

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

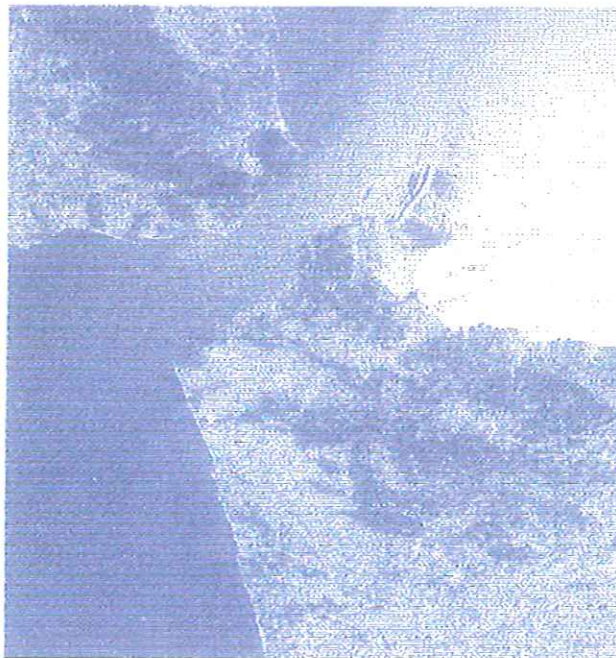


FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



ESTRUCTURA VERTICAL DE LAS CORRIENTES DE MAREA

EN EL UMBRAL DEL ESTRECHO DE GIBRALTAR



TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

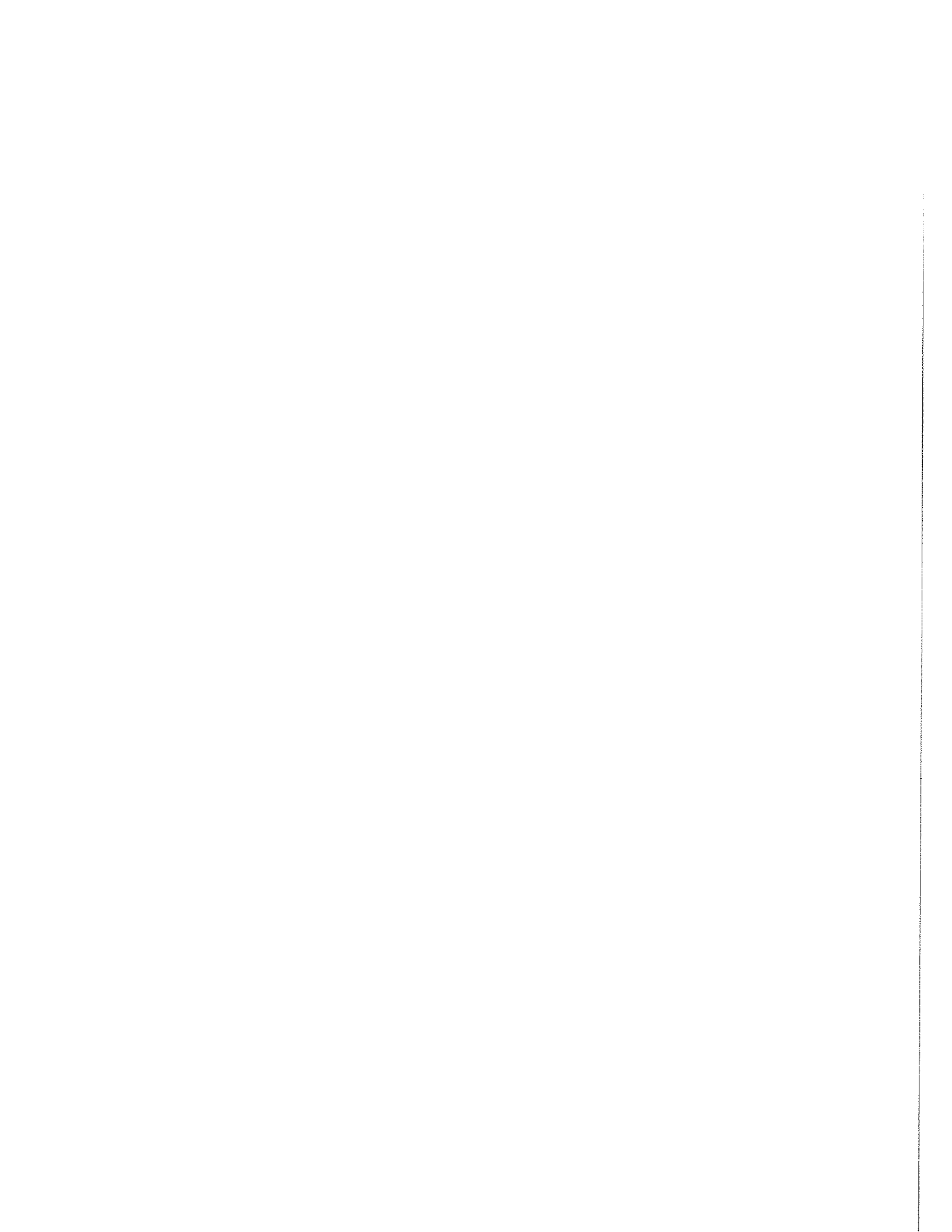
OCEANÓLOGO

PRESENTA:

ADRIÁN TORALES RODRÍGUEZ

Ensenada, Baja California.

Febrero de 2002



RESUMEN

Utilizando datos obtenidos con un ADCP anclado en el fondo del umbral del estrecho de Gibraltar, se realizó el análisis armónico de las corrientes de marea por el método de cuadrados mínimos, posteriormente se procesaron los datos para presentar los datos vectoriales en forma de elipses componentes de corrientes de marea ya que de esta manera se facilita la visualización de la estructura vertical de estas corrientes.

Se encontró que en general, la estructura vertical de la corriente de marea en el umbral del estrecho de Gibraltar indica que el agua del Atlántico fluye hacia el Mediterráneo entre la superficie y los ~150 m de profundidad, el flujo presenta mayor intensidad en la banda semidiurna constituida principalmente por las mareas N_2 , S_2 y M_2 , siendo esta última la de mayor amplitud con una velocidad máxima de 126 cm s^{-1} a una profundidad de 154m. El agua del Mediterráneo fluye en la capa inferior entre los ~150 m y el fondo. La marea rota en sentido ciclónico en la capa superior invirtiendo el sentido de rotación en la interfase (entre los 130 y 175 m), después de los 175 m la corriente vuelve a rotar en sentido ciclónico. Existe una marcada diferencia de magnitud entre el semieje mayor y el semieje menor, esta diferencia indica que el flujo se da en forma casi rectilínea a lo largo del estrecho de Gibraltar.

La distribución vertical de la orientación muestra un cambio de orientación siendo hacia el Este cerca de la superficie y hacia el Noreste cerca del fondo. La estructura de la corriente de marea presenta mayor variabilidad en la interfase, esto se debe probablemente a efectos de fricción ocasionados por el cambio de densidad entre el agua Atlántica y el agua Mediterránea.

Empleando un modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante se explica bien la estructura vertical promedio de la corriente de marea sin embargo, la variabilidad observada en la profundidad de la interfase no puede ser explicada con este modelo, dichas variaciones probablemente pueden explicarse empleando un coeficiente de viscosidad que varíe con la profundidad, y que considere los efectos de las fronteras laterales del estrecho de Gibraltar.

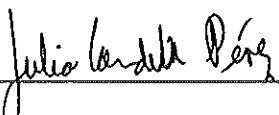
En este trabajo se obtuvieron resultados analíticos similares a los resultados publicados por Tsimplis (2000), sin embargo, para la realización de este trabajo de tesis se utilizaron datos correspondientes a dos años de mediciones continuas que permiten observar con detalle la presencia de una variabilidad estacional en la estructura vertical de las corrientes de marea en el umbral del estrecho de Gibraltar que no ha sido reportada formalmente en alguna publicación especializada. En los estudios anteriores citados en la introducción no se menciona nada relacionado con esta variabilidad, este descubrimiento merece ser estudiado a detalle para su publicación internacional.

**ESTRUCTURA VERTICAL DE LAS CORRIENTES DE MAREA EN EL UMBRAL DEL
ESTRECHO DE GIBRALTAR**

TESIS
QUE PRESENTA

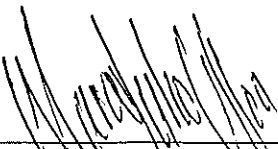
ADRIÁN TORALES RODRÍGUEZ

APROBADA POR



PRESIDENTE DEL JURADO

DR. JULIO CANDELA PÉREZ



SINODAL PROPIETARIO



SINODAL PROPIETARIO

M.C. MARCO JULIO ULLOA TORRES DR. AFFONSO DA SILVEIRA MASCARENHAS

DEDICATORIA

A mis padres Rosita Y Elías con mucho amor, ¡Todo es gracias a ustedes!

A mis hermanos José Elías y Jorge Daniel con toda mi admiración
¡Ustedes dos son lo mejor de mundo!

A mi abuelita Martita.
¡Estoy orgulloso de ser tu nieto!

A mis tíos; Ricardo, Adrianita, Enrique, Laurita, Araceli, Fernando y Martita,
¡Quiero ser como ustedes!

A todos mis primos, ¡Son mi alegría y ejemplo!

A mis tíos; Marcos, Tomás, Fany, Tulita, Josefina, Rafael y Carmen,
¡Los extraño y los quiero mucho!

A Ana Allen, ¡Sin tu ayuda no lo habría logrado!

A mis amigotes, Erick Bravo, Nemer, Oscar, Mark, Ligeia y Gaby Prior,
¡Por que son también mi familia!

A todos los que son o serán oceanólogos,
¡Prometo dar lo mejor de mí para ser digno de llevar mi título!

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mis padres el apoyo incondicional que siempre me han brindado y el amor por la vida que me han inculcado, para ustedes toda mi admiración y mi corazón. A mis hermanos Pepe y Daniel por aguantar a su hermano mayor, por que son mi fuente de inspiración, mi orgullo y mi alegría.

A mi abuelita Martita que con su ejemplo me inspira a seguir luchando por alcanzar mi realización.

A todos mis tíos y primos que me han brindado su apoyo en todo momento, que son lo mas valioso que tengo en la vida.

Este trabajo fue realizado gracias a la ayuda de mi director de tesis Dr. Julio Candela Pérez que me aceptó como tesista y me dio la oportunidad de aprender a ejercer mi profesión, gracias a su inagotable paciencia al explicarme conceptos completamente nuevos para mi y que atesoraré por siempre, mi respeto y admiración por su trabajo excede mis palabras.

Al Dr. Francisco J. Aranda Manteca por inculcarme el valor para liberar mi mente de dogmas y prejuicios y así buscar la verdad con libertad y compromiso, por que con sus enseñanzas descubrí la increíble maravilla que es formar parte de este universo.

Al Dr. Reginaldo Durazo Arvizu porque con su ejemplo y entusiasmo descubrí mi gusto por la oceanografía física, y por darme las herramientas necesarias para iniciar mi carrera en este campo.

A mi profesor y sinodal Dr. Affonso Da Silveira Mascarenhas por mostrarme la forma de adquirir el conocimiento con orden y con alegría, por sus valiosas correcciones y consejos pero sobre todo; por enseñarnos con su ejemplo que un ser humano realmente sabio va por el mundo con sencillez.

A mi sinodal M.C. Marco Julio Ulloa Torres por haber mostrado tanto interés sobre este trabajo, por sus correcciones tan profundas como valiosas, su actitud fue inspiradora y de gran ayuda para esclarecer aspectos fundamentales de esta tesis, por enseñarme a valorar y a defender mi trabajo.

A las secretarias de la FCM porque con su ayuda siempre salen las cosas bien.

A todos mis maestros (sin excepción) de la carrera, por su enseñanzas y por que ahora que inicio mi aventura por los mares y océanos sé que este es mi puerto base, donde me equiparon y donde siempre hallaré resguardo.

A Erick Bravo por su amistad y apoyo incondicional en todo momento, por tantas aventuras vividas, por enseñarme el significado de compartir sin reservas.

A Oscar Guzón por su amistad y sus consejos siempre acertados, prometo ya no ser tan terco.

A Nemer Narchi por su amistad y por que tengo la certeza de que siempre cuento con su apoyo, y por los detalles tan especiales que siempre tiene y que me convencen de que quien encuentra un amigo encuentra un tesoro.

A Ligeia Del Toro por saber escuchar por compartir su forma de pensar y de ver el mundo que es una maravilla, no me queda ninguna duda de que... ¡Donde está Ligeia la vida es bella!

A Alejandro Rodríguez por su amistad, entusiasmo y por transmitirme un poco de la energía que desborda.

A Ana Allen porque su amistad y apoyo en todo momento ha sido vital y siempre una gran motivación.

A Eneas Aguirre por ser tan excepcional, porque su ejemplo es para todos la evidencia de que cuando se quiere llegar alto no existen límites.

A Mark Marín por su ayuda desinteresada en momentos críticos y por que siempre esta cerca y dispuesto a compartir.

A Karla Aburto por que definitivamente eres básica en mi vida y gracias al amor tan grande que me brindaste tuve la fuerza de irme a perseguir mi sueño, S.K.

A Gabriela Prior por mostrarnos lo que se puede hacer con amor y valor, y por que es toda una inspiración.

A la familia Lopez Cedano por su calidez, apoyo y por que son como mi familia.

A Fabiola y Alexis por que son una gran motivación.

A todos los amigos que han estado a mi lado y que me han brindado su cariño, ayuda y alegría, ¡soy feliz por estar cerca de ustedes!; Fabiola Lafarga, Diego Wolf, Lucía Bunge, Alfredo Camacho, Berta Laura Beverido, Claudia Sanfilipo, Axelle Jouveneau, Magali De Rijk, Magali Velasco, Doris Velásquez, Ismael Jiménez, Jose Luis Navarrete, Norita y Manuel, Eric Reinecke, Santiago Mejía, Jorge Zambrano, Etelberto Serrano, Pedro Maldonado, Ulises Núñez, Alfonso Fajer, Paola Trenti, Eduardo y Rodrigo Morteo, Gabriela Athié, Alejandra Prieto, Rodrigo Gómez, Eduardo Sierra, Rodrigo De la Peña, Julio Montolla, Enrique Strassburguer, Beatriz García, Gerardo Larios, ArlÍ De Luca, Jorge Noguez, Giacomo Palaviccini, Enrique Castro, Enrique Collard, Hiula, Aleph Jiménez, Enrique Quintero, Alec Torres, Gabriela Medellín, Tonatiu, Samanta De la Gala, Clarisa Galindo, Yoli y Gisela, Ramón Carrillo, Cesar y Bagu Calderón, Emanuel Kraus, Paola Batta, Cristina Orozco, Omar Quetzalcóatl, David Rivas, Ricardo Domínguez, Roberto Altamirano, Carlos Cruz, Alfonso Medellín y Luis Malpica.

A todo el personal del CICESE en especial a Joaquín García, Nacho, Charly, Armando, Sergio Ramos, Lina Zúñiga y Tere Agüero.

Al capitán Jaques Ives Cousteau por contarme como es el mundo del silencio y porque con sus películas y libros me enamoré del mar.

A Francisco Becerril por su amistad, por enseñarme a bucear y por llevarnos a esos lugares tan increíbles.

INDICE

| | |
|--|----|
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Descripción del área de estudio | 10 |
| II. OBJETIVO | 12 |
| II.1. Objetivos particulares | 12 |
| III. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS Y METODOLOGÍA | 13 |
| III.1 Aspectos importantes sobre el ADCP | 13 |
| III.2. Datos disponibles | 15 |
| III.3. Tratamiento de los datos | 16 |
| III.3.1. Representación armónica y espectral de las corrientes de marea | 17 |
| III.3.2. Elipse componente | 25 |
| III.3.3. Características de la elipse componente | 27 |
| III.3.4. Proccsamiento de los datos | 30 |
| IV. RESULTADOS | 34 |
| IV.1.1. Componentes semidiurnas | 34 |
| IV. 1.1.1. Componente M_2 | 34 |
| IV. 1.1.2. Componente N_2 | 37 |
| IV. 1.1.3. Componente S_2 | 39 |
| IV. 1.2. Componentes diurnas K_1 y O_1 | 41 |
| IV. 1.3. Componente M_4 | 45 |
| IV. 1.4. Componentes mensual M_m y quincenal M_{sf} | 47 |
| IV. 2. Modelo analítico | 52 |
| IV.2.1. Descripción del modelo | 52 |
| IV.2.2. Resultados del modelo | 54 |
| IV. 2.3. Modelo aplicado a las componentes semidiurnas M_2 , N_2 , y S_2 | 55 |

| | |
|--|----|
| IV. 2.4. Modelo aplicado a las componentes diurnas O_d y K_d | 58 |
| IV. 2.5. Modelo aplicado a las componentes M_d y M_m | 60 |
| IV. 3 Discusiones | 62 |
| V. CONCLUSIONES | 65 |
| VI. TRABAJO FUTURO | 66 |
| VII. LITERATURA CITADA | 68 |

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.- Esquema de la sección vertical a lo largo del estrecho de Gibraltar, en la zona del umbral de Camarinal que indica el perfil de la profundidad media de la interfase (~150 m en el umbral) que separa el agua atlántica en la capa superior del agua mediterránea en la capa inferior..... 4
- Figura 2. Esquema del anclaje utilizado por el Dr. Julio Candela para hacer las mediciones en el umbral del estrecho de Gibraltar..... 9
- Figura 3.- Mapa del área de estudio: Estrecho de Gibraltar, situado entre España y Marruecos, la zona marcada con un triángulo es la zona del umbral de Camarinal, sitio en donde fue colocado el perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP) en cuatro periodos de mediciones semestrales iniciando en Octubre de 1994 y finalizando en Octubre de 1996. Las líneas continuas son las isóbatas medidas cada 200 metros..... 11
- Figura 4. Diagramas esquemáticos que muestran como trabaja el perfilador de corrientes acústico Doppler. (a) El pulso de sonido es emitido por un transductor (usualmente uno de cuatro colocados en ángulo recto uno del otro). (b) El sonido es dispersado en todas direcciones por las pequeñas partículas y plancton suspendido en el agua y los ecos son modulados por el efecto Doppler de acuerdo a la dirección del movimiento de los dispersores. Si, por ejemplo, el parche se está moviendo alejándose del ADCP, el pulso de sonido reflejado será modulado hacia longitudes de onda mas largas y frecuencias menores. (Tomado de: *The open university*, 2001)..... 14
- Figura 3.1 a) Corriente de marea V en el marco de referencia local ENZ (este, norte y hacia arriba), b) Vector de corriente de marea V en el plano x, y 18
- Figura 3.2. Interpretaciones geométricas de los operadores de rotación a) $E^{\pm i\sigma_k t}$ y b) $W_{\pm k} E^{\pm i\sigma_k t}$, α_k es el ángulo de la k -ésima componente de marea comprendido entre el vector y el eje x 24
- Figura 3.3. Interpretación geométrica de la componente de corriente de marea $W_k(t)$ 25
- Figura 3.4. Elipse componente de la corriente de marea las variables se encuentran definidas en el texto..... 25
- Figura 4.5. Dirección de rotación y formas especiales de la elipse componente..... 28
- Figura 5.1. Distribución vertical de la componente semidiurna M_2 ; Semieje mayor, semieje menor, orientación (grados) y fase (grados), las velocidades positivas en el semieje mayor indican que el flujo medio de volumen es principalmente hacia el mar mediterráneo, el semieje menor representa el sentido de rotación de la corriente de marea, su signo es positivo en el sentido ciclónico (contrario a las manecillas del reloj). La Orientación y fase correspondientes a la marea entrante (hacia dentro del Mediterráneo). La orientación está medida trigonométricamente en sentido contrario a las manecillas del reloj a partir del Este geográfico. Las fases, las cuales indican el tiempo de ocurrencia del la corriente de flujo máximo, están medidas en grados con respecto al tiempo del meridiano de Greenwich (GMT). Series; S2 (color azul), S3 (color rojo), S4 (color verde) y S5 (color negro)..... 37
- Figura 5.2. Distribución vertical de la componente N_2 . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1..... 39
- Figura 5.3. Distribución vertical de la componente semidiurna S_2 . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1..... 41

| | |
|---|----|
| Figura 5.4. Distribución vertical de la componente diurna O_I . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1..... | 43 |
| Figura 5.5. Distribución vertical de la componente diurna K_I . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1..... | 44 |
| Figura 5.6. Distribución vertical de la componente diurna M_4 . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1..... | 46 |
| Figura 5.7. Distribución vertical de la componente diurna M_m . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1..... | 48 |
| Figura 5.8. Distribución vertical de la componente diurna M_f . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1..... | 49 |
| Figura 6.1. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente M_2 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación (grados) y fase (grados)..... | 56 |
| Figura 6.2. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente N_2 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación (grados) y fase (grados)..... | 57 |
| Figura 6.3. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente S_2 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación (grados) y fase (grados)..... | 57 |
| Figura 6.4. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente O_I de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación ($^\circ$) y fase ($^\circ$)..... | 59 |
| Figura 6.5. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente K_I de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación ($^\circ$) y fase ($^\circ$)..... | 59 |
| Figura 6.6. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente M_4 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación ($^\circ$) y fase ($^\circ$)..... | 61 |
| Figura 6.7. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente M_m de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación ($^\circ$) y fase ($^\circ$)..... | 61 |
| Figura 7. Distribución vertical de la señal de marea y el modelo friccional de <i>Kundu et al.</i> (1981) para las mareas semidiurnas: (a) semieje mayor; (b) semieje menor; (c) fase; (d) dirección. De esta manera reporta sus resultados <i>Tsimplis</i> (2000) en su artículo sobre la estructura vertical de las corrientes de marea en el umbral de Camarinal. Notese que la escala no permite observar variaciones significativas..... | 64 |

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Definición, símbolo y periodo de las componentes principales de marea..... 12

Tabla 2. Valores máximos y mínimos de semieje mayor “M”, semieje menor “m”, orientación “Inc” y fase “θ” de las componentes de marea; M_2 , N_2 , S_2 , O_1 , K_1 , M_4 , M_m y M_{sf} , obtenidos a partir del análisis armónico de velocidad de corriente de cuatro series de mediciones de ADCP anclado en el umbral del estrecho de Gibraltar entre Octubre de 1994 y Octubre de 1996. Los símbolos en las columnas indican lo siguiente: “M” es el semieje mayor (centímetros por segundo). El signo del semieje menor “m” (en centímetros por segundo) indica el sentido de rotación de la corriente de marea (positivo en sentido contrario a las manecillas del reloj). Orientación “Inc” y fase “θ” correspondientes a la marea entrante (hacia dentro del Mediterráneo). La orientación está medida trigonométricamente en sentido contrario a las manecillas del reloj a partir del Este geográfico. Las fases, las cuales indican el tiempo de ocurrencia del la corriente de flujo máximo, están medidas en grados con respecto al tiempo del meridiano de Greenwich (GMT)..... 51

Tabla 3. Valores de ω para cada una de las componentes de marea estudiadas en este trabajo..... 54

Tabla 4. Diferencia entre los resultados analíticos y las observaciones obtenida a partir del cálculo de las raíces cuadráticas medias $RCM = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_1^N (x_{modelo} - x_{observada})^2 \right)}$, donde N es el número de datos..... 58

I. INTRODUCCIÓN.

Las corrientes de marea han tenido influencia sobre el uso que el hombre da al mar desde tiempos ancestrales. En los días en que las embarcaciones eran impulsadas solo por remos y velas, una fuerte corriente, favorable o adversa, podía hacer la diferencia entre un viaje rápido o una travesía lenta y tediosa. Hoy en día las corrientes continúan afectando a la navegación ya que su intensidad influye directamente sobre la maniobrabilidad de los buques de gran calado. Las corrientes transportan sedimento a través de canales y puertos, si no se conoce la dinámica de estas puede haber problemas de asolvamiento o erosión en las instalaciones costeras. Otro aspecto importante acerca de las corrientes de marea es que estas contribuyen a la dispersión tanto de nutrientes como de propiedades físicas y químicas del agua de mar.

Las corrientes en los océanos y mares pueden ser producidas por diferentes causas, que se combinan para formar la corriente total instantánea. Los gradientes de presión asociados a la circulación oceánica general dan lugar a corrientes relativamente estables, el forzamiento meteorológico causa corrientes que varían de manera irregular, en la zona litoral, el oleaje provoca corrientes normales y paralelas a la playa, por último, la atracción gravitacional de los cuerpos astronómicos da lugar a las corrientes de marea. En esta tesis nos centraremos en la estructura vertical de las corrientes de marea, sin embargo, debe tenerse en mente que las componentes de la corriente total interactúan una con la otra por medio de términos no-lineales y fricción incluidos en las ecuaciones de movimiento.

Las corrientes de marea constituyen una parte importante de la corriente total de los océanos del mundo, incluyendo algunas de las áreas comerciales mas importantes de los mares, tales como la plataforma continental del noroeste de Europa y las costas norte y este de Norte América. En sitios donde una cuenca de agua se vacía, tanto alrededor de un promontorio como a través de un canal angosto, las velocidades de la corriente pueden ser de gran magnitud. La predicción de la estructura vertical de las corrientes de marea es un requisito para muchos proyectos de ingeniería costera debido a que permite conocer aspectos como la fricción sobre el fondo y la turbulencia que esta produce, determinando también el transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes, así como su intensidad que afecta directamente a las estructuras instaladas sobre el suelo marino y la calidad del agua en la región.

Las mareas son la respuesta a los movimientos relativos del Sol, la Luna y la Tierra, la atracción gravitacional que ejercen otros planetas puede ser medida pero su magnitud es tan pequeña que se considera despreciable. La rotación de la tierra sobre su eje, la traslación de la luna alrededor de la tierra y las trayectorias elípticas que describen los tres cuerpos provocan que la distancia y orientación entre ellos varíe en ciclos muy precisos y definidos. La fuerza de gravedad resultante en la capa del océano varía de acuerdo a estos movimientos orbitales, conduciendo así a un forzamiento armónico bien determinado que ocasiona que el nivel del mar suba y baje en forma casi periódica, de tal forma que es posible expresarla como una suma de funciones sinusoidales (*Godin, 1988*).

La luna por su distancia a la tierra y el sol por su tamaño son los cuerpos que ejercen mayor fuerza de gravedad sobre las capas oceánicas, por lo que pequeñas variaciones de su posición se reflejan en las características de mareas para cada lugar.

El Estrecho de Gibraltar es una zona muy importante en el aspecto socio-económico de Europa ya que es la puerta de entrada al mar Mediterráneo, lugar de gran actividad comercial y cultural. Además, en el umbral de este estrecho se llevan a cabo aspectos oceanográficos muy interesantes debido a que es en esta zona donde ocurre la transición entre dos regímenes de marea distintos: el del Atlántico Norte, donde la amplitud de la marea es mayor a 1 m, y el del Mediterráneo Oeste cuya amplitud de marea es inferior a 0.50 m, esto aunado a la notable diferencia de salinidad que existe entre el agua del Atlántico Norte y el agua mediterránea, que presenta valores característicos de 36.1 y 38.4 (en la escala práctica de salinidad de 1978, o PSS78), respectivamente.

En el Mediterráneo, la entrada de la onda de marea proveniente del Atlántico, a pesar de que es fuertemente reflejada (~ 94%) a la entrada del estrecho de Gibraltar, tiene una contribución integrada de cerca del 10% a la onda de marea observada dentro del mar Mediterráneo (*Candela, 1991*). En el estrecho la mayor parte del flujo de marea (~ 92%) es barotrópico, pero una clara marea baroclínica es discernible a partir de las observaciones. La correlación entre corrientes de marea y variaciones de profundidad de la interfase localizada a 150 m de profundidad aproximadamente (véase Figura 1) que separa las aguas

Mediterráneas y las Atlánticas en el umbral principal del estrecho de Gibraltar representa más de 1/3 del transporte medio de volumen en cada capa (Candela, 1991).

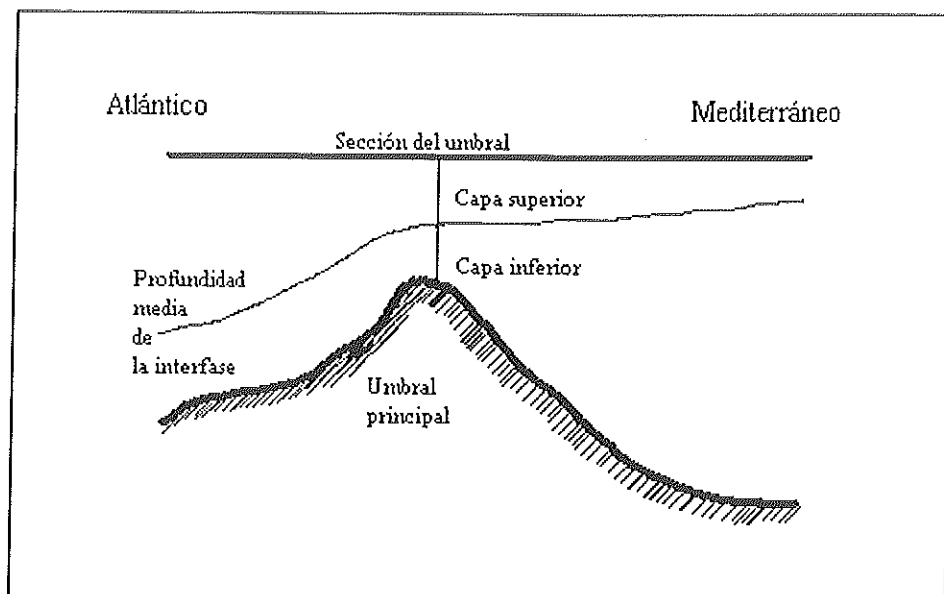


Figura 1.- Esquema de la sección vertical a lo largo del estrecho de Gibraltar, en la zona del umbral de Camarinal que indica el perfil de la profundidad media de la interfase (~150 m en el umbral) que separa el agua atlántica en la capa superior del agua mediterránea en la capa inferior.

Candela y Winant (1990) encontraron que dentro del estrecho de Gibraltar la marea es principalmente semidiurna; en su trabajo se observa que en promedio el 96% de la presión en el fondo y el 74% de la variabilidad de la corriente están contenidas en la banda semidiurna (2 cpd). La estructura de la componente M_2 es complicada pero es explicada en términos de los balances de momentum realizados a lo largo y a lo ancho del estrecho. A lo

largo del estrecho, el gradiente de presión esta balanceado principalmente por la aceleración del flujo, aunque la fricción puede ser de magnitud apreciable, correspondiendo a una escala de decaimiento de 3 a 16 horas. A lo ancho del estrecho el balance de momentum es principalmente geostrófico, pero se requieren mejores observaciones para explicar los términos residuales. Las observaciones disponibles (*Candela y Winant, 1990*) indican que la marea M_2 no tiene un flujo de energía neto a través del estrecho. En el umbral (zona marcada con un triángulo en la Figura 3), el transporte de volumen por marea en la capa superior (con un espesor de aproximadamente 130m) excede al correspondiente para la capa inferior (con aproximadamente 150m de espesor) en un factor cercano a 2. En el extremo este del estrecho, entre Algeciras y Ceuta (Figura 3), el transporte por marea es mayor en la capa inferior (Figura 1). Este aparente cambio en la localización del transporte máximo por marea es explicado en términos de la cinemática de la interfase entre las aguas Atlánticas y Mediterráneas (*Candela y Winant, 1990*).

Utilizando datos provenientes de mediciones con corrientímetro y CTD tomadas durante el experimento de Gibraltar 1985-1986, Bruno *et al.* (1999) aclara aspectos de la estructura vertical de las componentes de marea M_2 y S_2 en el umbral de Camarinal (zona marcada con un triangulo en la Figura 3). Es demostrado que, de acuerdo con la inferencia hecha a partir de las observaciones, estas corrientes son importantes en las frecuencias semidiurnas M_2 y S_2 . Se revelan ciertas discrepancias cuantitativas entre los valores de las velocidades de corriente de marea cuyo análisis requiere de nuevos datos de corrientímetro con una resolución vertical mas fina que la de su trabajo, ya que solamente contó con los

datos de tres corrientímetros localizados uno a 123 m en el primer periodo de mediciones y los dos restantes a 120 m y 90 m durante el segundo periodo de mediciones. La razón de muestreo que Bruno utilizó fue de 1 hora, la profundidad de la zona es de 290 m.

Mediante el uso de un ADCP anclado en el fondo del umbral de Camarinal en el estrecho de Gibraltar, Tsimplis y Bryden (2000) definen la interfase de intercambio entre el agua mediterránea y el agua Atlántica como la profundidad de máximo corte vertical en el perfil de la velocidad de la corriente horizontal, localizando esta a 147 m (ver Figura 1). La capa situada por arriba de la profundidad de la interfase correspondiente al agua entrante del Atlántico norte, presentó un transporte de 0.78 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), mientras que el agua Mediterránea saliente situada por debajo de la profundidad de la interfase proporciona valores de -0.67 Sv . La lectura de la corriente medida por el ADCP más cercana a este aparato (270 m) se compara bien con un corrientímetro convencional situado por debajo del mismo (272 m).

La diferencia del nivel del mar a lo ancho del estrecho (transversal) está bien correlacionada con las estimaciones de flujo de volumen entrante del Atlántico y puede explicar el 57% de la variabilidad de los registros de transporte. La suma de oscilaciones de frecuencias de las mareas quincenal (M_{5f}) y mensual (M_m) mejora el porcentaje de la varianza explicada siendo entonces de 78%. El flujo saliente del Mediterráneo estuvo más correlacionado con la diferencia de nivel del mar a lo largo del estrecho la cual explica solo el 10% de la variabilidad de transporte registrada. Nuevamente la suma de los ciclos M_{5f} y

M_m mejora el porcentaje de varianza explicada a un 37%. La componente local del viento a lo largo del estrecho esta correlacionada significativamente con el flujo hacia el interior del Atlántico y la diferencia en el nivel del mar a lo ancho del estrecho (*Tsimplis y Bryden, 2000*).

De Octubre de 1995 a Abril de 1996 fueron sumergidas tres líneas de anclaje en la entrada este del estrecho de Gibraltar (*García et al., 1999*). La cobertura espacial del arreglo de anclajes permite una buena descripción de las mareas ya que fueron colocados en línea perpendicular a la costa, uno en la parte norte a 4 km de la costa de España, otro en el centro del estrecho (8 km al sur de España) y un último en el extremo sur (14 km al sur de España). Las mareas exhiben una naturaleza semidiurna dominante y una estructura baroclínica notable. Las corrientes de marea en la capa superior (arriba de los 130 m de profundidad) son irregulares y demasiado débiles para revertir el flujo medio en esta capa, que se mantiene fluyendo hacia el Este. La capa inferior (debajo de los 130 m) se revierte con periodicidad semidiurna debido a la pequeñez del flujo medio y a la apreciable amplitud de la oscilación semidiurna regular de las corrientes de marea en esta capa (*García et al., 1999*).

Tsimplis (2000) utilizó un ADCP anclado en el fondo a una profundidad de 283 m que tomó los datos de dirección y magnitud de la corriente con una resolución vertical de 8 m y una razón de muestreo de 30 minutos para estimar la estructura vertical de las corrientes en el umbral de Camarinal en el estrecho de Gibraltar. En su trabajo fueron examinadas las componentes de marea más importantes; M_2 , S_2 , O_1 , K_1 , M_4 , M_3 , M_{sf} y M_m (Tabla 1). Se encontró que las componentes más energéticas son las semidiurnas, que presentan velocidades a lo largo del estrecho de más de 120 cms^{-1} para M_2 y 48 cm/s para S_2 . Las mareas diurnas tienen velocidades a lo largo del estrecho de $15\text{-}35 \text{ cms}^{-1}$. La componente M_4 se incrementa de 4 cms^{-1} en la capa superior (0 – 130 m) hasta $\sim 15 \text{ cms}^{-1}$ por debajo de los 220 m de profundidad. La componente quincenal M_{sf} alcanza velocidades que exceden los 30 cms^{-1} en la capa superior a los 120 m. La estructura vertical de la señal de marea es complicada, difiere entre mareas diurnas y semidiurnas, y varía entre mareas vivas y muertas. La estructura vertical de sus datos de corriente fue descrita por Tsimplis (2000) usando un modelo analítico de viscosidad turbulenta constante.

Los flujos de marea en el estrecho de Gibraltar son inducidos principalmente por la marea del Atlántico Norte. Como la amplitud de marea en el Atlántico Norte excede de 1m, mientras que en el Mediterráneo la amplitud de la marea es menor a 0.5 m, debe ocurrir una drástica transición en las mareas dentro del estrecho de Gibraltar. Mediciones extensivas llevadas a cabo entre 1960 y 1967 resultaron en la primera descripción de las complicadas características de marea en esta área (Candela y Winant, 1990).

La importancia de este trabajo de tesis de licenciatura reside en el hecho de que se cuenta con cuatro series de mediciones consecutivas, con duración de seis meses cada una, iniciando en Octubre de 1994 y finalizando en Octubre de 1996, obtenidas utilizando un ADCP anclado en el fondo del umbral de Camarinal (Figura 3) a una profundidad de 290 m (Figura 2). Esta cantidad de datos y la resolución de los mismos (resolución espacial de corriente en la vertical de diez metros desde los 275 m de profundidad hasta la superficie, con una razón de muestreo de quince minutos) permiten obtener resultados muy finos acerca de la estructura vertical de las corrientes de marea así como observar si existen variaciones estacionales.

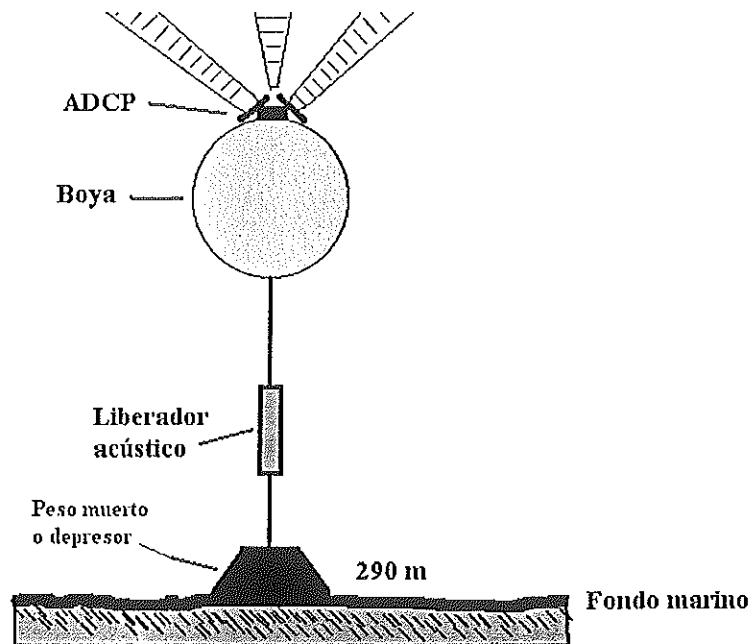


Figura 2. Esquema del anclaje utilizado por el Dr. Julio Candela para hacer las mediciones en el umbral del estrecho de Gibraltar.

I.1. Descripción del área de estudio.

El Estrecho de Gibraltar ($36^{\circ} 15' - 36^{\circ} 45' N$ y $06^{\circ} 05' - 5^{\circ} 15' E$) es la zona geográfica que conecta al mar Mediterráneo con el Océano Atlántico norte. El Estrecho tiene una longitud cercana a los 60 km, y en su sección mas angosta tiene una anchura de 15 km (Figura 3). El umbral de Camarinal (zona marcada con un triángulo en la Figura 3), es un carácter distintivo del estrecho. Este tiene una profundidad máxima de 300 m. Al Este del umbral el canal aumenta su profundidad hasta casi los 600 m en la sección de Tarifa y alcanza los 900 m en la sección comprendida entre Algeciras y Ceuta. Al Oeste del umbral la profundidad llega a ser de 450 m al norte de Tangier, pero mas hacia el Oeste se encuentra un umbral secundario con cerca de 350 m de profundidad, y después la profundidad se incrementa gradualmente hacia el Atlántico Norte.

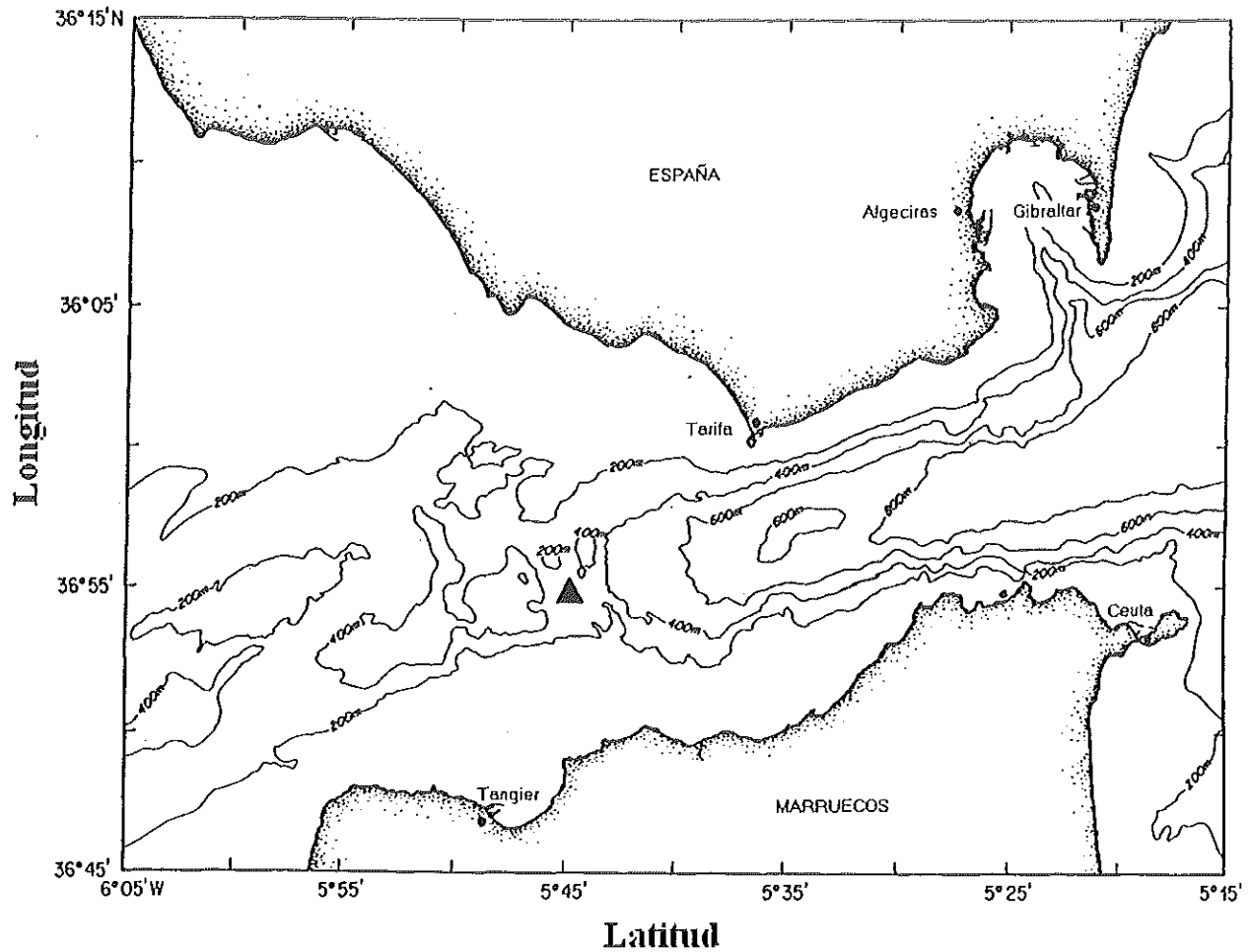


Figura 3.- Mapa del área de estudio: Estrecho de Gibraltar, situado entre España y Marruecos, la zona marcada con un triángulo es la zona del umbral de Camarinal, sitio en donde fue colocado el perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP) en cuatro periodos de mediciones semestrales iniciando en Octubre de 1994 y finalizando en Octubre de 1996. Las líneas continuas son las isóbatas medidas cada 200 metros.

II. OBJETIVO.

Mediante un análisis armónico obtener y describir la estructura vertical de las componentes de la corriente de marea correspondientes a las frecuencias M_2 , N_2 , S_2 , O_1 , K_1 , M_m , M_{sf} y M_4 (Tabla 1).

Tabla 1. Definición, símbolo y periodo de las componentes principales de marea.

| Nombre de la componente de marea | Símbolo | Periodo en horas solares |
|----------------------------------|----------|--------------------------|
| Lunar cuatridiurna | M_4 | 6.21 |
| Lunar tridiurna | M_3 | 8.28 |
| Lunar principal semidiurna | M_2 | 12.42 |
| Elíptica lunar mayor semidiurna | N_2 | 12.66 |
| Solar principal semidiurna | S_2 | 12.00 |
| Lunar principal diurna | O_1 | 25.82 |
| Lunar-solar diurna | K_1 | 23.93 |
| Solar quincenal | M_{sf} | 354.61 |
| Lunar mensual | M_m | 662.25 |

II.1. Objetivos particulares.

a) Discutir las variaciones en la estructura vertical de las corrientes de marea observadas en resultados preliminares entre los cuatro periodos de mediciones.

b) Mediante un modelo analítico discutir la influencia de la viscosidad turbulenta en la distribución de velocidades en la columna de agua.

III. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS Y METODOLOGÍA.

III.1. Aspectos importantes sobre el ADCP.

En la década de los 80's la oceanografía observacional fue revolucionada por la introducción del perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP). Este instrumento utiliza el sonido para medir la velocidad de la corriente empleando el efecto Doppler el cual establece que la frecuencia de vibración medida es afectada por el movimiento relativo entre la fuente de vibración y el punto de observación (*The open University, 2001*). En el océano se encuentran millones de pequeñas partículas en suspensión (sedimento, burbujas de gas, plancton, etc.) las cuales dispersan el sonido. El ADCP emite el sonido a una frecuencia determinada y "escucha" el eco reflejado por los dispersores de sonido.

La mayor parte del sonido emitido continua su camino hacia el frente, pero la parte de este que es reflejado por las partículas es dispersado en todas direcciones (Figura 4) y tiene ahora una frecuencia modificada por el efecto Doppler, este efecto se refiere al cambio aparente en la frecuencia de una fuente de sonido cuando hay un movimiento relativo entre la fuente sonora y un oyente.

Esta modificación Doppler de la frecuencia (tono) del sonido recibido por el ADCP es proporcional a la velocidad de la corriente, la cual puede entonces ser determinada de la forma determinada en la ecuación (3.1).

$$f_0 = \frac{Vf_s}{V - v_s} \quad (3.1)$$

donde V es la velocidad del sonido, v_s es la velocidad de la fuente, f_0 es la frecuencia escuchada por un oyente inmóvil (en este caso el ADCP), f_s es la frecuencia de la fuente en movimiento. Las frecuencias de sonido más comúnmente usadas se encuentran entre ~70 kHz y ~150 kHz esta es la frecuencia que envía el ADCP (f_s en la ecuación 3.1).

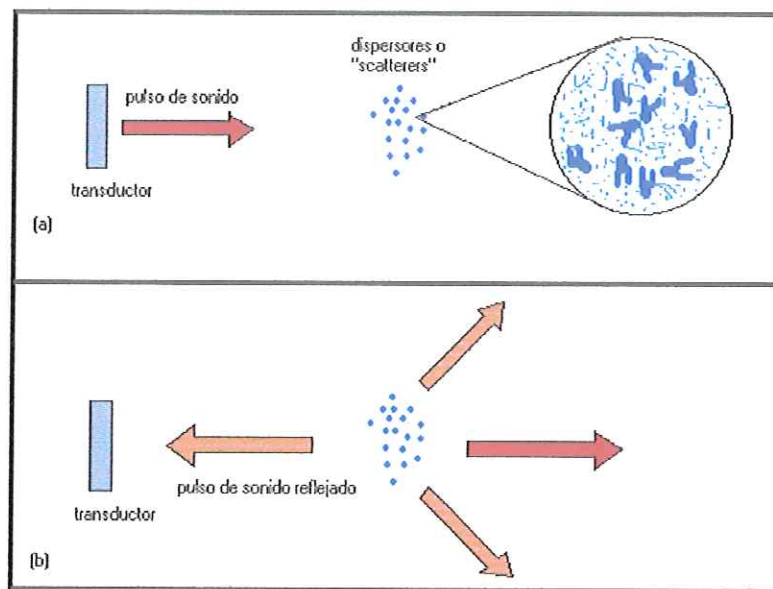


Figura 4. Diagramas esquemáticos que muestran como trabaja el perfilador de corrientes acústico Doppler. (a) El pulso de sonido es emitido por un transductor (usualmente uno de cuatro colocados en ángulo recto uno del otro). (b) El sonido es dispersado en todas direcciones por las pequeñas partículas y plancton suspendido en el agua y los ecos son modulados por el efecto Doppler de acuerdo a la dirección del movimiento de los dispersores. Si, por ejemplo, el parche se está moviendo alejándose del ADCP, el pulso de sonido reflejado será modulado hacia longitudes de onda más largas y frecuencias menores. (Tomado de: *The open university*, 2001).

Se ha vuelto práctica de rutina el empleo de ADCP's montados en el casco del barco para realizar mediciones continuas de velocidades de corrientes a profundidades de varios cientos de metros, mientras la embarcación se encuentra navegando. La gran ventaja de los ADCP's es que los perfiles y las secciones de corriente pueden ser obtenidas muy rápidamente, de tal forma que la cantidad de datos que puede adquirirse es varios ordenes de magnitud mayor que la que sería posible obtener por métodos convencionales (i.e. corrientímetros, boyas de deriva, etc.).

En las investigaciones de oceanografía física, se supone generalmente que los dispersores planctónicos se encuentran flotando pasivamente en el agua, y en promedio se mueven a la misma velocidad que el agua, es por esto que el ADCP se ha vuelto cada vez mas útil en investigaciones tanto biológicas como físicas.

III.2- Datos disponibles.

Para la realización de este trabajo de tesis se cuenta con cuatro series de mediciones continuas de velocidad y dirección de corriente provenientes de un ADCP anclado en el fondo (Figura 2) (Cada una correspondiente a un periodo de seis meses), con una resolución espacial de diez metros y una resolución temporal de quince minutos, por ejemplo; durante el periodo de Abril de 1995 la profundidad de medición mas cercana al fondo fue de 275 m, se obtuvieron 27 datos de magnitud y dirección de la corriente (uno a cada diez metros) cada quince minutos durante seis meses para esa serie en particular, al

término de este periodo, en Octubre de 1995, el anclaje fue recuperado e inmediatamente después se sumergió en el mismo lugar un nuevo arreglo de ADCP.

Las series con las que se trabajó son: S2, que comprende el periodo de Octubre de 1994 a Abril de 1995, le sigue la serie S3 que contiene las mediciones comprendidas entre Abril de 1995 y Octubre del mismo año, a continuación la serie S4 con observaciones del lapso que inició en Octubre de 1995 y finalizó en Abril de 1996, por último, la serie S5 que inició en Abril de 1996 finalizando en Octubre de ese mismo año.

III.3. Tratamiento de los datos.

Los datos en su forma cruda consisten en mediciones de velocidad en la dirección Este-Oeste (componente u) y en la dirección Norte-Sur (componente v), estos datos fueron filtrados utilizando un filtro de paso bajo para eliminar altas frecuencias (periodos menores a una hora) de la señal, los valores correspondientes a cada hora fueron seleccionados por interpolación lineal entre los dos datos mas cercanos a la hora exacta.

Una vez obtenidos los datos horarios de las componentes u y v se procedió a hacer un análisis armónico de las corrientes de marea para obtener las elipses correspondientes a las componentes de marea M_2 , N_2 , S_2 , O_1 , K_1 , M_m , M_{sf} y M_4 (véase Tabla 1). A continuación se describe detalladamente el método que se ha seguido en este trabajo y que fue desarrollado por Godin (1988).

III.3.1. Representación armónica y espectral de las corrientes de marea.

El desplazamiento de las partículas de fluido dentro de un cuerpo de agua se representa con un vector tridimensional. Se puede usar un marco de referencia rectangular y tomar el plano paralelo a la superficie del agua o a algún otro plano de nivel (por ejemplo: fondo regular plano, isoterma, isohalina, etc.) como referencia. La componente vertical del desplazamiento puede ser medida con la ayuda de un sensor de presión o algún instrumento que mida el nivel del mar (mareógrafo) mientras que la componente horizontal es medida por medio de corrientímetros o como en este caso, con un ADCP anclado en el fondo. Esta componente horizontal es representada con un vector bidimensional y puede ser tratada de forma separada a la componente vertical. Si se mide el desplazamiento horizontal en un punto dado durante una unidad de tiempo, entonces se tiene una observación de corriente. Las observaciones de la corriente durante un intervalo razonable de tiempo revelarán oscilaciones en la amplitud y dirección de la corriente; estas oscilaciones son debidas a las componentes de marea características de la zona de estudio.

El método de procesamiento de los datos de corrientes se realizó de la manera propuesta por Godin (1988). En un marco cartesiano donde el vector unitario \hat{h}_z está dirigido en la dirección vertical, \hat{i}_x apunta hacia el Este y el vector \hat{j}_y hacia el Norte (Figura 3.1).

El vector \mathbf{V} en el plano xy está dado como:

$$\mathbf{V} = w = u\hat{i}_x + v\hat{j}_y$$

donde w es la corriente medida en un punto (x, y, z) en el interior de un fluido al tiempo t . Esta velocidad tiene componentes u y v a lo largo de las direcciones x y y . El valor de w en cualquier punto depende de su posición (x, y, z) y podemos representarlo en un plano complejo como:

$$w = u + iv; \quad \text{con } i = \sqrt{-1}$$

donde: $u = u(x, y, z, t)$ y $v = v(x, y, z, t)$.

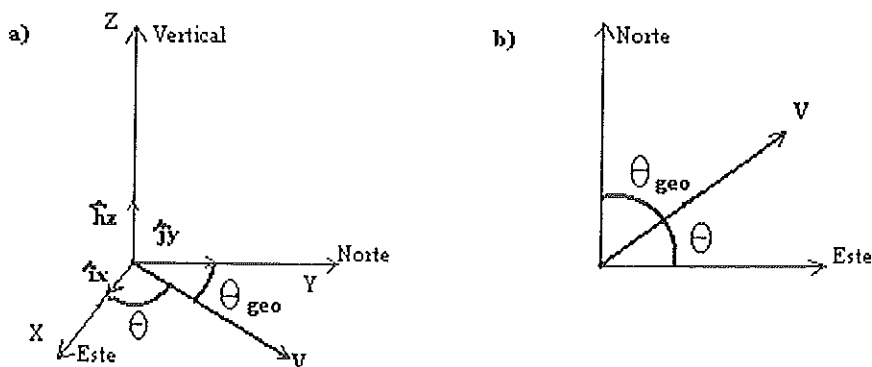


Figura 3.1 a) Corriente de marea \mathbf{V} en el marco de referencia local ENZ (este, norte y hacia arriba), b) Vector de corriente de marea \mathbf{V} en el plano x, y .

Las corrientes son registradas en coordenadas geográficas en las que los ángulos son medidos en el sentido de las manecillas del reloj teniendo como cero (0°) el Norte geográfico; las mediciones en un punto toman la forma $[V(t), \theta_{\text{geo}}(t)]$ proporcionando la velocidad y la dirección geográfica de la corriente (Figura 3.1). En matemáticas los ángulos son medidos en contra de las manecillas del reloj a partir del eje x (desde la dirección Este). Antes de iniciar el procesamiento de los registros de corriente es necesario describir estos datos en una forma que sea apropiada para hacer cálculos. El procedimiento más simple es buscar las componentes $V \cos \theta_{\text{geo}}$ y $V \sin \theta_{\text{geo}}$, hacer una transformación de orientación geográfica a orientación trigonométrica de la siguiente manera: $\theta = -\theta_{\text{geo}} + 90^\circ$, donde θ es la dirección trigonométrica, para luego reordenarlos como:

$$(V \sin \theta, V \cos \theta) = (u, v)$$

esto se hace para introducir los vectores como las coordenadas x, y de la corriente en el formato matemático adecuado.

Una vez hecho esto se procede con el análisis. Todos los resultados que se obtendrán estarán dados en los términos aceptados por convención, entonces, desde este punto en adelante se trabajará estrictamente con las orientaciones matemáticas.

Podemos aplicar una representación armónica para u y v de la misma manera como se hace para el nivel del mar $z(t)$, se definen:

$$u(t) = u_0 + \sum_{k=1}^N u_k \cos(\sigma_k t - b_k) + n_x(t) \quad (3.1)$$

$$v(t) = v_0 + \sum_{k=1}^N v_k \cos(\sigma_k t - c_k) + n_y(t) \quad (3.2)$$

donde σ_k es la frecuencia de la marea deseada; n_x , n_y son las señales no resueltas (fluctuaciones de menor o mayor frecuencia que las elegidas en nuestro análisis) en las direcciones x , y , (u_k, v_k) y (b_k, c_k) son la amplitud y fase de la componente de marea "k".

También podemos describir la corriente de marea como una representación espectral:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} u_k' \cos(\sigma_k t - b_k') \quad (3.3)$$

$$v(t) = \sum_{k=0}^{\infty} v_k' \cos(\sigma_k t - c_k') \quad (3.4)$$

donde $\sigma_k = 2\pi k/T$, $2T$ es el intervalo de observaciones, (u_k', v_k') y (b_k', c_k') son la amplitud y fase de la componente de marea "k".

Podemos escribir ambas representaciones (3.1, 3.2, 3.3 y 3.4) formalmente como:

$$u(t) = \sum_{k=0} u_k \cos(\sigma_k t - b_k) \quad (3.5)$$

$$v(t) = \sum_{k=0} v_k \cos(\sigma_k t - c_k) \quad (3.6)$$

la sumatoria está dada de 0 a N en una representación armónica y va de 0 a ∞ en la representación espectral, con $b_0 = c_0 = 0$; las σ_k 's representan frecuencias específicas en una representación armónica mientras que en la representación espectral son frecuencias equidistantes.

Podemos escribir un vector bidimensional como:

$$w = u\hat{x} + v\hat{y} = u + iv, \quad \text{con } i = \sqrt{-1}$$

Usando la identidad de Euler:

$$\cos\theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2},$$

las expresiones (3.5) y (3.6) se reducen a:

$$w(t) = \sum_{k=-P}^P w_k e^{i\sigma_k t} \quad (3.7)$$

donde $P = N$ ó ∞ dependiendo de si la representación es armónica o espectral, $\sigma_{-k} = -\sigma_k$, $w_k = \frac{1}{2} (u_k e^{-ib_k} + iv_k e^{-ic_k})$, y, $w_{-k} = \frac{1}{2} (u_k e^{ib_k} + iv_k e^{ic_k})$, la ecuación (3.7) es conocida como la representación polarizada de las corrientes. La exponencial $e^{i\sigma_k t}$ se interpreta como un operador que rota w_k hacia la izquierda o hacia la derecha del eje x en un factor $\sigma_k t$ dependiendo del signo de σ_k (Figura 3.2a).

El vector $e^{i\sigma_k t}$ tiene magnitud 1; su posición al tiempo t_0 es tal que su orientación es $\sigma_k t_0$ con respecto al Este.

Definimos ahora:

$$w_k = |w_k| e^{ia_k} \qquad w_{-k} = |w_{-k}| e^{ia_k}$$

el producto $w_k e^{i\sigma_k t}$ está constituido por un vector fijo w_k , y por un vector rotante $e^{i\sigma_k t}$; debe considerarse que el vector resultante rota hacia la izquierda del eje x en un factor $\sigma_k t_0$ durante el intervalo de tiempo $t = 0$ a t_0 (figura 3.2b), su magnitud $|w_k|$ no cambia pero su

orientación original ahora será $\alpha_k + \sigma_k t_0$. La componente de la corriente correspondiente a la frecuencia σ_k es la suma de los vectores:

$$w_k(t) = w_k e^{i\sigma_k t} + w_{-k} e^{i\sigma_{-k} t}$$

representado en la Figura 3.3. Esta es la componente armónica o espectral para la frecuencia σ_k de la corriente $w(t)$.

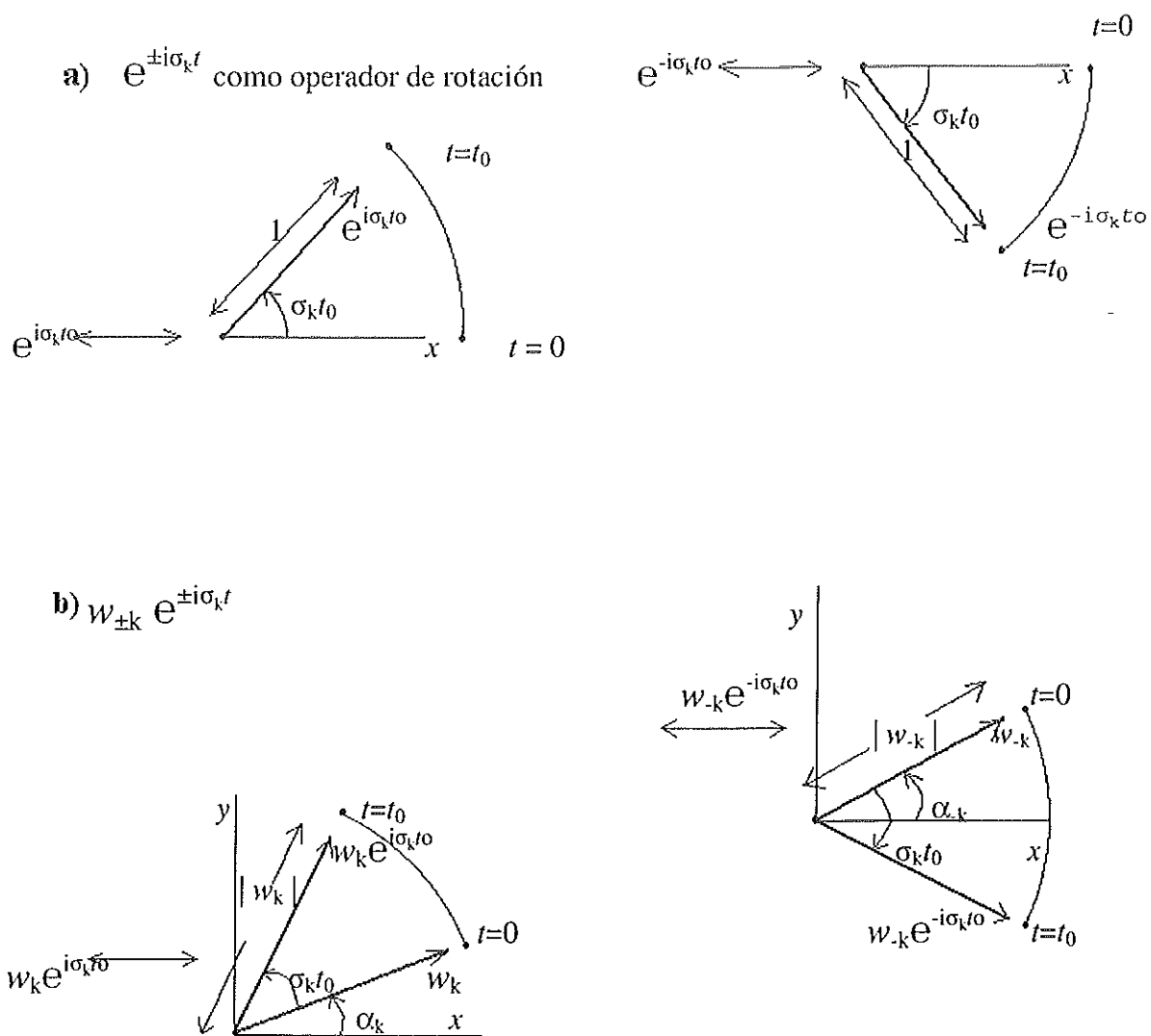


Figura 3.2. Interpretaciones geométricas de los operadores de rotación a) $e^{\pm i\sigma_k t}$ y b) $w_{\pm k} e^{\pm i\sigma_k t}$, α_k es el ángulo de la k -ésima componente de marea comprendido entre el vector y el eje x .

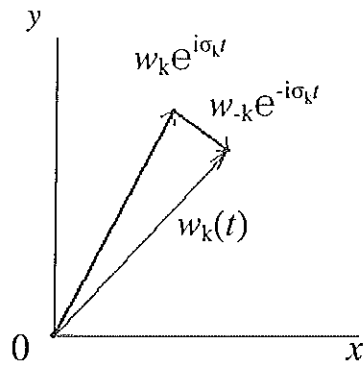


Figura 3.3. Interpretación geométrica de la componente de corriente de marea $w_k(t)$.

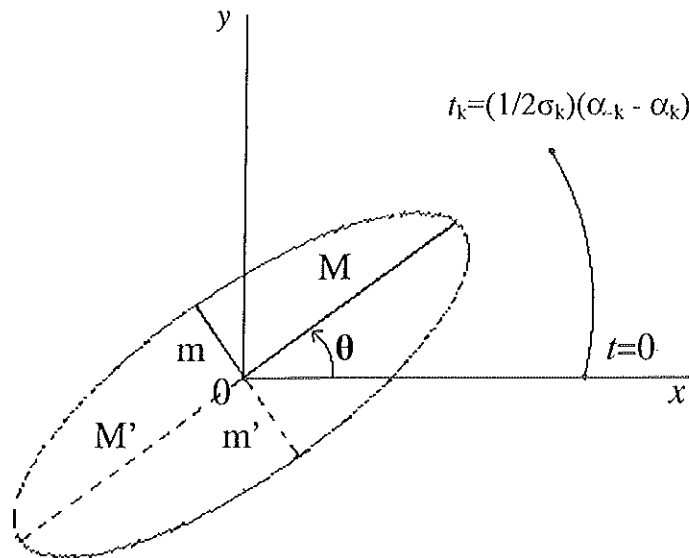


Figura 3.4. Elipse componente de la corriente de marea las variables se encuentran definidas en el texto.

III.3.2. Elipse componente.

Existe una frecuencia específica de marea σ_k correspondiente al periodo: $T_k = 2\pi/\sigma_k$. Durante un periodo de la marea, $e^{i\sigma_k t}$ y $e^{-i\sigma_k t}$ describe un círculo completo; la resultante esta dada por $w_k(t)$ y es una elipse que se conoce como elipse componente de marea que tiene los siguientes elementos:

$$\text{semieje mayor: } M = |w_k| + |w_{-k}|, \quad \text{semieje menor: } m = |w_k| - |w_{-k}|,$$

$$\text{inclinación: } \theta = \frac{1}{2} (\alpha_k + \alpha_{-k}), \quad \text{fase: } \sigma_k t_k = \frac{1}{2} (\alpha_{-k} - \alpha_k).$$

los cuales se encuentran ilustrados en la Figura 3.4. La componente armónica o espectral de la corriente a cualquier frecuencia σ_k siempre traza una elipse durante su periodo correspondiente y la corriente total consiste en la suma de todas las elipses componentes, lo cual queda expresado como:

$$w(t) = \sum_{k=0}^N w_k(t)$$

Se puede demostrar que $w_k(t)$ traza una elipse de la manera siguiente:

$$w_k(t) = |w_k| e^{i(\sigma_k t + \alpha_k)} + |w_{-k}| e^{i(\sigma_k t + \alpha_{-k})}$$

la cual puede escribirse como: $w_k(t) = E(t) e^{1/2i(\alpha_k - \alpha_{-k})}$

donde:

$$E(t) = \{ [|w_k| + |w_{-k}|] \cos[\sigma_k t - 1/2(\alpha_{-k} - \alpha_k)] + i [|w_k| - |w_{-k}|] \sin[\sigma_k t - 1/2(\alpha_{-k} - \alpha_k)] \}$$

el término exponencial $e^{1/2i(\alpha_k + \alpha_{-k})}$ es un operador que rota al vector $E(t)$ en un ángulo $1/2(\alpha_k + \alpha_{-k}) = \theta$. La figura trazada por $E(t)$ satisface la ecuación siguiente que es la ecuación de una elipse con semiejes mayor y menor M y m respectivamente:

$$\frac{x^2}{M^2} + \frac{y^2}{m^2} = 1$$

en donde hemos definido: $x = M \cos\varphi_k$, $y = m \sin\varphi_k$, $\varphi_k = \sigma_k t - (\alpha_{-k} - \alpha_k)$.

III.3.3. Características de la elipse componente.

Las partículas dentro del fluido de la corriente de marea rotarán en el sentido determinado por el signo del semieje menor “m” : si $m > 0$, la k-ésima componente rotará en sentido ciclónico (contrario a las manecillas del reloj), si $m < 0$, entonces la k-ésima componente rotará en sentido anticiclónico (con las manecillas del reloj). Esto puede verificarse sustituyendo en $E(t)$ valores consecutivos de t en (3.7). En la naturaleza, las componentes pueden rotar tanto hacia la derecha como hacia la izquierda del eje x (Figura 4.5).

Puede darse el caso de que el semieje menor “m” sea igual a cero, esto implica que $|\omega_k| = |\omega_{.k}|$, lo cuál significa que la k-ésima componente se degenera convirtiéndose en una línea recta orientada en la dirección θ a lo largo de la cuál la corriente oscila; el sentido de rotación en este caso no tiene ningún significado (Figura 4.5).

Si $|\omega_{.k}| = 0$ ó $|\omega_k| = 0$, entonces el semieje mayor será de la misma magnitud que el semieje menor, esto es; $M = \pm m$, en este caso la elipse componente se convierte en un círculo (Figura 4.5), la orientación θ pierde su significado. $m > 0$ cuando $|\omega_{.k}| = 0$ y la componente rotará en sentido ciclónico. $m < 0$ cuando $|\omega_k| = 0$ y la componente rota anticiclónicamente.

Estas formas especiales de la elipse componente se encuentran ilustradas en la Figura 4.5.

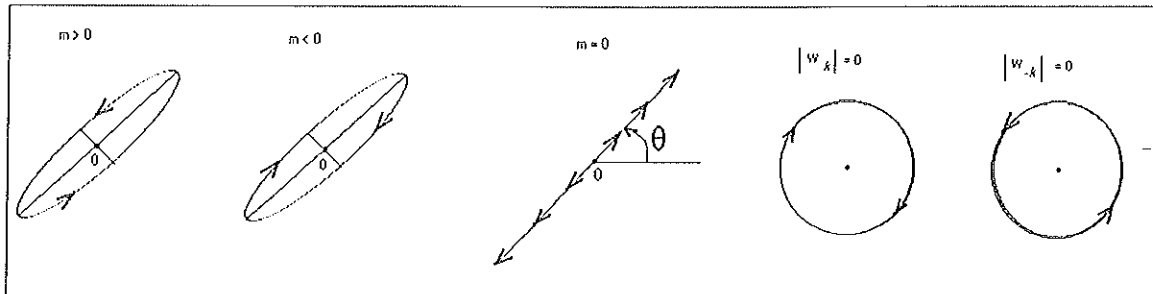


Figura 4.5. Dirección de rotación y formas especiales de la elipse componente.

Las corrientes de marea, en ríos y estrechos normalmente fluyen en línea recta dentro de casi la totalidad de la columna de agua, sin embargo adquieren una forma más elíptica cerca del fondo donde la fricción se vuelve importante, lo cual afecta la estructura vertical de la corriente de marea. Cuando la onda de marea se propaga como una onda de Kelvin las elipses de las componentes también adquieren forma rectilínea.

Cuando se trabaja con elipses componentes se deben enfrentar ciertas dificultades prácticas. Se encontrarán puntos donde aparecen cambios abruptos en las orientaciones y fases resueltas, la razón de esto es que existen dos representaciones elípticas completamente equivalentes. En la Figura (3.4) se observa que podemos definir una elipse usando el semieje mayor M y el semieje menor m indicados por un par de líneas continuas

perpendiculares o con el semieje mayor M' y el semieje menor m' conformados por el otro par de líneas ortogonales (líneas discontinuas). En la segunda representación:

$$\begin{aligned} M' &= M & m' &= m \\ \theta &= \theta' \pm \pi \text{ radianes} & \sigma_k t_k &= \sigma_k t_k' \pm \pi \text{ radianes} \end{aligned}$$

Por lo tanto la transformación:

$$\begin{aligned} M' &\rightarrow M & m' &\rightarrow m & (3.8) \\ \theta &\rightarrow \theta' \pm \pi & \sigma_k t_k &\rightarrow \sigma_k t_k' \pm \pi \end{aligned}$$

no afecta a la elipse componente. Esto significa que la elipse componente es invariante a la transformación (3.8). Por ejemplo, en un punto de medición, podemos obtener los siguientes resultados a una frecuencia σ_k :

$$M = 32.5 \text{ cm/s}, \quad m = 4.2 \text{ cm/s}, \quad \theta = 47^\circ, \quad \sigma_k t_k = 57^\circ$$

mientras que en un punto cercano tenemos:

$$M = 37.0 \text{ cm/s}, \quad m = 3.7 \text{ cm/s}, \quad \theta = 225^\circ, \quad \sigma_k t_k = 240^\circ$$

Aquí encontramos un cambio abrupto en la orientación y la fase lo cual crea un problema al presentar los resultados de una secuencia de análisis. Usando la transformación (3.8) podemos reescribir los resultados del segundo análisis como:

$$M = 37.0 \text{ cm/s}, \quad m = 3.7 \text{ cm/s}, \quad \theta = 45^\circ, \quad \sigma_k t_k = 60^\circ$$

O bien, los resultados del primer análisis:

$$M = 32.5 \text{ cm/s}, \quad m = 4.2 \text{ cm/s}, \quad \theta = 227^\circ, \quad \sigma_{ktk} = 237^\circ$$

podemos cambiar tanto θ como σ_{ktk} para proteger la no variancia de la solución. La elección de las cantidades de cualquiera de las dos presentaciones depende de la decisión que tomemos respecto al signo del flujo y el reflujos, en este trabajo tomamos el signo positivo hacia dentro del mar Mediterráneo debido a que el flujo promedio de la corriente de marea es en esta dirección.

III.3.4. Procesamiento de los datos.

El ADCP proporciona directamente los datos de velocidad de corriente en las componentes horizontales u y v , para conocer la amplitud y la fase de las componentes de marea deseadas que en este caso son M_4 , M_2 , N_2 , S_2 , K_1 , O_1 , M_m y M_{sf} (Tabla 1) se realiza un análisis armónico que consiste en determinar las constantes armónicas a_k , b_k y c_k , c_k que son la amplitud y fase de las componentes de velocidad horizontal u y v expresadas en las ecuaciones (3.1) y (3.2).

Para obtener los valores de amplitud y fase de cada una de las componentes de la corriente de marea se efectuó un ajuste por cuadrados mínimos, para este fin se empleó la subrutina de MATLAB llamada **tide.m** desarrollada en el instituto oceanográfico de Woods Hole (WHOI) por Steve Lenz y Bob Beardsley, esta subrutina se encuentra en la siguiente dirección de internet (http://www.ocgy.ubc.ca/~rich/t_tide/t_tide_v0.98.zip).

El programa **tide.m** de MATLAB funciona de la siguiente manera: Primero debe leerse el archivo de datos por MATLAB para que sea incluido en el espacio de trabajo llamándolo con el comando **load archivo**, luego se utiliza la subrutina **stime.m** que transforma la fecha de los datos que esta dada en días julianos a año, mes, día y hora , esto debe hacerse para utilizar la fase con respecto al meridiano de Greenwich. A continuación se declaran las variables

stime: fecha [año,mes,día,hora],

dt: intervalo de muestreo [una hora],

lat: latitud del área de estudio [36°Norte],

ray: criterio de Rayleigh que es el criterio que se utiliza para solo incluir en el análisis a aquellas componentes que pueden ser resueltas entre si de acuerdo a la longitud de la serie de observaciones disponible (*Godin.,1972*) (se utilizó el criterio $ray = 1$ para todas las series).

Por último se declara la variable:

xin: contiene el vector $\psi = u+iv$, que es el vector de corriente, este se introduce al MATLAB como la suma de la columna que contiene a u mas i ($i = \sqrt{-1}$) multiplicado por la columna que contiene los datos de la velocidad v .

Utilizando la notación de MATLAB, las variables se introducen a la subrutina **tide.m** de la siguiente manera:

$$[\text{nameu}, \text{fu}, \text{tidecon}, \text{xout}] = \text{tide}(\text{xin}, \text{dt}, \text{stime}, \text{lat}, \text{ray})$$

donde **[nameu, fu, tidecon, xout]** es la información de salida de la función **tide.m** y significan:

nameu: lista de constituyentes de marea utilizadas (M_2 , S_2 , O_1 , etc.) el programa tiene posibilidad de incluir 146 frecuencias diferentes de marea (constituyentes),

fu: frecuencia de la constituyente de marea (ciclos/hora),

tidecon: [fmaj, emaj, fmin, emin, finc, einc, pha, epha] para **xin** vectorial (que es nuestro caso), donde:

fmaj, **fmin**; son los semiejes mayor y menor, respectivamente, componentes de la elipse de corriente (están dados en las mismas unidades que **xin** (m/s)),

emaj, **emin**; intervalos de confianza al 95% para **fmaj** y **fmin**,

finc; orientación de la elipse (grados),

einc; intervalos de confianza al 95% para **finc**,

pha; fase de las constiyentes de marea (grados relativos al meridiano de Greenwich),

epha; intervalos de confianza al 95% para **pha**, y por último,

xout; que es la predicción de marea.

El programa principal **tide.m** utiliza a su vez otras subrutinas, las cuales son:

constituents.m; introduce al ambiente de trabajo las 146 constituyentes , su frecuencia y su constituyente de comparación (de acuerdo al criterio de Rayleigh),

find_const.m; localiza el constituyente apropiado en la lista de 146 diferentes constituyentes de marea,

vuf.m; calcula la corrección a la fase para que esta sea relativa al meridiano de Greenwich, así como también hace las correcciones para la amplitud nodal. Esta solamente es utilizada si **stime** y **lat** son dadas,

errcoef; calcula los errores en los coeficientes de los senos y cosenos y por último,

errell; calcula los errores en los parámetros de la elipse.

IV RESULTADOS.

No obstante que en la sección III.3.2 se han descrito las características de la elipse componente de la corriente de marea, es conveniente, para propósitos comparativos presentar los resultados en términos de perfiles de semieje mayor “M”, semieje menor “m”, orientación y fase de cada una de las elipses componentes de marea, ya que de esta manera se puede observar su estructura vertical.

IV.1.1. Componentes semidiurnas.

IV.1.1.1. Componente M_2 .

La distribución vertical de la componente M_2 se muestra en la Figura 5.1. La velocidad en el semieje mayor varía de los 80 cms^{-1} a 250 m de profundidad en la serie S3 alcanzando su valor máximo de 124 cms^{-1} a 176 m en el registro de la serie S5 (Tabla 2). Se observa que en las cuatro series de mediciones, la velocidad en el semieje mayor se mantiene casi constante entre los 45 y 120 m, a partir de esta profundidad, que concuerda con la profundidad de la interfase mencionada anteriormente, la velocidad comienza a aumentar alcanzando sus valores máximos entre los 160 y 190 m para luego disminuir hacia el fondo.

La distribución de velocidades es muy similar en las cuatro series de datos, sin embargo existe diferencia en la magnitud de estos valores, siendo la serie S3 la que presenta las velocidades mas bajas y S4 las mas altas.

Con respecto al este semieje menor se observan variaciones en la velocidad que van de -9.02 cms^{-1} a 195 m de profundidad en el registro de la serie S3, hasta el valor máximo de 5.13 cms^{-1} a 105 m registrado dentro de la misma serie (Fig. 5.1). La distribución de velocidades está dada de la siguiente forma; entre los 45 y 140 m la velocidad aumenta ligeramente, a partir de los 140 m se observa que la corriente rota en sentido anticiclónico adquiriendo valores negativos alcanzando el mínimo aproximadamente a los 200 m de profundidad para luego rotar de nuevo en sentido ciclónico a medida que se acerca al fondo. El comportamiento de las cuatro series es muy similar, la mayor variabilidad la presenta la serie S3. Es interesante observar que las velocidades máximas de las series de invierno; S2 y S4 se encuentran cerca del fondo.

Los valores del semieje mayor son mucho mayores a los del semieje menor de la elipse componente de corriente de marea, esto indica que dentro del estrecho de Gibraltar la corriente de marea fluye de manera casi rectilínea a lo largo del eje este-oeste (eje x) (véase también Figura 4.5).

La orientación varía de forma casi lineal desde los $\sim 5^\circ$ a 40 m de profundidad aumentando hacia el fondo hasta un valor máximo de 42° a 256 m en la serie S5. El comportamiento es muy similar para las cuatro series.

La fase permanece prácticamente constante (140°) dentro de los primeros 100 m, aumentando ligeramente hasta alcanzar el máximo valor registrado; 161° a 150 m de profundidad, para finalmente disminuir hacia el fondo registrando un valor mínimo promedio de 125° a 250 m para las series S2, S4 y S5, mientras que para S3 este mínimo es de 78.31° a 275 m.

Las mayores velocidades de la corriente de marea se encuentran dentro de esta componente; M_2 . Esta observación concuerda con lo establecido por *Bryden et al.* (1994) realizados en la zona, donde se demostró que la onda de marea que entra por el estrecho de Gibraltar representa el principal forzamiento de la marea que se observa en el mar Mediterráneo.

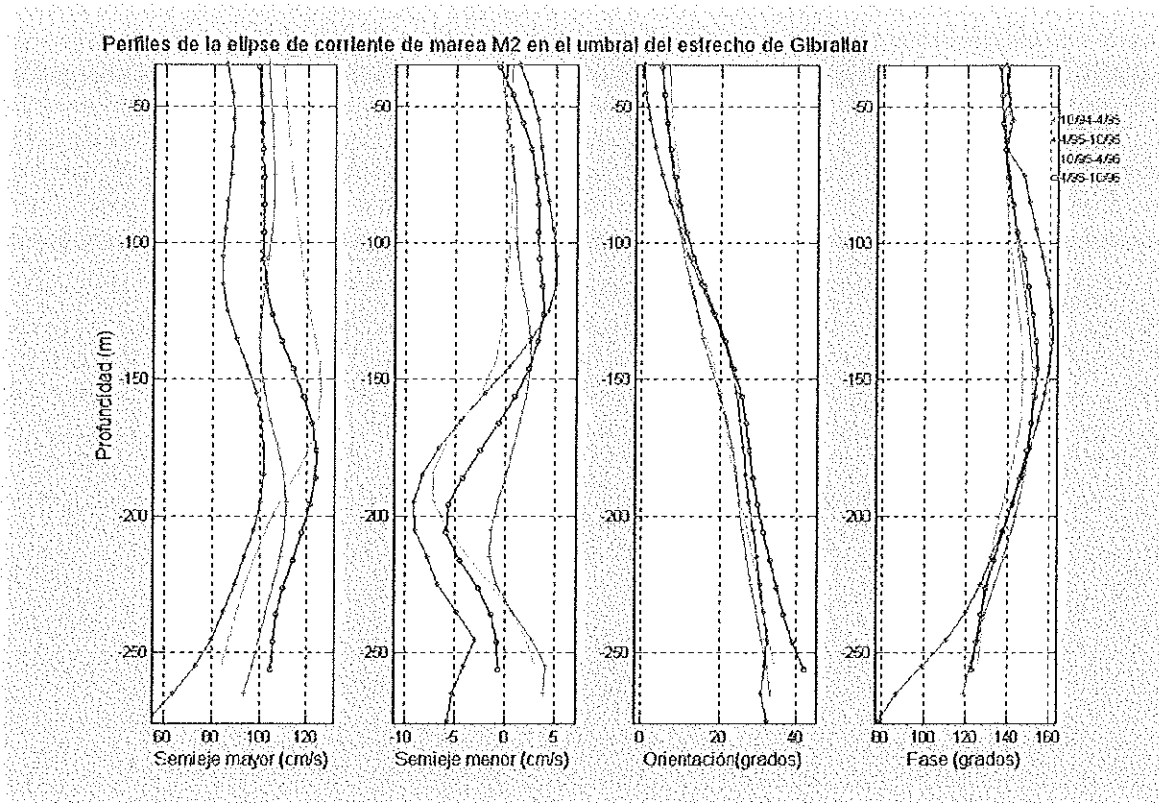


Figura 5.1. Distribución vertical de la componente semidiurna M_2 ; Semieje mayor, semieje menor, orientación (grados) y fase (grados), las velocidades positivas en el semieje mayor indican que el flujo medio de volumen es principalmente hacia el mar mediterráneo, el semieje menor representa el sentido de rotación de la corriente de marea, su signo es positivo en el sentido ciclónico (contrario a las manecillas del reloj). La orientación y fase correspondientes a la marea entrante (hacia dentro del Mediterráneo). La orientación está medida trigonométricamente en sentido contrario a las manecillas del reloj a partir del Este geográfico. Las fases, las cuales indican el tiempo de ocurrencia del la corriente de flujo máximo, están medidas en grados con respecto al tiempo del meridiano de Greenwich (GMT). Series; S2 (color azul), S3 (color rojo), S4 (color verde) y S5 (color negro).

IV.1.1.2. Componente N_2 .

En la Figura 5.2 se observa la distribución vertical de N_2 . El semieje mayor presenta valores máximos en los primeros metros, 27.64 cms^{-1} a 75 m en la serie S3, manteniéndose la velocidad casi constante hasta ~ 100 m de profundidad, para después disminuir suavemente hacia el fondo hasta alcanzar el valor mínimo de 18.33 cms^{-1} a 254 m para la

serie S4, el comportamiento es prácticamente el mismo para todas las series excepto para S3 (Verano de 1995) en este registro se observa que el mínimo valor del semieje mayor es de 6.02 cms^{-1} a 275 m de profundidad. La magnitud de la velocidad de la corriente en esta componente es aproximadamente cuatro veces menor a la correspondiente a M_2 .

En cuanto al semieje menor de la elipse componente de marea N_2 se observa que en las cuatro series; S2, S3, S4 y S5, la velocidad permanece sin cambios considerables dentro de los primeros 110 m de profundidad, a partir de ese punto todas las series, excepto S2, disminuyen su velocidad alcanzando valores mínimos a distintas profundidades, la serie S4 registra un mínimo de -1.68 cms^{-1} a 154 m, sin embargo, a esta misma profundidad S2 presenta un máximo en su velocidad de 0.5 cms^{-1} . La gráfica de la velocidad del semieje menor de las cuatro series converge a una profundidad de 200 m para después aumentar hacia el fondo de manera similar hasta alcanzar sus valores máximos siendo para S5 de 1.07 cms^{-1} a 265 m de profundidad. En todas las series, exceptuando ahora a S3, se observa que la velocidad máxima del semieje menor se encuentra muy cerca del fondo.

La orientación de las cuatro series varía de forma similar; el valor mínimo a 45m de la superficie es de 9.55° en la serie S3, aumentando suavemente hacia el fondo, el máximo (39.43° , serie S5) se localiza a 256m de profundidad.

La fase de N_2 se mantiene en $\sim 130^\circ$ dentro de los primeros 150 m (Figura 5.2) para después disminuir hacia el fondo registrándose un valor mínimo de 79.36° a 275 m de profundidad, esto para la serie S3.

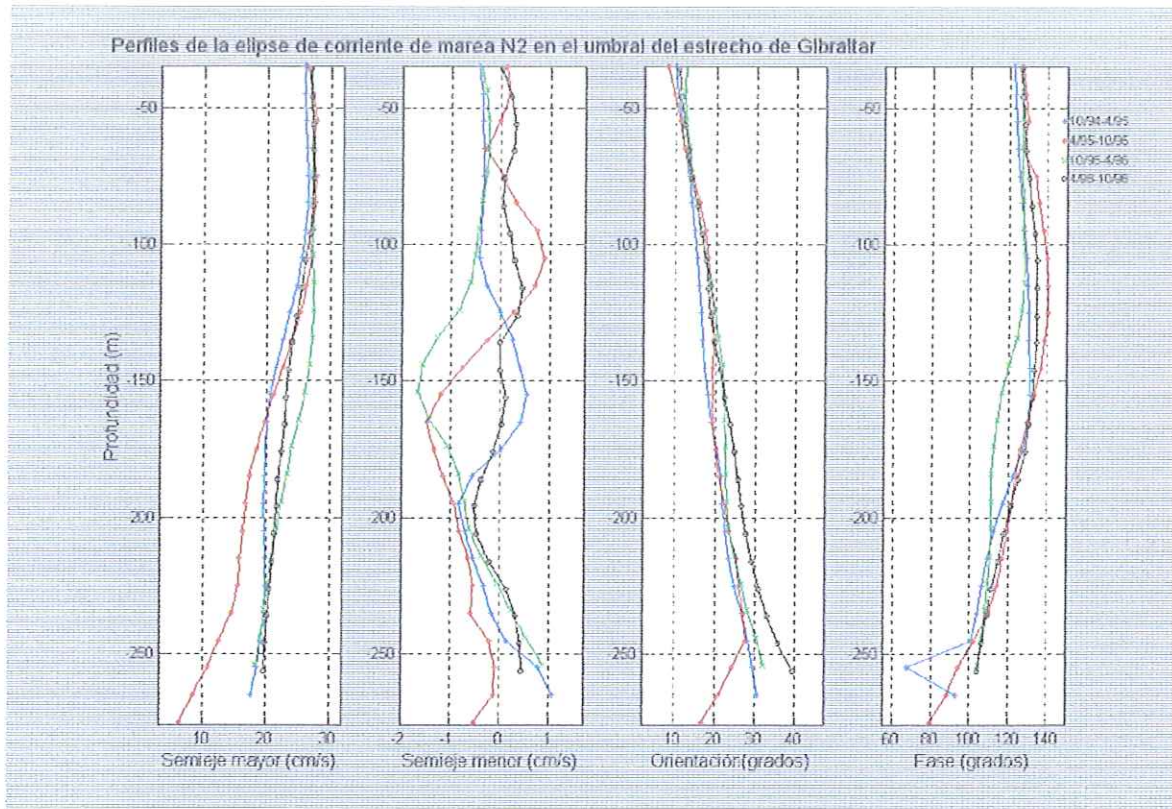


Figura 5.2. Distribución vertical de la componente N_2 . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1.

IV.1.1.3. Componente S_2 .

La Figura 5.3 muestra la estructura vertical de la corriente de marea correspondiente a la componente S_2 , en esta figura se observa que para el semieje mayor la velocidad permanece relativamente constante hasta una profundidad de 120 m, con valores promedio de 40 cm s^{-1} . entre los 120 y los 180 m se aprecia una disminución en los valores de velocidad de las cuatro series de mediciones (Tabla 2), siendo para S3, de $\sim 24 \text{ cm s}^{-1}$, la

velocidad continúa disminuyendo de forma suave hacia el fondo observándose los valores mínimos promedio de $\sim 26 \text{ cm s}^{-1}$ a 250 m de profundidad.

El semieje menor presenta pequeñas variaciones de velocidad ($\pm 1 \text{ cm s}^{-1}$) entre los 45 y 125 m de profundidad, se observa una disminución de la velocidad hasta que las cuatro series alcanzan su valor mínimo -3.21 cm s^{-1} a 175 m (Tabla 2). A partir de esta profundidad los valores de velocidad del semieje menor aumentan hacia el fondo siendo máximos en las series S2 y S4 que corresponden a los registros de verano.

La orientación está distribuida verticalmente de manera similar a las componentes M_2 y S_2 , observándose valores promedio a 45m de 9.5° aumentando suavemente hacia el fondo hasta alcanzar los valores máximos $\sim 30^\circ$ a 250 m de profundidad.

La fase de S_2 de las cuatro series se mantiene constante dentro del intervalo que va de 45 a 140 m, a partir de esta profundidad la fase disminuye hacia el fondo registrando los valores mínimos por debajo de los 250 m (Tabla 2), siendo para S3 de 119.27° a 275 m de profundidad (Figura 5.3).

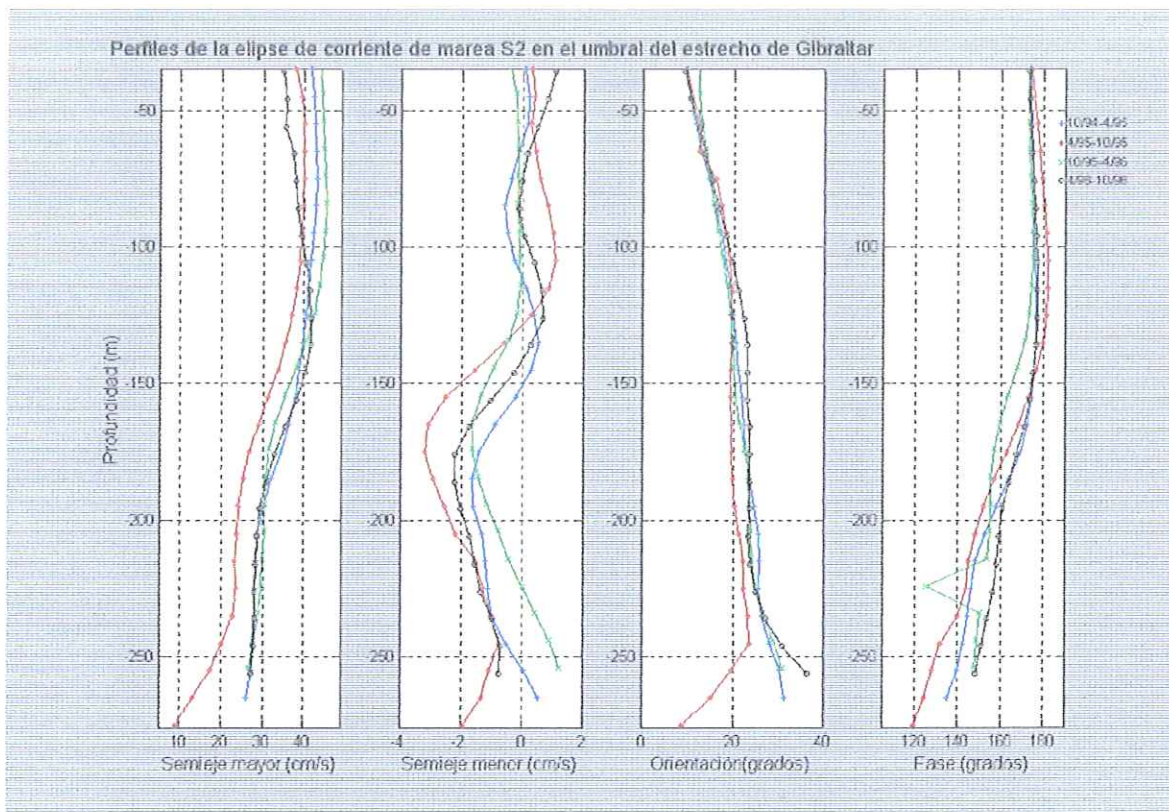


Figura 5.3. Distribución vertical de la componente semidiurna S_2 . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1.

IV.1.2. Componentes diurnas K_1 y O_1 .

El comportamiento de K_1 y O_1 es muy similar (Figuras 5.4 y 5.5 respectivamente) es por esta razón que estas componentes se pueden describir conjuntamente. El semieje mayor permanece con velocidad promedio de 27 cm s^{-1} dentro de los primeros 150 m para las dos componentes, a esta profundidad se observa que el semieje mayor de O_1 disminuye muy suavemente hasta los 230 m, mientras que en K_1 no se aprecia un cambio significativo. A partir de los 230 m las dos componentes muestran una disminución de velocidad hacia el fondo alcanzando los valores mínimos registrados en la serie S3 de 7.39 cm s^{-1} a 275 m en

el semieje mayor de la componente O_I , y un mínimo correspondiente a K_I de 8.91 cms^{-1} en la misma serie. Los valores máximos y mínimos de cada serie se encuentran detallados en la Tabla 2.

El semieje menor presenta una mayor variabilidad en la componente O_I (Figura 5.4), los valores máximos se localizan en el registro mas somero (35 m) y en el mas profundo (~ 250 m), el valor máximo promedio del semieje menor en la componente O_I es de $\sim 1.5 \text{ cms}^{-1}$, respecto a K_I (Figura 5.5) el máximo valor promedio del semieje menor es de aproximadamente 2 cms^{-1} a 45 m de profundidad. En las dos series se observa una disminución de la velocidad en el semieje menor conforme aumenta la profundidad, alcanzándose un valor mínimo promedio de -1 cms^{-1} a 150 m de profundidad, sin embargo en la componente O_I de la serie S3 se observan valores de $\sim 0 \text{ cms}^{-1}$ a esta profundidad. El semieje menor tanto de O_I como de K_I aumentan suavemente hacia el fondo, siendo el mínimo valor promedio registrado de 1 cm s^{-1} por debajo de los 250 m.

La orientación de O_I y de K_I (Figuras 5.4 y 5.5 respectivamente) está distribuida de manera muy similar entre las dos componentes, se observa que dentro de los primeros 200m de profundidad el valor promedio de la orientación varía muy poco alrededor de 20° para después aumentar relativamente rápido con la profundidad (Tabla 2) registrándose un valor máximo de $\sim 40^\circ$ a 250m de profundidad en la serie S5.

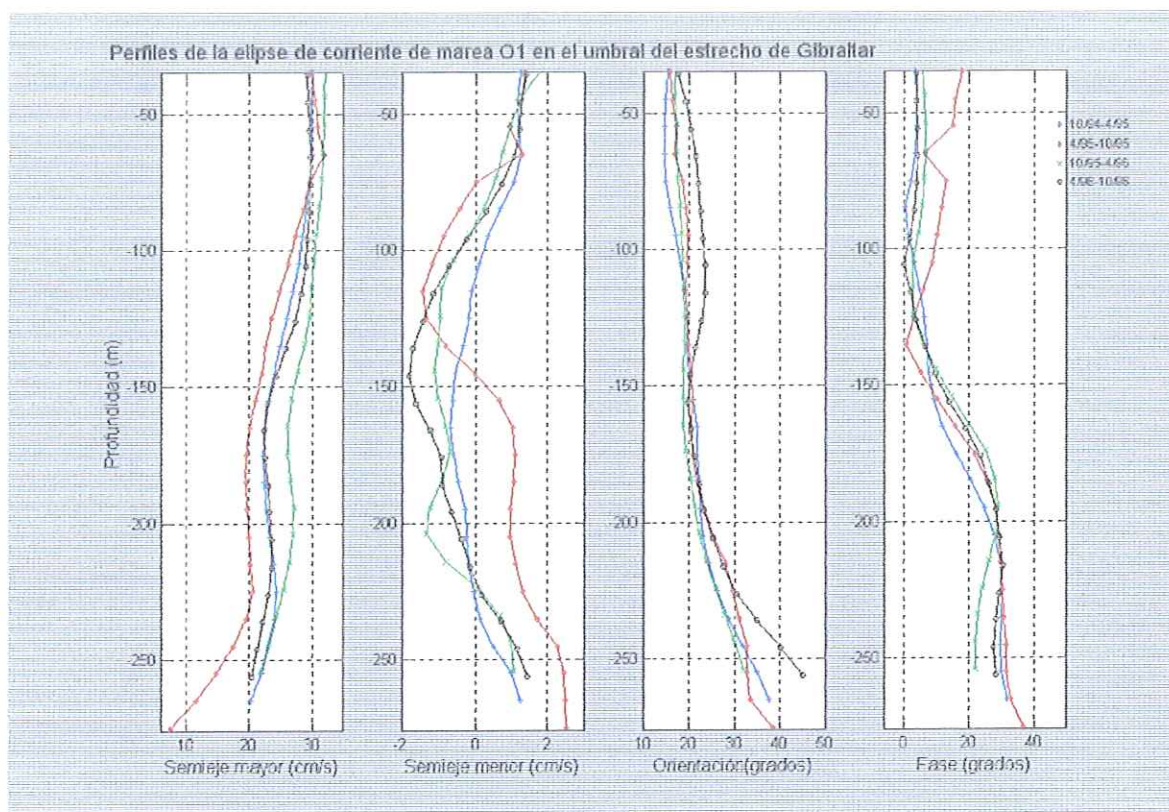


Figura 5.4. Distribución vertical de la componente diurna O_1 . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1.

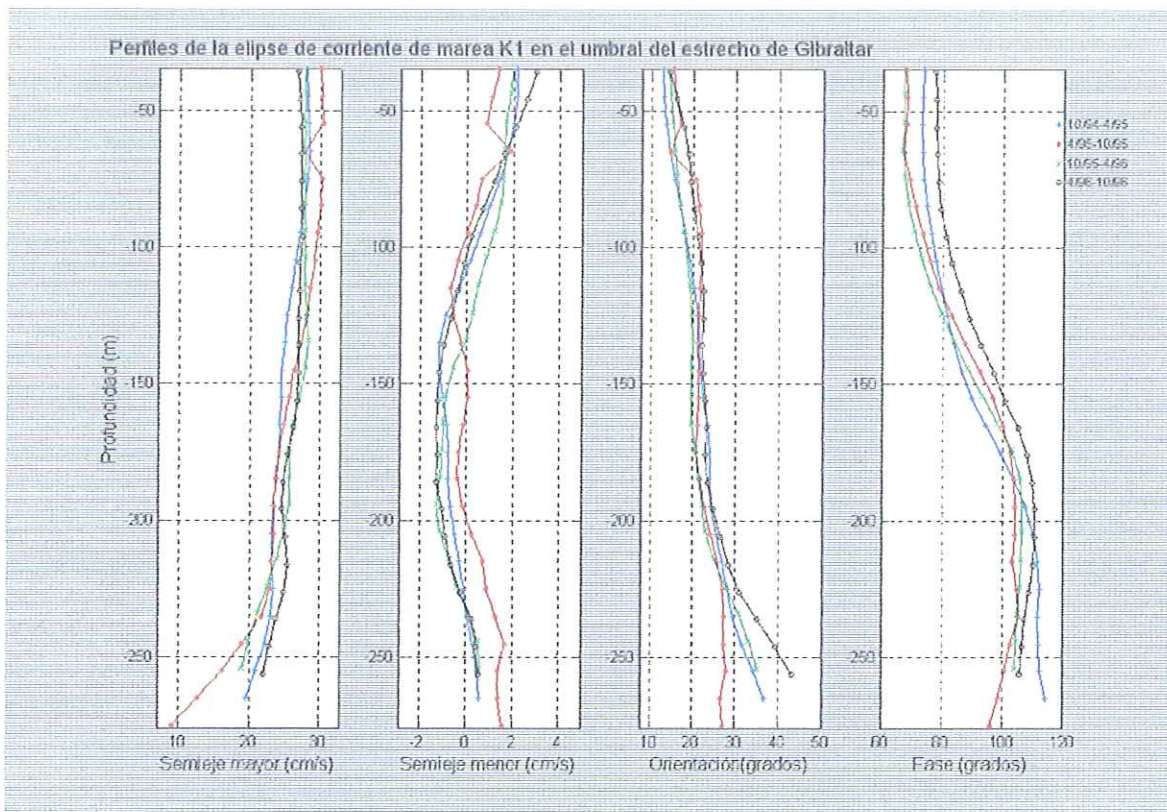


Figura 5.5. Distribución vertical de la componente diurna K_1 . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1.

La fase varía de forma muy similar entre las dos componentes (K_1 y O_1) sin embargo los valores mínimos y máximos son de diferente magnitud (Tabla 2). Las dos series inician a los 45 m de profundidad con sus valores mínimos, manteniéndose casi constantes hasta los 100 m, a esta profundidad se observa un aumento constante hasta llegar al máximo a los 200 m de profundidad, permaneciendo sin cambio apreciable hasta el fondo.

IV.1.3. Componente M_x .

Para esta componente (Figura 5.6) se observa que el semieje mayor permanece con valores mínimos promedio de $\sim 6 \text{ cms}^{-1}$ (Tabla 2) hasta los 120m de profundidad, se observa un aumento abrupto en la velocidad de todas las series hasta alcanzar un máximo a los ~ 170 m excepto S4, esta última permanece constante hasta los 150 m (alcanzando un valor máximo a los 214 m de 15.77 cms^{-1}), las series S2, S3 y S5 disminuyen nuevamente su velocidad en el semieje mayor hasta llegar a los 200 m que es cuando aumentan nuevamente su velocidad alcanzando los valores máximos (Tabla 2) después de los 250 m.

El semieje menor presenta los valores mínimos a ~ 80 m de profundidad (Tabla 2), aumentando después rápidamente alcanzando los máximos valores a ~ 140 m, la serie S4 presenta la máxima velocidad registrada (4.04 cms^{-1} a 154 m de profundidad). En todas las series se observa un descenso en la velocidad conforme se acercan al fondo siendo el valor mínimo promedio de -1 cms^{-1} aproximadamente a una profundidad de 250 m.

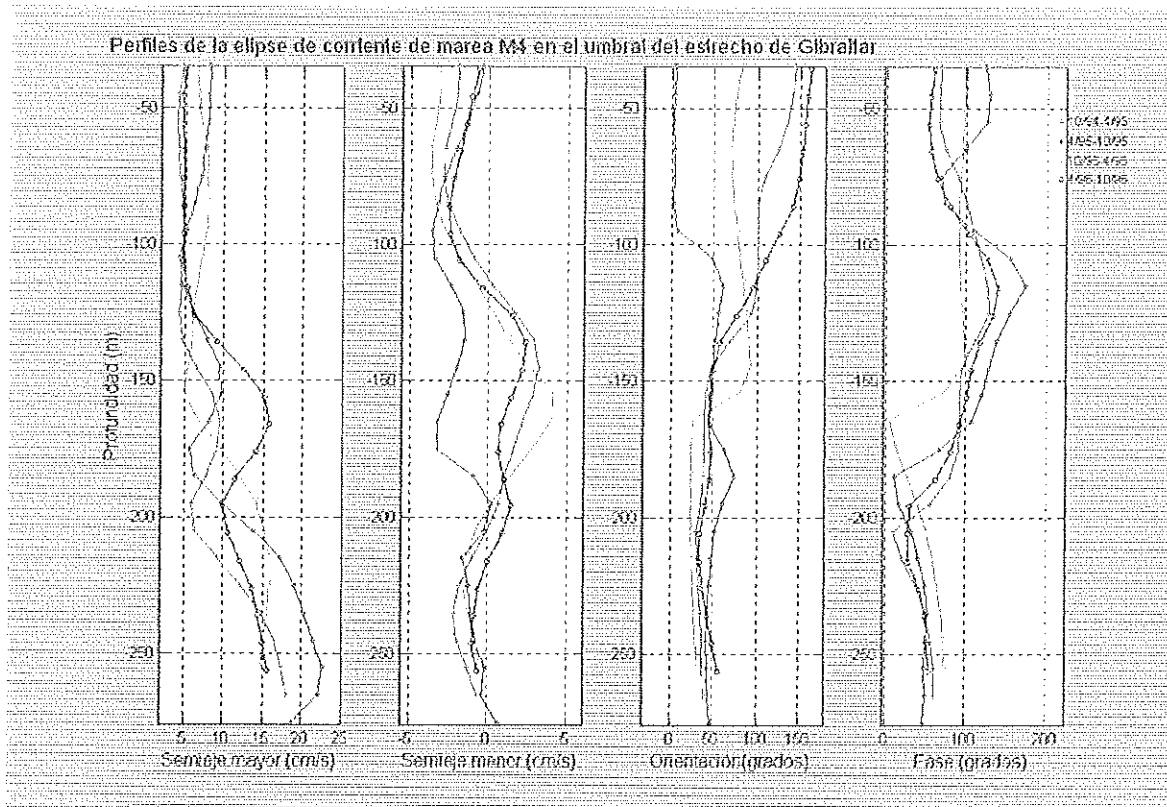


Figura 5.6. Distribución vertical de la componente diurna M_2 . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1.

Con respecto a la orientación se observa en la gráfica (Figura 5.6) que cada una de las series presenta valores diferentes a los 45 m de profundidad siendo los máximos para las series S2, S4 y S5 (Tabla 2) mientras que el valor de la orientación a esta profundidad es el mínimo en la serie S3, las gráficas de las cuatro series convergen a los 150 m de profundidad a un valor de $\sim 50^\circ$ en su orientación mismo que permanece sin variación considerable hasta el fondo, a excepción de la serie S4 que permanece con un valor promedio de 80° dentro de los primeros 180 m para después disminuir abruptamente hasta un mínimo de 22.19° a 184 m de profundidad, manteniéndose sin variación hasta el fondo.

La fase de la componente M_d muestra una variabilidad similar entre las cuatro series solo que los máximos y mínimos valores se encuentran a diferentes profundidades en cada una de las series (Tabla 2). Inicialmente se observa un aumento en la fase en el intervalo comprendido entre los 45 y 115 m de profundidad, excepto para la serie S4 (Figura 5.6) misma que permanece en un valor promedio de 100° hasta llegar a los 150 m de profundidad. Las series disminuyen hasta alcanzar sus valores mínimos dentro de los 160 y 205 m (Tabla 2), por último se observa un nuevo incremento en la fase hacia el fondo.

IV.1.4. Componentes mensual (M_m) y quincenal (M_{sf}).

Las componentes M_m y M_{sf} (Figuras 5.7 y 5.8 respectivamente) muestran una variabilidad del semieje mayor muy similar entre estas, sin embargo los valores numéricos de los máximos y mínimos son de diferente magnitud para cada una (Tabla 2). Se observa un aumento dentro de los primeros 130 m, para después disminuir rápidamente hasta alcanzar el valor mínimo a los ~ 175 m de profundidad. Conforme se acercan al fondo las dos componentes aumentan la magnitud del semieje mayor hasta alcanzar el valor máximo 29.51 cms^{-1} para M_{sf} y 15.8 cms^{-1} para M_m por debajo de los 250 m (Tabla 2).

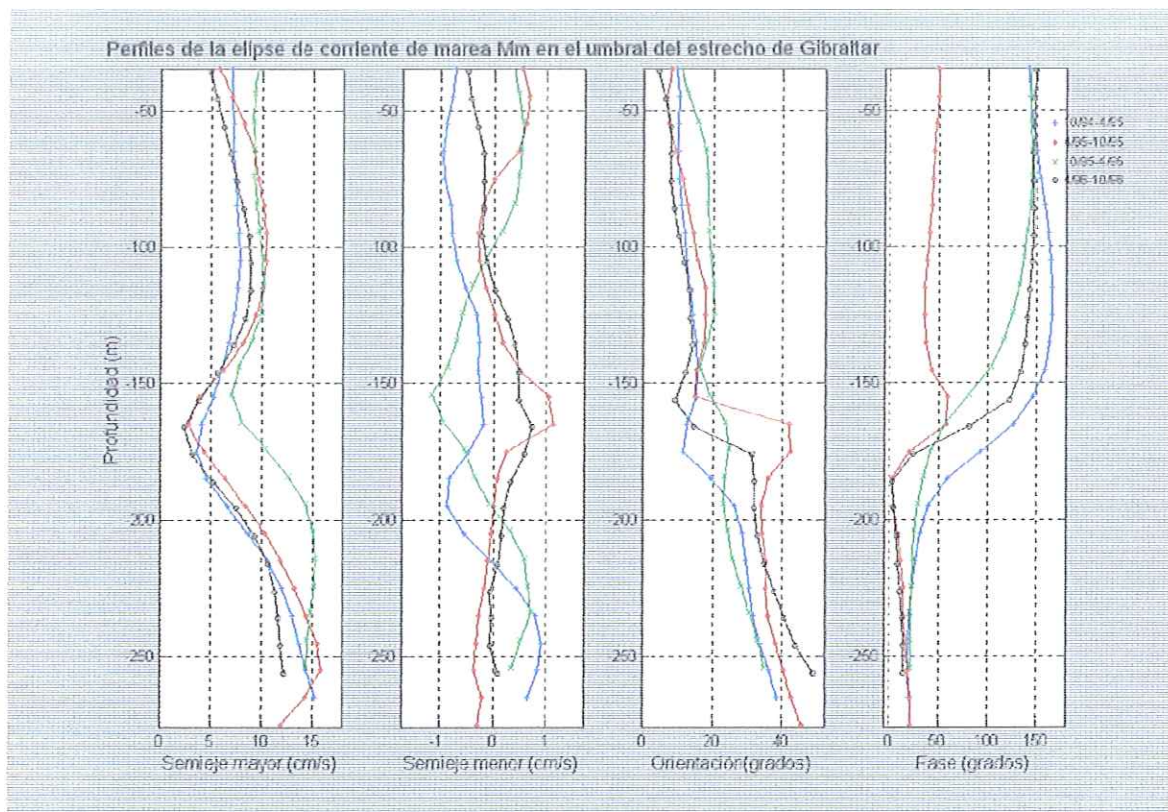


Figura 5.7. Distribución vertical de la componente diurna M_m . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1.

El semieje menor oscila entre valores de -1 y 1 cm s^{-1} en las dos componentes; M_m y M_{sf} (Figuras 5.7 y 5.8 respectivamente) esto implica que la corriente correspondiente a esta componente cambia el sentido de su rotación siendo ciclónico para signo positivo, se observa especialmente en la componente M_{sf} (Figura 5.8) que los valores mínimos se localizan por arriba de los 175 m, mientras que los valores mínimos del semieje menor se encuentran entre esta profundidad y los 200 m, permaneciendo estables después de este punto hasta el fondo.

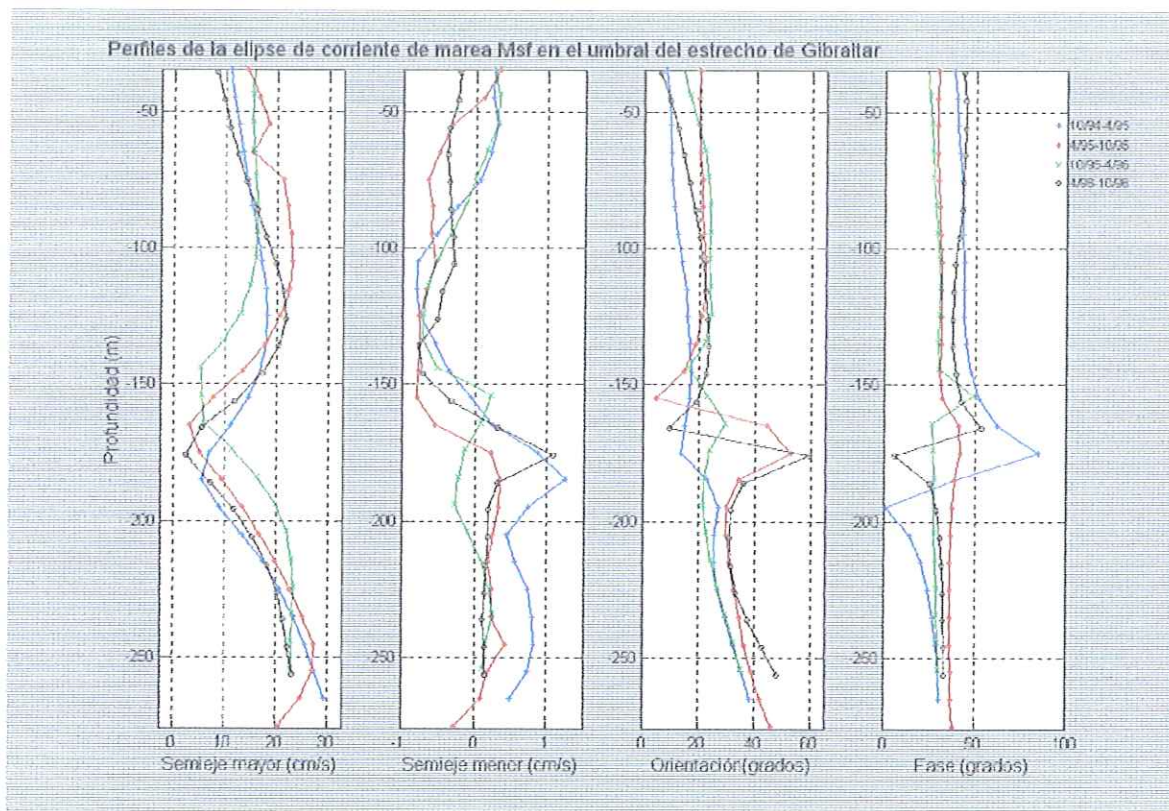


Figura 5.8. Distribución vertical de la componente diurna M_{sf} . Otros detalles se encuentran descritos en la Figura 5.1.

La orientación muestra para las dos componentes un aumento con la profundidad (Figuras 5.7 y 5.8), sin embargo entre los 150 y 190 m se presentan cambios muy abruptos de orientación que posteriormente se estabilizan para continuar con un aumento suave hacia el fondo. Estos cambios tan marcados se deben probablemente a que esta es la profundidad de la interfase entre el agua Atlántica y el agua Mediterránea.

La distribución de la fase es diferente para cada una de las componentes, observándose para M_m (Figura 5.7) valores máximos cerca de los 45 m de profundidad (Tabla 2), un cambio abrupto que consiste en una disminución de la fase se da entre los 150 y los 180 m siendo a esta última profundidad donde se registran los valores mínimos. La componente M_{sf} (Figura 5.8) muestra una variabilidad de fase dentro de los 160 y 190 m de profundidad, siendo en este intervalo donde se encuentran los valores máximos y mínimos de cada serie (Tabla 2).

Resulta interesante observar la gran variabilidad que presentan estas componentes (M_m y M_{sf}) dentro de los 150 y 200 m de profundidad, esto coincide con las observaciones realizadas por *Tsimplis* (2000), Esto implica que la corriente máxima proveniente del Atlántico Norte coincide a esta profundidad con la máxima corriente que sale del Mediterráneo. Las corrientes máximas (entrante y saliente) se localizan en la posición más profunda de la interfase entre las aguas Atlántica y Mediterránea (*Tsimplis*, 2000).

Tabla 2. Valores máximos y mínimos de semieje mayor "M", semieje menor "m", orientación "Inc" y fase "θ" de las componentes de marea; M_2 , N_2 , S_2 , O_1 , K_1 , M_4 , M_m y M_{sf} obtenidos a partir del análisis armónico de velocidad de corriente de cuatro series de mediciones de ADCP anclado en el umbral del estrecho de Gibraltar entre Octubre de 1994 y Octubre de 1996. Los símbolos en las columnas indican lo siguiente: "M" es el semieje mayor (centímetros por segundo). El signo del semieje menor "m" (en centímetros por segundo) indica el sentido de rotación de la corriente de marea (positivo en sentido contrario a las manecillas del reloj). Orientación "Inc" y fase "θ" correspondientes a la marea entrante (hacia dentro del Mediterráneo). La orientación está medida trigonométricamente en sentido contrario a las manecillas del reloj a partir del Este geográfico. Las fases, las cuales indican el tiempo de ocurrencia de la corriente de flujo máximo, están medidas en grados con respecto al tiempo del meridiano de Greenwich (GMT).

Serie S2 10/94-04/95

| Comp | $M_{max}(m/s)$ | prof.(m) | $M_{min}(m/s)$ | prof.(m) | $m_{max}(m/s)$ | prof.(m) | $m_{min}(m/s)$ | prof.(m) | Inc _{max} (°) | prof.(m) | Inc _{min} (°) | prof.(m) | θ _{max} (°) | prof.(m) | θ _{min} (°) | prof.(m) |
|------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|
| M2 | 93.61 | 265 | 111.75 | 195 | -1.5 | 215 | 4.01 | 255 | 4.84 | 35 | 33.37 | 265 | 119.21 | 265 | 152.11 | 155 |
| N2 | 17.58 | 265 | 26.4 | 75 | -0.83 | 195 | 1.07 | 265 | 9.92 | 35 | 30.63 | 265 | 93.53 | 265 | 130.97 | 145 |
| S2 | 25.91 | 265 | 42.81 | 75 | -1.67 | 185 | 0.53 | 135y265 | 9.73 | 35 | 31.57 | 265 | 134.79 | 265 | 176.78 | 125 |
| O1 | 20.28 | 265 | 30.06 | 35 | -0.67 | 165 | 1.28 | 35y265 | 14.49 | 55 | 37.56 | 265 | -3.94 | 55 | 32.18 | 265 |
| K1 | 19.51 | 265 | 28.35 | 65 | -1.22 | 145 | 2.19 | 35 | 12.71 | 35 | 36.4 | 265 | 73.62 | 35 | 114.48 | 265 |
| M4 | 4.09 | 55 | 18 | 265 | -2.93 | 75 | 3.17 | 145 | 29.2 | 205 | 145.21 | 35 | 9.36 | 215 | 129.31 | 125 |
| Mm | 3.66 | 175 | 15.31 | 265 | -0.95 | 65 | 0.9 | 245 | 9.58 | 35 | 38.29 | 265 | 19.69 | 255 | 165.37 | 115 |
| Msf | 5.63 | 185 | 29.51 | 265 | -0.81 | 115 | 1.25 | 185 | 9.58 | 35 | 38.29 | 265 | 0.71 | 195 | 84.92 | 175 |

Serie S3 04/95-10/95

| Comp | $M_{max}(m/s)$ | prof.(m) | $M_{min}(m/s)$ | prof.(m) | $m_{max}(m/s)$ | prof.(m) | $m_{min}(m/s)$ | prof.(m) | Inc _{max} (°) | prof.(m) | Inc _{min} (°) | prof.(m) | θ _{max} (°) | prof.(m) | θ _{min} (°) | prof.(m) |
|------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|
| M2 | 53.56 | 275 | 102.11 | 165 | -9.02 | 195 | 5.13 | 105 | 5.13 | 75 | 32.57 | 275 | 78.31 | 275 | 161.6 | 135 |
| N2 | 6.02 | 275 | 27.64 | 75 | -1.48 | 165 | 0.89 | 105 | 9.55 | 45 | 27.73 | 245 | 79.36 | 275 | 140.6 | 115 |
| S2 | 8.85 | 275 | 39.99 | 55 | -3.21 | 175 | 1.08 | 105 | 8.74 | 275 | 23.58 | 245 | 119.27 | 275 | 182.11 | 115 |
| O1 | 7.39 | 275 | 31.88 | 55 | -1.44 | 115 | 2.54 | 275 | 16.47 | 45 | 38.54 | 275 | -16 | 45 | 37.06 | 275 |
| K1 | 8.91 | 275 | 30.15 | 75 | -0.69 | 115 | 1.69 | 245 | 16.05 | 45 | 27.78 | 255 | 67.09 | 65 | 102.64 | 245 |
| M4 | 4.35 | 105 | 22.58 | 255 | -3.59 | 95 | 0.66 | 275 | 41.72 | 245 | 75.65 | 185 | 12.03 | 185 | 178.8 | 115 |
| Mm | 2.76 | 165 | 15.8 | 255 | -0.35 | 255 | 1.13 | 165 | 6.56 | 45 | 45.48 | 275 | 3.63 | 185 | 49.29 | 45 |
| Msf | 3.07 | 165 | 27.37 | 245 | -0.79 | 155 | 0.43 | 245 | 4.59 | 155 | 52.67 | 175 | 23.19 | 55 | 41.89 | 175 |

Serie S4 10/95-04/96

| Comp | $M_{max}(m/s)$ | prof.(m) | $M_{min}(m/s)$ | prof.(m) | $m_{max}(m/s)$ | prof.(m) | $m_{min}(m/s)$ | prof.(m) | Inc _{max} (°) | prof.(m) | Inc _{min} (°) | prof.(m) | θ _{max} (°) | prof.(m) | θ _{min} (°) | prof.(m) |
|------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|
| M2 | 84.38 | 254 | 126.41 | 154 | -7.17 | 184 | 2.95 | 254 | 6.97 | 34 | 34.16 | 254 | 126.24 | 254 | 147.19 | 154 |
| N2 | 18.33 | 254 | 27.3 | 124 | -1.68 | 154 | 0.88 | 254 | 12.19 | 44 | 31.92 | 254 | 104.68 | 254 | 127.93 | 104 |
| S2 | 26.45 | 254 | 44.96 | 74 | -1.66 | 164 | 1.25 | 254 | 12.33 | 34 | 30.85 | 254 | 147.8 | 254 | 175.06 | 104 |
| O1 | 22.13 | 254 | 32.1 | 34 | -1.35 | 204 | 1.07 | 254 | 16.71 | 34 | 32.07 | 254 | -6.77 | 54 | 29.15 | 194 |
| K1 | 18.92 | 254 | 28.19 | 134 | -1.3 | 194 | 2.18 | 34 | 14.3 | 34 | 35 | 254 | 66.97 | 64 | 106.57 | 194 |
| M4 | 5.48 | 144 | 15.77 | 214 | -3.71 | 74 | 4.04 | 154 | 22.19 | 184 | 92.81 | 144 | 4.16 | 164 | 99.06 | 34 |
| Mm | 7.04 | 154 | 15.27 | 214 | -1.15 | 154 | 0.71 | 224 | 10.43 | 34 | 34.79 | 254 | 21.38 | 244 | 144.86 | 64 |
| Msf | 5.29 | 144 | 23.3 | 224 | -0.72 | 124 | 0.3 | 54 | 13.71 | 34 | 35.33 | 254 | 23.19 | 34 | 23.73 | 174 |

Serie S5 04/96-10/96

| Comp | $M_{max}(m/s)$ | prof.(m) | $M_{min}(m/s)$ | prof.(m) | $m_{max}(m/s)$ | prof.(m) | $m_{min}(m/s)$ | prof.(m) | Inc _{max} (°) | prof.(m) | Inc _{min} (°) | prof.(m) | θ _{max} (°) | prof.(m) | θ _{min} (°) | prof.(m) |
|------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|
| M2 | 99 | 36 | 124.02 | 176 | -5.87 | 206 | 3.67 | 126 | 4.97 | 36 | 41.99 | 256 | 123.13 | 256 | 153.93 | 146 |
| N2 | 19.62 | 256 | 27.24 | 66 | -0.5 | 196 | 0.44 | 116y256 | 10.83 | 36 | 39.43 | 256 | 104.21 | 256 | 134.76 | 116 |
| S2 | 27.01 | 256 | 41.66 | 126 | -2.23 | 186 | 1.03 | 36 | 9.25 | 36 | 36.36 | 256 | 148.49 | 256 | 177.41 | 116 |
| O1 | 20.48 | 256 | 29.73 | 66 | -1.82 | 146 | 1.47 | 256 | 17.61 | 36 | 45.15 | 256 | -4.13 | 56 | 30.47 | 216 |
| K1 | 22 | 256 | 27.36 | 96 | -1.3 | 166 | 2.99 | 36 | 14.45 | 36 | 43.14 | 256 | 77.28 | 36 | 110.57 | 206 |
| M4 | 4.79 | 46 | 15.69 | 166 | -2.56 | 86 | 2.36 | 136 | 33.16 | 216 | 162.54 | 36 | 52.31 | 56 | 140.69 | 116 |
| Mm | 2.42 | 166 | 12.23 | 256 | -0.48 | 36 | 0.73 | 166 | 4.38 | 36 | 48.71 | 256 | 2.71 | 186 | 148.86 | 36 |
| Msf | 2.48 | 176 | 23.22 | 256 | -0.78 | 136 | 1.08 | 176 | 9.46 | 166 | 59.32 | 176 | 5.55 | 176 | 44.65 | 56 |

IV.2- Modelo analítico.

El modelo que se utilizó es un modelo simple con viscosidad turbulenta constante (*Kundu et al.*, 1981), ya que, como se planteó al principio, los términos de fricción juegan un papel fundamental en la distribución vertical de la velocidad.

IV.2.1- Descripción del modelo.

Si u y v son las componentes de velocidad y $w=u+iv$, la ecuación lineal de movimiento puede ser escrita como (*Kundu et al.*, 1981):

$$\frac{\partial w}{\partial t} + ifw - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial x} - i \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5.1)$$

donde f es el parámetro de Coriolis (positivo para el área de estudio, 36° de latitud Norte), p es la presión, x , y , y z son las coordenadas, y ν es el coeficiente de viscosidad turbulenta.

Suponiendo una longitud de onda larga y un fluido no estratificado, los gradientes de presión horizontal pueden ser considerados como independientes con respecto a z , es decir;

$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$. En el fondo se aplica la condición de no deslizamiento $w(z_{\max}) = 0$, y en la

superficie se aplica una condición de no esfuerzo tangencial. En la superficie el flujo se describe como una elipse de frecuencia ω , con semieje mayor $A+B$ y semieje menor $A-B$.

La solución de la ecuación (5.1) para el caso en el que la profundidad es finita, es decir, que hay influencia del fondo, está dada (Kundu *et al.*, 1981) como:

$$w = A\alpha e^{-i\omega t} \{1 - e^{-az(1+i)} + e^{-2ah(1+i)} [1 - e^{az(1+i)}]\} + B\beta e^{i\omega t} \{1 - e^{-bz(1+i)} + e^{-2bh(1+i)} [1 - e^{bz(1+i)}]\},$$

donde:

$$a = \sqrt{\frac{f - \omega}{2\nu}}, \quad b = \sqrt{\frac{f + \omega}{2\nu}}$$

$$\alpha = [1 - 2e^{-ah(1+i)} + e^{-2ah(1+i)}]^{-1},$$

$$\beta = [1 - 2e^{-bh(1+i)} + e^{-2bh(1+i)}]^{-1},$$

h es la profundidad en metros, A y B forman al semieje mayor $A+B$ definido en la sección III.3.2 como $M = |w_k| + |w_{-k}|$ y al semieje menor $A-B$ definido también (sección III.3.2) como $m = |w_k| - |w_{-k}|$ por lo tanto, $A = |w_k|$ y $B = |w_{-k}|$. En la sección III.3 se encuentran definidas las variables w_k y w_{-k} .

Nótese que los argumentos de las funciones exponenciales presentan los signos \pm ; el signo $+$ se aplica cuando $\omega < f$, mientras que el signo $-$ se aplica cuando $\omega > f$. El parámetro de Coriolis en el estrecho de Gibraltar es $8.5151 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ mientras que ω presenta los valores listados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de ω para cada una de las componentes de marea estudiadas en este trabajo

| Componente de marea | Valor correspondiente de ω |
|---------------------|-----------------------------------|
| M_2 | $1.65f$ |
| N_2 | $1.62f$ |
| S_2 | $1.71f$ |
| O_1 | $0.79f$ |
| K_1 | $0.85f$ |
| M_m | $0.03f$ |
| M_4 | $3.30f$ |

IV.2.2.- Resultados del modelo.

El coeficiente de viscosidad turbulenta utilizado en el modelo es constante con un valor de $\nu = 0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, se experimentó con dos coeficientes de viscosidad turbulenta $\nu = 1.4 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (Candela y Winant, 1990) y el utilizado por Tsimplis (2000) $\nu = 0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. El modelo concuerda bastante bien con las observaciones de semieje mayor ($\pm 8.08 \text{ cm s}^{-1}$ para M_2), semieje menor ($\pm 5.33 \text{ cm s}^{-1}$ para M_2) y la fase ($\pm 7.64^\circ$ para M_2) (véase Tabla 4), sin embargo, existen discrepancias entre la orientación de las observaciones y las encontradas analíticamente ($\pm 2.91^\circ$ para M_2), estas discrepancias se deben probablemente a que el modelo no considera las fronteras laterales de la zona.

La geometría del estrecho de Gibraltar (60 km de largo por 15 km de ancho en la sección mas angosta) (Figura 3) permite que se considere como un canal, siendo el flujo dentro de este casi rectilíneo, esto se verifica al revisar los resultados de las observaciones del semieje menor de las elipses componentes de corriente de marea estudiadas, su magnitud es mucho menor que la del semieje mayor, por lo tanto, la forma de la elipse será muy alargada (Figura 3.4), esto indica que la mayor parte del flujo se da a lo largo del estrecho.

IV.2.3. Modelo aplicado a las componentes semidiurnas M_2 , N_2 y S_2 .

La Figura 6.1 muestra los resultados del modelo con coeficiente de viscosidad turbulenta constante aplicado a la componente de marea M_2 . Los resultados correspondientes a la componente N_2 son mostrados en la Figura 6.2, por último la Figura 6.3 corresponde a los resultados analíticos de la componente S_2 . Se muestran los resultados correspondientes a la serie de mediciones S_2 ya que, al ser los resultados muy similares entre las cuatro series incluir las gráficas de todas las observaciones resultaría en un gasto innecesario de espacio.

Se encontró que el modelo describe bastante bien la distribución vertical del semieje mayor (Tabla 4), sin embargo las variaciones localizadas en la profundidad de la interfase (~150 m) no se obtienen con el modelo, esto se debe probablemente a que a esta profundidad el coeficiente de viscosidad turbulenta cambia su valor debido a la diferencia de densidad entre el agua Atlántica y el agua Mediterránea.

El resultado analítico correspondiente al semieje menor presenta variaciones de forma similar a las observadas pero de una magnitud mucho mayor ($\pm 5.33 \text{ cm s}^{-1}$ para M_2), los resultados del modelo muestran que la corriente máxima de marea se encuentra muy cerca del fondo, esto concuerda con las observaciones, solo que el valor analítico que arroja el modelo es considerablemente mayor al observado (Tabla 4).

En lo que respecta a la orientación el modelo no se ajusta bien a las observaciones ($\pm 2.91^\circ$ para M_2) porque considera que las fronteras laterales son infinitas. Sin embargo, Los resultados analíticos de la fase de las componentes de corriente marea M_2 , N_2 y S_2 se ajustan muy bien a las observaciones.

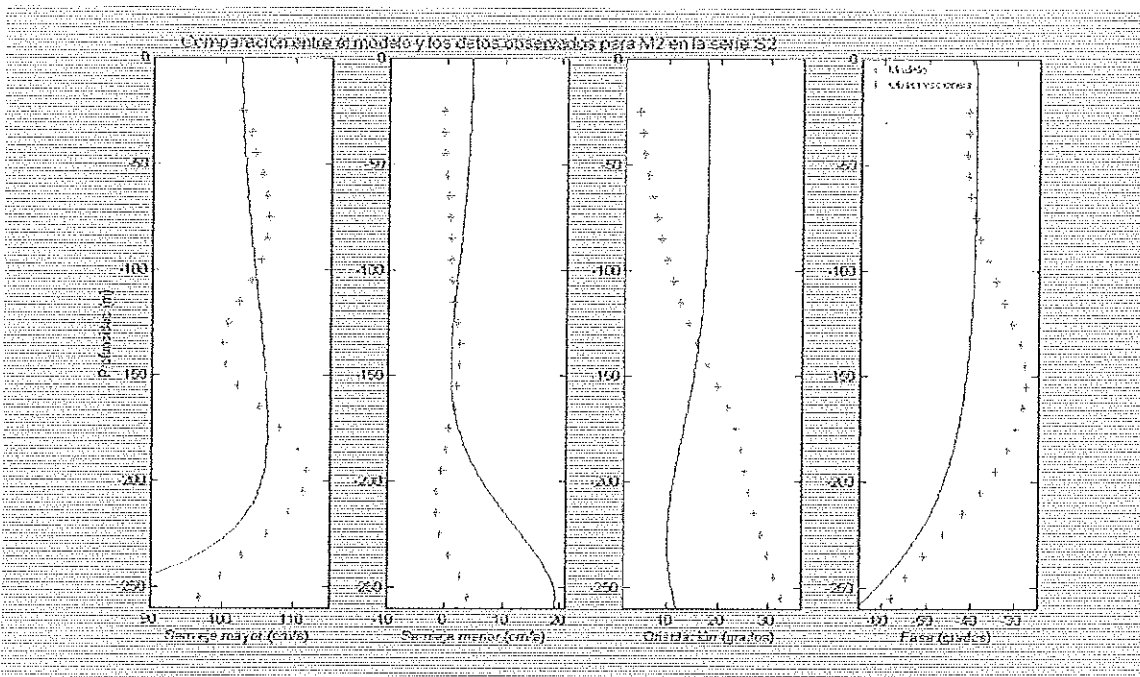


Figura 6.1. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente M_2 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación (grados) y fase (grados).

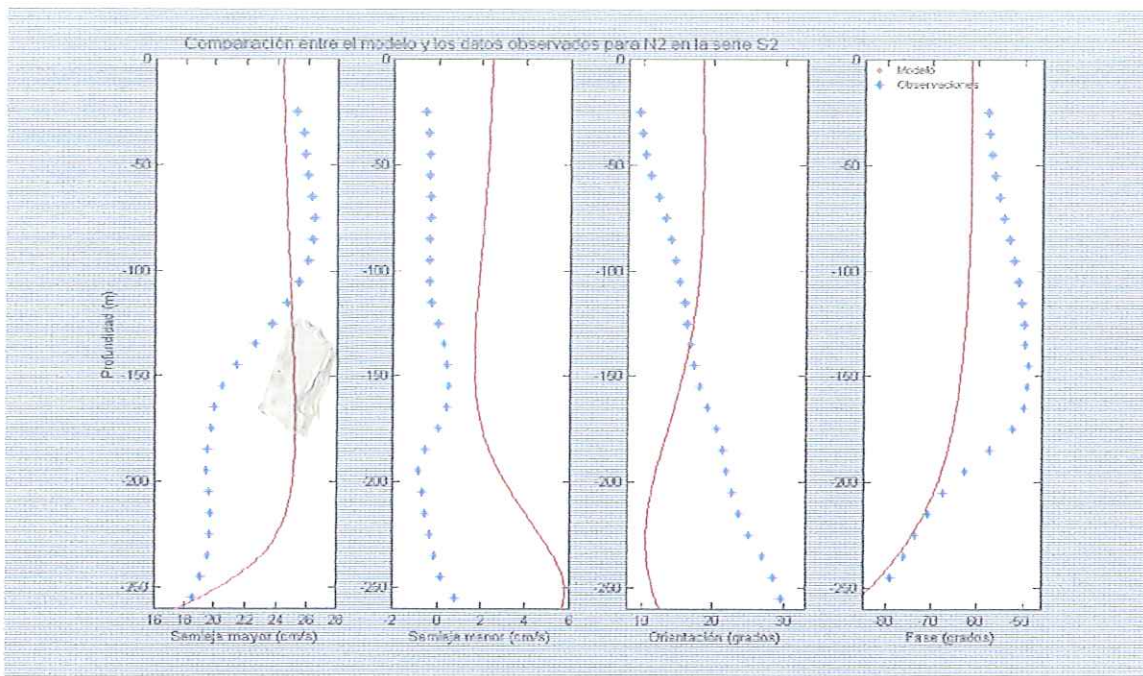


Figura 6.2. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente N_2 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación (grados) y fase (grados).

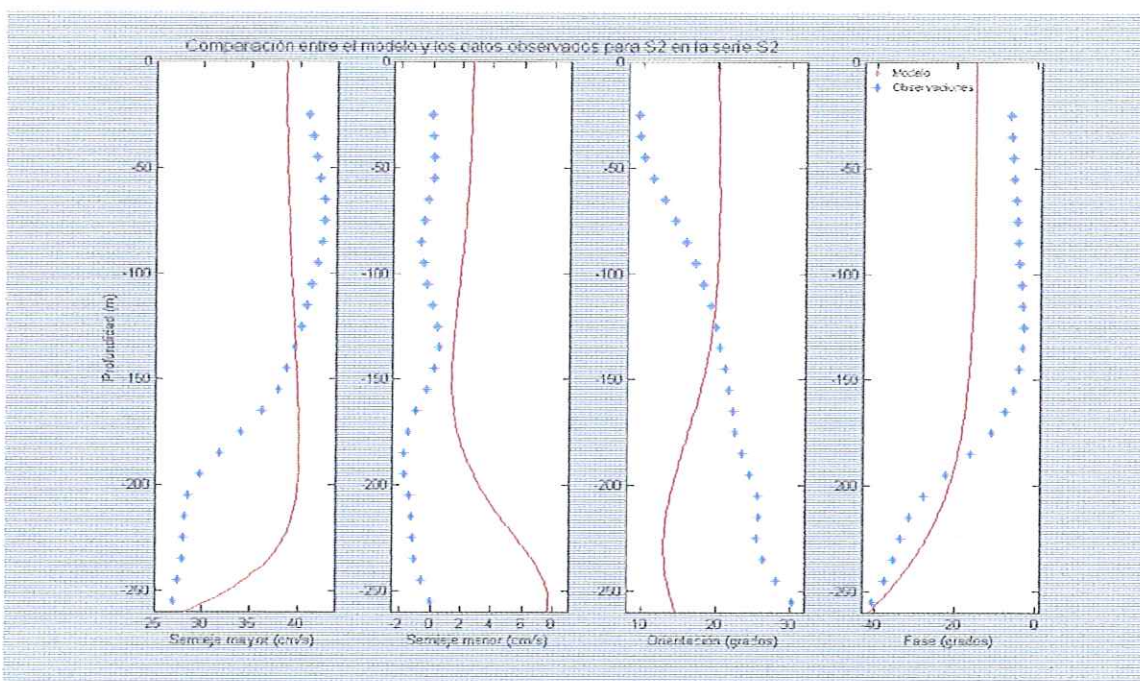


Figura 6.3. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente S_2 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación (grados) y fase (grados).

IV.2.4. Modelo aplicado a las componentes diurnas O_1 y K_1 .

El modelo analítico aplicado sobre las componentes de marea diurnas mostró los mismos resultados para la componente O_1 que cuando se aplicó sobre las componentes semidiurnas (Tabla 4), es decir, se explica relativamente bien la variabilidad vertical del semieje mayor, en el caso de la componente K_1 el modelo analítico subestima los valores observados aunque muestra una distribución de velocidad muy similar a la observada. El resultado analítico del semieje menor difiere de las observaciones sobrestimando el valor observado para las dos componentes diurnas.

Con respecto a la orientación se observa la variabilidad debida a los efectos de fronteras laterales que no considera el modelo. Los resultados analíticos de la fase difieren también con las observaciones mostrando una distribución inversa de este parámetro.

La figura 6.4 corresponde a los resultados de la componente de marea O_1 , mientras que la figura 6.5 ilustra los resultados para K_1 .

Tabla 4. Diferencia entre los resultados analíticos y las observaciones obtenida a partir del cálculo de las

raíces cuadráticas medias $RCM = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (x_{mod\ est} - x_{observada})^2 \right)}$, donde N es el número de datos.

| Componente de marea | Semieje mayor (cm s ⁻¹) | Semieje menor (cm s ⁻¹) | Orientación (°) | Fase (°) |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|----------|
| M_2 | 8.08 | 5.33 | 2.91 | 7.64 |
| N_2 | 0.50 | 2.97 | 3.08 | 7.83 |
| S_2 | 0.34 | 3.65 | 2.62 | 7.29 |
| O_1 | 2.11 | 0.01 | 4.58 | 10.32 |
| K_1 | 6.35 | 3.54 | 3.42 | 9.04 |
| M_1 | 2.04 | 1.51 | 0.69 | 4.38 |
| M_{11} | 0.71 | 0.01 | 0.14 | 7.82 |

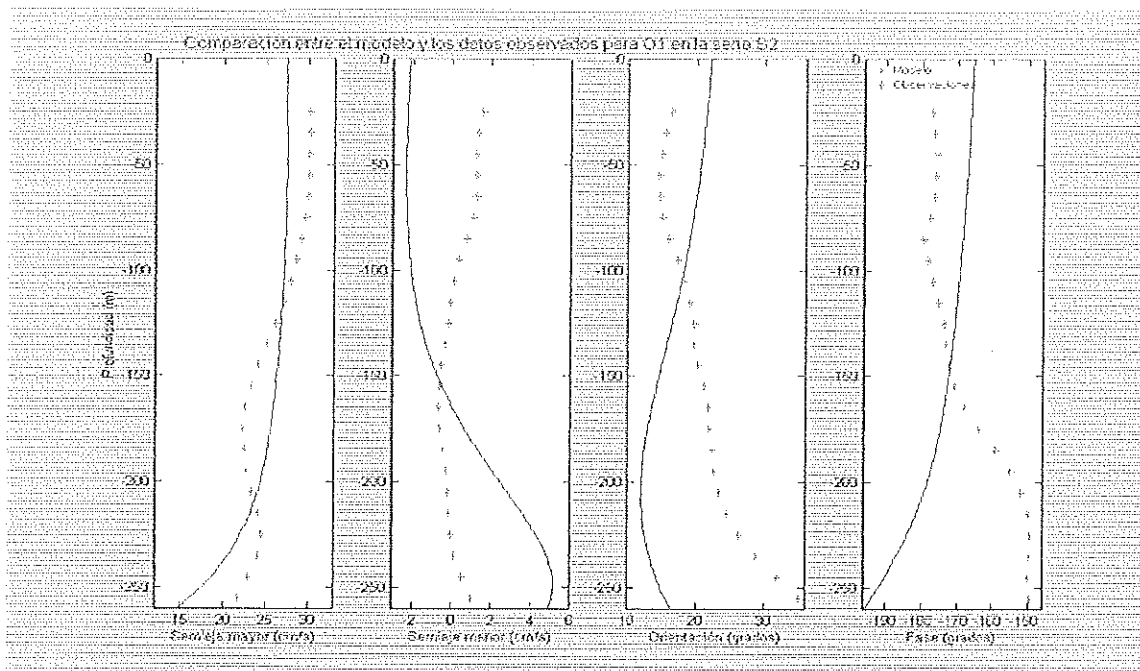


Figura 6.4. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente O_1 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación ($^\circ$) y fase ($^\circ$).

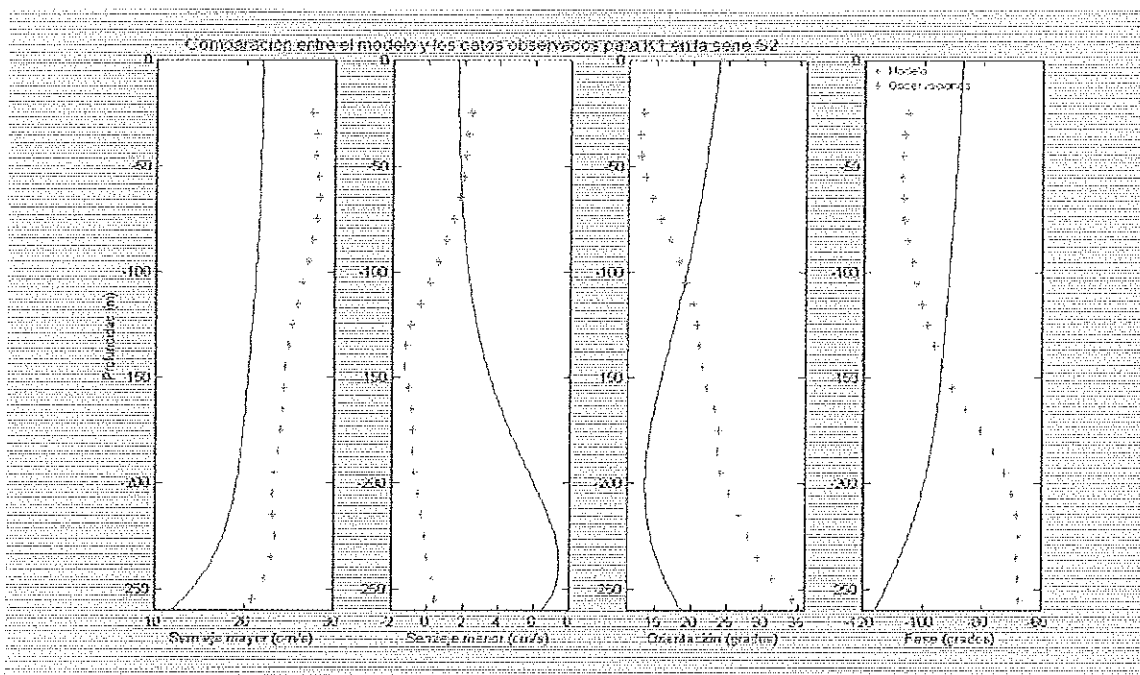


Figura 6.5. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente K_1 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación ($^\circ$) y fase ($^\circ$).

IV.2.5. Modelo aplicado a las componentes M_d y M_m .

El modelo analítico aplicado sobre la componente M_d que es la que tiene mayor frecuencia entre las componentes analizadas aquí, y la componente M_m se ajusta bien a las observaciones del semieje mayor ($\pm 0.71 \text{ cm s}^{-1}$ para M_m) hasta una profundidad de 200m después de este punto el modelo permanece alrededor del valor medio hasta hacerse igual a cero cerca del fondo mientras que los datos observados muestran un aumento en la velocidad del semieje mayor, esto se debe probablemente a que el modelo analítico considera que la velocidad en el fondo es igual a cero (condición de no desplazamiento).

Respecto al semieje menor se observa que el modelo permanece cerca del valor medio de las observaciones. Sucede lo mismo con la orientación y la fase

Se incluyen las figuras 6.6 y 6.7 que corresponden respectivamente a los resultados del modelo con viscosidad turbulenta constante aplicado sobre las componentes M_d y M_m .

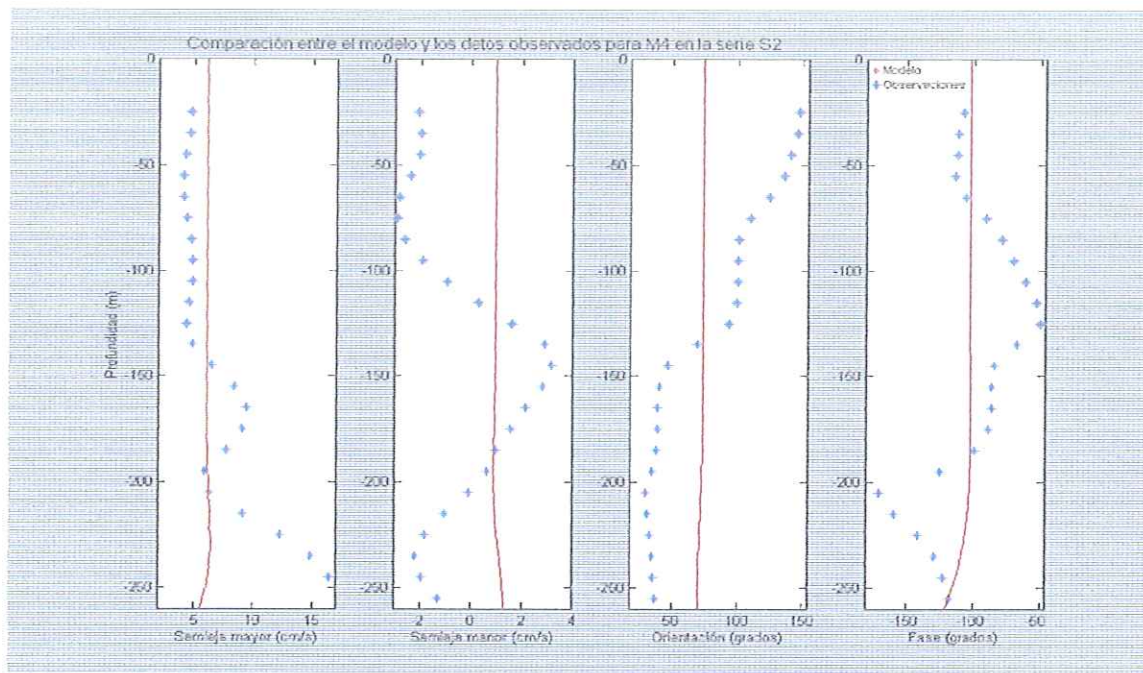


Figura 6.6. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente M_4 de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación ($^\circ$) y fase ($^\circ$).

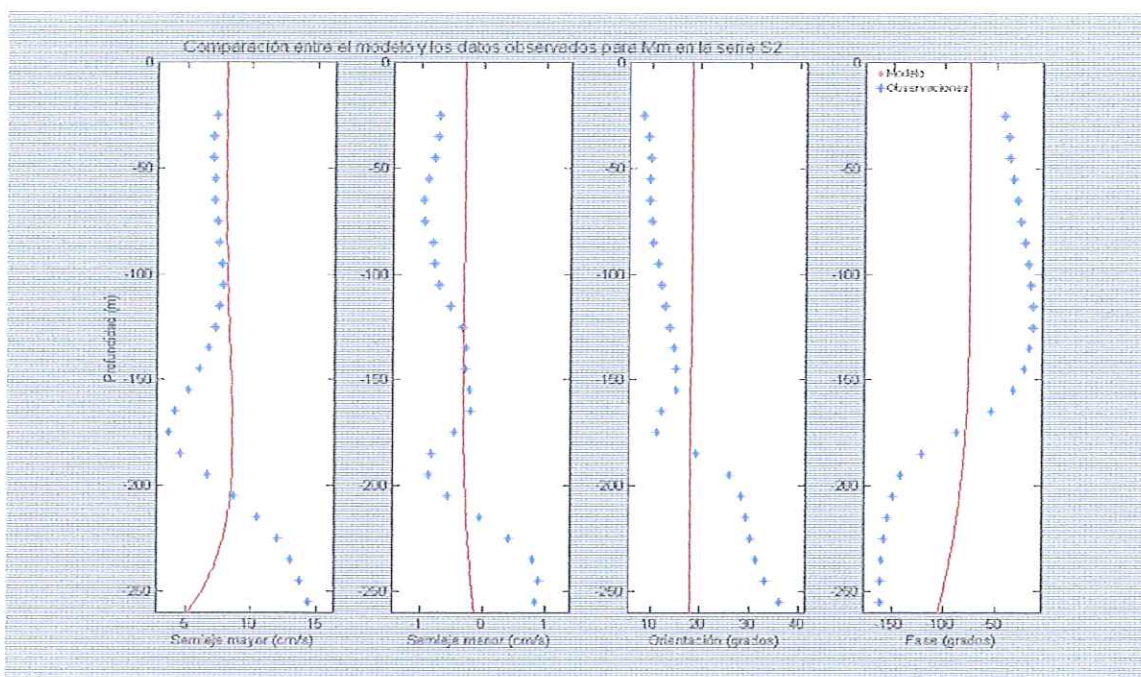


Figura 6.7. Resultados del modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante (línea continua) sobre las observaciones correspondientes a la componente M_m de la serie de mediciones S2 (asteriscos), semieje mayor (cm s^{-1}), semieje menor (cm s^{-1}), orientación ($^\circ$) y fase ($^\circ$).

IV.3 Discusiones

En general, la estructura vertical de la corriente de marea en el umbral del estrecho de Gibraltar indica que el agua del Atlántico fluye hacia el Mediterráneo entre la superficie y los ~150 m de profundidad, se encontró que el flujo presenta mayor intensidad en la banda semidiurna constituida principalmente por las mareas N_2 , S_2 y M_2 , siendo esta última la de mayor amplitud con una velocidad máxima de 126 cm s^{-1} a una profundidad de 154m. El agua del Mediterráneo fluye en la capa inferior entre los ~150 m y el fondo. La marea rota en sentido ciclónico en la capa superior invirtiendo el sentido de rotación en la interfase (entre los 130 y 175 m), después de los 175 m la corriente vuelve a rotar en sentido ciclónico. Existe una marcada diferencia de magnitud entre el semieje mayor y el semieje menor, esta diferencia indica que el flujo se da en forma casi rectilínea a lo largo del estrecho de Gibraltar.

La distribución vertical de la orientación muestra un cambio de orientación siendo hacia el Este cerca de la superficie y hacia el Noreste cerca del fondo.

La estructura de la corriente de marea presenta mayor variabilidad en la interfase, esto se debe probablemente a efectos de fricción ocasionados por el cambio de densidad entre el agua Atlántica y el agua Mediterránea.

El modelo utilizado se ajusta relativamente bien a las observaciones (véase Tabla 3) sin embargo, la variabilidad observada en la profundidad de la interfase no puede ser explicada con un modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante, estas variaciones probablemente pueden explicarse empleando un coeficiente de viscosidad que varíe con la profundidad, y que considere los efectos de las fronteras laterales del estrecho de Gibraltar.

En este trabajo se obtuvieron resultados analíticos similares a los resultados publicados por Tsimplis (2000) (Figura 7), sin embargo, para la realización de este trabajo de tesis se utilizaron datos correspondientes a dos años de mediciones continuas que permiten observar con detalle la presencia de una variabilidad estacional en la estructura vertical de las corrientes de marea en el umbral del estrecho de Gibraltar que no ha sido reportada formalmente en alguna publicación especializada. En los estudios anteriores citados en la introducción no se menciona nada relacionado con esta variabilidad, este descubrimiento merece ser estudiado a detalle para su publicación internacional.

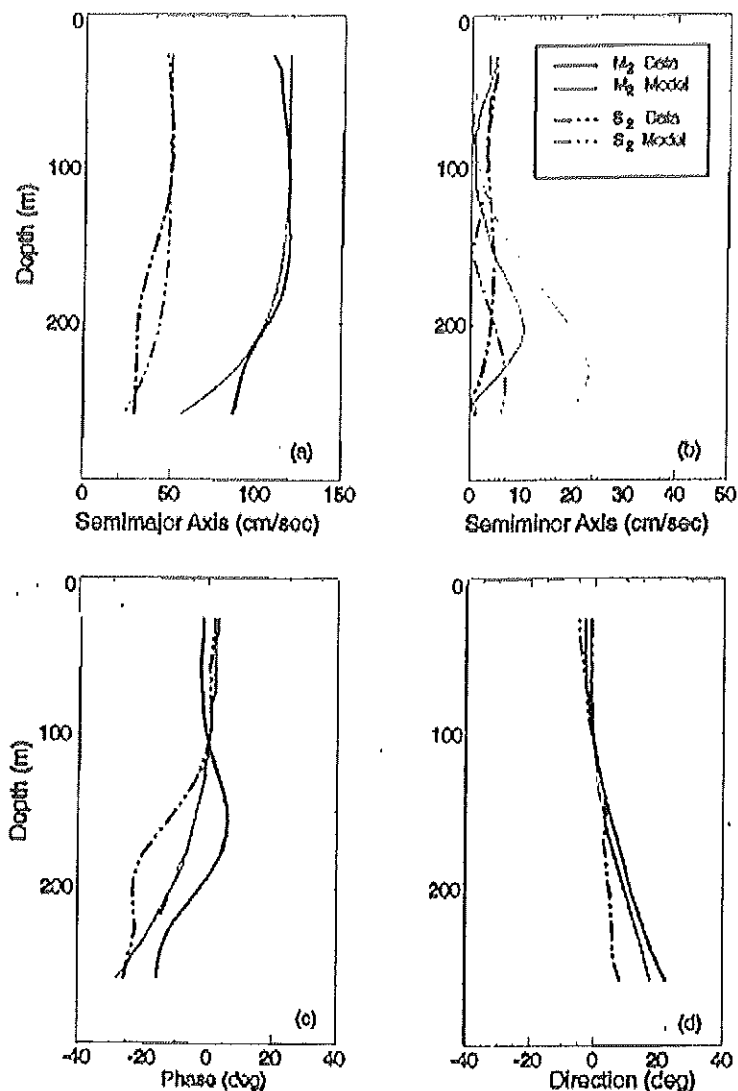


Figura 7. Distribución vertical de la señal de marea y el modelo friccional de *Kundu et al.* (1981) para las mareas semidiurnas: (a) semieje mayor; (b) semieje menor; (c) fase; (d) dirección. De esta manera reporta sus resultados *Tsimplis* (2000) en su artículo sobre la estructura vertical de las corrientes de marea en el umbral de Camarinal. Notese que la escala no permite observar variaciones significativas.

V. CONCLUSIONES.

1.- Los resultados del análisis armónico muestran que sí existe variabilidad en la estructura vertical de la corriente de marea en el umbral del estrecho de Gibraltar.

2.- La variabilidad en la estructura vertical de las corrientes de marea se intensifica cerca de la profundidad de la interfase (130 - 175 m) que separa el agua del Atlántico Norte en la parte mas superficial del agua del Mediterráneo localizada por debajo de esta profundidad.

3.- La variabilidad encontrada en la estructura vertical de la corriente de marea en el umbral del estrecho de Gibraltar se explica relativamente bien empleando un modelo analítico con coeficiente de viscosidad turbulenta constante $\nu = 0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (véase la Tabla 4). Los resultados obtenidos por Tsimplis (2000) para esta zona empleando el mismo modelo muestran una variabilidad muy similar entre los resultados analíticos y los observados, sin embargo, el periodo de sus observaciones (tres meses) es considerablemente menor al periodo de observaciones con el que se trabajó en esta tesis (dos años).

4.- Se propone el desarrollo futuro de un modelo analítico que emplee un coeficiente de viscosidad turbulenta que varíe con la profundidad $\nu = \nu(z)$.

VI. TRABAJO FUTURO.

Con el fin de explicar la variabilidad de la estructura vertical de las corrientes de marea en el umbral del estrecho de Gibraltar (umbral de Camarinal), se propone aplicar un modelo donde el coeficiente de viscosidad turbulenta ν varíe con la profundidad, se puede experimentar primeramente con un modelo donde ν se incremente linealmente con la profundidad en la ecuación de movimiento:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + ifw - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} - i \frac{\partial p}{\partial y} \quad (6.1)$$

Un modelo similar fue propuesto por Soulsby (1990), en este modelo; el coeficiente de viscosidad turbulenta se relaciona con la profundidad de la forma; $\nu = k \hat{u}_* z$, donde k es la constante de proporcionalidad de von Karman que tiene un valor de $k = 0.40$ (Soulsby, 1990), \hat{u}_* es la velocidad de fricción máxima durante el ciclo de marea definida como: $\rho \hat{u}_*^2 = \max |\tau_0|$, obtenida a partir de la relación:

$$\frac{\partial u}{\partial z} \sim \tau_0^{1/2} \rho^{-1/2} z^{-1} \quad (6.2)$$

que define la velocidad de fricción u_* por medio de $\tau_0 = \rho u_*^2$, donde ρ es la densidad.

Para evitar alguna singularidad en la solución debe aplicarse la condición de no deslizamiento $u = 0$ a la profundidad finita $z = z_0$ en lugar de en $z = 0$.

De esta forma se puede seguir trabajando con los resultados del análisis armónico de la corriente de marea, experimentando solamente con distintos valores de z_0 .

Puede considerarse la profundidad de la interfase ($\sim 150\text{m}$) como z_0 en una primera aproximación, para después evaluar el modelo desde esta profundidad ($\sim 150\text{m}$) hasta el fondo (290m) y observar si con estas consideraciones se puede explicar la variabilidad vertical de las corrientes de marea en el umbral de Camarinal.

VII – LITERATURA CITADA.

Bruno, M., Mañanes, R., Alonso, J.J., Izquierdo, A, Tejedor, L.; Kagan, B. (1999) Vertical structure of the semidiurnal tidal currents at Camarinal sill, The Strait of Gibraltar. Departamento de física aplicada, Universidad de Cádiz, Puerto Real (Cádiz) España. Reporte técnico. 16 pp.

Bryden, H.L, Candela, J. y Kinder, T.H. (1994) Exchange through the Strait of Gibraltar. *Progress in Oceanography*. **Vol. 33**. 201-248.

Candela, J. y Winant, C. (1990) Tides in the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research.*, **Vol. 95**. 7313-7335.

Candela, J. (1991) The Gibraltar Strait and its role in the dynamics of the Mediterranean Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. **Vol. 15**. 267-299.

García, J.L., Miguel, J.V. y Plaza, F. (1999) The tide at the eastern section of the Strait of Gibraltar. Departamento de física aplicada II, Universidad de Málaga. España. reporte técnico. 45 pp.

Godin, G. (1972). *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press. Toronto Canada. 264 pp.

Godin, G. (1988). TIDES. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada Baja California. México. 290 pp.

Kundu, P.K., Blanton, J.O. y Janopaul, M.M. (1981). Analysis of Current Observations on the Georgia Shelf. *Journal of Physical Oceanography*. **Vol. 11**. 1139-1149.

Soulsby, R. L. (1990). Tidal current boundary layers. Contenido en: Le Mehaute, B., Haines, D. M. (1990) *The sea*. Vol. 9A. Ocean engineering science. Wiley Interscience. New York. Páginas 523-566.

The Open University. (2001). *Ocean Circulation*. The Open University press and Butterworth-Heinemann. Oxford, UK. 286 pp.

Tsimplis, M.N. y Bryden, H.L. (2000) Estimation of the transports through the Strait of Gibraltar. *Deep-Sea Research*. I 47. Páginas 2219-2242.

Tsimplis, M. N. (2000) Vertical structure of tidal currents over the Camarinal Sill at the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical research*,. **Vol. 105**. 19,709 - 19,728.