el ángulo opuesto de propagación del oleaje.

Por otro lado, en la Figura 5. 19 de manera similar se observan los datos de las mediciones de los perfiles de velocidad para cada serie de tiempo con los dos tipos de condiciones para la segunda campaña de campo. A diferencia de los perfiles de velocidad de la primera campaña en donde se obtuvieron más casos cuando el oleaje y la corriente se propagan en una misma dirección, para la segunda campaña, la cantidad de perfiles de velocidad que se obtuvieron fueron mucho más para el caso de oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta que en una misma dirección. Esto se debe a que el ángulo de la corriente de reflujos coincide más frecuentemente con el ángulo de incidencia del oleaje, y el ángulo entre el flujo de la corriente y el ángulo de incidencia del oleaje coincide en pocas ocasiones.

Además, se observa en ambas figuras que para los perfiles de los casos en misma dirección, éstos tienden a tener magnitudes de corrientes mayores que cuando se presentan los perfiles de dirección opuesta.

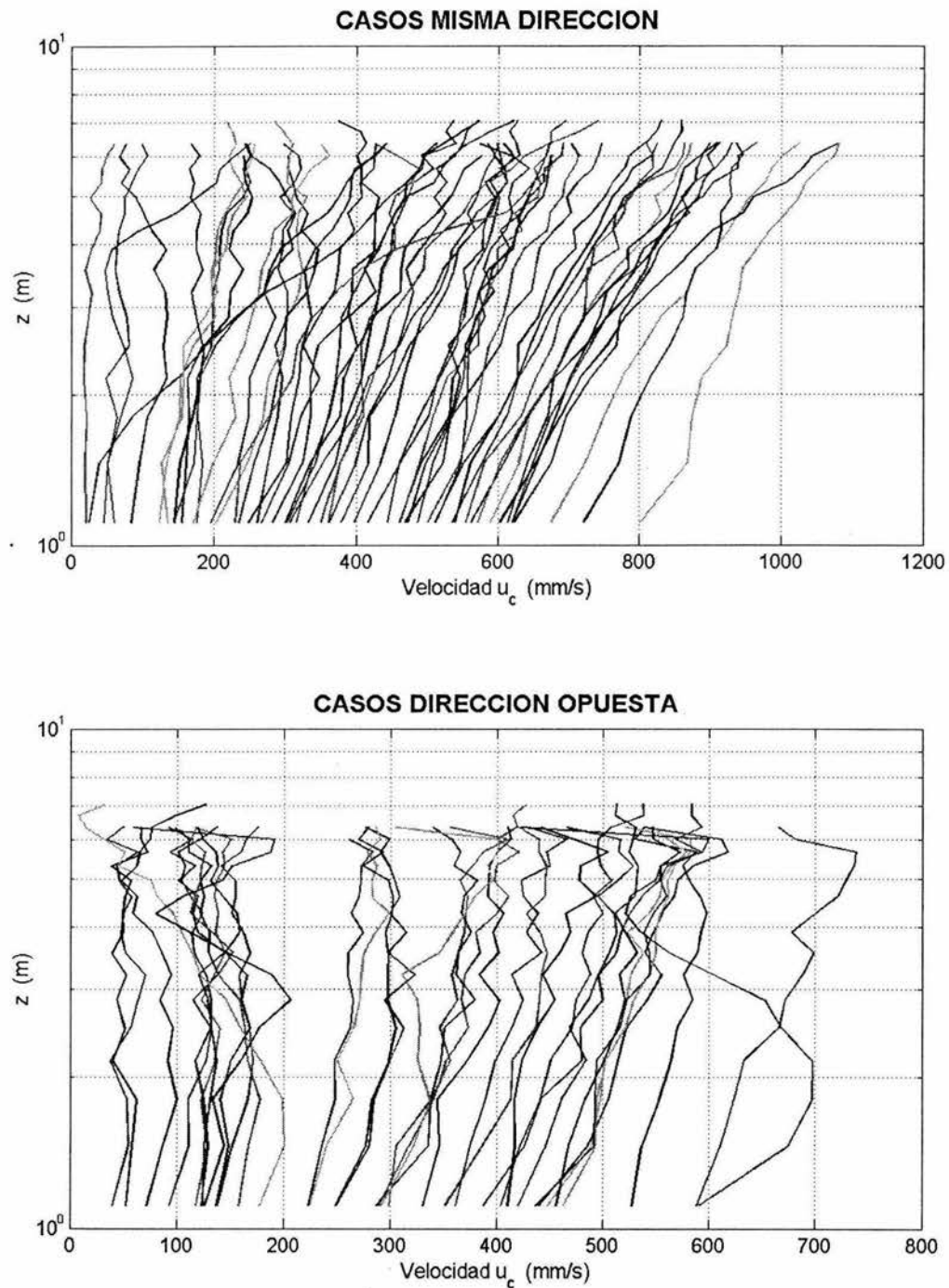


Figura 5. 18. Perfiles de velocidad de la primera campaña: (a) Oleaje y corriente propagándose en la misma dirección y (b) Oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta

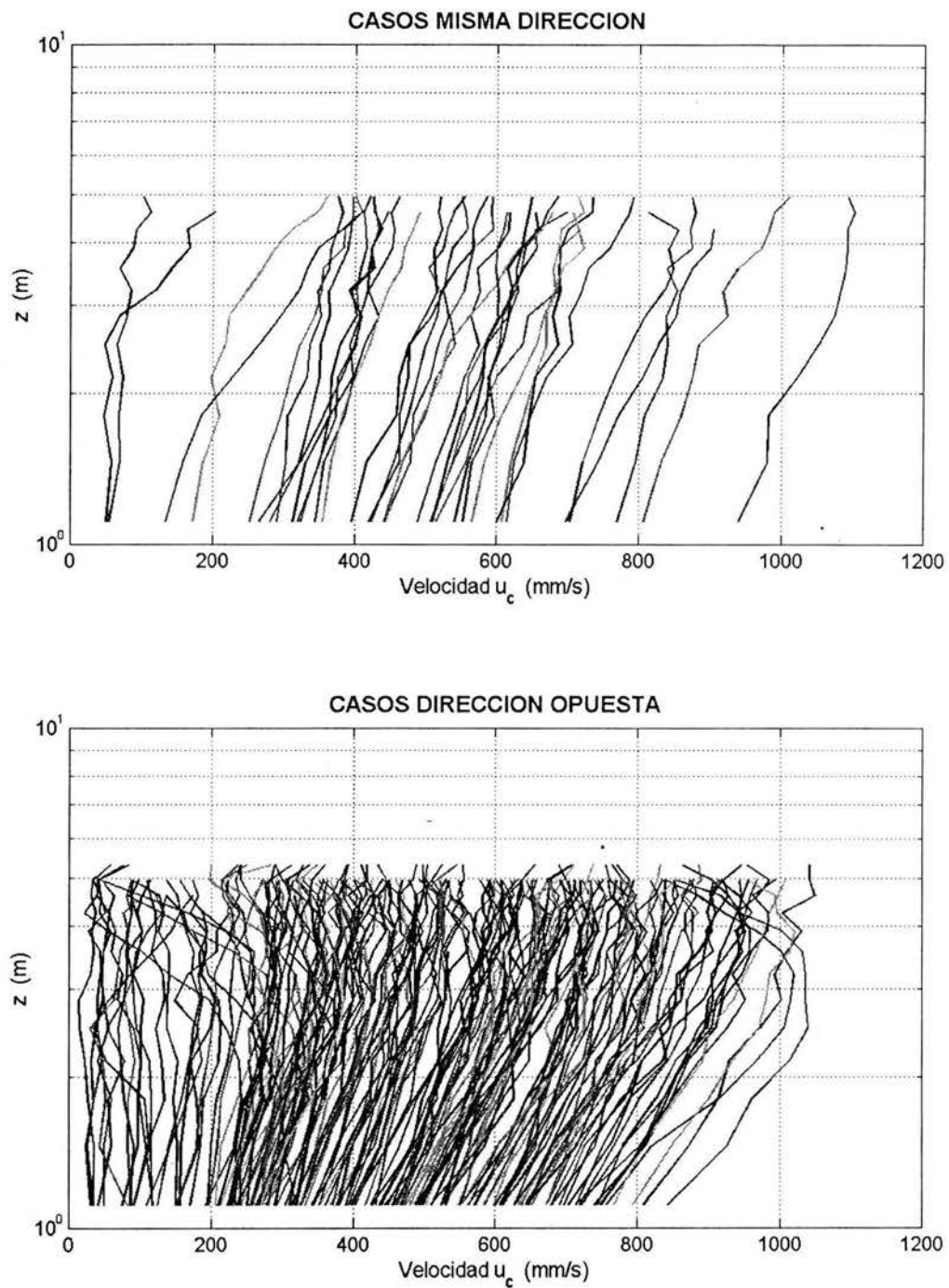


Figura 5. 19. Perfiles de velocidad de la segunda campaña: (a) Oleaje y corriente propagándose en la misma dirección y (b) Oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta

En la Figura 5. 20 se muestra una comparación entre la velocidad al cortante (u^*) según su variación con la profundidad en las dos direcciones que aplica la metodología (misma dirección y dirección opuesta de oleaje-corriente). Las dos gráficas superiores de dicha figura se generaron obteniendo valores de la velocidad al cortante (de acuerdo al ajuste de los perfiles correspondientes), variando el número de capas consideradas para la regresión ($\partial u^*/\partial$ (capas), la cual es el valor de la pendiente de cada línea, ver gráfica inferior de la Figura 5. 20). Lo que se puede observar es que, para el caso de oleaje y corriente viajando en la misma dirección, la velocidad al cortante tiene tendencia a aumentar conforme más capas se consideren. Lo opuesto sucede para el caso de "dirección opuesta", al disminuir la velocidad al cortante conforme se consideran más capas de la columna de agua. Lo anterior confirma los mecanismos de aceleración/desaceleración expuestos en el apartado 3.4.2 en la Figura 3. 4. Por otro lado, cuando el oleaje y la corriente se propagan en la misma dirección la velocidad al cortante tiende a ser mayor (56.0 mm/s) que la velocidad al cortante que se presenta en el caso de "dirección opuesta" (49.00 mm/s). Por lo tanto, se puede inferir que cuando la velocidad al cortante (proporcional a la raíz cuadrada del esfuerzo cortante de fondo) es mayor, en este caso específico cuando el oleaje y la corriente se propagan en la misma dirección, la capacidad de transporte de sedimento es mayor que cuando se presenta dirección opuesta.

De la misma forma, para el caso de la segunda campaña también se observa que mientras más capas se consideren para la regresión, la velocidad al cortante aumenta (42.38 mm/s) cuando el oleaje y la corriente se encuentran más frecuentemente en misma dirección (ver Figura 5. 21). Caso contrario, cuando el oleaje y la corriente se propagan en dirección opuesta, la velocidad al cortante disminuye (33.48 mm/s).

Lo mismo se puede establecer al observar la comparación de la rugosidad en la capa límite (z_0) como se muestran en las Figura 5. 22 y Figura 5. 23. Es decir, aumento de rugosidad conforme se consideran más capas en las regresiones para los casos de "misma dirección", así como mayores rugosidades en general para esos mismos casos, en oposición a los casos de "dirección opuesta". Esto muestra que la rugosidad experimentada por la corriente en el fondo es mayor cuando se presenta misma dirección (59.98 mm/s) del oleaje y corrientes que cuando se presenta en dirección opuesta (44.26 mm/s).

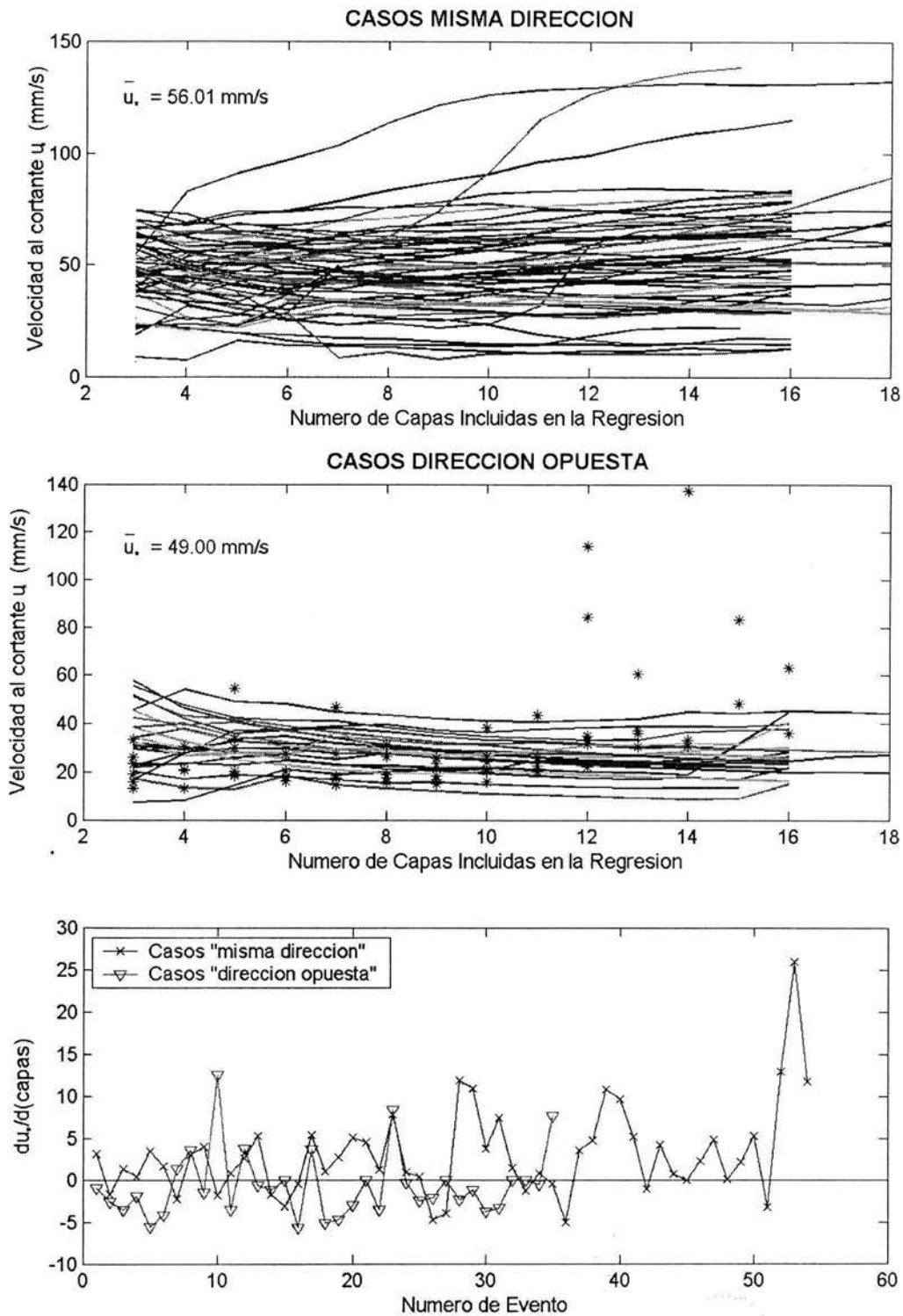


Figura 5. 20. Comparación de la velocidad al cortante en misma dirección y en dirección opuesta y la cantidad de eventos que se presentaron en la primera campaña

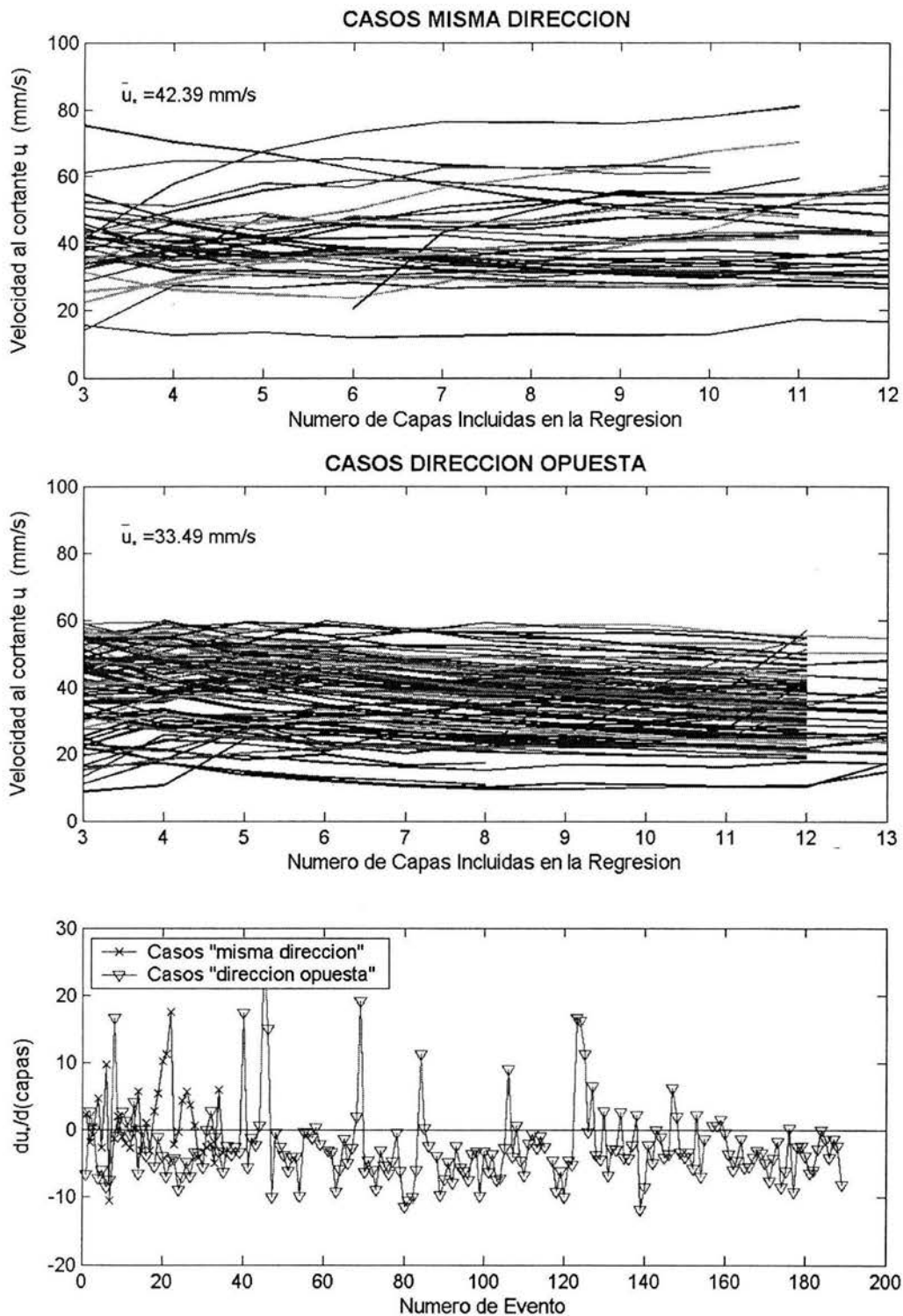


Figura 5. 21. Comparación de la velocidad al cortante en misma dirección y en dirección opuesta y la cantidad de eventos que se presentaron en la segunda campaña

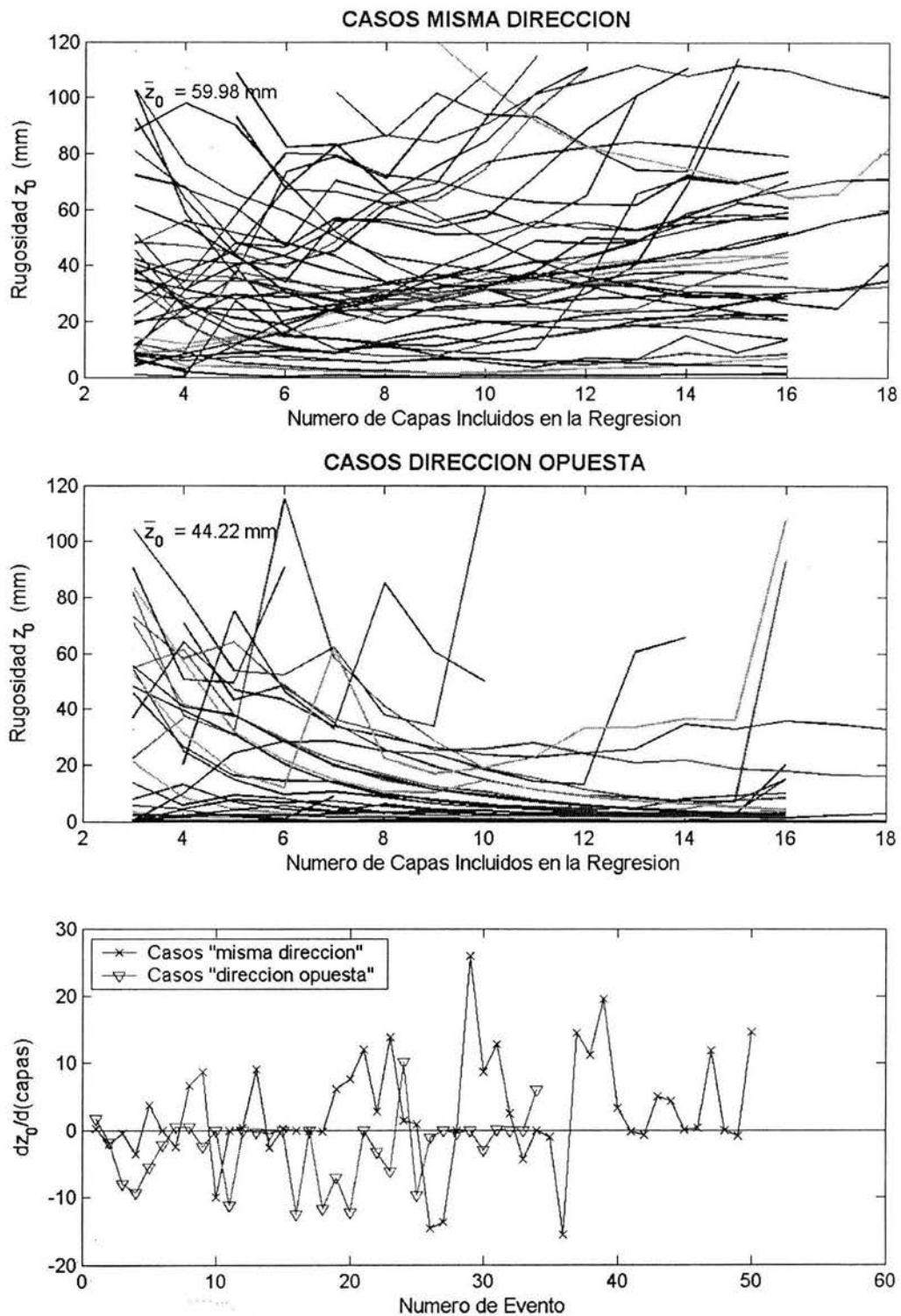


Figura 5. 22. Comparación de la rugosidad en la capa límite en misma dirección y en dirección opuesta y la cantidad de eventos que se presentaron en la primera campaña

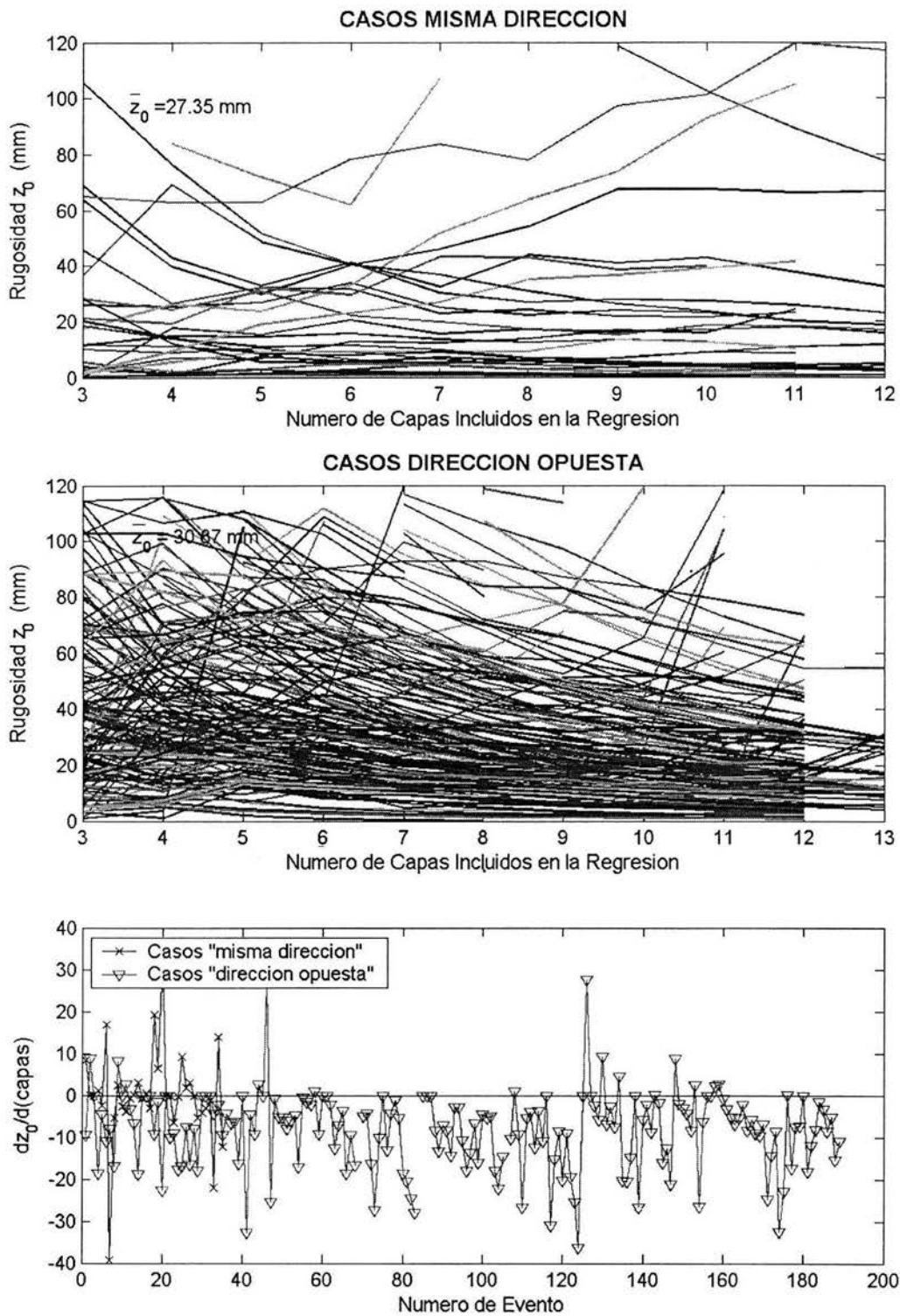


Figura 5. 23. Comparación de la rugosidad en la capa límite en misma dirección y en dirección opuesta y la cantidad de eventos que se presentaron en la segunda campaña

En la Figura 5. 24 se muestran, para oleaje y corriente propagándose en la misma dirección, los resultados de los valores totales de la velocidad al cortante (u_*), la rugosidad en la capa límite (z_0), el ángulo que se forma entre la dirección del oleaje (θ_w) y la dirección de la corriente (θ_c), el nivel de superficie libre (η), la altura de ola significativa (H_s) y la velocidad de la corriente (u_c) que se obtuvieron a partir de la metodología del análisis de datos y criterios descritos anteriormente. Cabe mencionar que aunque las mediciones duraron alrededor de 34 días, los datos que se obtuvieron para el análisis comprendieron alrededor de 20 días, ya que los demás datos no cumplieron con el criterio de selección para el análisis. Los mismos datos correspondientes a oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta se muestran en la Figura 5. 25.

Como se observa en las gráficas de velocidad al cortante (u_*) y de rugosidad en la capa límite (z_0) para ambos casos, dichos parámetros aumentan considerablemente debido a la presencia del huracán Isidoro. Esto se debe al oleaje de mayor tamaño que se presentó durante el paso del huracán, debido tanto a la presencia de fuertes vientos como a la sobrelevación de tormenta que posibilitó la entrada de mayor oleaje a la boca. Sin embargo, asumiendo que las características físicas del fondo, conformado por limos, arcillas, conchuelas y materia orgánica (todo medianamente consolidado en "terrones" de diversos tamaños), no se modificaron significativamente durante el paso del huracán, el aumento de la rugosidad resulta ser sólo aparente. Es decir, el aumento de rugosidad se debe a la presencia de oleaje mayor, y el consecuente aumento de la turbulencia cerca del fondo, el cual hace que el perfil de corrientes experimente una "rugosidad aparente", z_{0a} , de mayor magnitud que la rugosidad real del fondo.

En cuanto a la gráfica del nivel de superficie libre, dado que no se contó con una cota vertical exacta del sensor de presión del equipo, se tomó en cuenta como el nivel de referencia al promedio de las profundidades medidas antes del paso del huracán, lo cual resulta en una estimación aproximada del nivel del mar. Sin embargo es apreciable la sobrelevación de tormenta, que fue de más de un metro.

Para la gráfica de la velocidad de la corriente, se aprecia que esta se vio afectada disminuyendo drásticamente su velocidad mientras se empezaban a sentir los efectos del huracán. Esto se debe a que el nivel de la Laguna de Términos fue aumentando conforme el huracán fue aumentando de intensidad, de forma que las velocidades se vieron detenidas durante algunos días mientras la sobrelevación de tormenta "llenaba" la laguna, incluidas las zonas altas fuertemente friccionantes, hasta el momento en que la fuerza de

reflujo, incluido el desfogue de los ríos, fue suficiente para que el sistema empezara a vaciarse.

De igual manera que para las gráficas de la primera campaña, en las Figura 5. 26 y Figura 5. 27 se muestran las dos condiciones de direcciones (misma dirección y dirección opuesta) para obtener la velocidad al cortante y la rugosidad en la capa límite durante la segunda campaña. En las que se puede observar que para oleaje y corrientes en misma dirección, dichos parámetros tienden a aumentar cuando se presentan marea muerta, una disminución en las corrientes y oleaje..

Otro aspecto importante que se puede comparar entre estas gráficas, es que las velocidades de las corrientes no presentan variaciones en sus direcciones cuando el oleaje y los corrientes se propagan en una misma dirección, no obstante, cuando el oleaje y la corriente se propagan en direcciones opuestas, se aprecia que las direcciones de las velocidades están sólo en función de la marea.

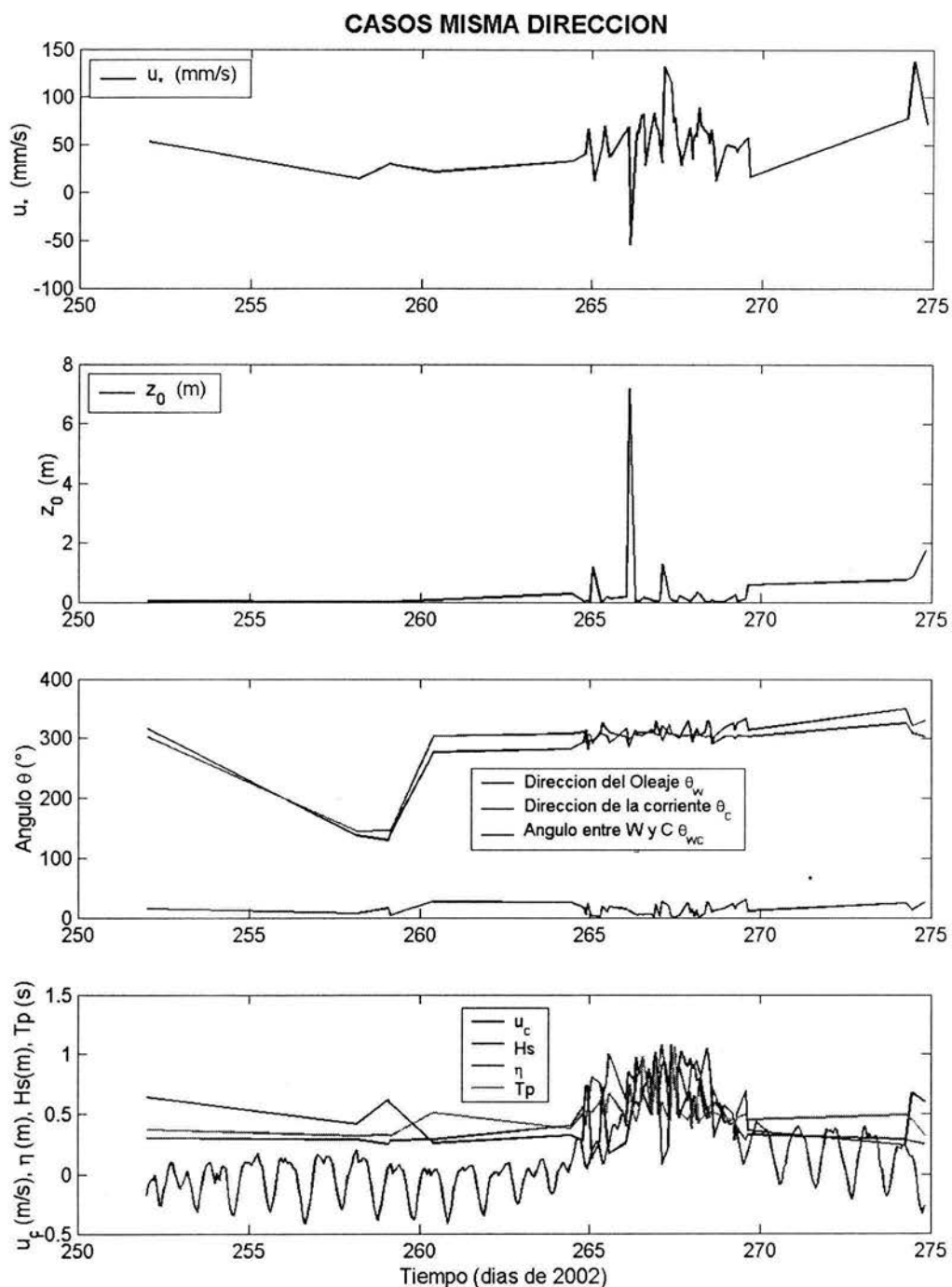


Figura 5. 24. Velocidad al cortante, rugosidad en la capa límite, ángulos de propagación del oleaje y la corriente, magnitud de la corriente, nivel de superficie libre, periodo pico y altura de ola significativa para el caso de oleaje y corriente propagándose en la misma dirección de la primera campaña

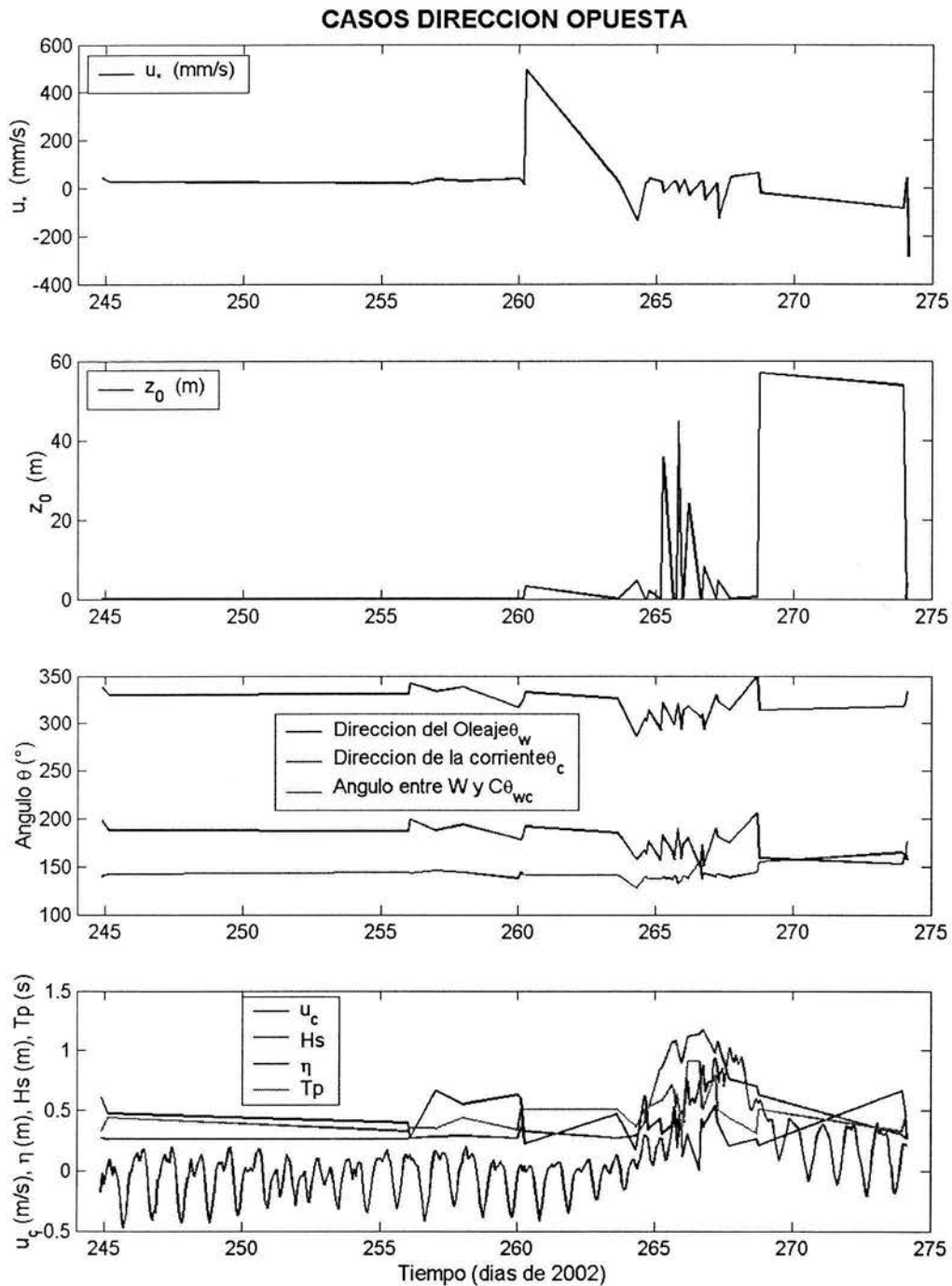


Figura 5. 25. Velocidad al cortante, rugosidad en la capa límite, ángulos de propagación del oleaje y la corriente, magnitud de la corriente, nivel de superficie libre, periodo pico y altura de ola significativa para el caso de oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta de la primera campaña

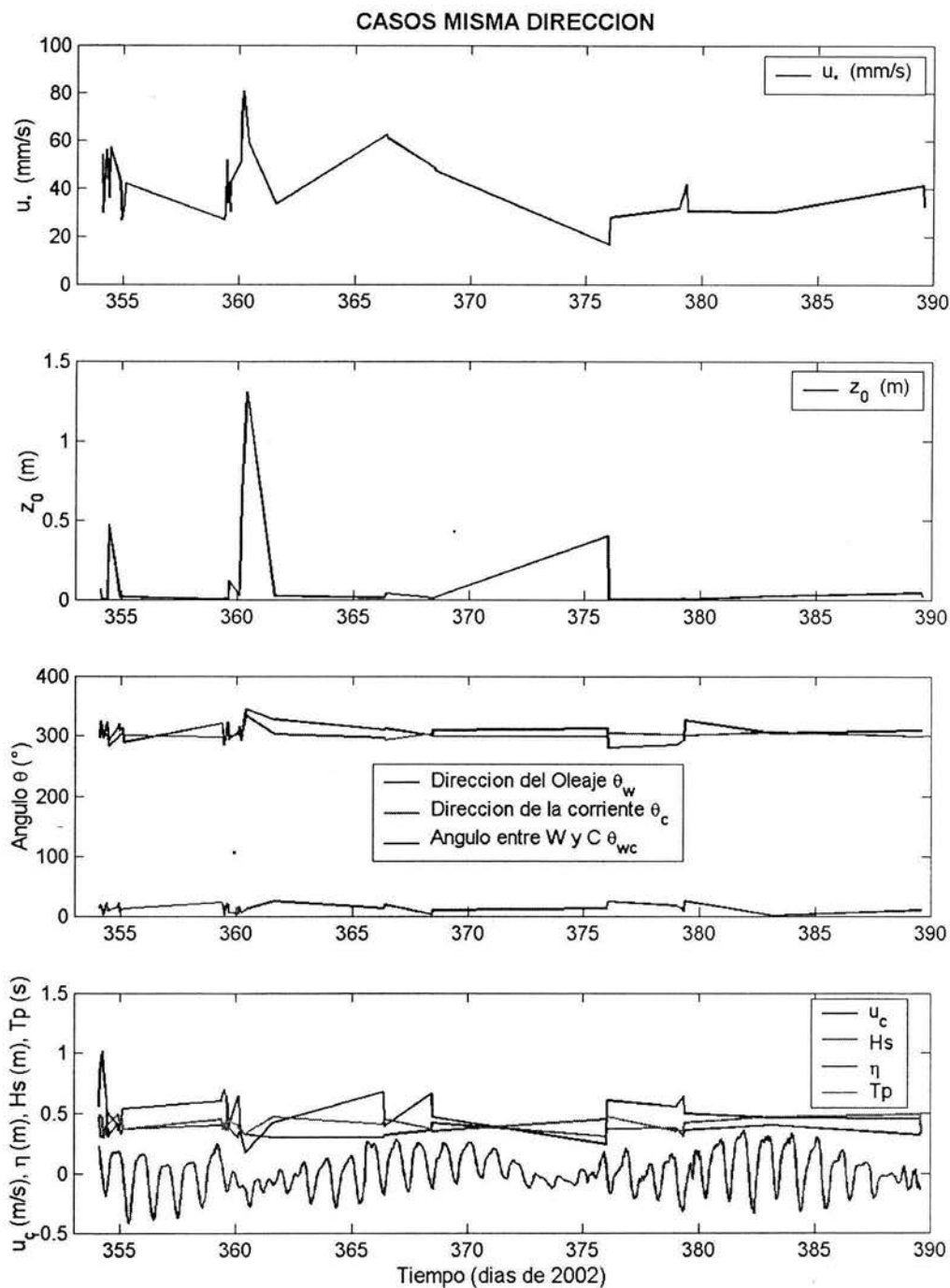


Figura 5. 26. Velocidad al cortante, rugosidad en la capa límite, ángulos de propagación del oleaje y la corriente, magnitud de la corriente, nivel de superficie libre, periodo pico y altura de ola significativa para el caso de oleaje y corriente propagándose en la misma dirección de la segunda campaña

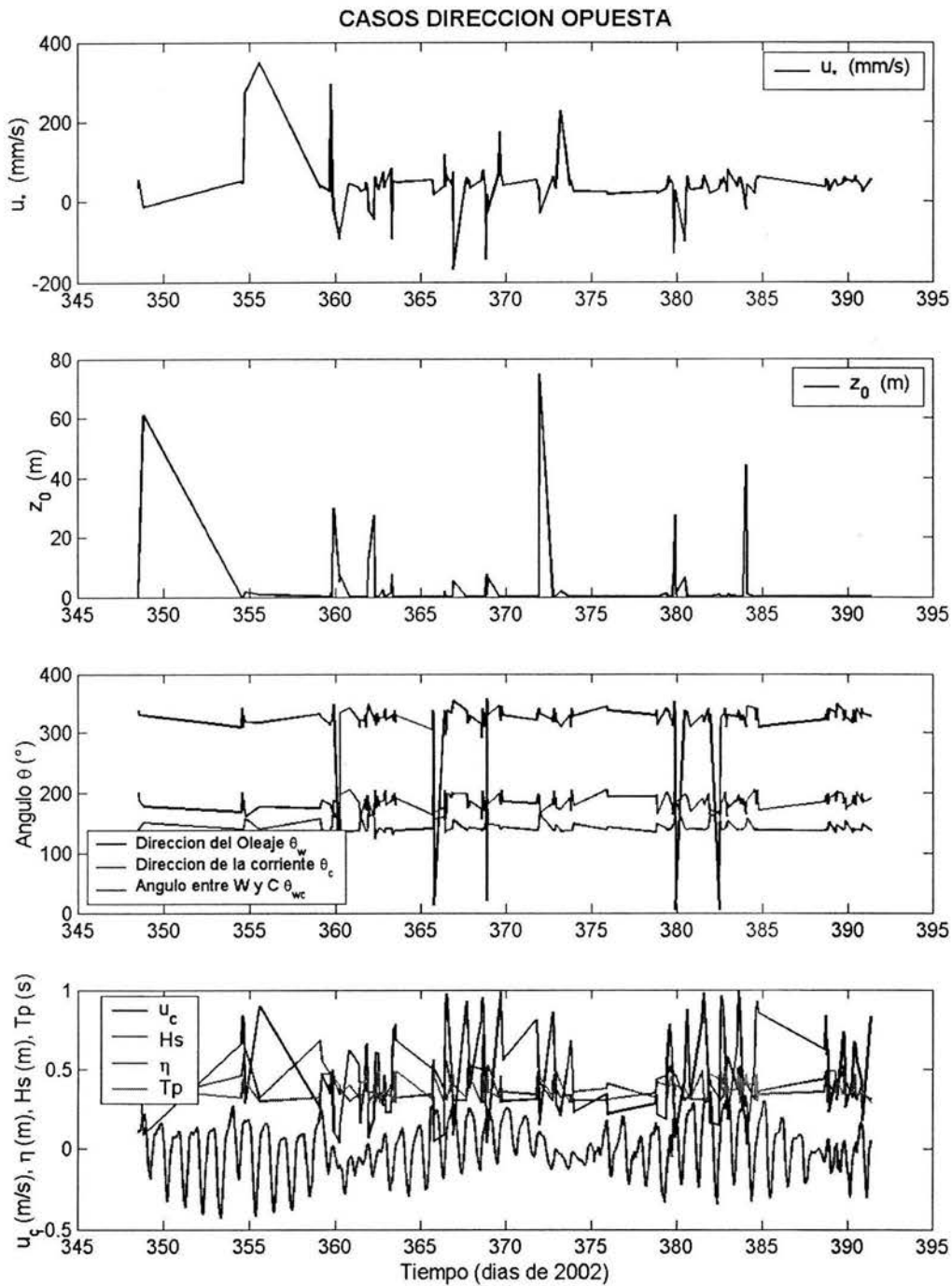


Figura 5. 27. Velocidad al cortante, rugosidad en la capa límite, ángulos de propagación del oleaje y la corriente, magnitud de la corriente, nivel de superficie libre, periodo pico y altura de ola significativa para el caso de oleaje y corriente propagándose en dirección opuesta de la segunda campaña

Finalmente, comparando los perfiles de velocidad que se muestran en las Figura 5. 28 y Figura 5. 29 para los dos casos analizados, se puede observar que en algunos casos (ej. eventos 28, 29, 39 y 40) cuando el oleaje y la corriente se propagan en una misma dirección los perfiles tienden a acelerarse. Esto se debe a que las corrientes generadas por el oleaje cerca de la superficie afectan a las corrientes del flujo aumentando su magnitud. Esto también se puede deducir analíticamente de la pendiente de los perfiles de velocidad, es decir, debido a que la velocidad al cortante es la inversa de la pendiente, cuando este aumenta, la pendiente disminuye.

Por otro lado, para el caso cuando el oleaje y la corriente se propagan en direcciones opuestas (ver Figura 5. 29), la corriente tiende a desacelerarse debido a que el esfuerzo cortante disminuye, es decir, la pendiente del perfil aumenta (ej. eventos 16,18,24 y 25). En general se puede ver que los perfiles de "misma dirección" tienen pendientes menores, es decir mayores velocidades al cortante y por ende mayores esfuerzos cortantes en el fondo y mayor capacidad de transportar sedimentos que los de "dirección opuesta". También se puede observar que cuando la velocidad orbital es mayor que la velocidad de la corriente ($u > u_c$), el perfil presenta una desviación del perfil logarítmico cerca de la superficie, esto se debe a la alta velocidad orbital de las olas que generan importantes corrientes inducidas, las cuales contraponen y rebasan la intensidad de las corrientes.

Estos efectos también se pueden apreciar en los perfiles de velocidad de la segunda campaña que se muestran en las Figura 5. 30, Figura 5. 31, Figura 5. 32 y Figura 5. 33. Las cuales describen los perfiles de velocidad en cuando el oleaje y la corriente se propagan en una misma dirección y cuando el oleaje y la corriente se propagan en dirección opuesta para cada uno de los eventos que cumplieron con los criterios de selección. Para el primer caso se observa que algunos perfiles (ej. eventos 6 y 8) están acelerados, por lo que para esos eventos la velocidad al cortante aumenta. Para el segundo caso se observa que para algunos eventos (ej. eventos 2, 9, 68 y 69) los perfiles se desaceleran debido a la presencia del oleaje en las capas cercanas de la superficie, y por tanto, las velocidades al cortante tienden a disminuir. Por otro lado, para ese mismo caso se pueden observar que para otros eventos (ej. eventos 16, 17 y 46) inclusive existe una mayor incidencia del oleaje que el reflujos de las corrientes.

Con estos perfiles de velocidad se ha podido verificar que la teoría del modelo de interacción oleaje – corriente en cuanto a la aceleración y desaceleración de los perfiles depende de la influencia que pueda tener el oleaje sobre las corrientes en flujo y reflujos y en la manera que la velocidad al cortante responde ante estos efectos.

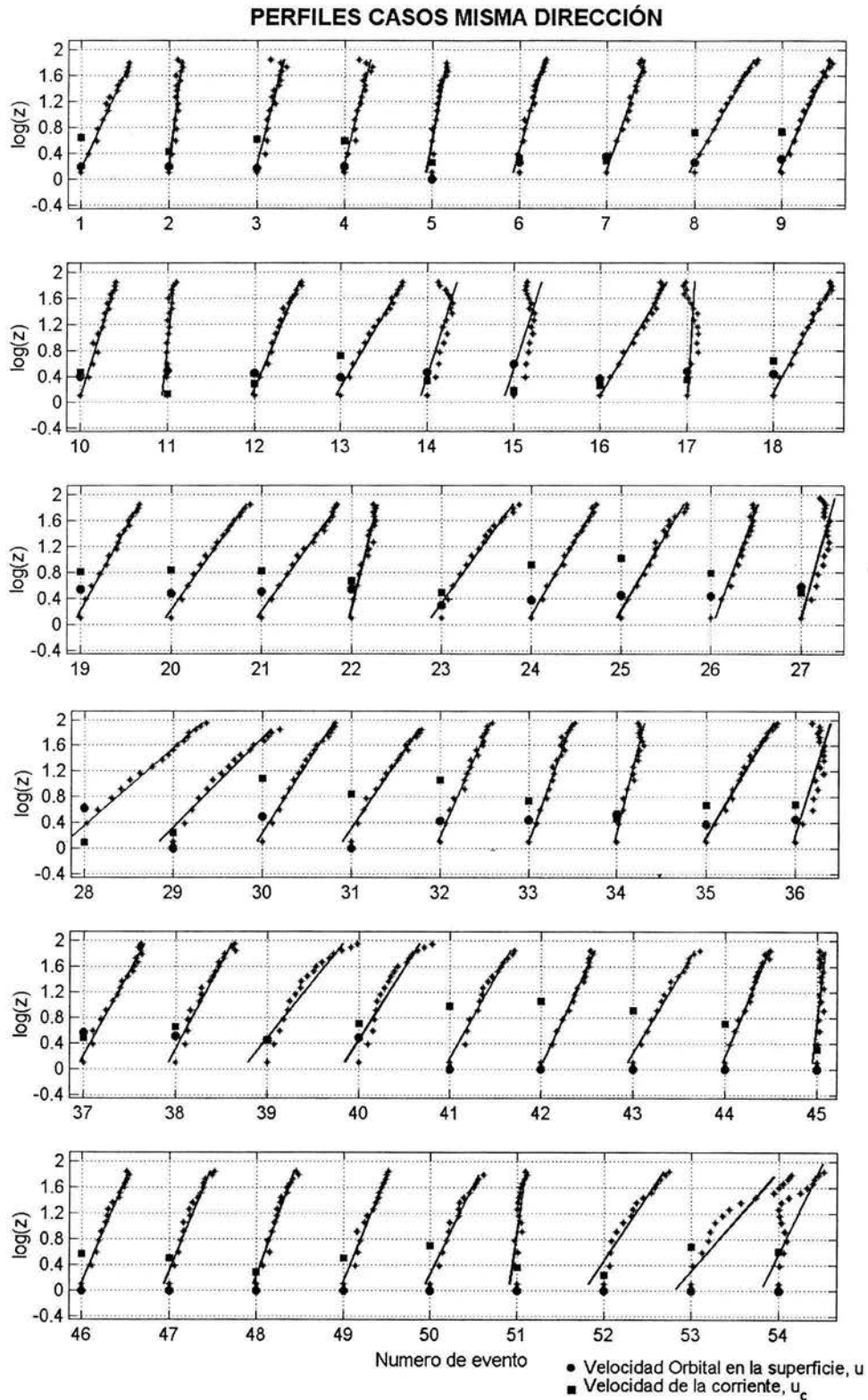


Figura 5. 28. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de misma dirección de la primera campaña

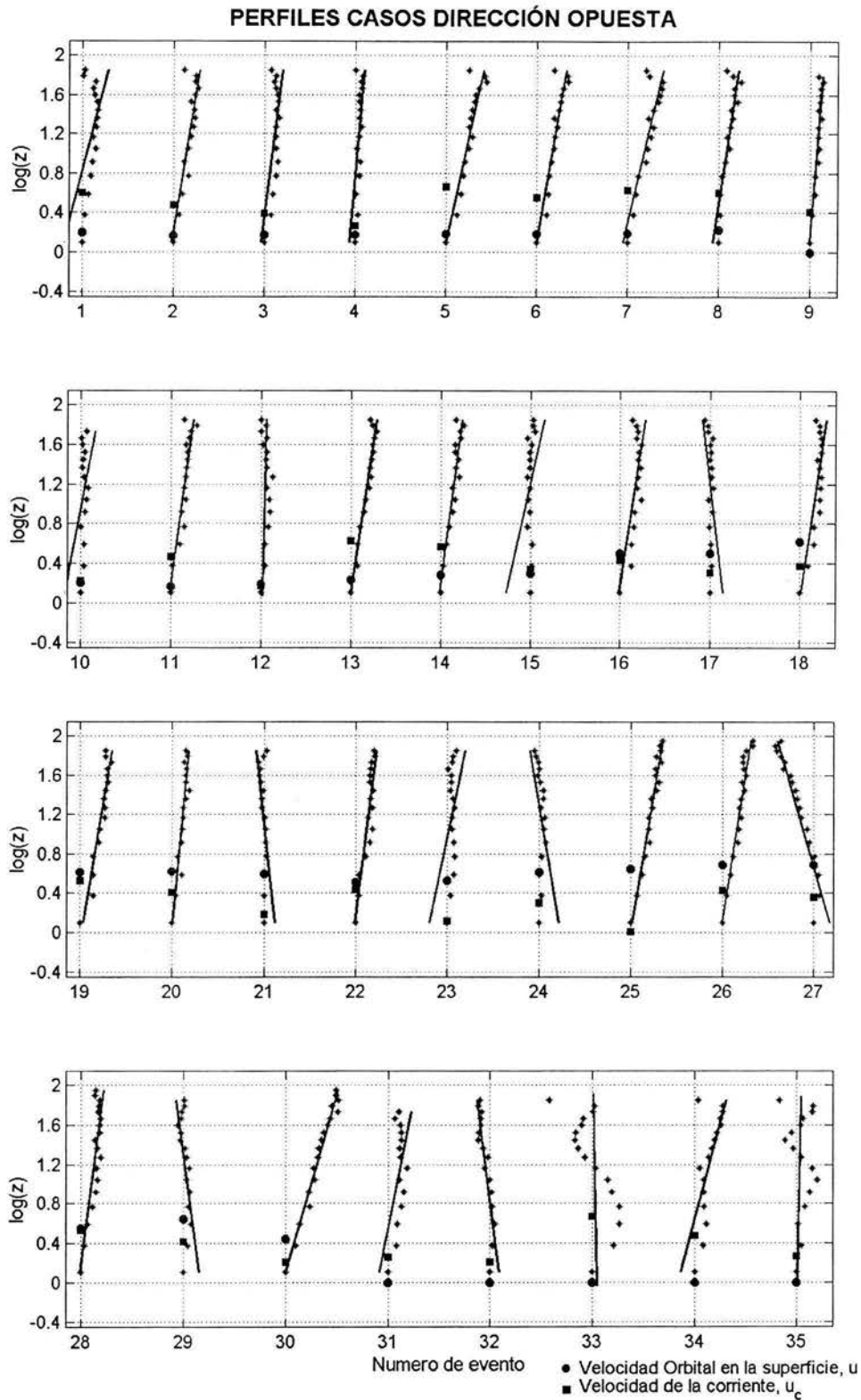


Figura 5. 29. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de dirección opuesta de la primera campaña

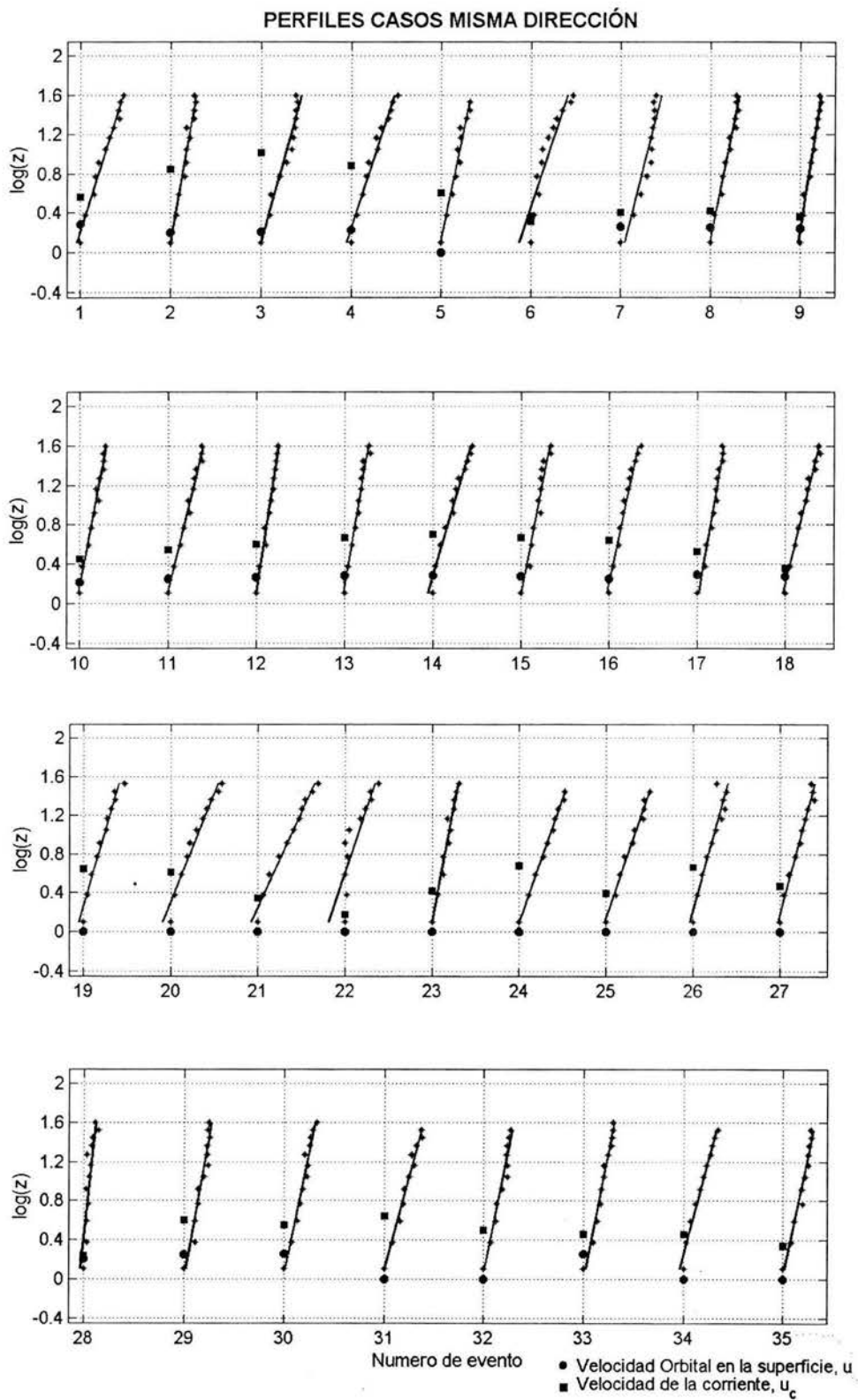


Figura 5. 30. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de misma dirección de la segunda campaña

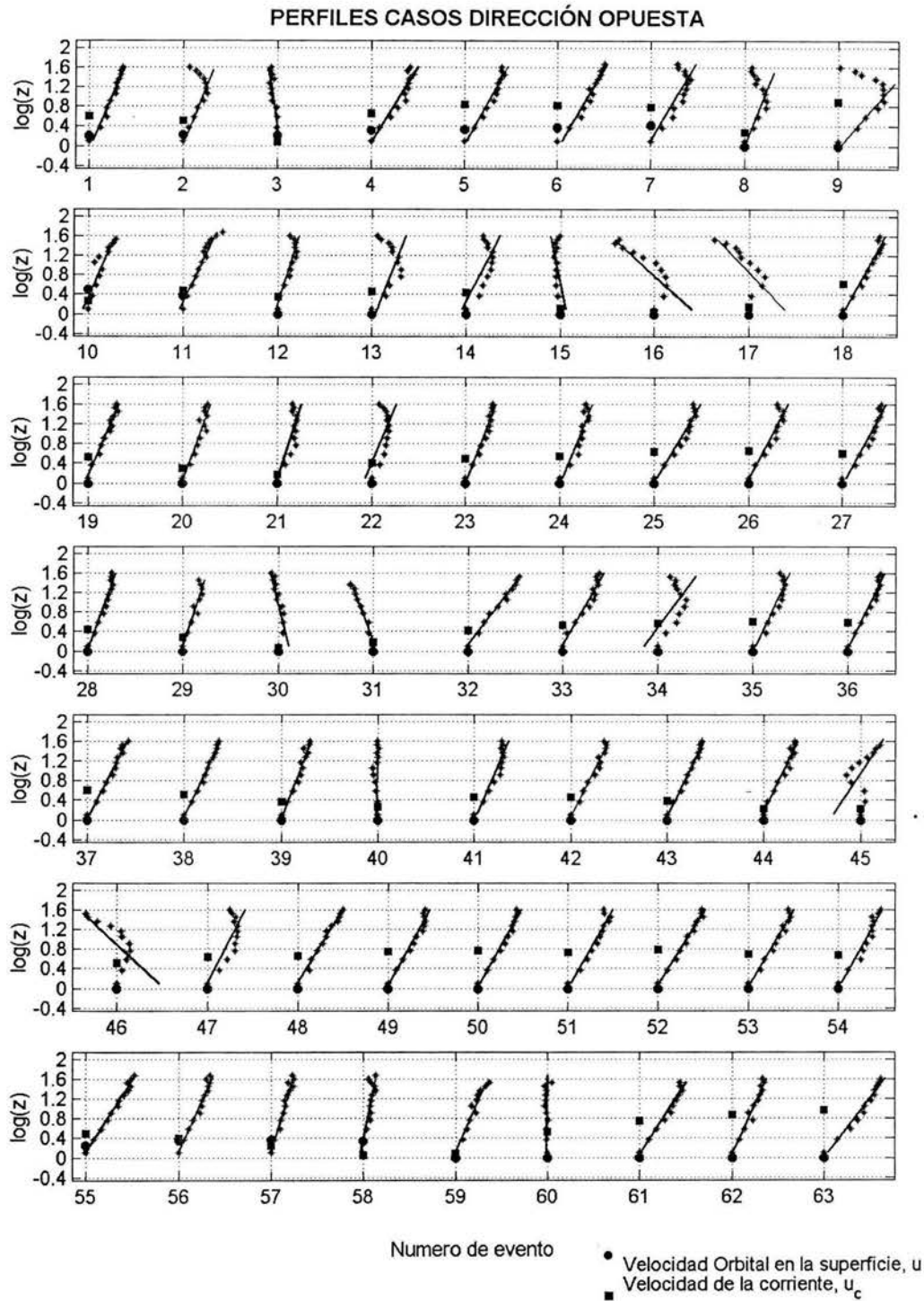


Figura 5. 31. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de dirección opuesta de la segunda campaña (primera parte)

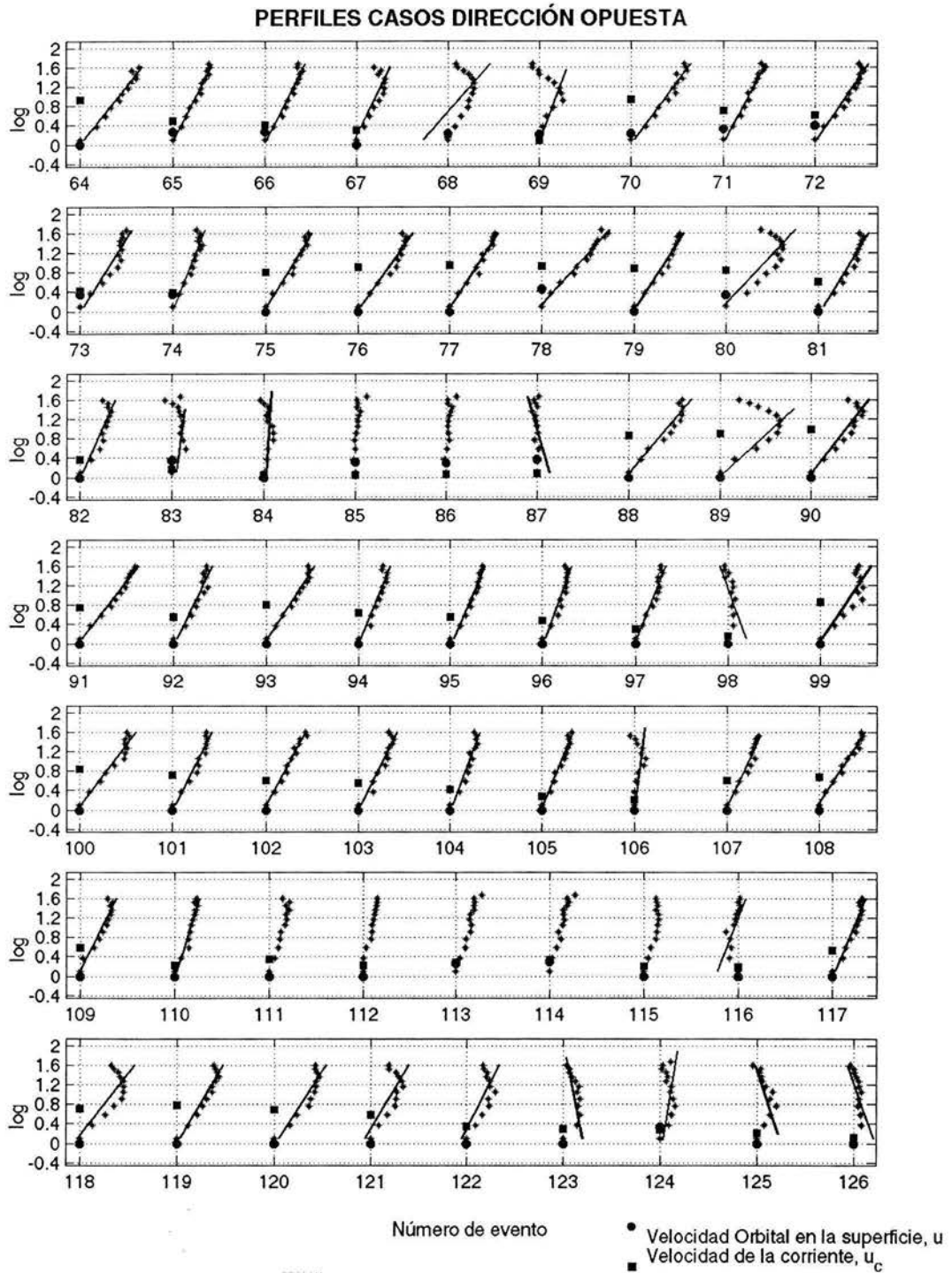


Figura 5. 32. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de dirección opuesta de la segunda campaña (segunda parte)

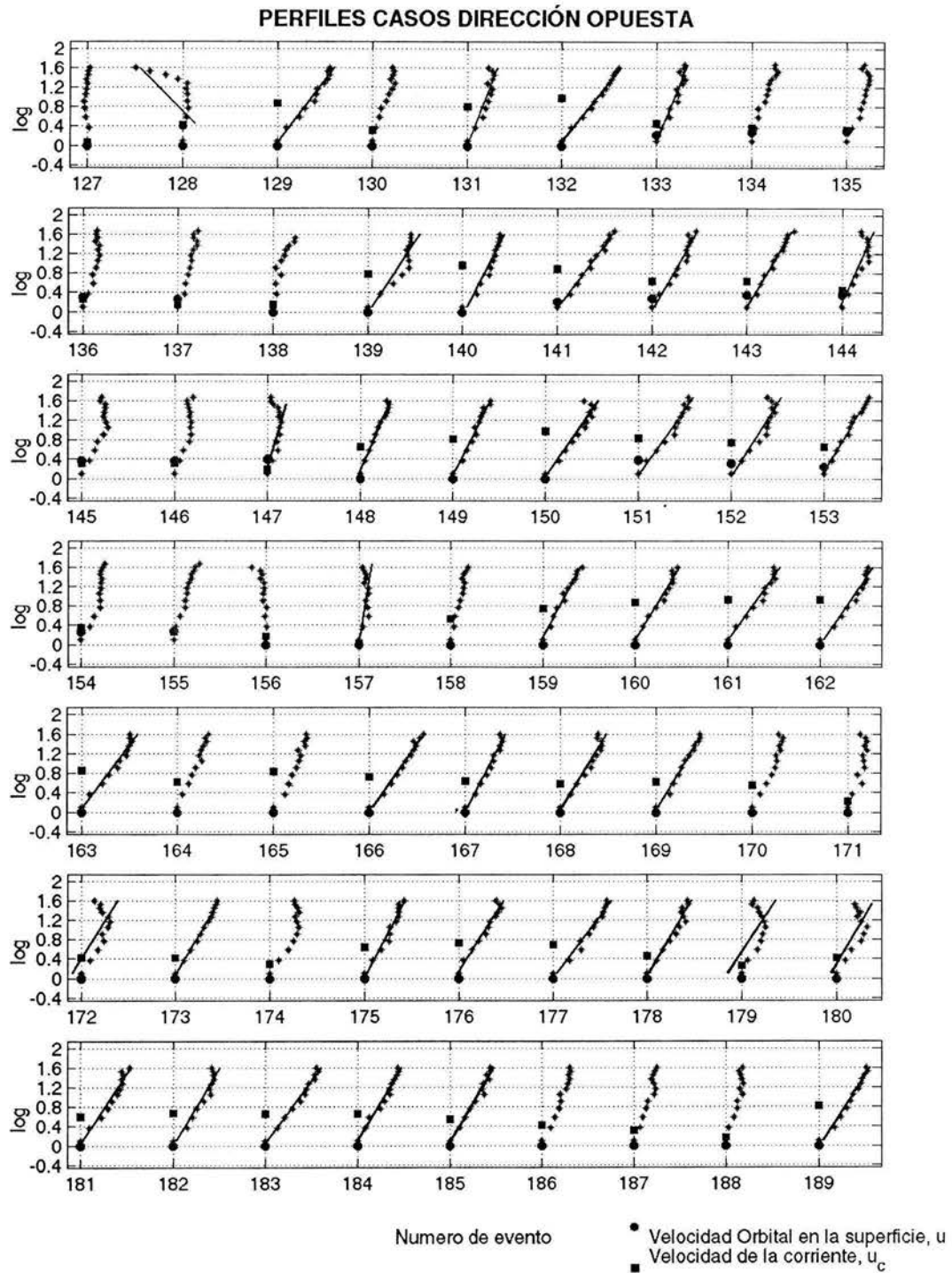


Figura 5. 33. Perfiles de velocidad, velocidad orbital y velocidad al cortante para el caso de dirección opuesta de la segunda campaña (tercera parte)

Falta página

N° 102

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- De los perfiles de velocidad que se obtuvieron de la primera campaña de campo durante el paso del huracán Isidores se determinó que en la boca de Puerto Real parece haber una mayor incidencia del oleaje y corriente viajando en una misma dirección. Por tanto, el ángulo de incidencia del oleaje coincide más frecuentemente con el ángulo de flujo que con el ángulo de reflujo.
- En la segunda campaña de campo, los perfiles de velocidad que más se presentaron fueron los de oleaje y corriente en direcciones opuestas. Es decir, que el ángulo de incidencia del oleaje y el reflujo coincidieron más frecuentemente que cuando se presenta flujo.
- Con base en los resultados obtenidos en la primera campaña, se pudo determinar que las dos condiciones del análisis entre la interacción del oleaje y la corriente se ven afectados por la presencia del huracán Isidore, donde e nivel de superficie libre registro una marea de tormenta de mas de un metro de altura.

- De ambas campañas, se establece que cuando el oleaje y la corriente se propagan en la misma dirección, la velocidad al cortante tiende a ser mayor que la velocidad al cortante que se presenta en el caso de oleaje y corriente en dirección opuesta. Por tanto cuando la velocidad al cortante es mayor, la capacidad de transporte de sedimentos es mayor y por lo que se puede determinar que la boca de Puerto Real es una boca importadora de sedimentos. Esto confirma un delta interior en la boca.
- También se pudo establecer cuantitativamente que la rugosidad experimentada por la corriente en el fondo es mayor cuando se presenta oleaje y corriente en la misma dirección que cuando se presenta en dirección opuesta
- Para el caso de la primera campaña, tanto la velocidad al cortante como la rugosidad en la capa límite para ambas condiciones aumentaron considerablemente debido a la presencia del huracán Isidore. Por tanto, el aumento de rugosidad se debió a la presencia de oleaje de mayor tamaño, y el consecuente aumento de la turbulencia cerca del fondo, el cual hace que el perfil de corrientes experimente una "rugosidad aparente", z_{0a} , de mayor magnitud que la rugosidad del fondo.
- Se ha determinado que cuando el oleaje y la corriente se propagan en la misma dirección, la influencia que tiene el oleaje sobre la corriente cerca de la superficie de los perfiles de velocidad, tiende a acelerarlos aumentando sus magnitudes y por tanto aumentando las velocidades al cortante. En caso contrario, cuando el oleaje y la corriente se propagan en dirección opuesta, los perfiles tienden a desacelerarse, disminuyendo su magnitud y su velocidad al cortante.
- Por otro lado, se observó que cuando la velocidad orbital es mayor que la velocidad de la corriente ($u > u_c$), el perfil presenta una desviación del perfil logarítmico cerca de la superficie, esto se debe a la alta velocidad orbital de las olas que generan importantes corrientes inducidas, las cuales contraponen y rebasan la intensidad de las corrientes.
- La principal limitante en este trabajo es que en la boca de Puerto Real se suponía que iba a haber más oleaje, sin embargo, el oleaje fue pequeño. A pesar de eso, este estudio logró identificar las diferencias claras entre los dos casos
- Este trabajo se puede aplicar a cualquier escenario en donde se presenten oleaje y corrientes, por ejemplo: entradas a puertos, zonas costeras importantes, toma y descarga de termoeléctricas, en ductos submarinos, etc.

6.2. RECOMENDACIONES

- Calibrar los modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en suspensión de la Laguna de Términos a partir de las mediciones que se obtuvieron de las campañas de campo
- Analizar la influencia del oleaje sobre la corriente cuando sus direcciones son no coincidentes
- Identificar el efecto que tiene el oleaje en la evolución morfodinámica y estabilidad de bocas en lagunas costeras
- Diseñar y realizar más campañas de campo para poder cuantificar el transporte de sedimento asociado al oleaje
- Realizar estudios en las desembocaduras con importantes descargas de agua dulce, donde se presentan ambos casos simultáneamente.

Falta página

N° 106

ANEXO A

PROGRAMAS DEL ADCP

En este apartado se describen los programas utilizados para configurar e ingresar los datos al ADCP, las pruebas requeridas para configurarlo y la recuperación de los datos almacenados en el equipo una vez finalizada la campaña de campo.

A.1. WinSC

El programa WinSC se utilizó para realizar la configuración inicial así como la extracción de los datos. También fue utilizado para probar el equipo antes de ser colocado para mediciones en campo.

Toda esta programación se llevó a cabo con ayuda de una computadora donde el programa fue empleado en tiempo real, es decir, cada comando u opción elegida en la computadora es ingresada inmediatamente al ADCP. (ver Figura A. 1)

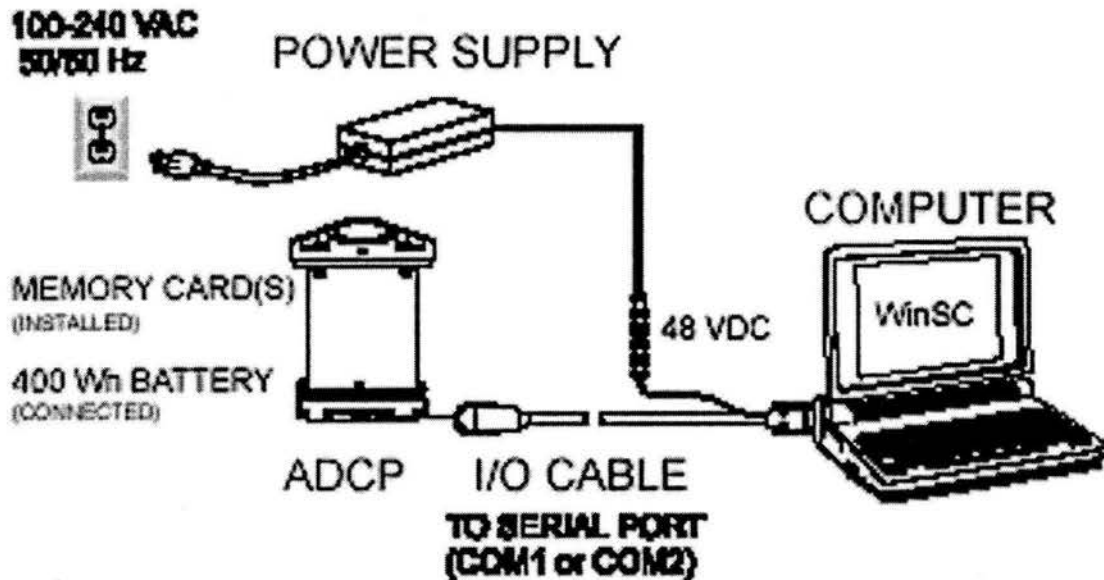


Figura A. 1. Esquema de conexión del ADCP a la computadora

Una vez hechas todas las conexiones necesarias, se ejecutó el programa. Este muestra una ventana de inicio en donde se pueden seleccionar lo que se desea realizar. (ver Figura A. 2)

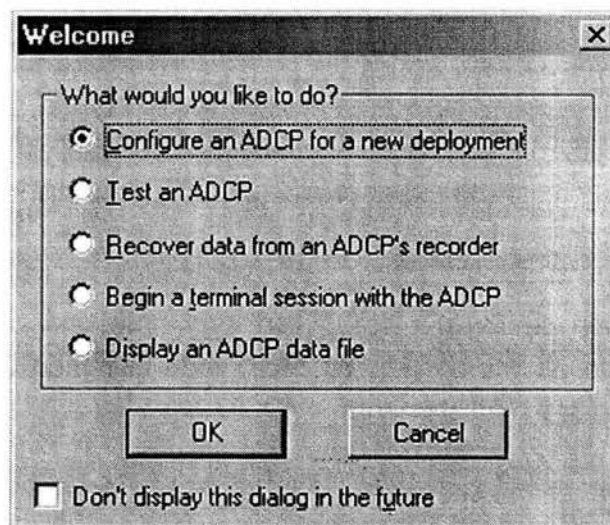


Figura A. 2. Ventana de inicio del WinSC

- *Configurar al ADCP para una nueva campaña*, crea el nombre del archivo que contendrá los datos medidos.
- *Pruebas al ADCP*, sirve para ingresarle todos los comandos necesarios para ajustarle el tiempo, la brújula, la frecuencia de la señal, el funcionamiento de cada transductor, así como verificar la comunicación entre el programa y el aparato por medio de información desplegada en la pantalla del programa.
- *Recuperación de datos del ADCP*, transfiere los datos medidos al disco duro de la computadora
- *Sesión terminal con el ADCP*, funciona para verificar si el ADCP ha respondido adecuadamente a los comandos que le fueron ingresados
- *Mostrar el archivo del ADCP*, por medio de esta opción se puede visualizar la información del archivo crudo

A.2. PlanADCP

El programa PlanADCP es un programa complementario de la configuración inicial desarrollada con el WinSC. A diferencia del WinSC, este programa permite fijar valores de comando y visualizar los resultados de las opciones elegidas antes de ser ingresados al ADCP. También se agregan algunos comandos que aseguran que el ADCP fue configurado correctamente.

A continuación se describen los pasos a seguir una vez que se ha ejecutado el programa:

1. Seleccionar el tipo de equipo que se desea configurar. Para efectos de las campañas de campo, el ADCP que se utilizó es el llamado Workhorse Monitor (ver Figura A. 3)

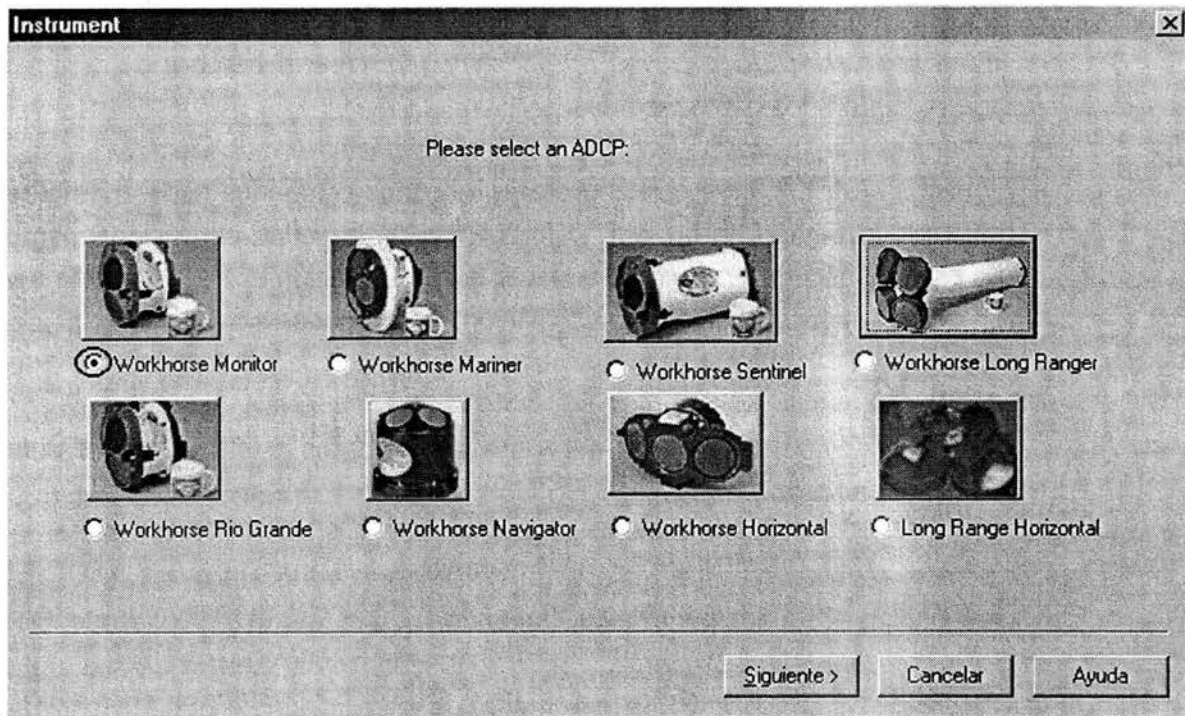


Figura A. 3. Selección del tipo de ADCP

2. Seleccionar la frecuencia del ADCP. Para el Workhorse Monitor utilizado para las campañas, la frecuencia fue de 1200 kHz.

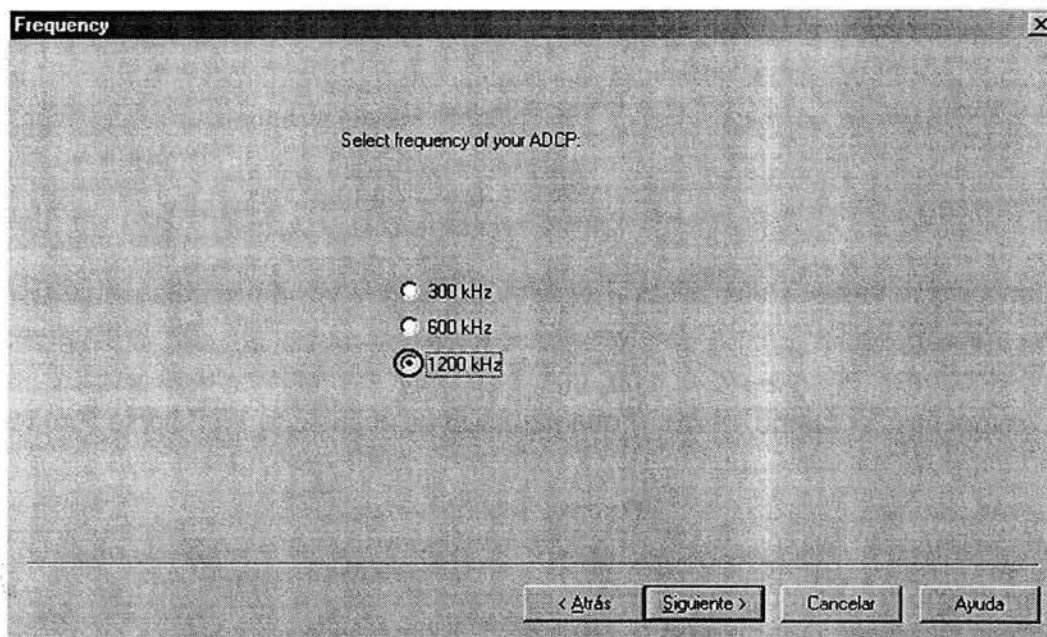


Figura A. 4. Selección de frecuencia

3. Seleccionar si se cuenta con batería (memoria interna) y la cantidad que se pretende utilizar

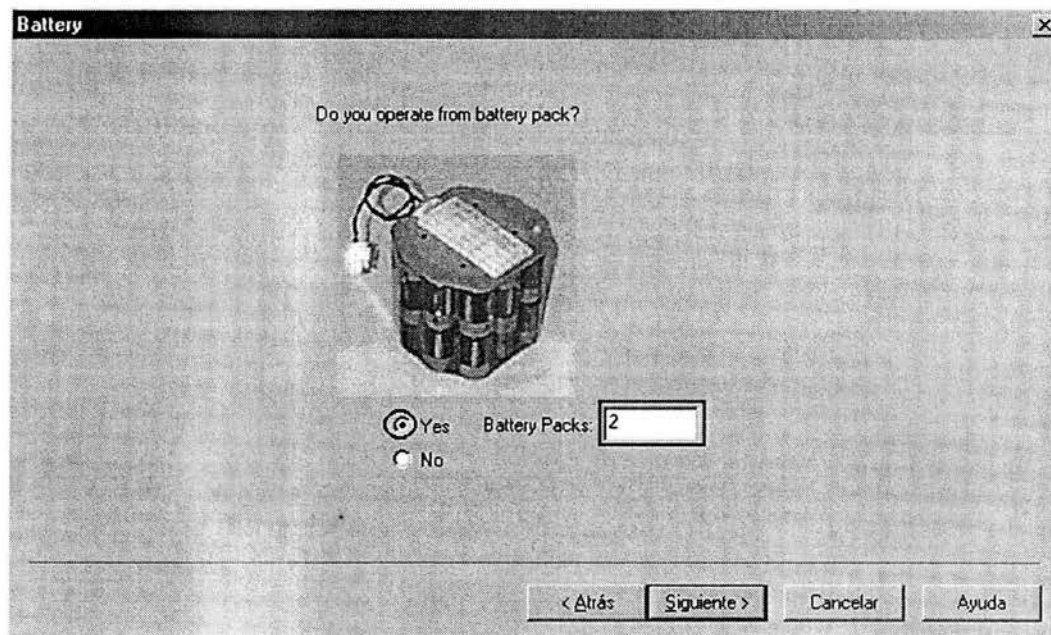


Figura A. 5. Selección de batería

4. Seleccionar en donde se piensa realizar las mediciones, es decir, si es en el océano o en algún río. Para nuestras campañas se seleccionó que en el océano.

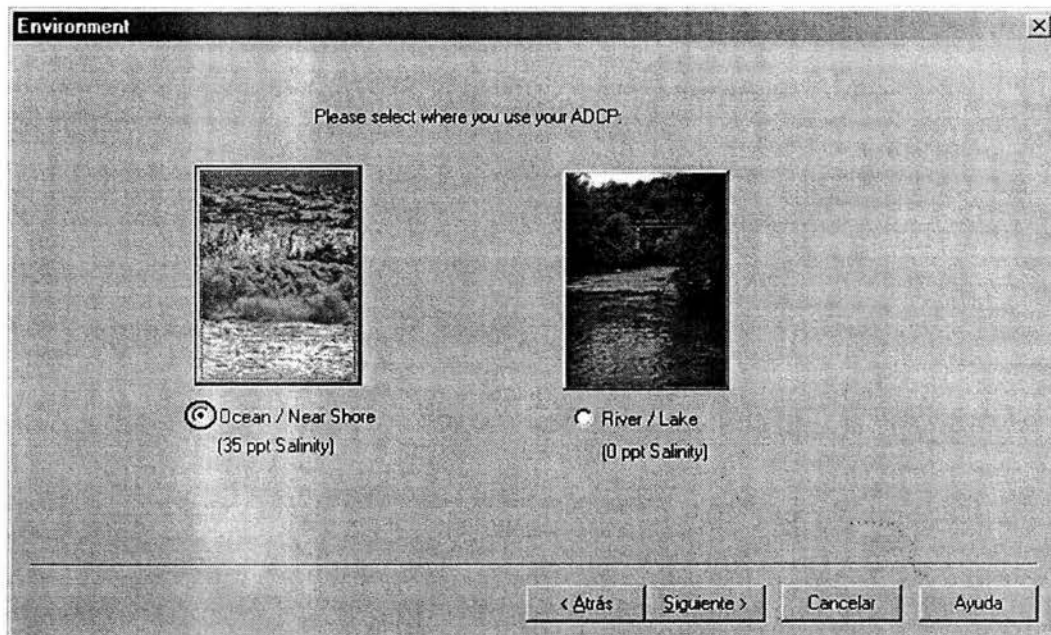


Figura A. 6. Selección de uso del ADCP

5. Seleccionar el tipo de colocación del ADCP.

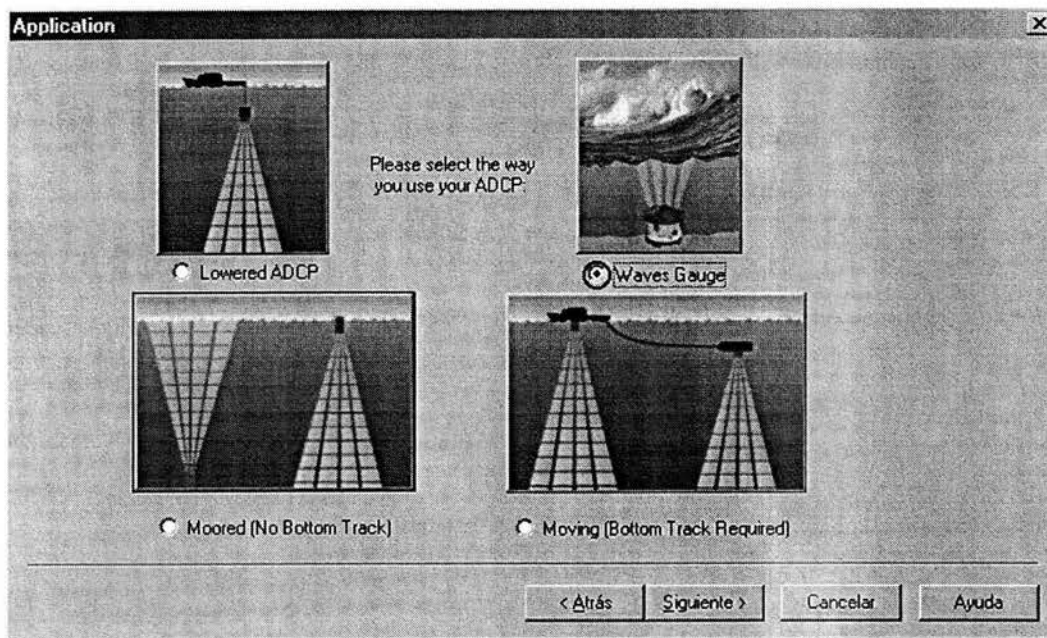


Figura A. 7. Tipo de colocación

6. Seleccionar el rango de profundidad, el cual depende de la temperatura, la salinidad, y la frecuencia y tamaño del ADCP

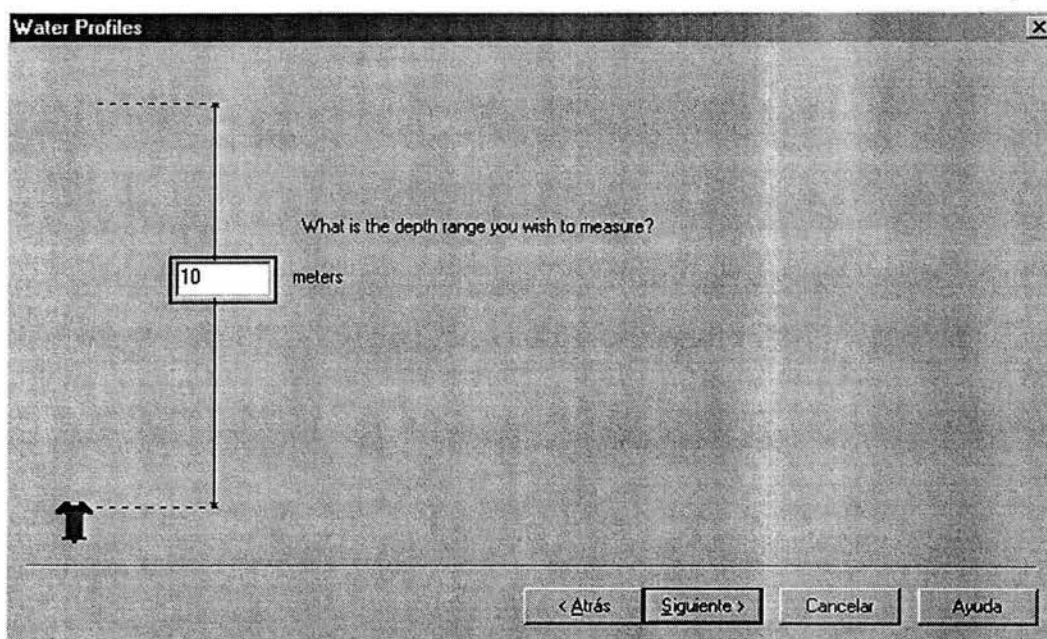


Figura A. 8. Rango de profundidad

7. Seleccionar tamaño y número de capas para las mediciones

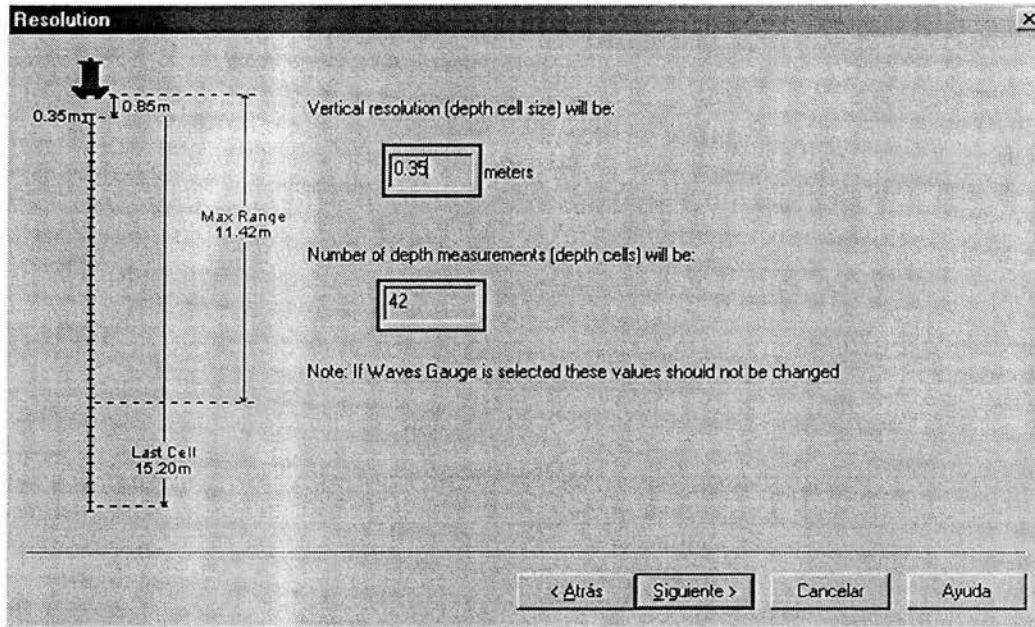


Figura A. 9. Tamaño de capas

8. Ingresar la información de la cantidad de memoria interna disponible del ADCP

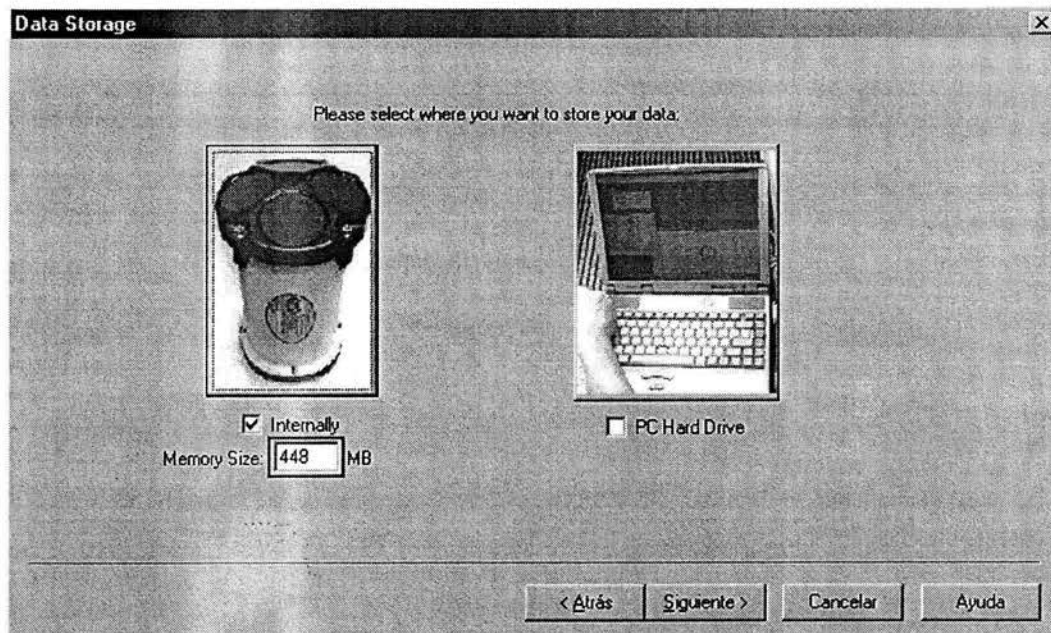


Figura A. 10. Capacidad de memoria interna

9. Selección del tiempo e intervalo de muestreo

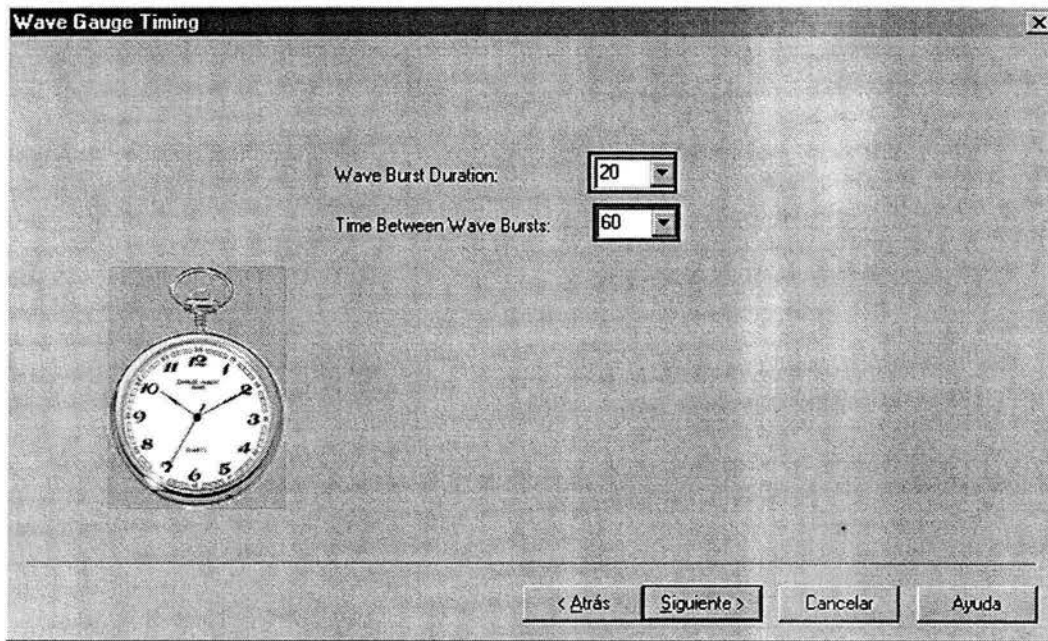


Figura A. 11. Tiempo e intervalo de muestreo

10. Agregar el número de lecturas por cada muestreo

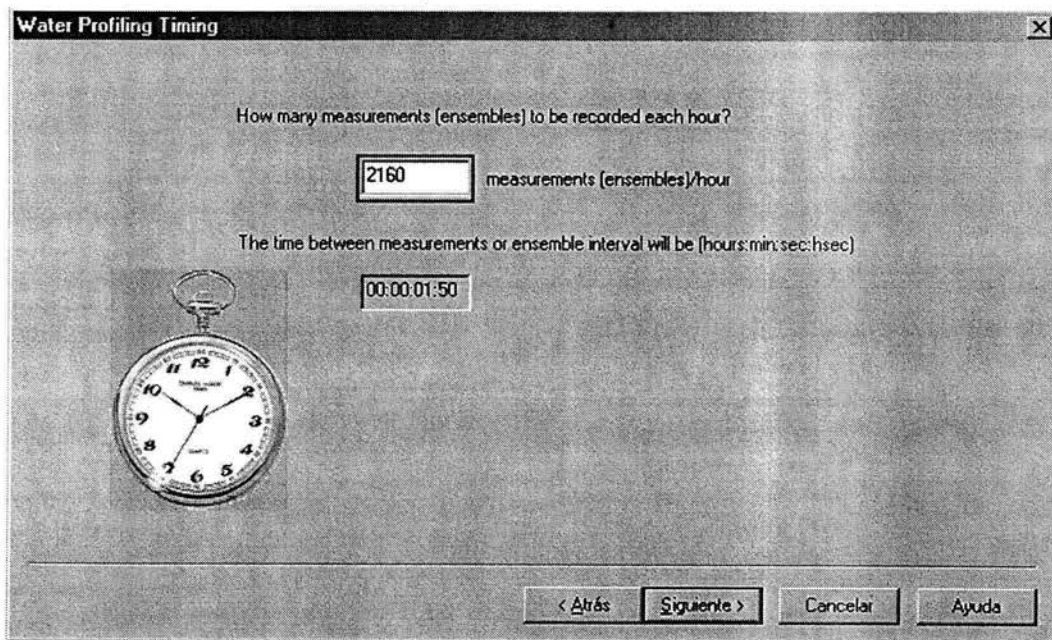


Figura A. 12. Lecturas en cada muestreo

11. Ingresar el número de días que durará la recolección de datos

Duration

What is anticipated duration of the deployment?

35 days

Number of water pings per measurement (ensemble) will be:

1

You will need at least 2049 MB of internal memory for this deployment.

The number of pings is too low for reasonable sampling of the currents. Recommended shortening the deployment or adding batteries.

< Atrás Siguiente > Cancelar Ayuda

Figura A. 13. Duración de las mediciones

12. Se despliega un resumen de toda la información que fue ingresada por medio del PlanADCP.

PlanADCP (Advanced)

File Settings View Help

CAUTION: Not enough memory for the deployment.

Basic Expert

Environmental Setup:

Transducer Depth: 10 m

Salinity: 35 ppt

Magnetic Variation: 0 °

Temperature: 5 °C

Profiling Setup:

Pings Per Ensemble: 1

Number of Depth Cells: 42

Depth Cell Size: 0.35 m

Mode: 1

Deployment Timing Setup:

Duration: 35 days

Ensemble Interval: 00:00:01.50

Ping Int. (Auto): 00:00:00.50

Ping Immediately After Deployment

Waves Setup:

Burst Duration: 20 min

Time Between Bursts: 60 min

Collect Motion Data (Moored)

Deployment Consequences:

First Cell Range: 0.85 m

Last Cell Range: 15.20 m

Max Range: 11.42 m

Standard Deviation: 10.87 cm/s

Ensemble Size: 988 bytes

Storage Required: 2049.56 MB

Power Usage: 684.00 Wh

Battery Pack Usage: 1.5

Samples Per Wave Burst: 2400

Min. Observable Wave Period For:

Non-directional Data: 1.85 sec

Directional Data: 2.49 sec

Burst Size: 187280 bytes

Workhorse Monitor: 1200 kHz/ High Res./ 2 Battery Packs/ Memory: 448 MB/ Waves

Figura A. 14. Resumen de configuración

A.3. WavesMon

El programa WavesMon tiene como función separar el archivo crudo en datos de oleaje y en datos de corrientes con la finalidad de poder utilizarlos con otros determinados programas y analizar los datos por separado.

En seguida se muestran los pasos a seguir para ejecutar el programa:

1. Para iniciar el programa se debe seleccionar una nueva configuración creando un archivo de instalación en modo de playback, es decir, en modo de procesar datos desde un archivo (ver Figura A. 15)

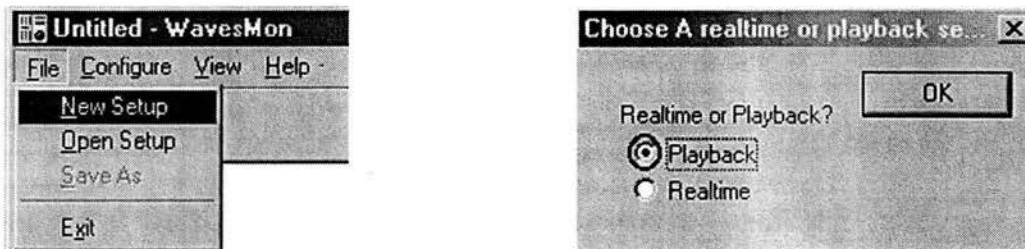


Figura A. 15. Inicio de programa y selección de procesamiento

2. Ingresar la ruta del archivo crudo. Después de seleccionarlo automáticamente se crean los nombres de los archivos de corriente y de oleaje

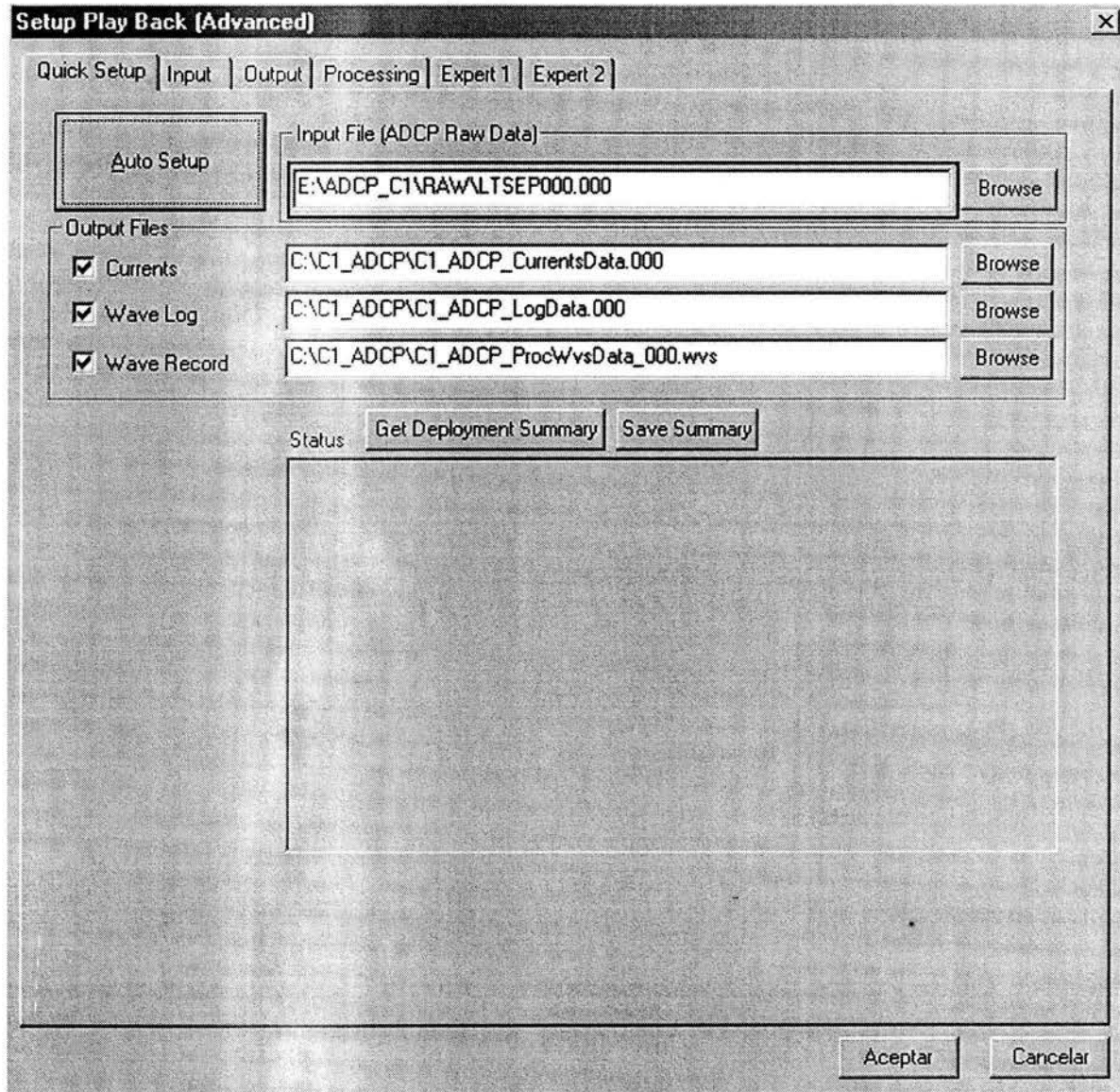


Figura A. 16. Localización del archivo crudo

3. En la ventana de Processing, se le ingresa información referente al oleaje como lo es el número de lecturas por muestreo, el tiempo entre cada muestreo, la altitud a la que se encontraban los transductores y la corrección de la desviación magnética. Cabe mencionar que la corrección de la desviación magnética sólo se realiza para los datos de oleaje. Por lo tanto, para llevar a cabo la corrección de la desviación magnética en las corrientes se utilizó un programa creado en MatLab.

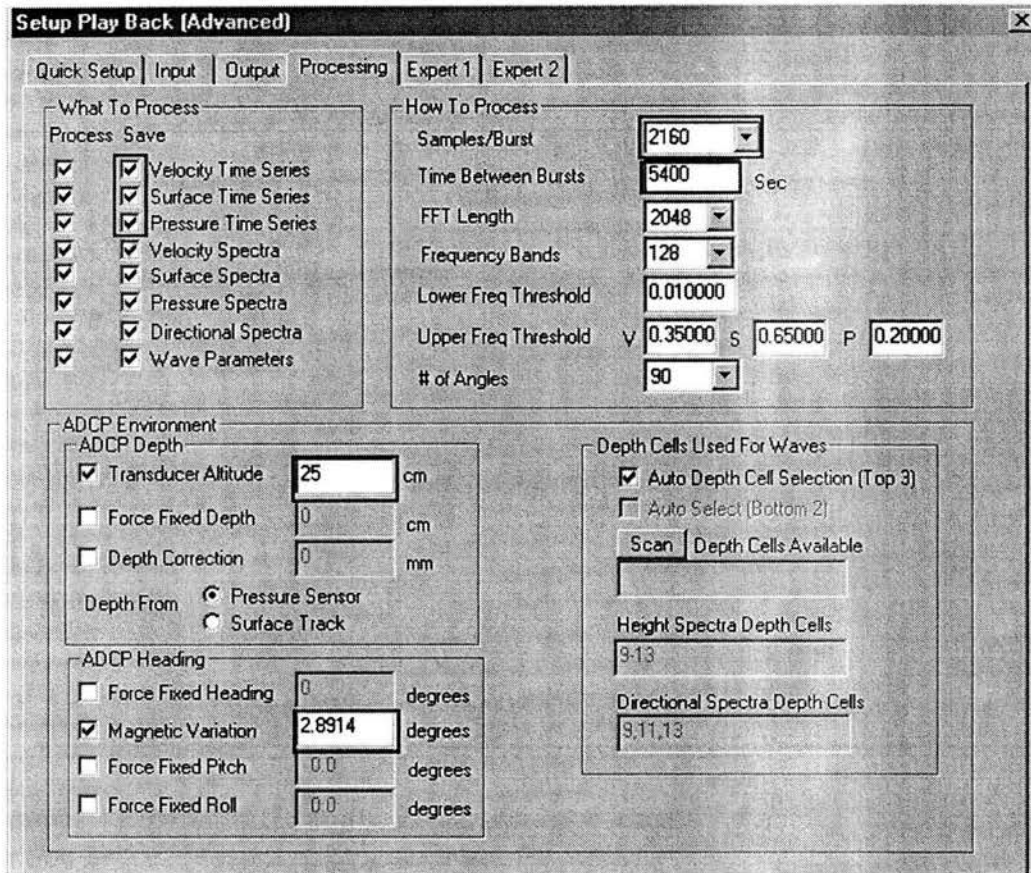


Figura A. 17. Ventana o etiqueta Processing

- En la ventana Expert 2 se seleccionan la casilla de corrección por corrientes, el cual, utiliza la velocidad promedio para corregir el espectro de oleaje y la casilla que ingresa el dato para olas muy largas, la cual analiza el oleaje por medio del espectro de presión

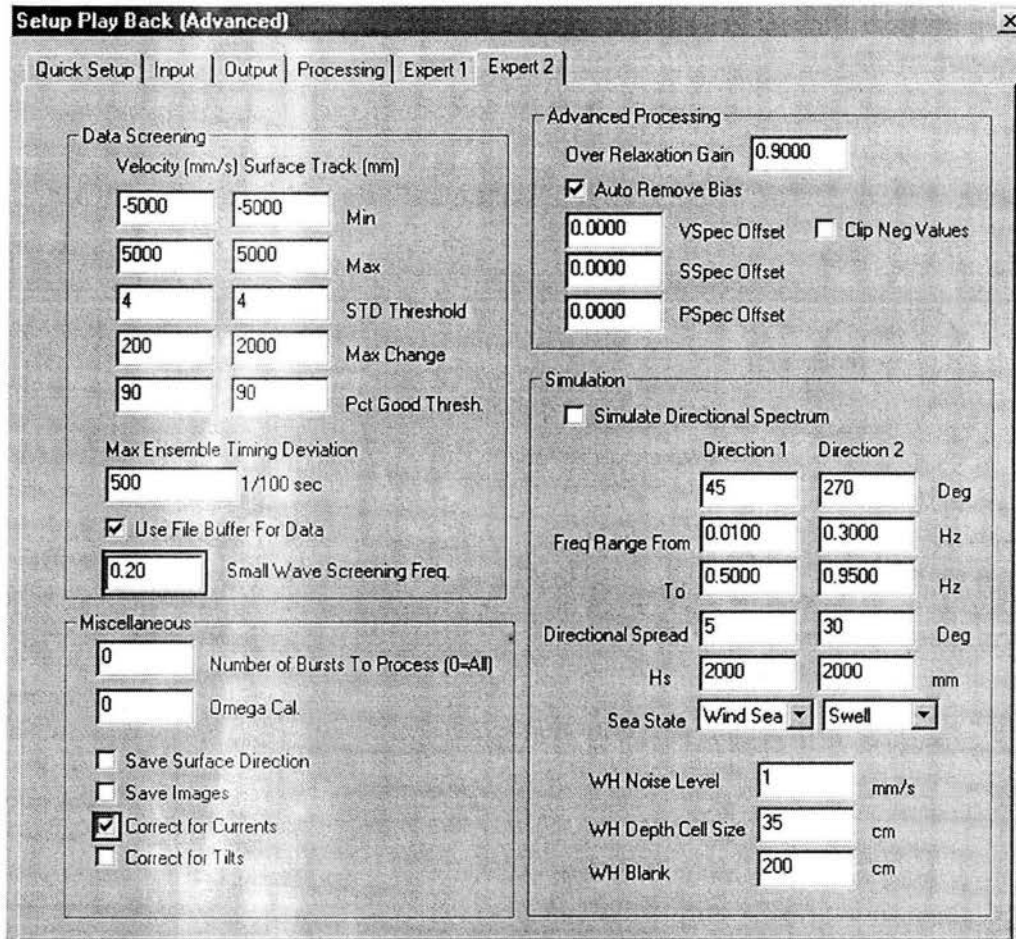


Figura A. 18. Ventana o etiqueta Expert 2

5. Al finalizar todos los puntos anteriores, se inicia con la separación de los archivos al seleccionar el botón GO como se muestra en la Figura A. 19.



Figura A. 19. Selección del inicio de procesamiento

6. El programa WavesMon ejecuta toda la información ingresada para llevar a cabo la separación de archivos

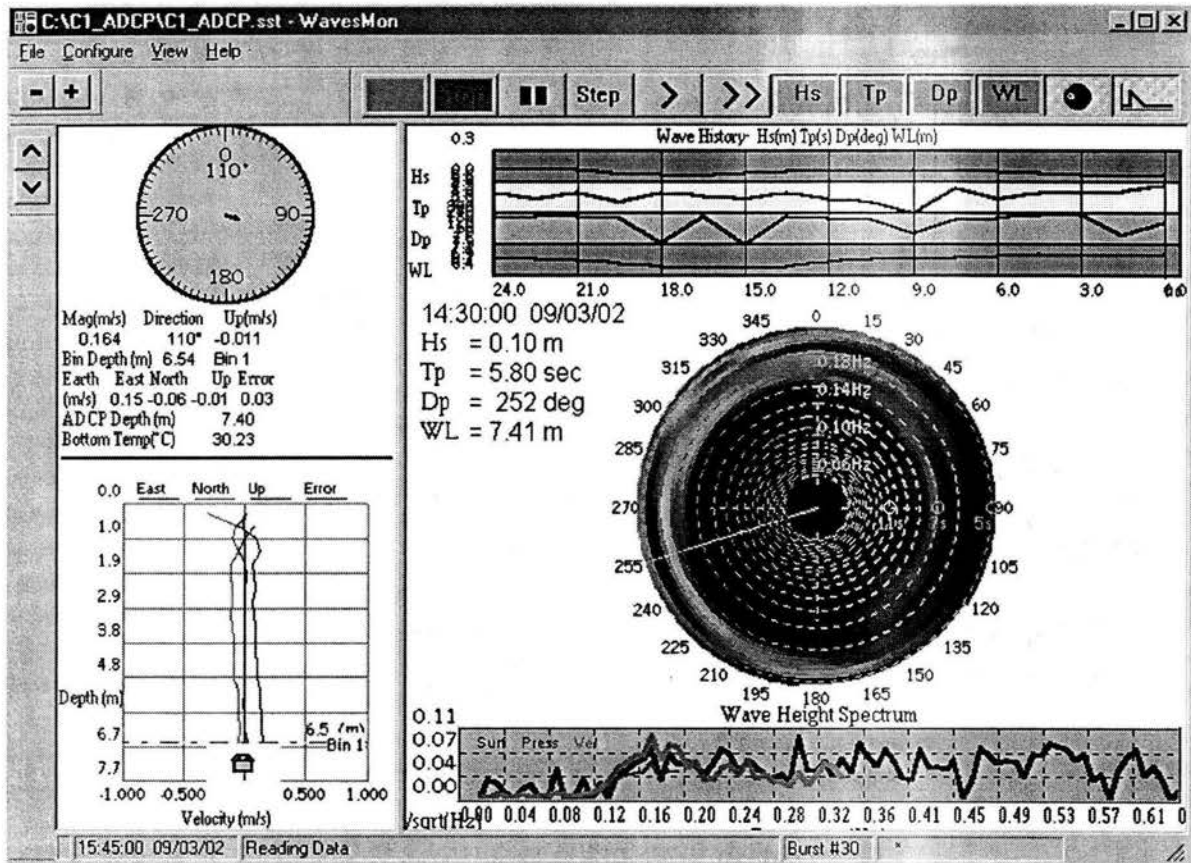


Figura A. 20. Programa WavesMon ejecutándose

REFERENCIAS

- AMEZCUA, F. y YÁNEZ-ARANCIBIA, A. (1980) "Ecología De Los Sistemas Fluvio-Lagunares Asociados A La Laguna De Términos. El Habitat Y Estructura De Las Comunidades De Peces". An. Cienc. Del Mar y Limnol. UNAM, 7(1): 69-118
- BAUTISTA, E. (2001). TESIS DE MAESTRÍA. "Modelo hidrodinámico para predicción de sobrelevación del nivel del mar generado por huracanes". División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- BOTELLO, A. (1978), "Variación De Los Parámetros Hidrológicos En Las Épocas De Sequía Y Lluvias (Mayo Y Noviembre De 1974) En La Laguna De Términos, Campeche, México" An. Cienc. Del Mar y Limnol. UNAM, 5(1): 159 -178
- BRIGGS, M.J., et al. (1996). "Wave Current Interaction in Inlets" Proc. Of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, Florida, in: B-L-Edge, Ed.: Vol 1. pp 1219-1232
- BIJKER, E. W. (1967). "Some consideration about scales for coastal models with movable bed". Delft Hydraulics Lab. Publ. 50.
- DAVIES, A. G. et. al. (1988). "A Numerical Model of the combined Wave and Current Bottom Boundary Layer". Ocean Engineering. Vol 12. No. 5. pp 387-423
- DYER, K. (1986). "Coastal and estuarine sediment dynamics". Ed. John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra. 342 pp.
- DYER, K. (2000). "Estuaries: a physical introduction". Ed. Wiley. 2da Edición. Inglaterra. 192 pp.
- EPOMEX (1993). "Estudio de declaratoria como área ecológica de protección de flora y fauna de la Laguna de Términos, Campeche". Campeche, México, EPOMEX. Informe Técnico. 300 pp

- ESPINAL, J. C. (2002). TESIS DE MAESTRÍA. "Caracterización del transporte de sedimentos en las bocas del Carmen y Puerto Real en Laguna de Términos, Campeche". División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- GRANT, W. D. & MADSEN, O. S. (1986). "The Continental – Shelf Bottom Layer" Annual Review of Geophysical Research. Vol. 87. No. C1. pp 469-481.
- INE, Instituto Nacional de Ecología, "Programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna "Laguna de Términos". 1ra Edición.
- MADSEN, O. S. (1993). "Sediment Transport On The Shelf". Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139, USA.
- MADSEN, O. S. y WIKRAMANAYAKE, P. N. (1991) "Simple Models For Turbulent Wave-Current Bottom Boundary Layer Flow". Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139, USA. DEPARTMENT OF THE ARMY.
- MORÁN, D. K. (2004). TESIS DE MAESTRÍA. "Estimación de los tiempos de residencia en Laguna de Términos, Campeche". (En elaboración).
- MCKEE SMITH, J, et al. (1996). " Current-Induced Breaking at an Idealized Inlet". Proc. Of the Coastal Dynamics, ASCE.
- ORTEGA, M. Y LOSADA, M.A. (2002). "Interacción Ola-Corriente En Desembocaduras". Grupo de Puertos y Costas. Universidad de Granada
- ORTEGA, M. (2003). TESIS DOCTORAL. "Procesos Hidrodinámicos y Sedimentarios en Formas Litorales de Gran escala". Grupo de Puertos y Costas. Universidad de Granada
- ROMERO, J., FERRARA, M., LIZÁRRAGA, L. Y RODRÍGUEZ, H. (1986). "Variación Estacional De Las Poblaciones De Enterobacterias En La Laguna De Términos. Campeche, México"
- SALLES, P. (2000). TESIS DOCTORAL. "Hydrodynamic Controls on Multiple Tidal Inlet Persistence". MIT/WHOI Joint Program in Applied Ocean Sciences and Engineering, Massachusetts Institute of Technology / Woods Hole Oceanographic Institution: 272pp.

- SANTAMARÍA, B. (1992). "Estudio Bacteriológico Del Área Costera De La Bahía De Campeche Durante 1990 A 1992" Secretaría de Marina, Dirección General de Oceanografía Naval, Estación de Investigación Oceanográfica de Campeche
- SCHLICHTING, H. (1968). "Boundary Layer Theory". 6ta. Ed. McGraw-Hill. USA.
- SILVA, R. (2002). "Análisis y descripción estadística del oleaje". Instituto de Ingeniería, UNAM. México. 155 pp. (En Revisión)
- URIBE, R. (2000). TESIS DE LICENCIATURA. "Caracterización del clima marítimo mexicano". Facultad de Ingeniería, UNAM. México
- VAZQUEZ, F., DORANTES, H., ALEXANDER, H. y FRAUSTO, A. (1988). "Estudio Hidrológico De Las Aguas Costeras, Frente A Las Bocas De La Laguna De Términos, Campeche. En Dos Épocas Climáticas Diferentes. Parte I". An. Cienc. Del Mar y Limnol. UNAM, 15(2): 183-194
- YÁNEZ – ARANCIBIA, A. & SÁNCHEZ – GIL, P. (1983). "Environmental Behaviour of Campeche Sound Ecological System of Términos Lagoon, México". Preliminar Results. UNAM. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. 10 pp. 117-136
- YÁNEZ, A. "Batimetría, Salinidad Temperatura Y Distribución De Los Sedimentos Recientes De La Laguna De Términos, Campeche, México". Inst. Geol., Bol. UNAM, n 67, pt 1, 47 p., 17fig