

PARTE 1.-

EL MODELO REGIONAL: Resultados y validación

1.1.- Dominios espaciales del informe

El sistema de corrientes en el Estrecho de Gibraltar es muy complejo debido a un conjunto de circunstancias que convergen en la zona entre las que destacan la abrupta topografía y la importante estratificación de la columna de agua que, junto con los importantes volúmenes intercambiados para compensar las pérdidas evaporativas del Mar Mediterráneo y, más importante aún, para ajustar las oscilaciones de marea a uno y otro lado del Estrecho, conducen a la generación de una de las dinámicas internas más complicadas e intensas que existen en el planeta. Estos fenómenos internos condicionan la circulación en el área del Estrecho y, debido a que tienen escalas espaciales de coherencia mucho menores que los externos, producen variaciones espaciales de los patrones circulatorios en distancias relativamente cortas, tanto en la horizontal como en la vertical. Una consecuencia inmediata es que la modelización numérica realista de la dinámica del Estrecho precisa de un mallado de alta definición espacial a la vez que de un dominio lo suficientemente extenso como para permitir que estos fenómenos internos decaigan antes de alcanzar los contornos del mismo (ver Figura 1.1).

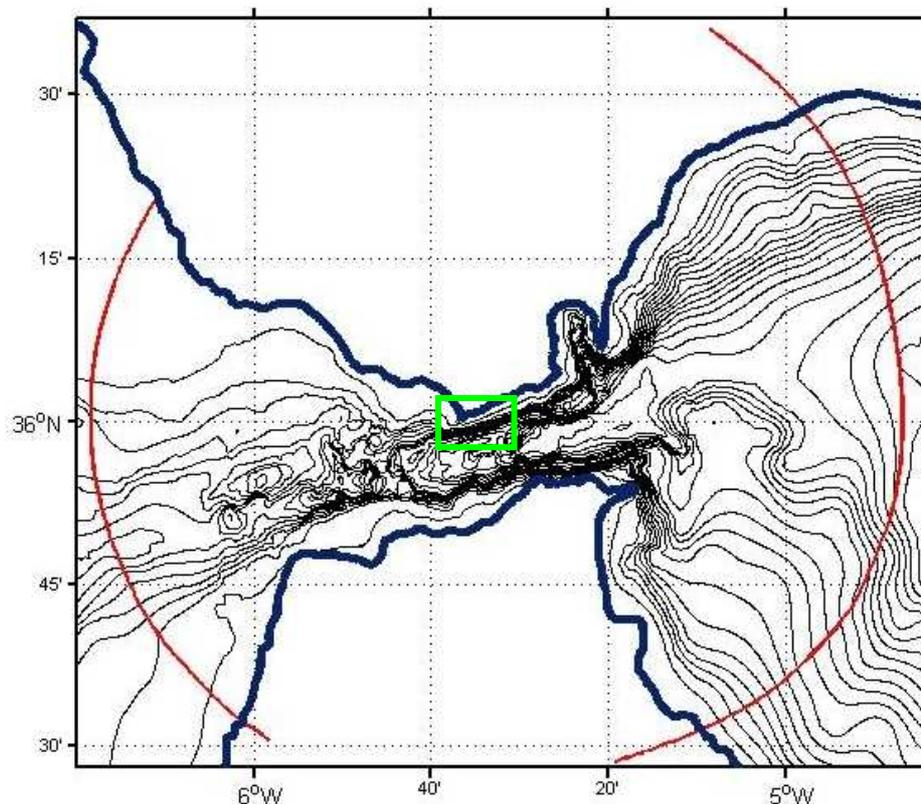


Figura 1.1.- Dominio del modelo numérico. Las líneas rojas marcan los contornos oriental y occidental. El recuadro verde indica el dominio modelo local que se está completando para cumplir con los objetivos del Estudio

El modelo numérico base empleado, que se denominará en lo sucesivo **modelo regional**, es totalmente tri-dimensional y utiliza una malla de más de 16 millones de nodos en 53 niveles de profundidad, alcanzando resoluciones de unos 50 metros en los lugares más conflictivos (la zona más angosta del Estrecho). Ha sido probado y contrastado en estudios científicos publicados en revistas de reconocido prestigio internacional.

El modelo ha sido anidado con el que denominaremos **modelo local** (Parte 2 del Informe) cuyo dominio espacial es el indicado en el recuadro verde de las Figuras 1.1 y 1.2), proporcionándole las condiciones de contorno necesarias para su correcto funcionamiento. En esta Primera Parte del informe se presentan los resultados producidos por el modelo regional en el dominio del modelo local representado en la Figura 1.2 siguiendo la estructura que se esboza en el siguiente epígrafe.

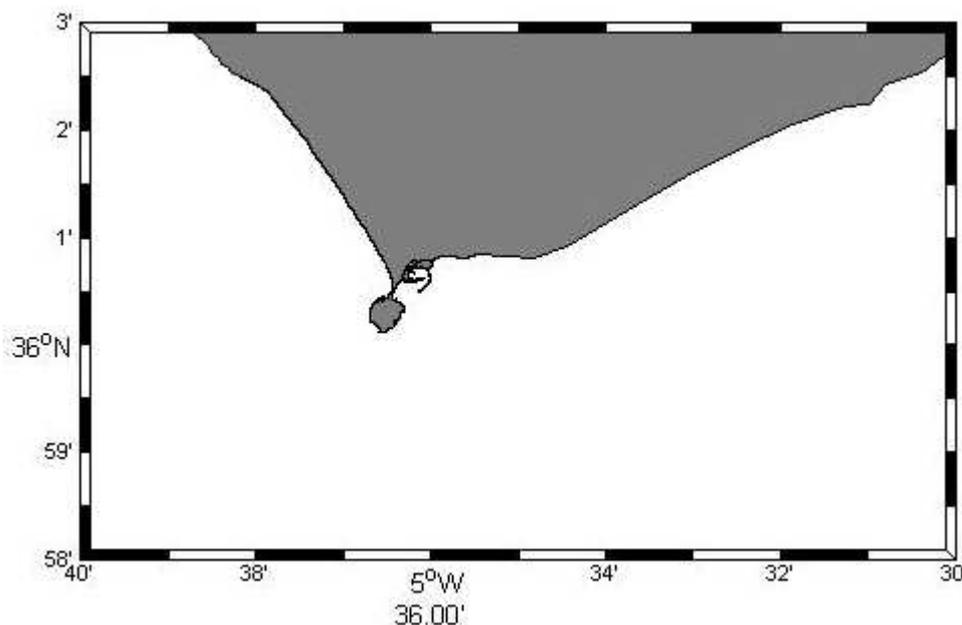


Figura 1.2.- Dominio del modelo local sobre el que se investigará las alteraciones del régimen circulatorio en las inmediaciones de la Isla de Tarifa bajo las diferentes alternativas de configuración de la ampliación del Puerto de Tarifa. En esta primera parte del informe se analizan, valoran y validan las soluciones que produce el modelo regional sobre este dominio con el fin de producir las condiciones de contorno necesarias para ejecutar el modelo local de mucha más resolución que se presenta en la Parte 2.

1.2.- Estructura del capítulo.

Un buen procedimiento a seguir a la hora de abordar el estudio del complejo sistema de corrientes en el Estrecho de Gibraltar es descomponer el campo de velocidades en contribuciones de escalas temporales bien definidas y que no solapen. La descomposición más conveniente es de la forma:

$$U_{total} = U_0 + U_{marea} + U_{meteo} + U_{otros} \quad (1.1)$$

(a) (b) (c) (d)

donde U_{total} es la velocidad actual en un momento dado, U_0 la contribución debida al intercambio medio baroclino (el forzado climáticamente por el exceso de evaporación en la cuenca Mediterránea) y que se correspondería con un hipotético estado estacionario donde no existiera ningún otro forzamiento U_{marea} es la velocidad asociada a la marea, U_{meteo} la inducida por agentes meteorológicos y U_{otros} la debida a otras posibles causas, entre ellas, el ruido. Este último término no puede modelarse y por ello no se analiza en este informe.

En el epígrafe 1.3 se describe brevemente, siempre en el subdominio local, el primero de los términos de la ecuación (1.1) y en el 1.4 se hace lo propio con la contribución mareal para un régimen de mareas medias. Mencionar que la intensa interacción no lineal entre la dinámica “estacionaria” (U_0) y la escala temporal de las mareas aconseja tratar conjuntamente los términos (a) y (b) y así se hace en el citado epígrafe. En el epígrafe 1.5 se describe la manera en la que la variabilidad meteorológica afecta a los patrones de circulación bajo cuatro escenarios distintos de forzamiento, es decir, se valora y estima la influencia del término (c) en la ecuación (1.1) en la corriente total. En el epígrafe 1.6 se resumen las principales conclusiones que se derivan de la ejecución del modelo regional en lo referente a la circulación en el dominio del modelo local. Se incluye un último epígrafe 1.7 para mostrar observaciones recientes de corrientes tomadas en campañas oceanográficas realizadas “*ad hoc*” conjuntamente por la APBA y GOFIMA para la validación del modelo donde se muestra cómo este recoge satisfactoriamente los patrones observados de circulación en las proximidades del puerto.

1.3.- Campo medio de velocidades.

La Figura 1.3 muestra el campo de velocidades medio a cinco profundidades diferentes. Cuando la velocidad es nula o la profundidad menor que la cota representada, el punto de malla correspondiente aparece indicado por un punto. Aunque se es consciente de que el principal interés de este informe es la circulación de la capa más superficial (la definida por $z > -50\text{m}$ ó, incluso $z > -25\text{m}$), en esta figura se incluye el nivel $z = -100\text{m}$ para poner de manifiesto el correcto funcionamiento del modelo a la hora de reproducir el conocido intercambio bicapa a través del Estrecho de Gibraltar.

Los paneles correspondientes a las 5 cotas seleccionadas (-2m , -10m , -20m , -50m y -100m) muestran la estructura baroclina típica del Estrecho con la velocidad decreciendo en intensidad con la profundidad. El dominio se encuentra en la capa Atlántica donde la corriente media se dirige siempre hacia el Este. En $z = -100\text{m}$ y aunque aún se dirige hacia el Mediterráneo, la corriente es muy débil indicando que nos hallamos en las inmediaciones de la interfase de velocidad nula (de hecho, la interfase en esta zona se encuentra entre los 120 y 130 m de profundidad).

En la parte exterior del dominio la corriente fluye paralela a costa, alcanzando valores de 1 m/s. Esta estructura se mantiene los primeros 20 metros y comienza a disminuir de modo que en $z = -50\text{m}$ la máxima velocidad es un 40% inferior a la superficial. En $z = -100\text{m}$ la corriente se ha reducido hasta valores máximos de 0.2 m/s. Unos pocos metros por debajo de esta cota la corriente se anula y más abajo aún, invierte (paneles no mostrados) indicando que nos adentramos en la capa de agua Mediterránea saliente.

Es interesante la presencia de una débil contracorriente costera superficial en la franja litoral al Este de la isla de Tarifa que se dirige hacia el Oeste y que afecta a la zona de mayor interés en este informe (rectángulo azul en el panel $z = -2\text{m}$, que denominaremos en lo sucesivo zona PT). La contracorriente es en realidad la rama septentrional de una pequeña celda de circulación ciclónica en toda el área costera al Este de Tarifa (visible en los tres primeros paneles), que estaría ocasionada por la separación de costa de la intensa corriente exterior a la altura de la isla de Tarifa. Las observaciones tomadas recientemente en la parte interior de la plataforma frente a Tarifa a escasas decenas de metros al sur del espigón del puerto confirman estos resultados (ver Figuras 1.27 a 1.30 y discusión en el epígrafe 1.7 al final del Capítulo).

ESCENARIO: Campo medio del modelo No Hidrostatico

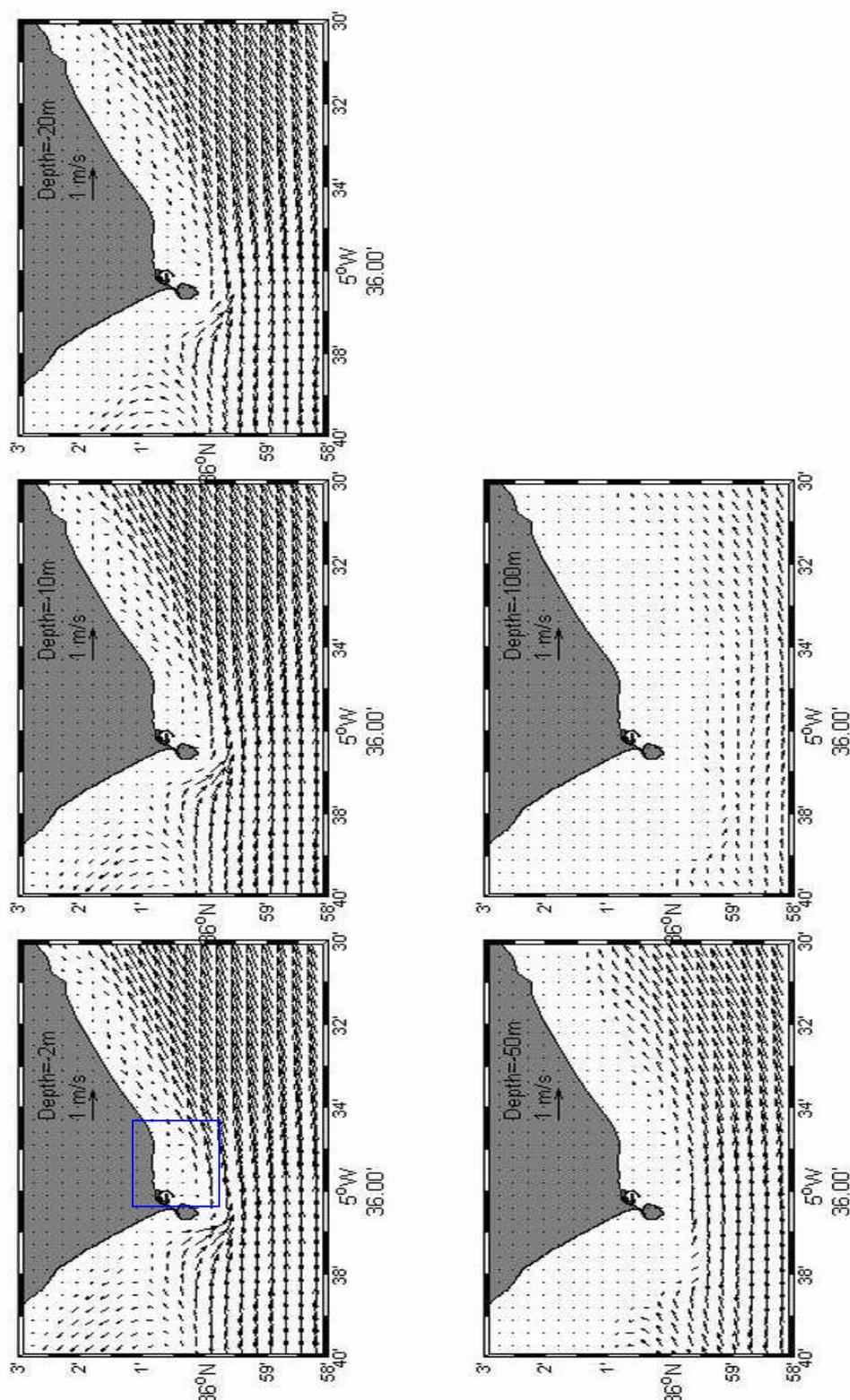


Figura 1.3. Patrón espacial del campo medio de velocidad en la zona de estudio a cinco cotas diferentes: -2m, -10m, -20m, -50m y -100m. Se incluye escala de velocidad horizontal. El patrón medio ha sido calculado promediando valores instantáneos proporcionados por el modelo forzado por mareas durante un mes lunar aproximadamente. El cuadrado azul señala las inmediaciones del puerto, zona a la que se refiere la mayor parte del informe.

1.4.- Campo de velocidades asociado a las mareas

La intensa interacción no-lineal entre las escalas temporales asociadas al intercambio estacionario y a las mareas hace que ambas deban ser computadas simultáneamente. De hecho, las mareas dominan la dinámica de las corrientes marinas en el Estrecho de modo que es prácticamente imposible encontrar la situación “media” esbozada en los paneles de la Figura 1.3. Lo normal es que el patrón de corrientes instantáneas varíe y mucho durante los ciclos de marea.

Desde un punto de vista global, el Mar Mediterráneo Occidental se comporta como onda estacionaria para las frecuencias de marea. Lógicamente, este comportamiento tiene su reflejo en la dinámica de mareas del Estrecho de Gibraltar. Concretamente, para la especie semidiurna dominante, el Estrecho está situado entre el nodo de oscilación que aquella onda tiene en la línea imaginaria que une Alicante con Orán en el Mediterráneo y el antinodo que se encuentra en el Golfo de Cádiz a unas decenas de kilómetros al Oeste de su contorno occidental. La dinámica de estas ondas exige que la corriente de marea se dirija desde el Mediterráneo hacia el Atlántico cuando el nivel del mar está subiendo (de bajamar a pleamar) y al contrario cuando está bajando. Tradicionalmente y por razones obvias estas fases de corriente se denominan “creciente” y “vaciante” y durante ellas las corrientes estarían dirigidas hacia el Oeste y Este respectivamente¹. En el informe se utilizarán estos términos para referirse a los semiciclos de marea correspondientes.

Los mapas de corriente que se muestran a continuación están realizados para una situación “media” de mareas (ver Figura 1.4). Cada figura consta de seis paneles, representando cada uno las corrientes producidas por el modelo en el instante indicado en el pequeño mareograma insertado en el mapa. Los sucesivos paneles están separados 2 horas y la secuencia comienza siempre en la bajamar de modo que el ciclo representado se inicia en el comienzo de la creciente y finaliza con la vaciante. No existe forzamiento meteorológico de modo que lo representado se corresponde con la suma de los términos (a) y (b) de la ecuación (1.1).

Se presentan mapas para las cinco profundidades mostradas en la Figura 1.3. Aunque no es de interés directo en este estudio se han incluido de nuevo los mapas de la cota $z=-100\text{m}$ por ser la velocidad media (término (a)) en esa

¹ Hay que recordar que la corriente total en un instante dado es suma de 3 contribuciones (ecuación 1.1) y por ello puede llevar la dirección “incorrecta” en un instante dado como consecuencia de la influencia de los términos (a) y (c). Es decir, podemos encontrar aguas desplazándose hacia el Este durante la creciente cuando, de no existir esos otros términos, la marea debe dirigirse hacia el Oeste.

profundidad muy débil, lo que permite visualizar mejor la dinámica debida exclusivamente a las mareas (término (b)), circunstancia que no ocurre en las otras cotas donde se dan patrones espaciales más complejos. Notar que en todos los paneles se mantiene la misma escala de velocidad y que ésta es el doble que la representada en la Figura 1.3 (2 m/s en lugar de 1 m/s). También se han construido contornos de color indicando el valor absoluto de la velocidad con la misma escala de color para todos los paneles.

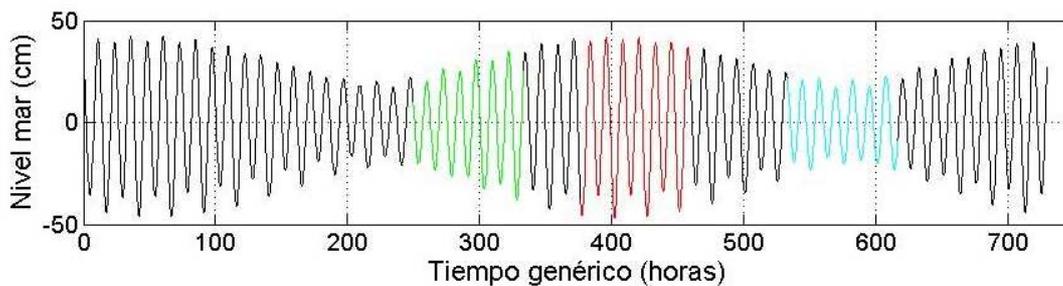


Figura 1.4. Mareograma producido por los armónicos M2 y S2 de la especie semidiurna y los O1, K1 de la diurna con que se ha forzado el modelo numérico. Los distintos colores indican periodos en los que las mareas se pueden considerar de rango medio (verde), vivas (rojo) y muertas (azul). Por cuestiones de brevedad en este informe solamente se presentan resultados para el primero de los escenarios, mareas medias, que es el más frecuente.

La Figura 1.5 muestra los resultados para la cota $z=-2\text{m}$. El primero de los paneles se corresponde al cambio de vaciante a creciente (bajamar) momento en el que teóricamente la contribución mareal es nula. Por esa razón el patrón de corrientes debiera parecerse al medio mostrado en la Figura 1.2 pero esto es solamente cierto en la parte exterior. En la franja costera la corriente de creciente ya ha entrado y fluye con bastante intensidad inundando la zona PT (rectángulo azul en Figura 1.2). Poco antes de la pleamar esta corriente desaparece y la corriente superficial en todo el dominio es muy débil debido a que la corriente de creciente fluye en contra de la corriente media y tiende a cancelar la corriente total. Como norma, se esperan corrientes totales menores (en promedio) durante la fase creciente de la marea.

La comparación de los paneles correspondientes a la vaciante (los dos últimos) con sus equivalentes de creciente ilustran muy bien este comportamiento en la zona exterior. Sin embargo, eso no es cierto en la zona PT, donde la creciente es la corriente importante y la vaciante es casi inexistente debido al apantallamiento que produce la isla de Tarifa. Las corrientes de marea son por tanto muy asimétricas en cuanto a intensidad durante uno y otro semiciclo de marea. Las observaciones recogidas en el interior de la zona PT confirman no solamente esta asimetría de intensidades sino también el desfase de las corrientes respecto a la zona exterior (ver epígrafe 1.7).

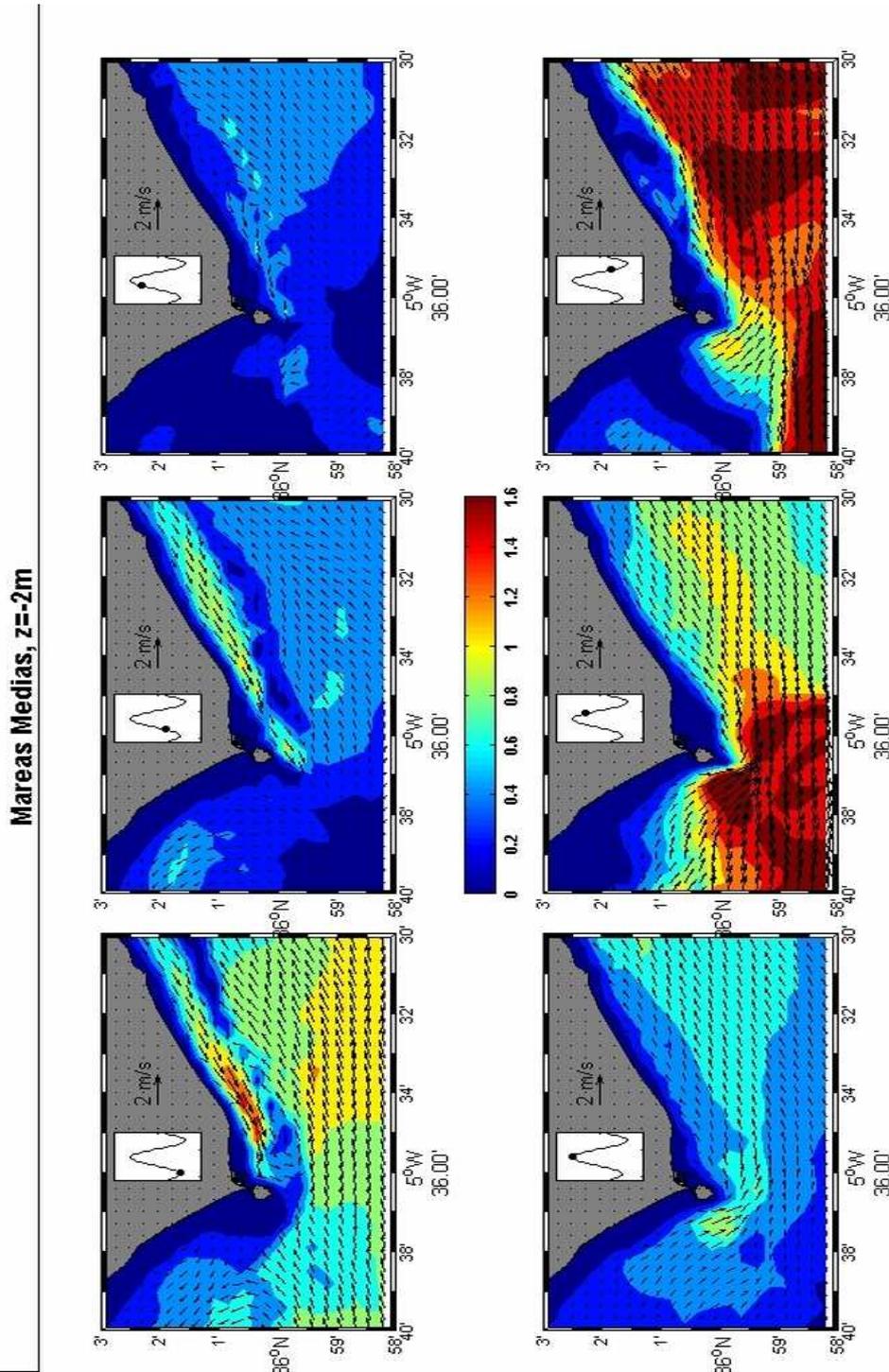


Figura 1.5. Corriente total sin forzamiento meteorológico durante un ciclo de mareas de rango medio en la cota $z=-2\text{m}$. El momento del ciclo de marea a que se refiere el mapa está indicado en el mareograma insertado. La secuencia comienza al inicio de la creciente y finaliza cerca del final de la vaciante. El panel que seguiría al último sería similar al primero de los presentados puesto que se cierra el ciclo. Los contornos de color muestran el módulo de la velocidad (intensidad de corriente) de acuerdo con la escala de color (m/s) en el centro de la Figura.

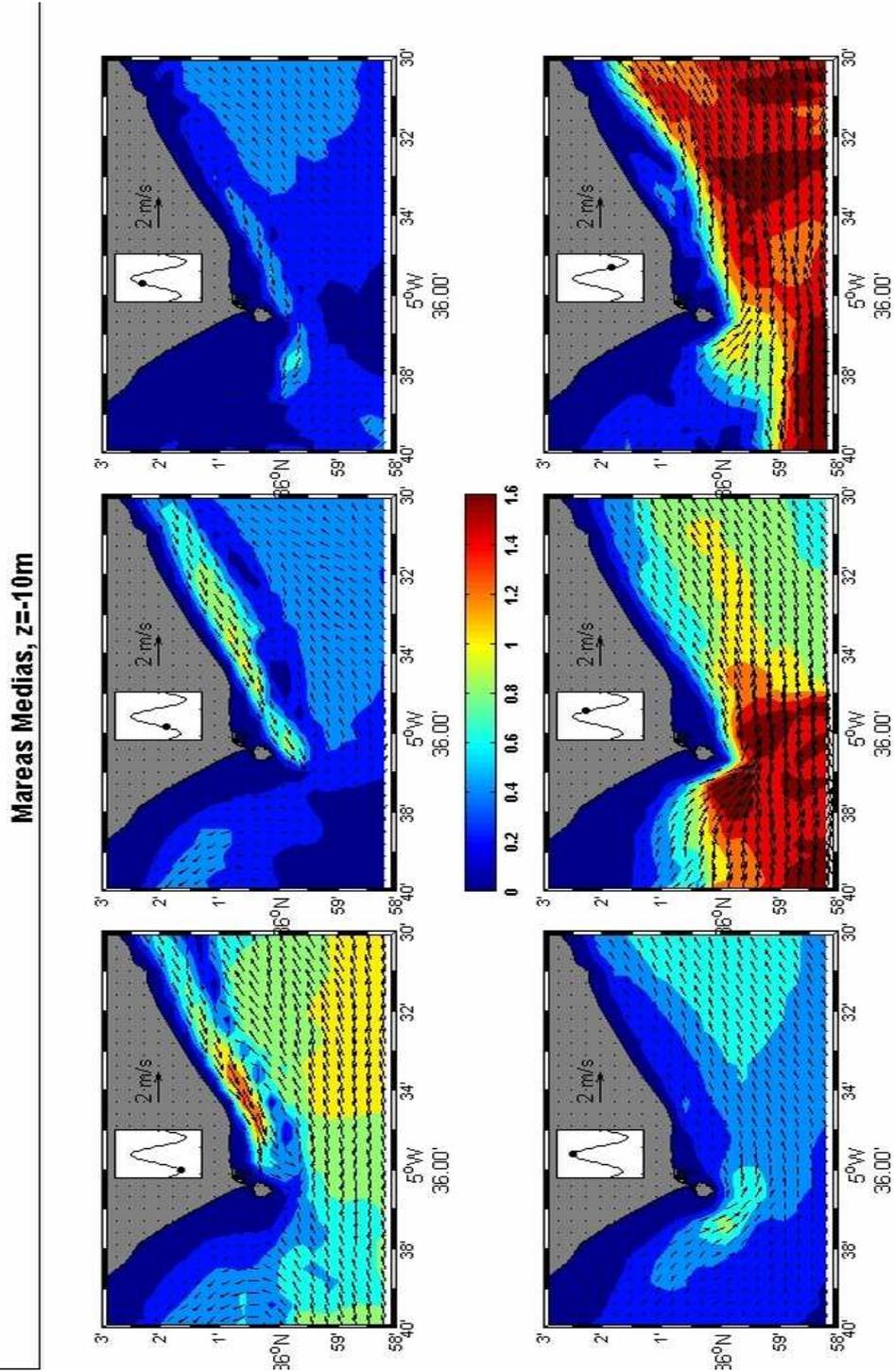


Figura 1.6. Mismo que Figura 1.5 para la cota $z = -10\text{m}$.

Otra característica digna de mención observada ya en la Figura 1.2 es la formación de la celda de circulación ciclónica justo a levante de la isla de Tarifa en la zona PT en el comienzo de la creciente (primero de los paneles de Figura 1.5). A la vista del patrón de circulación en la parte exterior, donde la corriente sigue siendo claramente hacia el Este, esta celda de circulación parece surgir del encuentro de la corriente exterior y de la corriente mareal costera. La formación de estos pequeños remolinos inducidos por la marea puede ser un fenómeno relativamente frecuente del que se tienen ciertas referencias por imágenes satélite tomadas con los radares de apertura sintética (imágenes SAR de Synthetic Aperture Radar en nomenclatura inglesa). La isla de Tarifa, con su peculiar geometría, bien pudiera ser un lugar de generación de tales estructuras de submesoescala cuya repercusión en el ecosistema costero puede ser importante.

No se observan grandes diferencias entre lo que ocurre en $z=-2\text{m}$ (Figura 1.5) y en las cotas $z=-10\text{m}$ y $z=-20\text{m}$ (Figuras 1.6 y 1.7). El patrón de corrientes es muy similar, con tamaños de corrientes sólo muy ligeramente inferiores, dando a entender que la dinámica descrita es aplicable a la capa superficial de unos 20m de espesor. Aunque es una conclusión que no puede ser ilustrada a partir de los resultados del modelo regional, sí se puede adelantar que en las zonas donde no se alcancen los 20 m de profundidad el perfil se verá deformado por la acción de la fricción con el fondo que hará disminuir la velocidad en la capa límite.

A partir de los 50m de profundidad el campo de velocidades tiende a ser menos intenso debido en buena medida a la disminución de la corriente media y también a una aparente reducción de las corrientes puramente mareales. En $z=-100\text{m}$ donde la contribución de la corriente media es poco importante, la dinámica de mareas se aprecia con claridad, con corrientes hacia el Oeste durante la creciente y hacia el Este durante la vaciante. El pequeño flujo medio hacia el Este que aún persiste (Figura 1.3, panel 5) y que coincide en dirección con la vaciante hace que esta última sea algo más intensa que la corriente durante la fase de creciente.

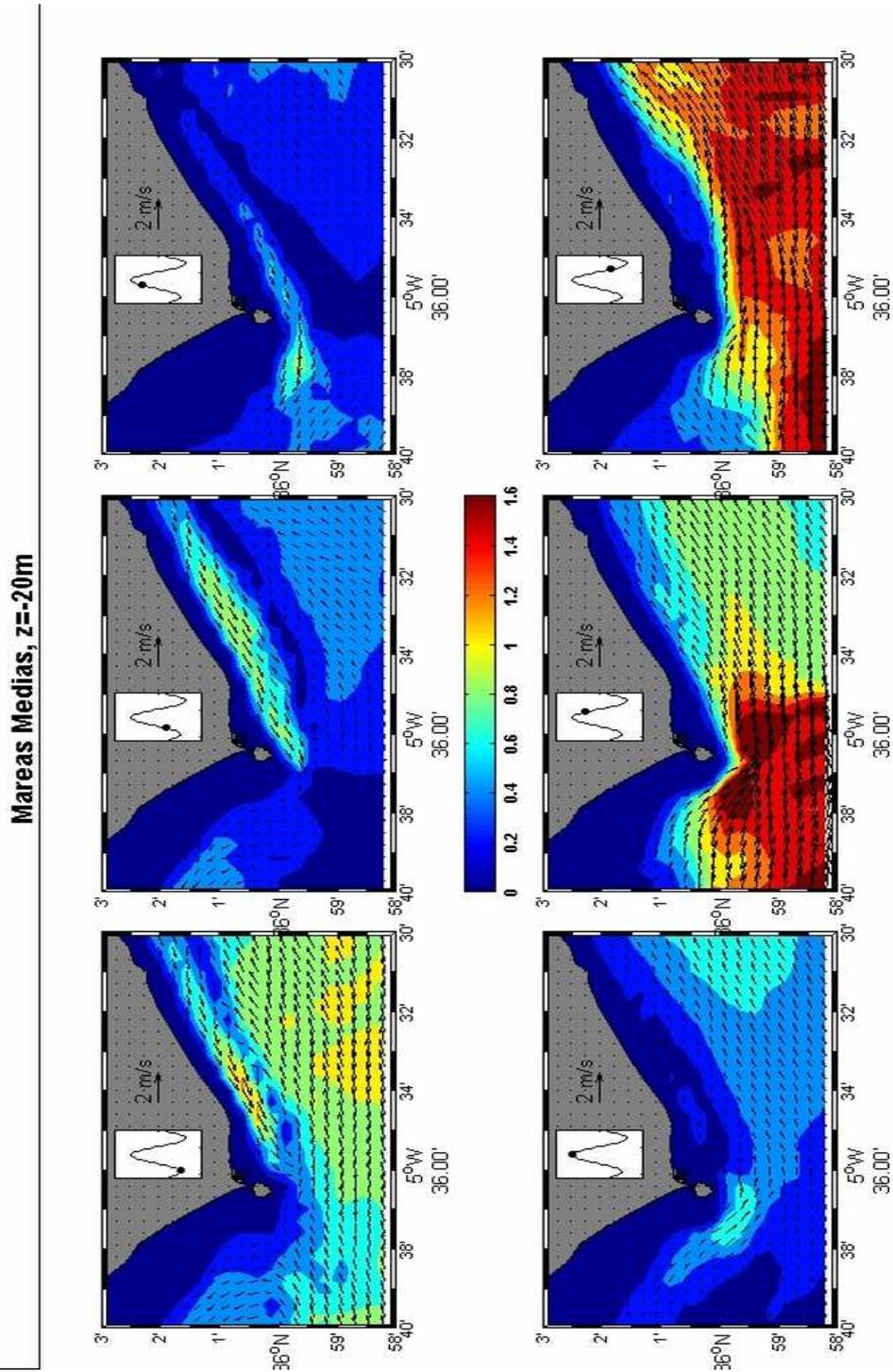


Figura 1.7. Mismo que Figura 1.5 para la cota $z = -20\text{m}$.

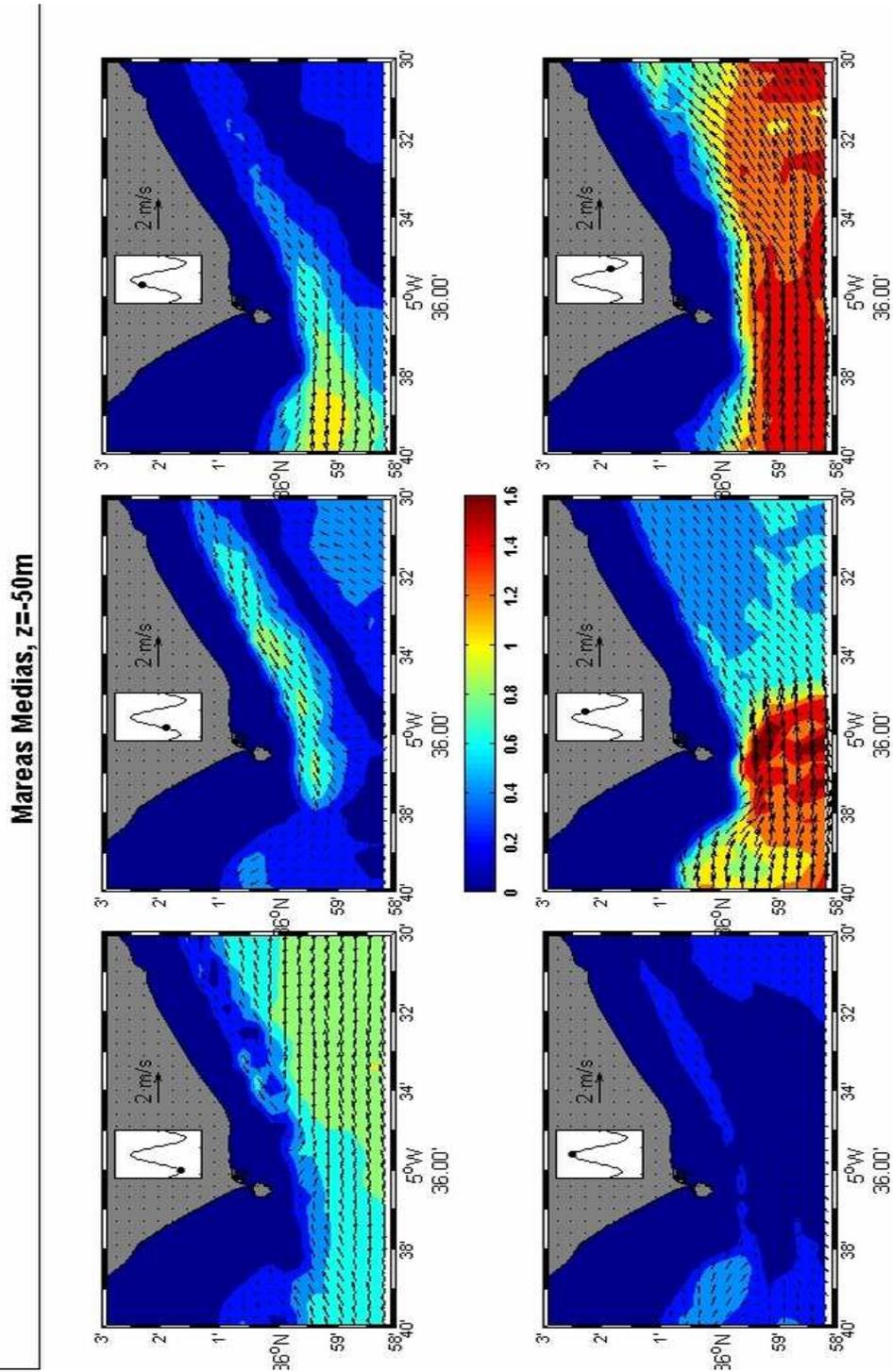


Figura 1.8. Mismo que Figura 1.5 para la cota $z = -50\text{m}$.

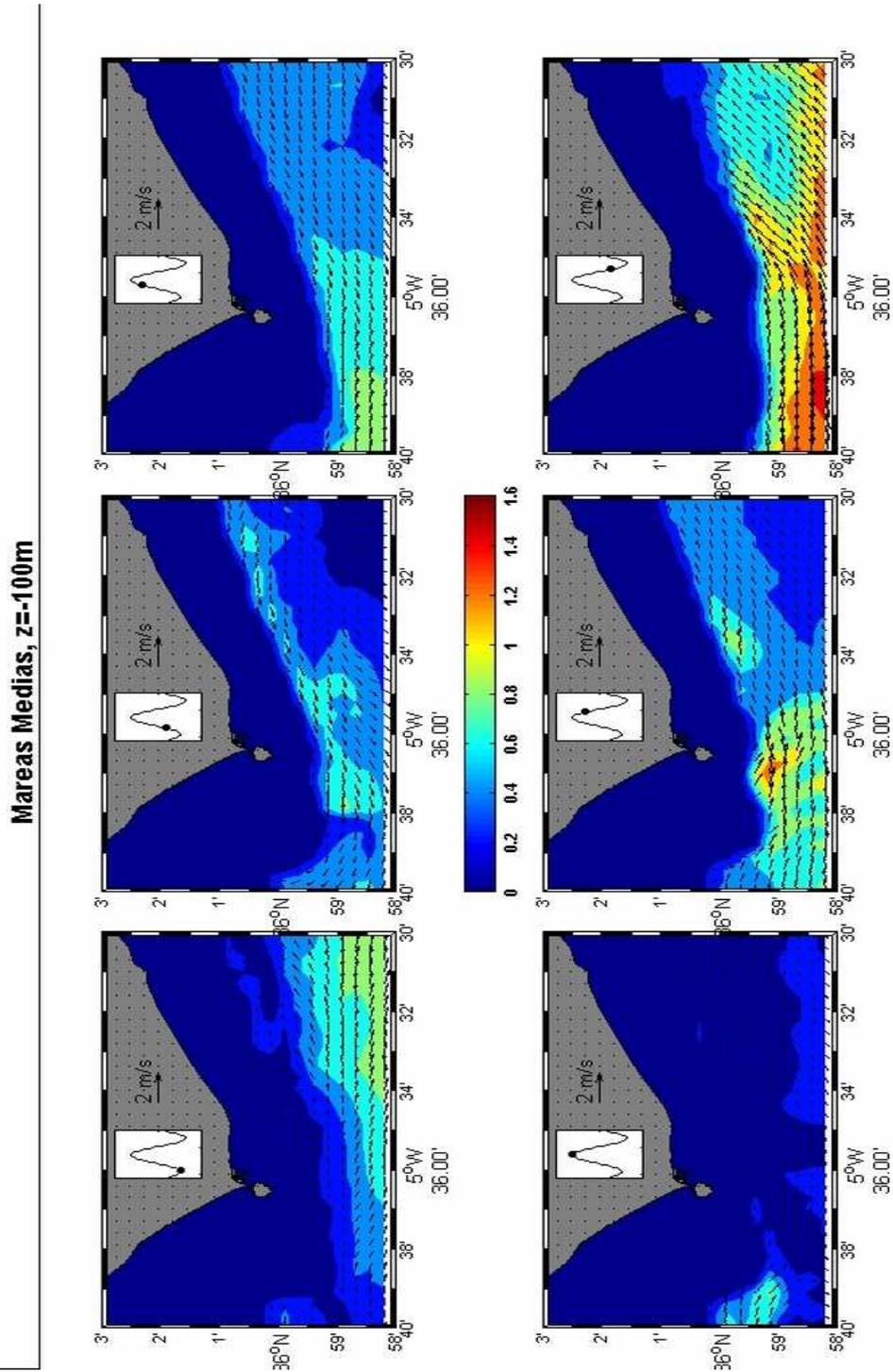


Figura 1.9. Mismo que Figura 1.5 para la cota $z = -100\text{m}$.

1.5.- Modificaciones debidas al forzamiento meteorológico.

En la escala temporal de pocos días (entre 5 y 15 días de periodo, en correspondencia con el paso de sistemas atmosféricos) el intercambio a través del Estrecho es sensible al llamado forzamiento meteorológico, que tiene doble origen. En primer lugar, un aumento de presión atmosférica en el Mediterráneo Occidental –principalmente- ejerce un empuje mecánico hacia abajo sobre el nivel del mar forzándolo a descender, para lo cual es necesario evacuar agua a través del Estrecho de Gibraltar, única conexión con el océano abierto. Ello se consigue disminuyendo el flujo entrante y aumentando el saliente simultáneamente (si la presión atmosférica disminuye ocurre lo contrario ya que la disminución ejercería una suerte de succión sobre el nivel del mar que forzaría a entrar más agua de la media). El segundo efecto mecánico es el arrastre del viento sobre la superficie del mar de modo que los Ponientes tienden a aumentar la velocidad de la corriente superficial hacia el Mediterráneo y los Levantes a frenarla.

Ambos mecanismos están auto-relacionados pues una alta presión sobre el Mediterráneo genera Levantes en el Estrecho de modo que los efectos de ambos se suman y acentúan la reducción de la velocidad de la capa Atlántica entrante (y del flujo entrante). Lo contrario sucede bajo el efecto de un descenso de presión sobre la cuenca, que conlleva vientos de Poniente y, consecuentemente, un aumento acentuado de la velocidad y flujo entrantes. Estudios experimentales, teóricos y numéricos muestran que, sobre el flujo intercambiado, el efecto de la presión atmosférica es mucho más importante debido a que produce una fuerza de volumen que actúa sobre toda la columna de agua, frente a la naturaleza de fuerza superficial de la cizalla del viento cuyo efecto decae con relativa rapidez con la profundidad. Sin embargo, el efecto del viento sobre la capa más superficial de la columna de agua es importante debido precisamente a esa naturaleza por lo que ambos factores deben ser tenidos en cuenta.

Se han generado cuatro escenarios que cubren el rango de variaciones meteorológicas esperables para cuantificar el efecto de estos forzamiento.

- ESCENARIO 1: Fuerte aumento de presión atmosférica en el Mediterráneo acompañada de vientos de Levante de intensidad 10 m/s en el centro del canal disminuyendo ligeramente hacia ambas costas.
- ESCENARIO 2: Fuerte disminución de la presión atmosférica en el Mediterráneo acompañada de vientos de Poniente de 10 m/s en el centro del canal disminuyendo ligeramente hacia ambas costas.
- ESCENARIO 3: Igual que escenario 1 pero sin aumento de presión atmosférica.

- ESCENARIO 4: Igual que escenario 2 pero sin disminución de la presión atmosférica.

Los dos primeros escenarios son más propios del invierno, cuando el paso de frentes atmosféricos por la zona produce fuertes variaciones de presión atmosférica y vientos asociados. Los otros dos se corresponderían con situaciones más estivales donde las variaciones de presión atmosférica son pequeñas pero sí pueden producirse intensos episodios de viento.

Los bloques de figuras que siguen ilustran las modificaciones que estos escenarios (término (c) en ecuación 1.1) introducen en los patrones de corrientes de marea mostrados en el epígrafe anterior. Los distintos paneles se corresponden con los mismos instantes de marea que en las figuras 1.5 a 1.9 por lo que pueden ser comparados directamente. Para no sobrecargar de figuras el informe se muestran solamente los resultados para las cotas más superficiales, usualmente las tres primeras ($z=-2\text{m}$, $z=-10\text{m}$, $z=-20\text{m}$) y excepcionalmente la $z=-50\text{m}$. No se presenta ningún panel de $z=-100\text{m}$.

Las Figuras 1.10-1.13 son los resultados obtenidos para el ESCENARIO 3 donde se impone un viento moderado-intenso de Levante sin forzamiento debido a la presión atmosférica. La primera de ellas (Figura 1.10) muestra el resultado en la cota $z=-2\text{m}$ donde se aprecia una intensificación de la corriente de creciente y una debilitación de la vaciante con respecto a la situación de no forzamiento (Figura 1.5). Aunque debilitada, la vaciante sigue teniendo una intensidad notable en la parte exterior del dominio. Las Figuras 1.11, 1.12 y 1.13 muestran los resultados en las cotas $z=-10\text{m}$, $z=-20\text{m}$ y $z=-50\text{m}$, esta última con la intención de ilustrar cómo el efecto del forzamiento bajo el ESCENARIO 3 apenas llega a esta profundidad y menos aún a la cota (no presentada) $z=-100\text{m}$. La acción del viento penetra en una capa de pocas decenas de metros de espesor, menos de 50 en este caso, en buena correspondencia con el espesor predicho en la teoría de capa límite de Ekman para coeficientes de difusión turbulenta realistas.

La situación es diferente en las condiciones del ESCENARIO 1 (Figuras 1.14 a 1.17) donde al mismo tipo de viento de Levante se le superpone un forzamiento meteorológico importante debido al efecto de la presión atmosférica (altas presiones en el Mediterráneo). En este caso, el efecto del forzamiento penetra en profundidad y afecta a todos los niveles intensificando la creciente y debilitando la vaciante en bastante mayor medida que bajo el ESCENARIO 3. De hecho, el efecto de frenado de este forzamiento sobre el flujo medio entrante es casi total, dejando corrientes dominantes medias hacia Poniente en toda la columna de agua.

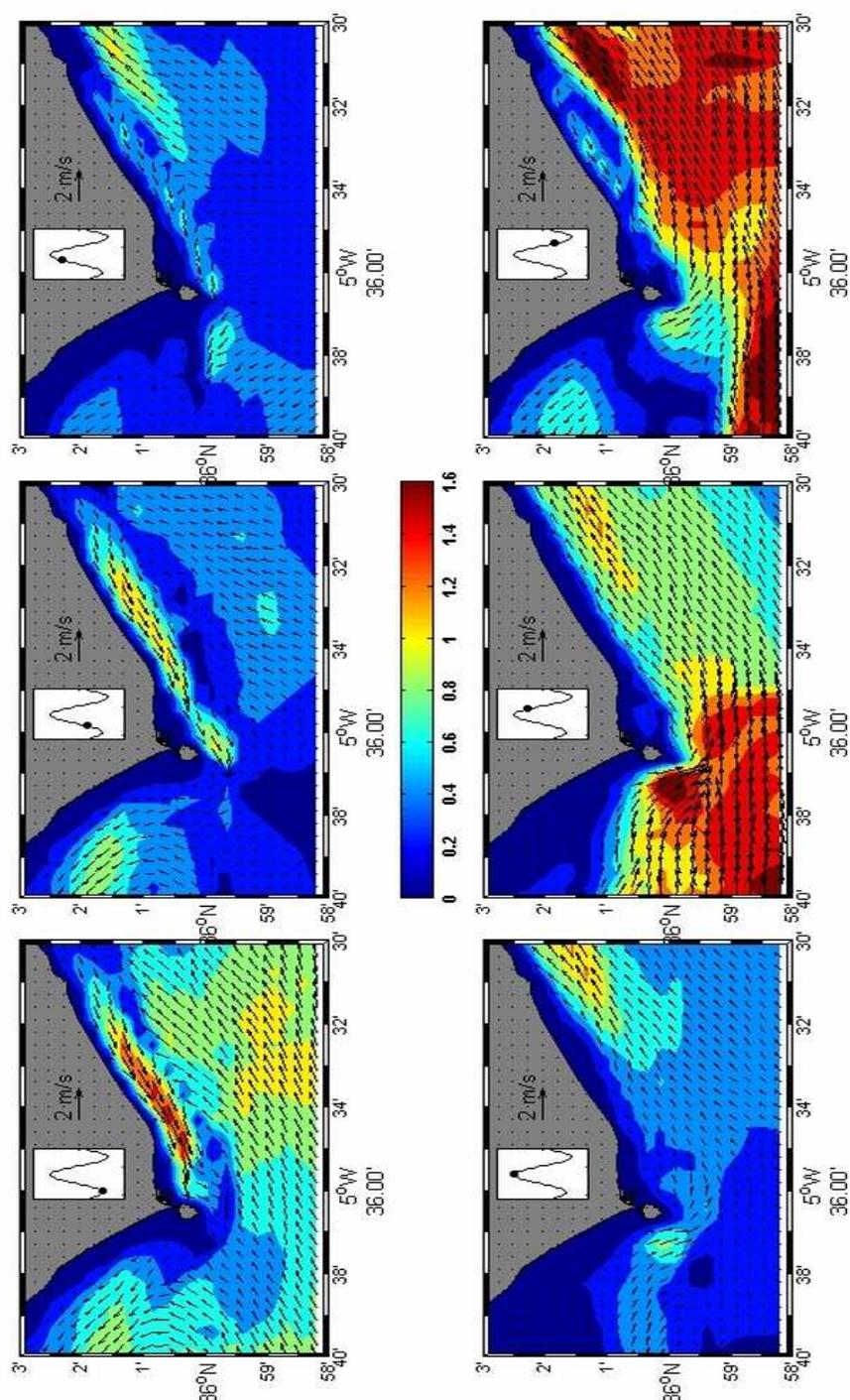
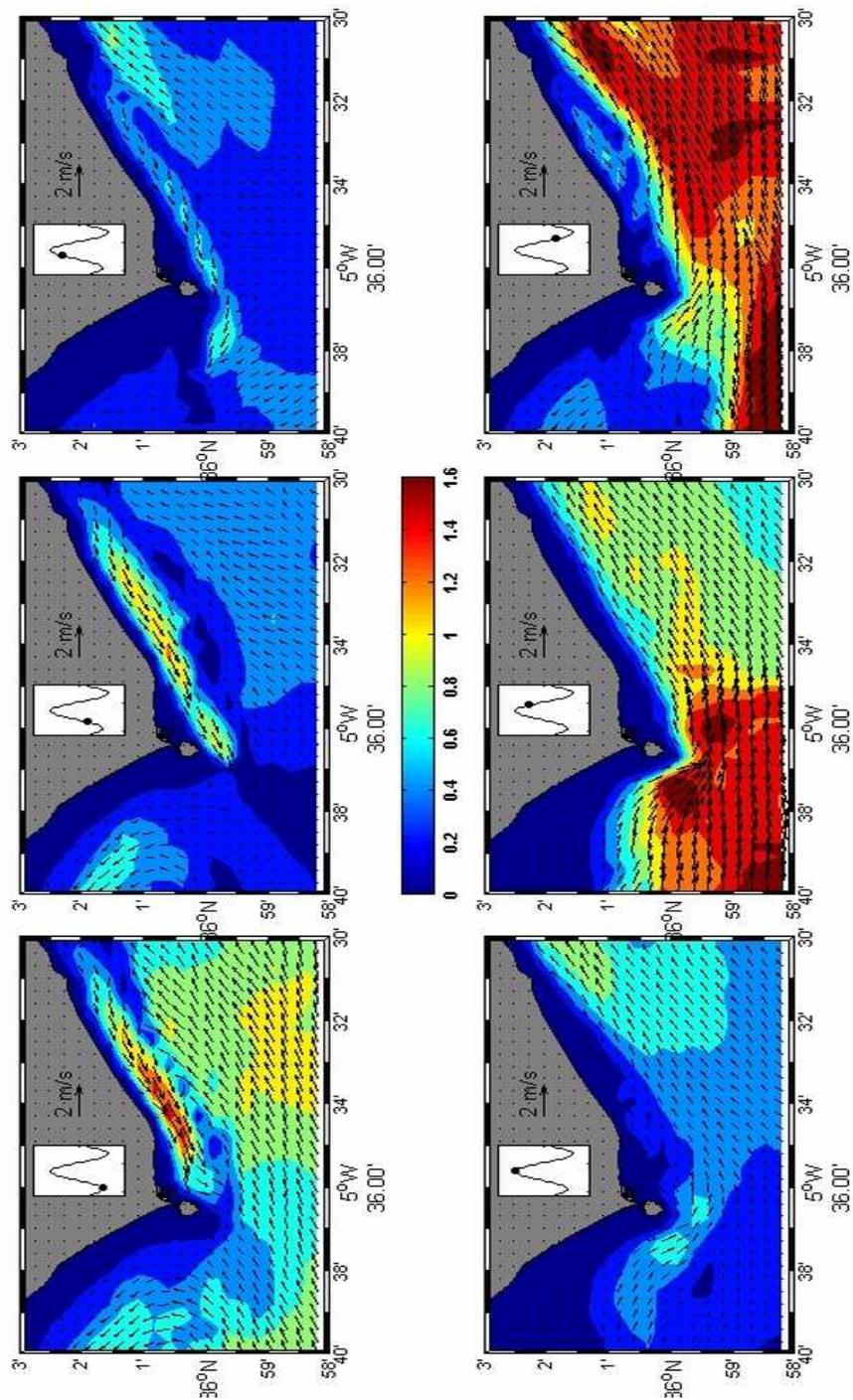
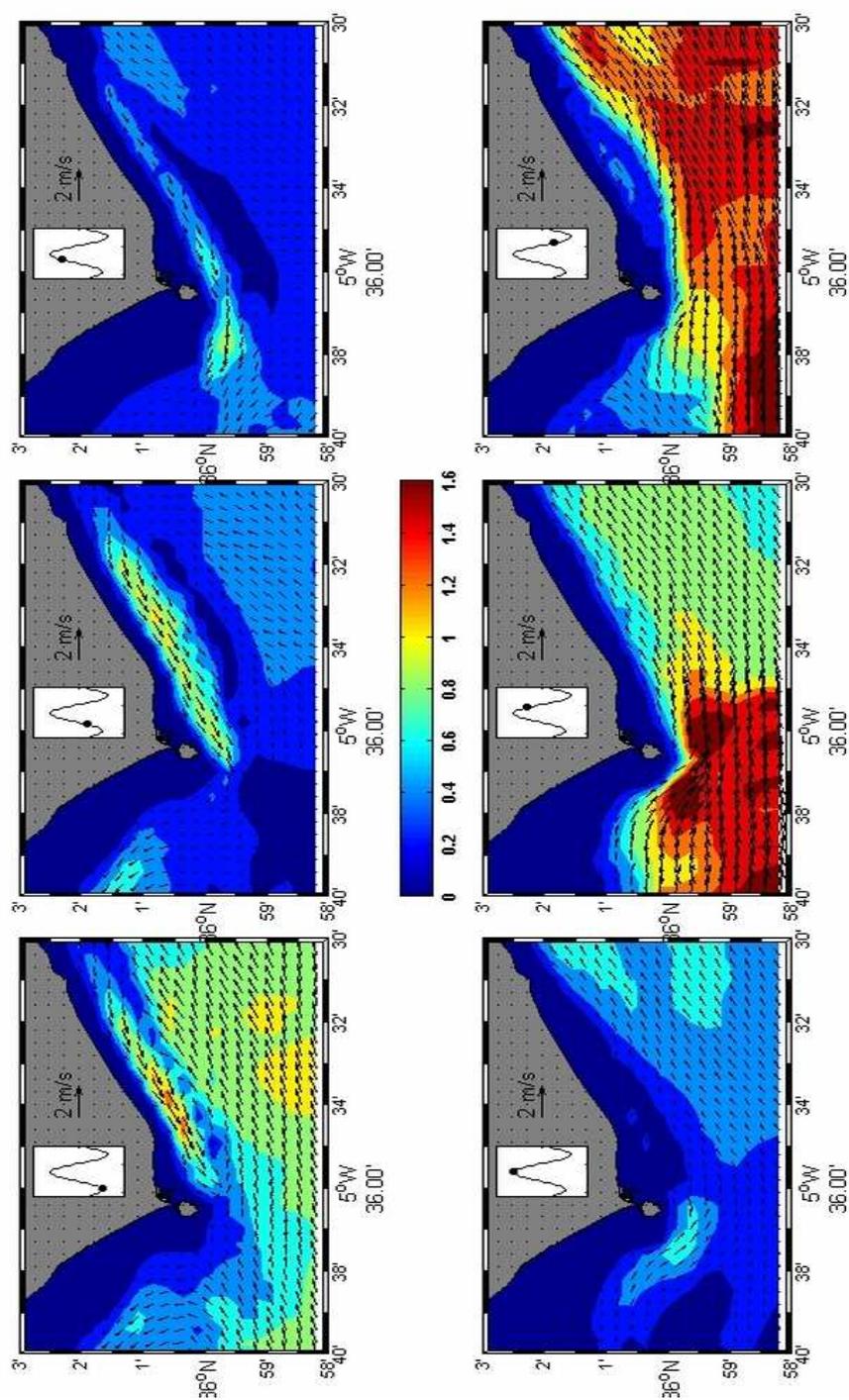
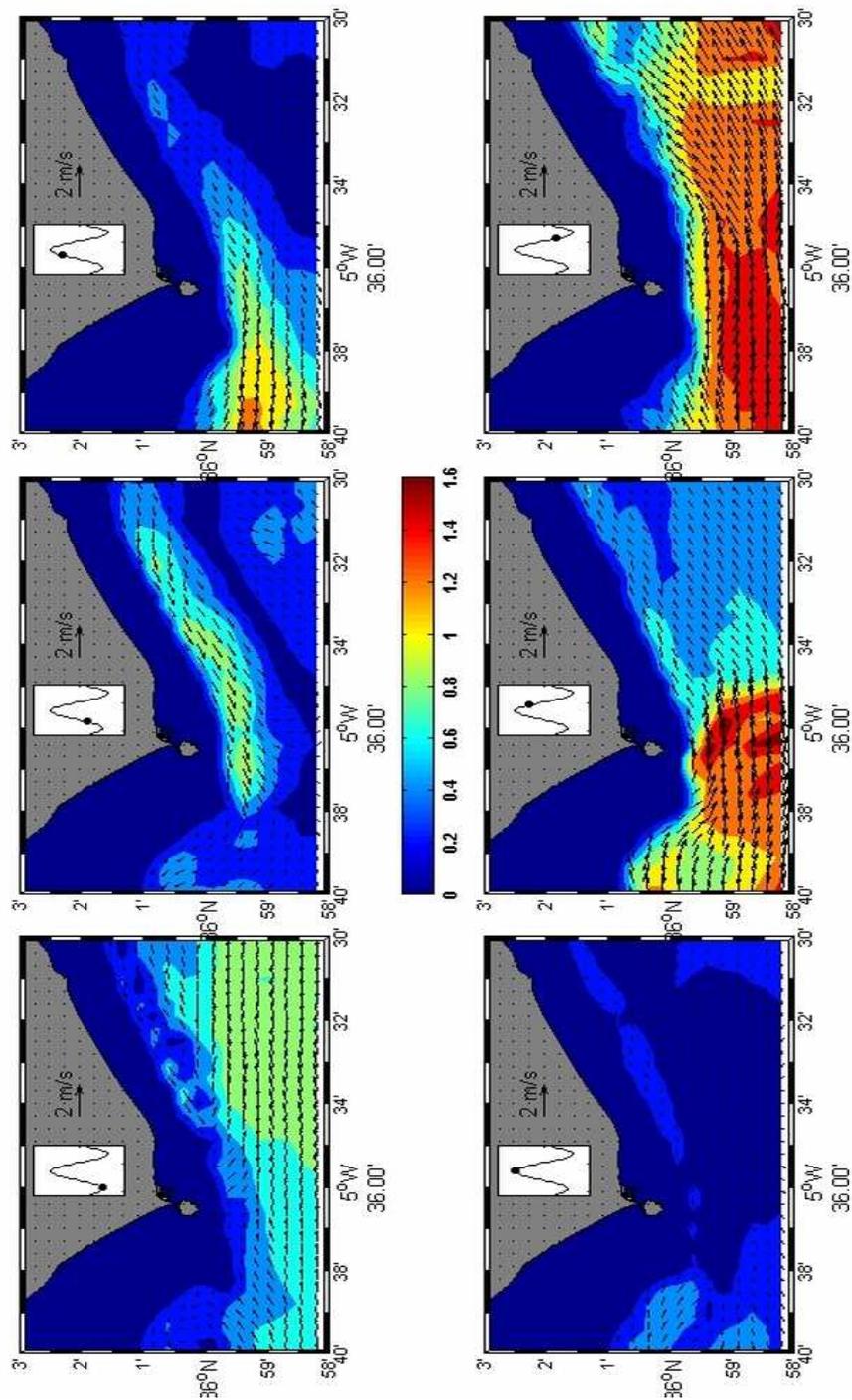
Mareas Medias, Forz-Meteo: Lev=10m/s, $Q_0=0$ Sv, Prof. z=-2m

Figura 1.10. Corriente total bajo forzamiento meteorológico de viento de Levante exclusivamente (**ESCENARIO 3**) durante el mismo ciclo de mareas de rango medio en la cota $z=-2$ m mostrado en la Figura 1.5. El momento del ciclo de marea está indicado en el mareograma insertado. La secuencia comienza al inicio de la creciente y finaliza al final de la vaciante. Los contornos de color muestran el módulo de la velocidad (intensidad de corriente) de acuerdo con la escala de color (m/s) en el centro de la Figura.

Mareas Medias, Forz-Meteo: Lev=10m/s, $Q_0=0$ Sv, Prof. z=-10mFigura 1.11. Mismo que Figura 1.10 para la cota $z=-10$ m (**ESCENARIO 3**)

Mareas Medias, Forz-Meteo: Lev=10m/s, $Q_0=0$ Sv, Prof. z=-20mFigura 1.12. Mismo que Figura 1.10 para la cota $z=-20$ m (ESCENARIO 3)

Mareas Medias, Forz-Meteo: Lev=10m/s, $Q_0=0$ Sv, Prof. z=-50mFigura 1.13. Mismo que Figura 1.10 para la cota $z = -50$ m (**ESCENARIO 3**)

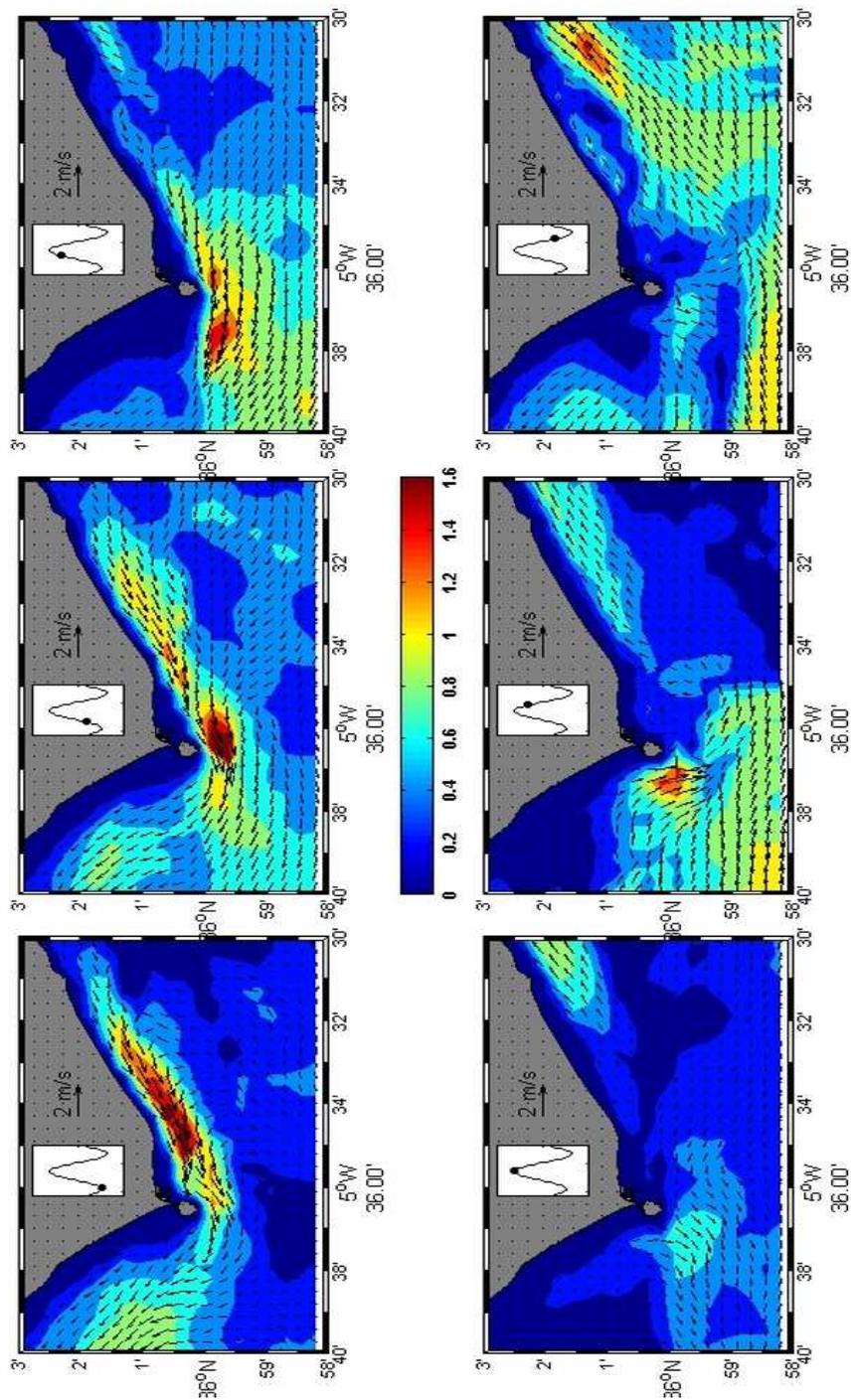
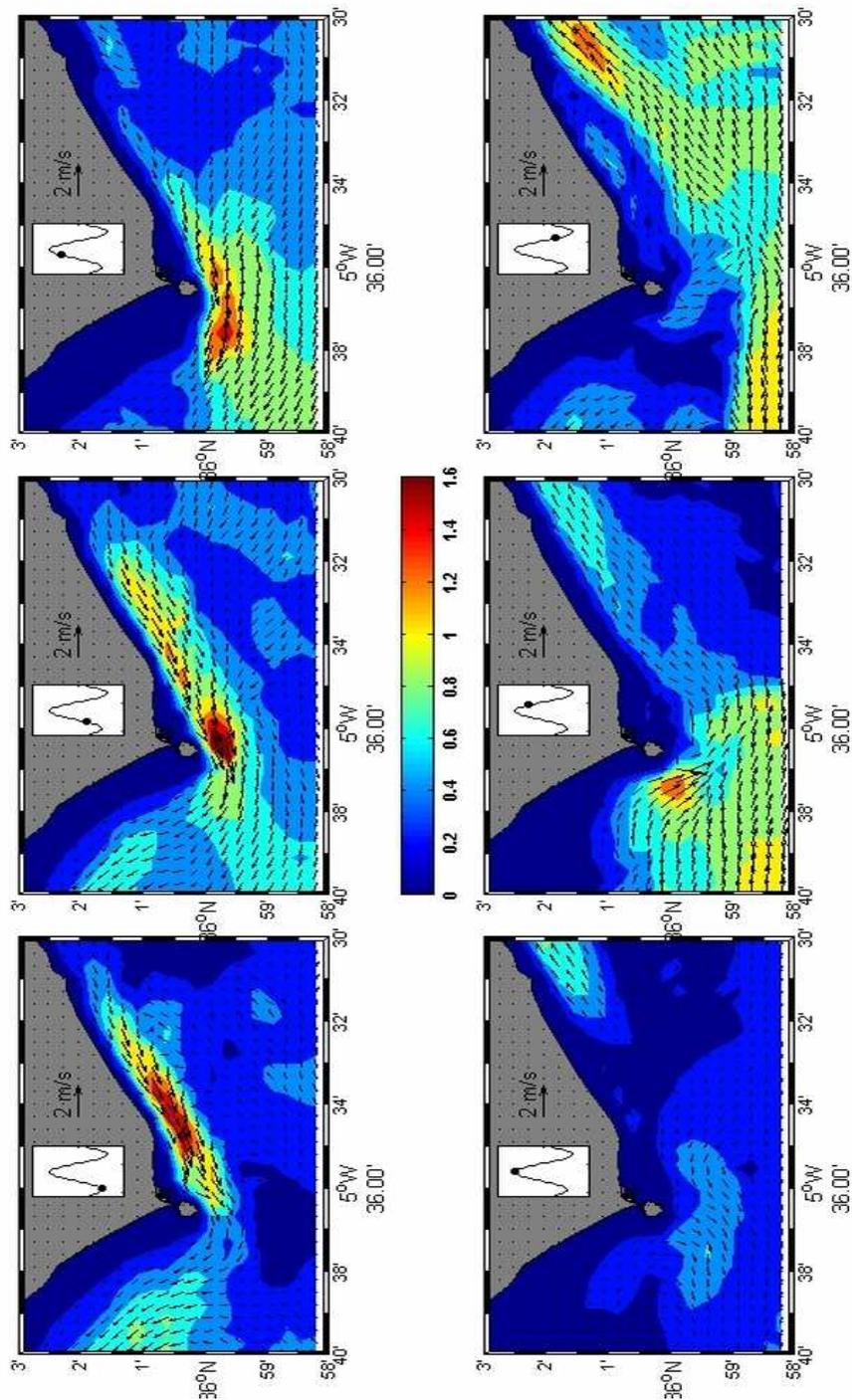
Mareas Medias, Forz-Meteo: Lev=10m/s, $Q_0=1\text{Sv}$. Prof. $z=-2\text{m}$ 

Figura 1.14. Corriente total bajo forzamiento meteorológico de viento de Levante y sobrepresión atmosférica en el Mediterráneo (**ESCENARIO 1**) durante el mismo ciclo de mareas de rango medio en la cota $z=-2\text{m}$ mostrado en la Figura 1.5. El momento del ciclo de marea está indicado en el mareograma insertado. La secuencia comienza al inicio de la creciente y finaliza al final de la vaciante. Los contornos de color muestran el módulo de la velocidad (intensidad de corriente) de acuerdo con la escala de color (m/s) en el centro de la Figura.

Mareas Medias, Forz-Meteo: Lev=10m/s, $Q_0=1\text{Sv}$, Prof. $z=-10\text{m}$ Figura 1.15. Mismo que Figura 1.14 para la cota $z=-10\text{m}$ (ESCENARIO 1)

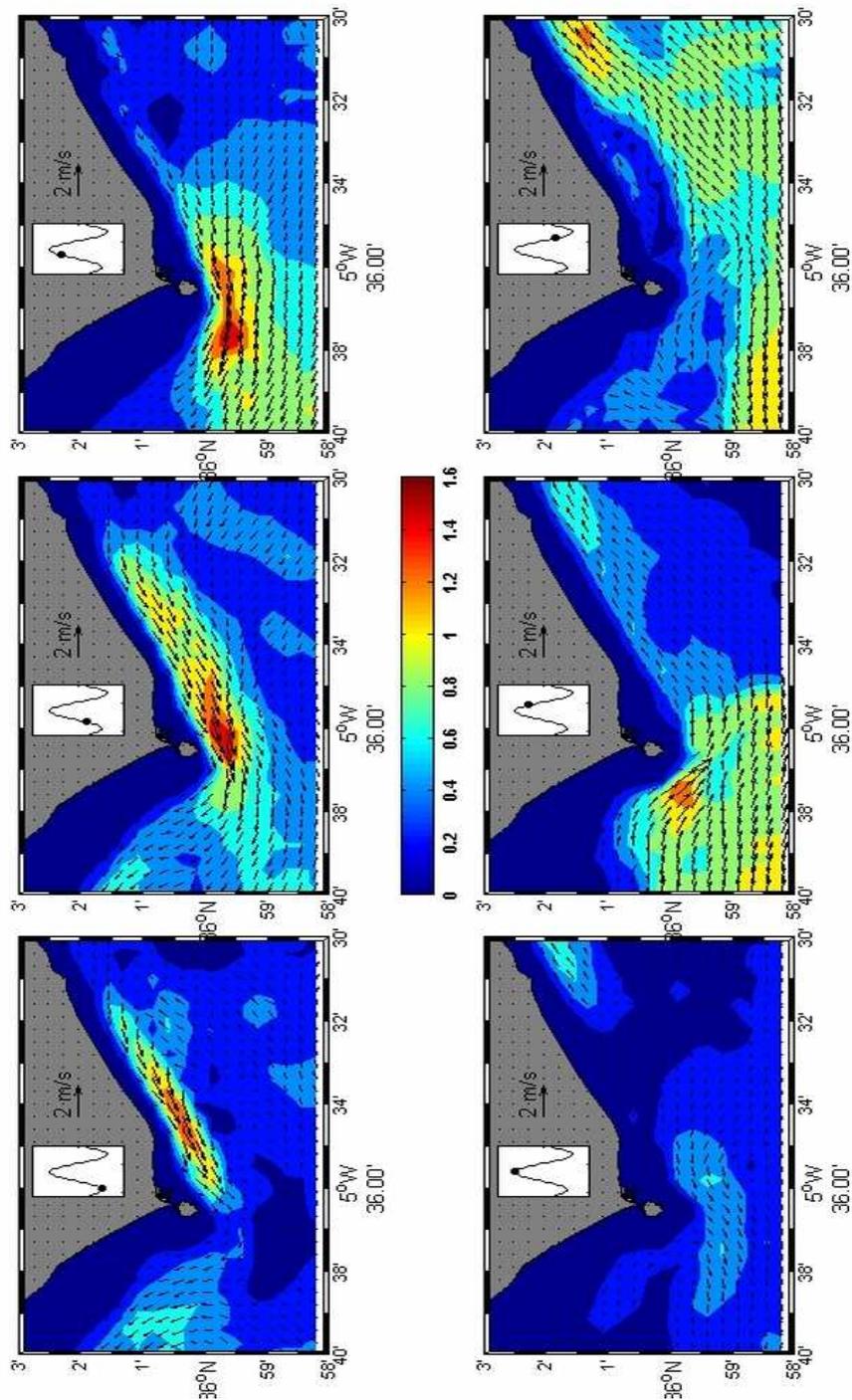
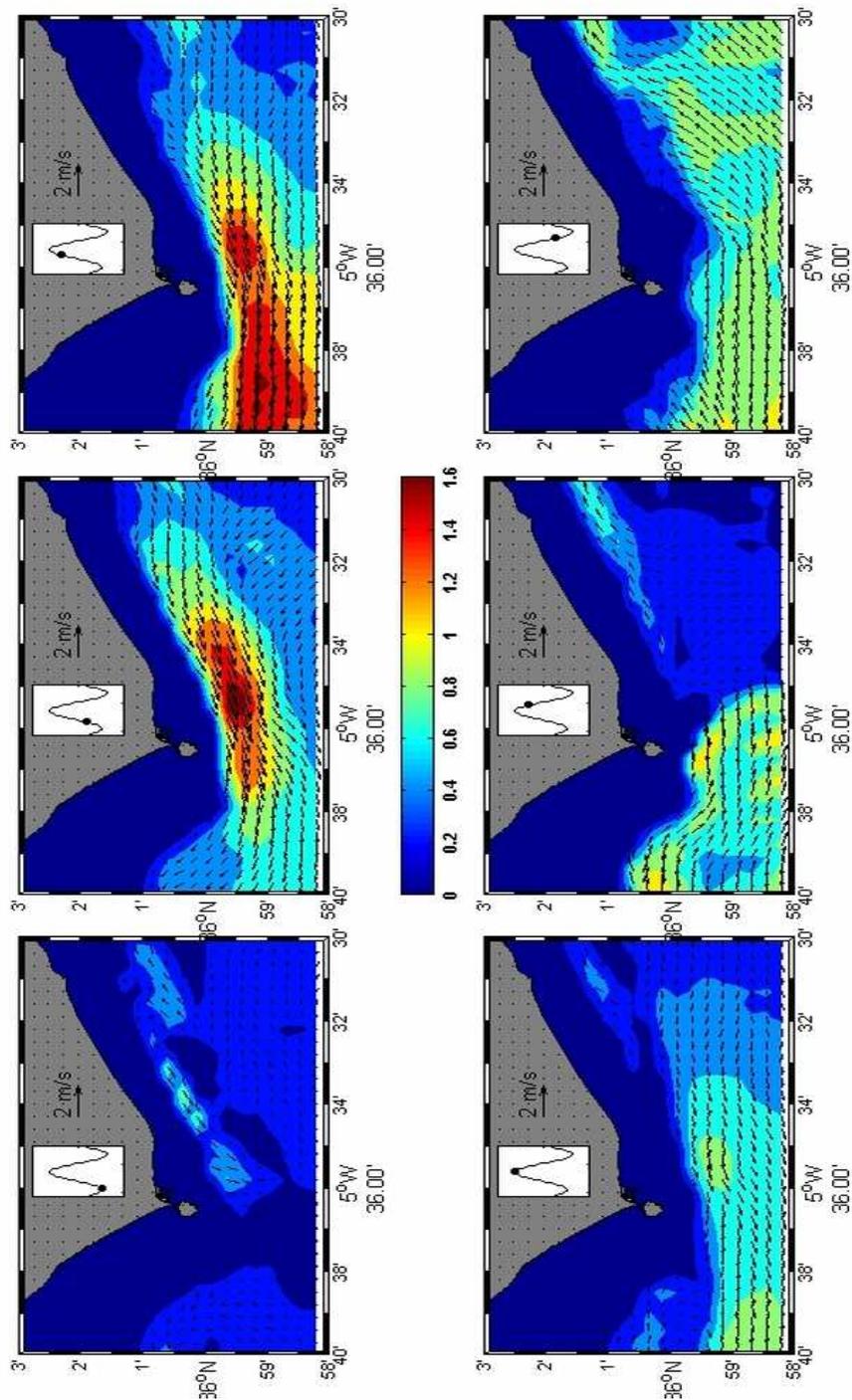
Mareas Medias, Forz-Meteo: Lev=10m/s, $Q_0=1\text{Sv}$, Prof. $z=-20\text{m}$ 

Figura 1.16. Mismo que Figura 11.4 para la cota $z=-20\text{m}$ (ESCENARIO 1)

Mareas Medias, Forz-Meteo: Lev=10m/s, $Q_0=1\text{Sv}$, Prof. z=-50mFigura 1.17. Mismo que Figura 1.14 para la cota $z=-50\text{m}$ (ESCENARIO 1)

Las modificaciones que producen los forzamientos de los ESCENARIOS 2 y 4 son de alguna manera simétricas (antisimétricas, más bien) a las producidos bajo los ESCENARIOS 1 y 3, respectivamente, por lo que solamente se presentan mapas para las dos primeras cotas.

En el caso del ESCENARIO 4 (Figuras 1.18 y 1.19) correspondiente a viento de Poniente de 10 m/s sin forzamiento debido a la presión atmosférica (la contrapartida del ESCENARIO 3 con Levante) el efecto del viento es frenar la creciente y amplificar como es lógico la vaciante. Con referencia a la zona PT la reducción de la creciente va acompañada de un desplazamiento del núcleo de corrientes hacia el Este (comparar Figura 1.18 con Figura 1.5) de modo que la zona en cuestión bajo estos escenarios se ve menos inundada por la creciente que en otras situaciones. Por la parte exterior la corriente de vaciante se ve muy reforzada por el efecto de arrastre del viento consiguiéndose velocidades próximas a los 2.5 m/s (unos 5 nudos) en superficie durante el pico de marea vaciante. Al igual que en el caso del ESCENARIO 3, el efecto del viento va decreciendo con la profundidad siendo despreciable en la cota $z=-50\text{m}$.

La descripción llevada a cabo para el escenario 4 es aplicable al ESCENARIO 2 (Figuras 1.20 y 1.21) con las matizaciones correspondientes introducidas por el forzamiento de una presión atmosférica muy baja afectando a la cuenca Mediterránea-Occidental. Actúa de forma similar, aunque opuesta, a como lo hace la sobrepresión del ESCENARIO 1, es decir, afectando a toda la columna de agua, acentuando la asimetría creciente / vaciante (incrementando notoriamente la segunda, disminuyendo la primera) y forzando las mayores corrientes de vaciante de cuantas se han generado con el modelo regional. En este caso se dan corrientes próximas a los 3 m/s (6 nudos) en la parte exterior.

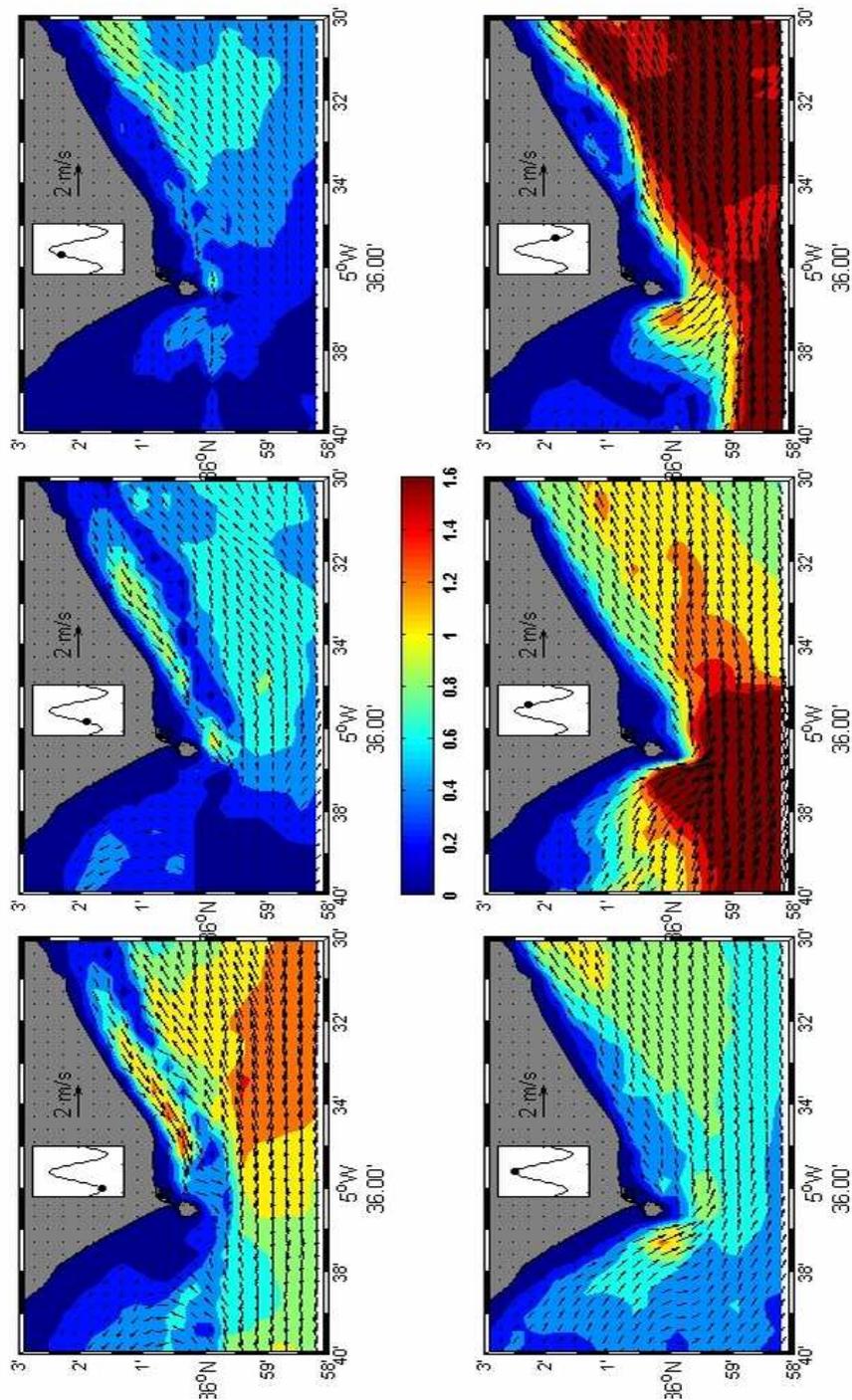
Mareas Medias, Forz-Meteo: Pon=10m/s, $Q_0=0$ Sv. Prof. z=-2m

Figura 1.18. Corriente total bajo forzamiento meteorológico de viento de Poniente exclusivamente (**ESCENARIO 4**) durante el mismo ciclo de mareas de rango medio en la cota $z=-2$ m mostrado en la Figura 1.5. El momento del ciclo de marea está indicado en el mareograma insertado. La secuencia comienza al inicio de la creciente y finaliza al final de la vaciante. Los contornos de color muestran el módulo de la velocidad (intensidad de corriente) de acuerdo con la escala de color (m/s) en el centro de la Figura. En estas gráficas la escala de velocidad queda corta pues se alcanzan valores por encima de 1.6 m/s con frecuencia. Sin embargo se mantiene la misma escala para facilitar la comparación con los mapas correspondientes a otros escenarios.

Mareas Medias, Forz-Meteo: $P_{on}=10\text{m/s}$, $Q_0=0\text{Sv}$, Prof. $z=-10\text{m}$

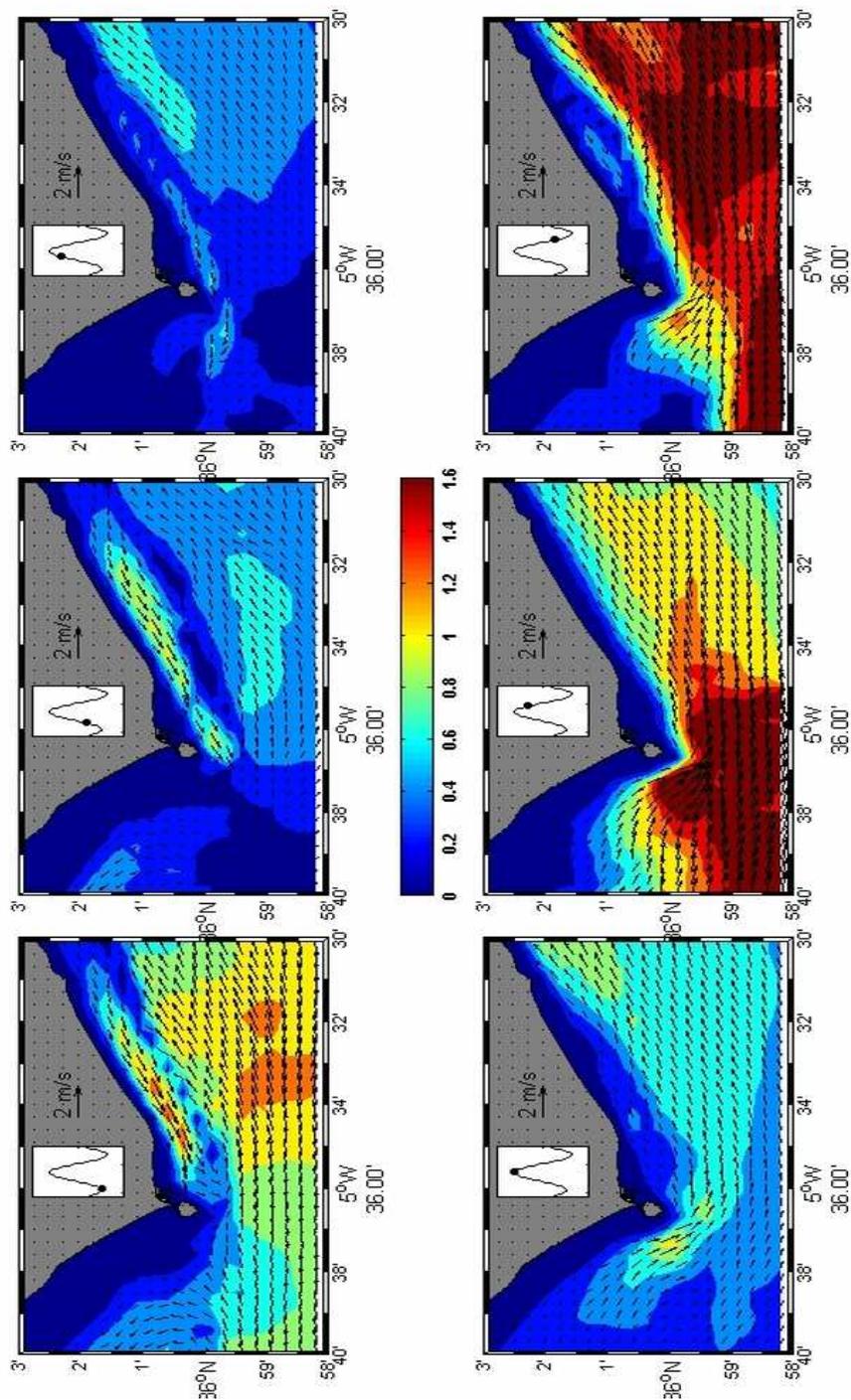


Figura 1.19. Mismo que Figura 1.18 para la cota $z=-10\text{m}$ (ESCENARIO 4)

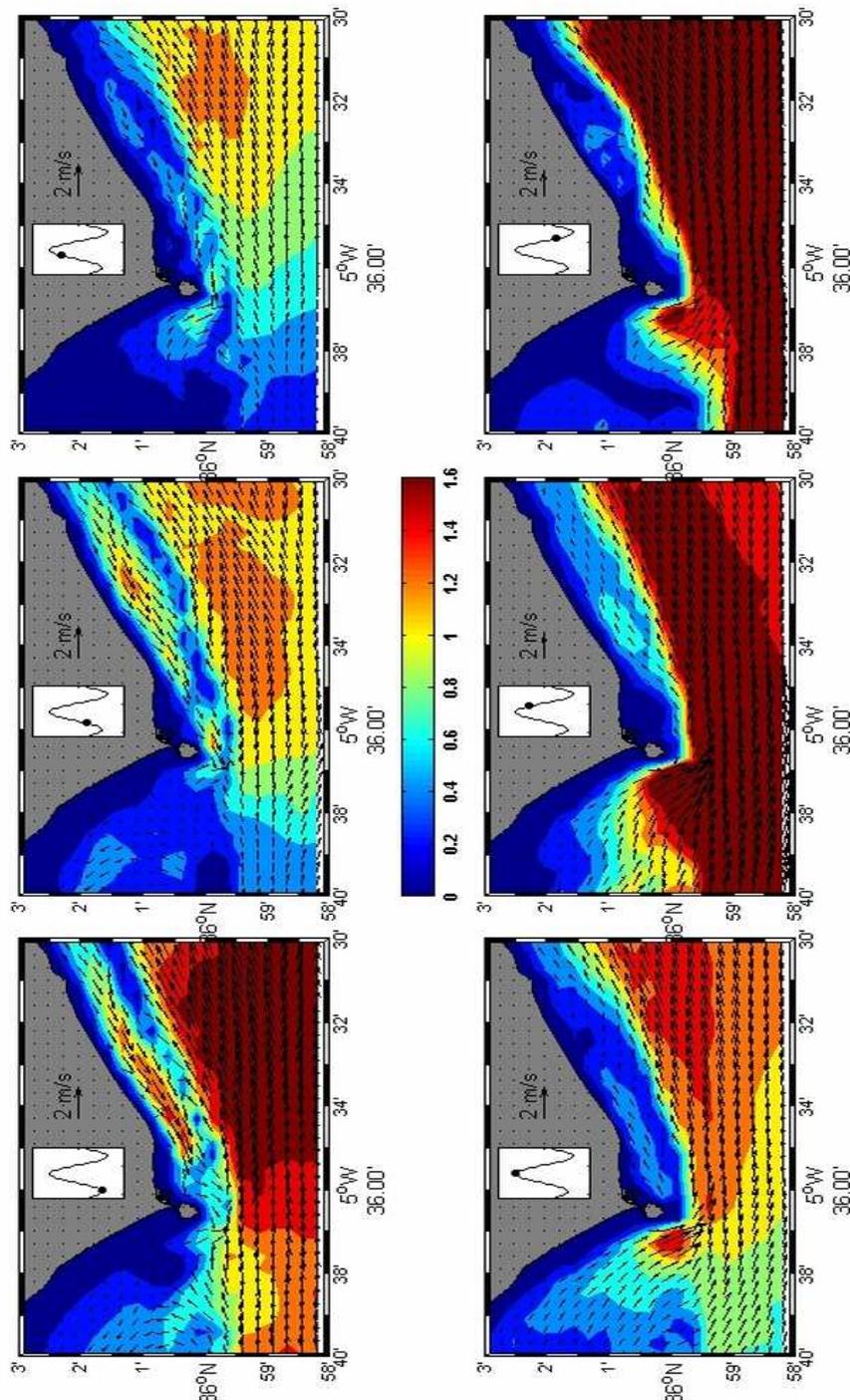
Mareas Medias, Forz-Meteo: Pon=10m/s, $Q_0=1$ Sv, Prof. z=-2m

Figura 1.20. Corriente total bajo forzamiento meteorológico de viento de Poniente y baja presión sobre el Mediterráneo (**ESCENARIO 2**) durante el mismo ciclo de mareas de rango medio en la cota $z=-2$ m mostrado en la Figura 1.5. El momento del ciclo de marea está indicado en el mareograma insertado. La secuencia comienza al inicio de la creciente y finaliza al final de la vaciante. Los contornos de color muestran el módulo de la velocidad (intensidad de corriente) de acuerdo con la escala de color (m/s) en el centro de la Figura. En estas gráficas la escala de velocidad queda corta pues se alcanzan valores por encima de 1.6 m/s con frecuencia. Sin embargo se mantiene la misma escala para facilitar la comparación con los mapas correspondientes a otros escenarios.

Mareas Medias, Forz-Meteo: $P_{on}=10\text{m/s}$, $Q_0=1\text{Sv}$, Prof. $z=-10\text{m}$

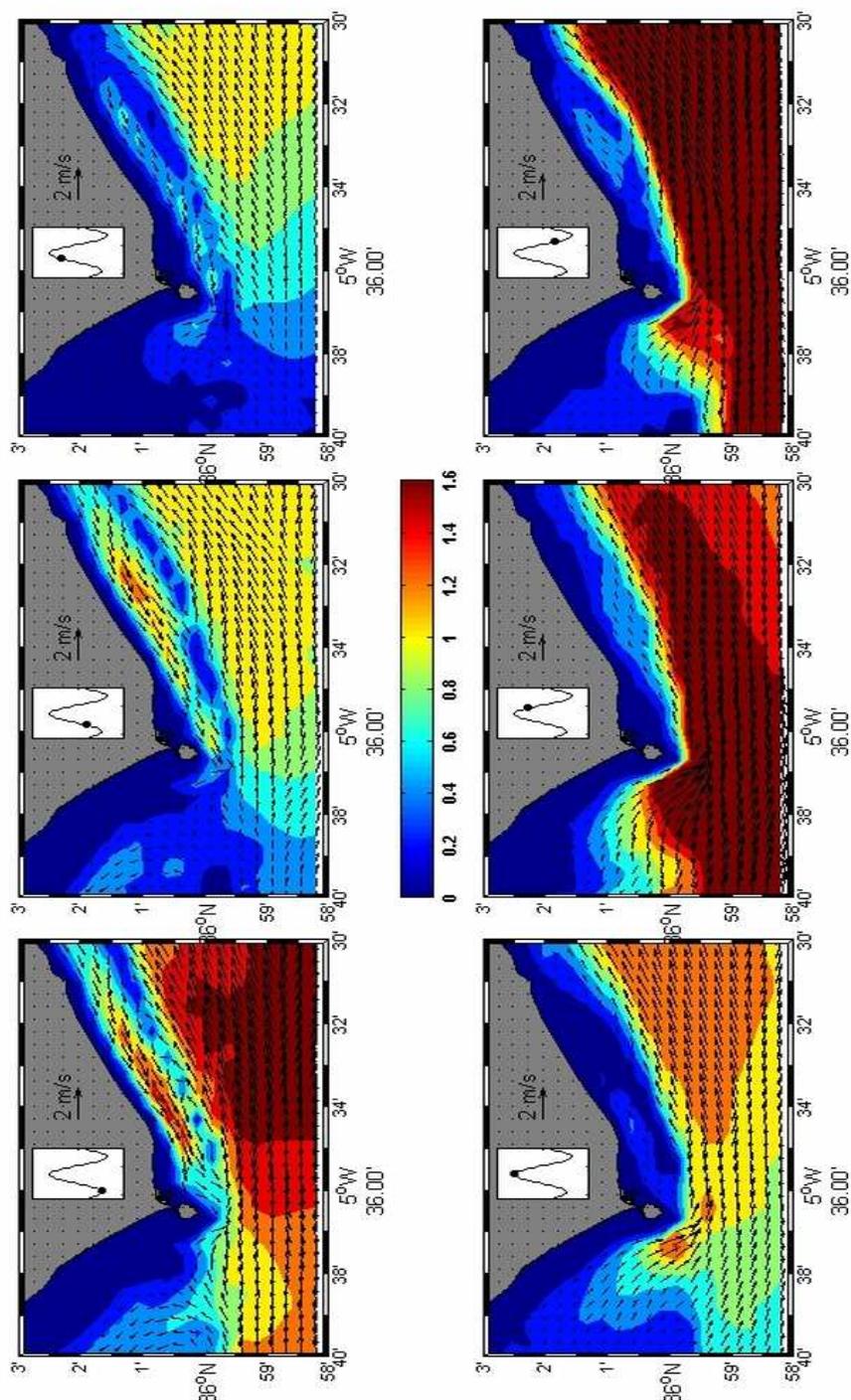


Figura 1.21. Mismo que Figura 1.20 para la cota $z=-10\text{m}$ (**ESCENARIO 2**)

1.6.- Discusión y conclusiones.

Por el interés especial que se tiene en la zona PT (ver Figura 1.3) centraremos la discusión en ella. Debe recordarse en cualquier caso que todos los resultados discutidos en esta Primera Parte del informe son preliminares en el sentido que provienen del modelo regional que no resuelve en detalle lo que ocurre en una zona de dimensiones tan reducidas como la PT. Esta zona, que es la de interés específico en el presente estudio, aparece mucho mejor resuelta en el modelo local que se comenta en la Parte 2 y es allí donde se ven detalles importantes para poder predecir los cambios de régimen hidrodinámico que introducen las geometrías de las distintas alternativas consideradas en la posible ampliación del puerto de Tarifa.

Teniendo presente estas limitaciones, sí se pueden extraer ciertas conclusiones preliminares sobre la circulación inducida por la marea y por diferentes escenarios meteorológicos en la zona PT o en sus cercanías. Mencionar también que los resultados predichos por el modelo están refrendados por las observaciones recogidas en las proximidades del actual puerto de Tarifa durante una campaña de medidas realizada durante Junio de 2009 que se explican con cierto detalle en el próximo epígrafe.

La zona PT se encuentra a resguardo de la corriente media superficial característica del Estrecho de Gibraltar por la presencia de la isla de Tarifa (ver Figura 1.3). Esto hace que la corriente media allí sea muy débil y con una cierta componente hacia el Oeste, en claro contraste con la relativamente intensa corriente media superficial en el Estrecho que fluye hacia el interior del Mediterráneo por la parte exterior. En realidad la presencia de la isla de Tarifa obliga a la corriente entrante a separarse de costa propiciando la generación de una celda de circulación ciclónica aguas abajo, quedando la zona PT inmersa en esta celda.

Debido a la notable intensidad de las corrientes de marea, el patrón medio de la Figura 1.3 no se observa prácticamente nunca. En un momento dado, la corriente existente está dominada por la contribución mareal (término (b) en ecuación 1.1) modificando totalmente el patrón medio. Las Figuras 1.5 a 1.9 que presentan distintos estados de marea a diferentes profundidades confirman lo anterior. Con respecto a la zona PT, puede verse en las figuras correspondientes a las cotas más superficiales que la zona queda totalmente expuesta a la corriente de creciente, que es de bastante mayor intensidad que la de vaciante. Esta última invade más bien poco la zona puesto que la isla de Tarifa la conduce topográficamente hacia la zona exterior donde confluye con la corriente que proviene del Oeste

produciendo allí una notable aceleración espacial durante esta fase. Por tanto, la corriente de marea produce un flujo bastante antisimétrico en la zona PT, con corrientes intensas de creciente y bastante más débiles durante la vaciante. Los datos experimentales que se presentan en el próximo epígrafe confirman totalmente esta descripción.

La circulación en la zona es por supuesto sensible al forzamiento meteorológico. Para investigarlo, se han generado los cuatro escenarios analizados en el epígrafe 1.5, dos de los cuales se corresponden con situaciones más bien estivales (ESCENARIOS 3 y 4) y los otros dos con invernales (ESCENARIOS 1 y 2). Estos últimos pueden considerarse en el límite de lo razonable en cuanto a forzamiento de presión atmosférica (en la práctica podrían darse no más de 2 ó 3 eventos de este tipo por año durante un par de días o tres de duración cada uno) en tanto que los escenarios estivales pueden darse con cierta frecuencia. Dado que la dinámica introducida por el forzamiento meteorológico es básicamente lineal, se podrían inferir de esos escenarios otros intermedios mediante la correspondiente interpolación. Por ello no se han generado escenarios de manera profusa.

Volviendo de nuevo a la zona PT, la respuesta de la dinámica forzada por la meteorología es la que dicta la intuición: los ESCENARIOS 1 y 3, que llevan asociados vientos de Levante, tienden a aumentar la corriente de creciente y a frenar la de vaciante de modo que la zona se ve ahora mucho más favorecida y afectada por la primera de ellas. Entre los ESCENARIOS 1 y 3 (“invierno” y “verano”) existe la diferencia importante del efecto de la presión atmosférica. Esta induce una fuerza de volumen que se transmite a toda la columna de agua y por tanto su influencia se deja notar en toda la columna de agua. El viento es una fuerza tangencial que actúa en superficie y se transmite desde allí hacia el interior amortiguándose cuando lo hace. Por ello su efecto desaparece a las pocas decenas de metros. Los mismos argumentos anteriores son también aplicable a los ESCENARIOS opuestos 2 y 4, aunque en este caso la dirección de la contribución meteorológica es lógicamente la contraria.

Todo lo anterior es evidente en las Figuras 1.22 a 1.25 donde se ha aislado la contribución meteorológica de cada escenario (es decir, el término (c) en la ecuación 1.1 para cada escenario). En las Figura 1.22 y 1.24 (ESCENARIOS 3 y 4 de “sólo viento”) la contribución del viento es apenas distinguible en $z=-50\text{m}$ e inexistente en $z=-100\text{m}$. En las Figuras 1.23 y 1.25 se ve que ese no es el caso en los ESCENARIO 1 y 2 donde la influencia de la presión sí es claramente detectable a 100m de profundidad.

ESCENARIO: Levante 10 m/s. Forzamiento barotrópico (Pa) 0 Sv (solo Umet)

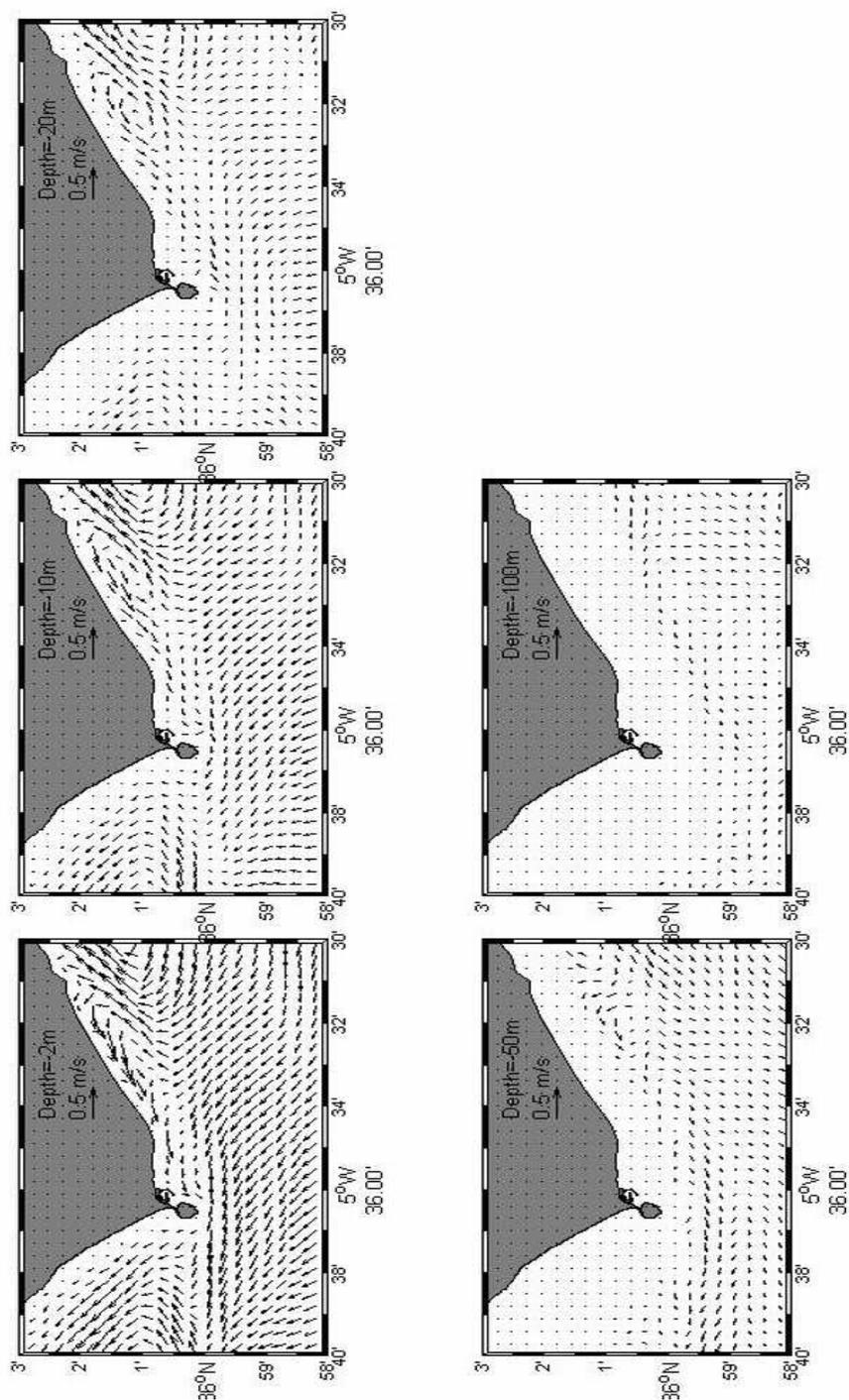


Figura 1.22. Contribución meteorológica al campo de velocidades en el ESCENARIO 3 (viento de Levante exclusivamente) a distintas profundidades. Puede verse que el efecto del viento es apenas apreciable a $z=-50\text{m}$ e inexistente a $z=-100\text{m}$.

ESCENARIO: Levante 10 m/s. Forzamiento barotrópico (Pa) 1 Sv (solo Umet)

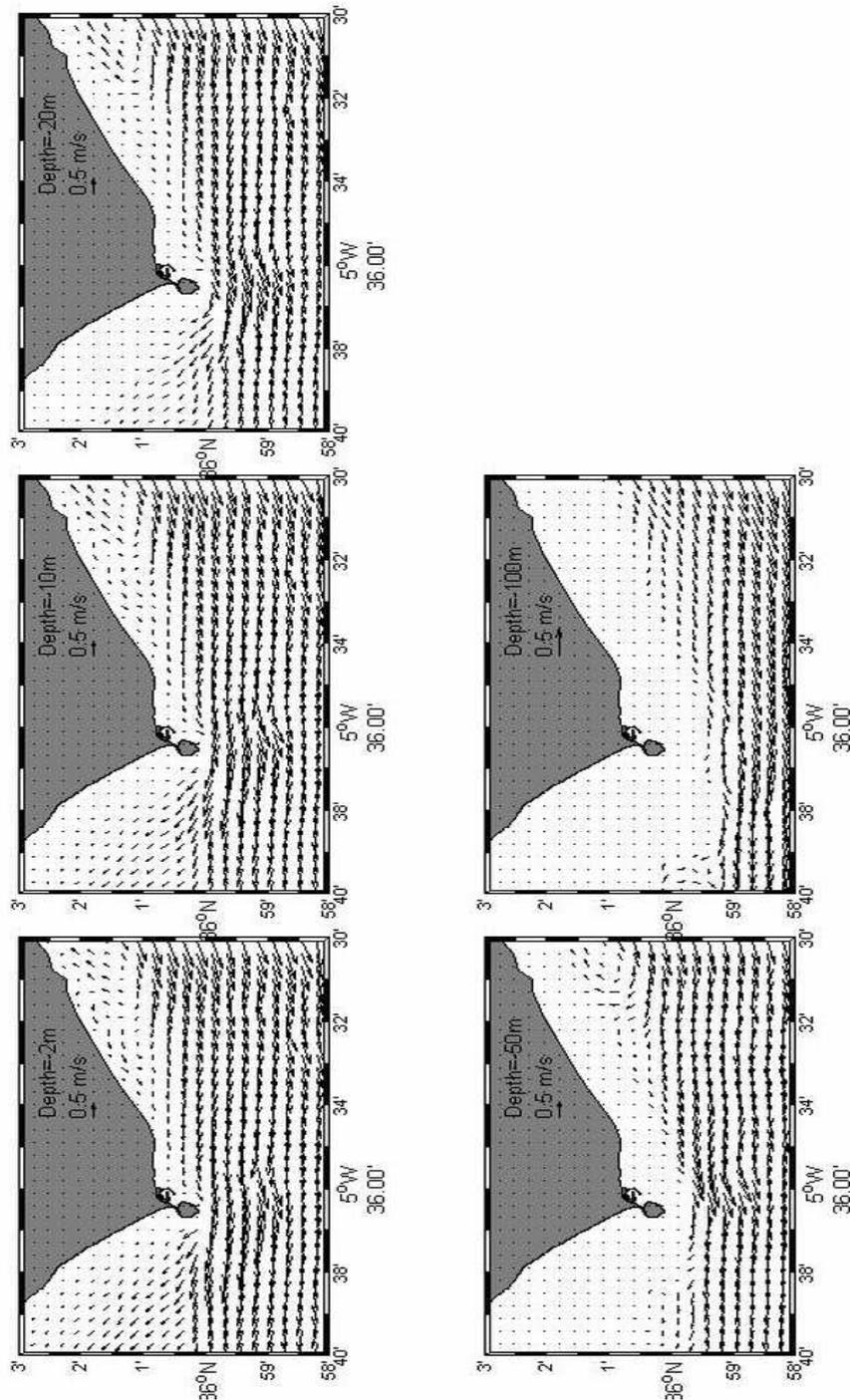


Figura 1.23. Mismo que Figura 1.22 para el forzamiento meteorológico creado en el **ESCENARIO 1**. En este caso el efecto de la meteorología afecta a toda la columna de agua que muestra una contribución (término (c) de ecuación 1) hacia el Oeste tendiendo a frenar el flujo medio. La contribución tiende a disminuir con la profundidad debido al efecto del viento.

A partir de gráficas como las de las Figuras 1.22 a 1.25 se puede hacer un primer intento de cuantificación del efecto meteorológico sobre las corrientes mareales en la zona PT. La Tabla 1.1 muestra un resumen de los resultados en tanto por ciento. El cálculo se ha hecho comparando los valores de pico de creciente y vaciante en los puntos interiores de la zona PT con las modificaciones inducidas en cada escenario en los mismos puntos (es decir, la información presentada gráficamente en las Figuras 1.22 a 1.25) y haciendo posteriormente un promedio espacial.

ESCENARIO	CRECIENTE	VACIANTE
1 (Lev. + AltaPres)	+25%	-60%
2 (Pon. + BajaPres)	-15%	+35%
3 (Levante)	+15%	-30%
4 (Poniente)	-10%	+25%

Tabla 1.1.- Cambios porcentuales que produce cada uno de los escenarios meteorológicos analizados sobre las corrientes de creciente y vaciante. Por ejemplo, el valor 25% en la celda (2,2) significa que con un forzamiento meteorológico correspondiente al ESCENARIO 1 la corriente de creciente en la zona PT se vería incrementada en un 25%.

El resultado intuitivo de aumento o disminución de cada corriente se ve reflejado en los valores de la Tabla. Destacar que la sensibilidad es mayor siempre para la corriente de vaciante y ello no es sino consecuencia de su menor valor absoluto debido a la asimetría ya mencionada. Destacar también que para forzamientos meteorológicos comparables (i.e, ESCENARIO 1 *versus* ESCENARIO 2 ó ESCENARIO 3 *versus* ESCENARIO 4) los de “Levante” (1 y 3) siempre producen mayores modificaciones que los de “Poniente” (2 y 4) y ello es obviamente debido al efecto de apantallamiento que ejerce la isla de Tarifa, situada en el contorno occidental, sobre la zona PT.

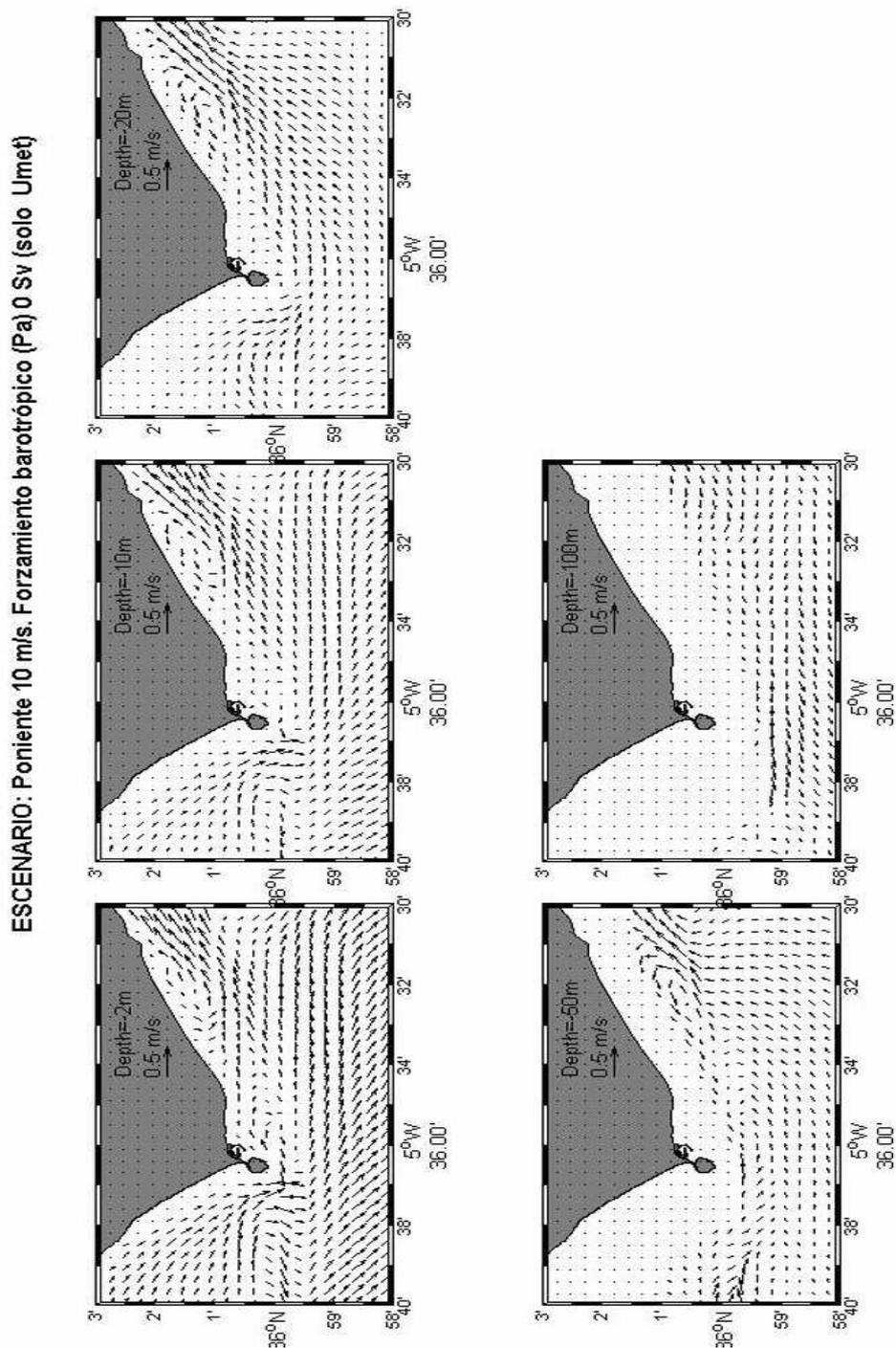


Figura 1.24. Mismo que Figura 1.22 para el forzamiento meteorológico creado en el **ESCENARIO 4** con viento de Poniente exclusivamente.

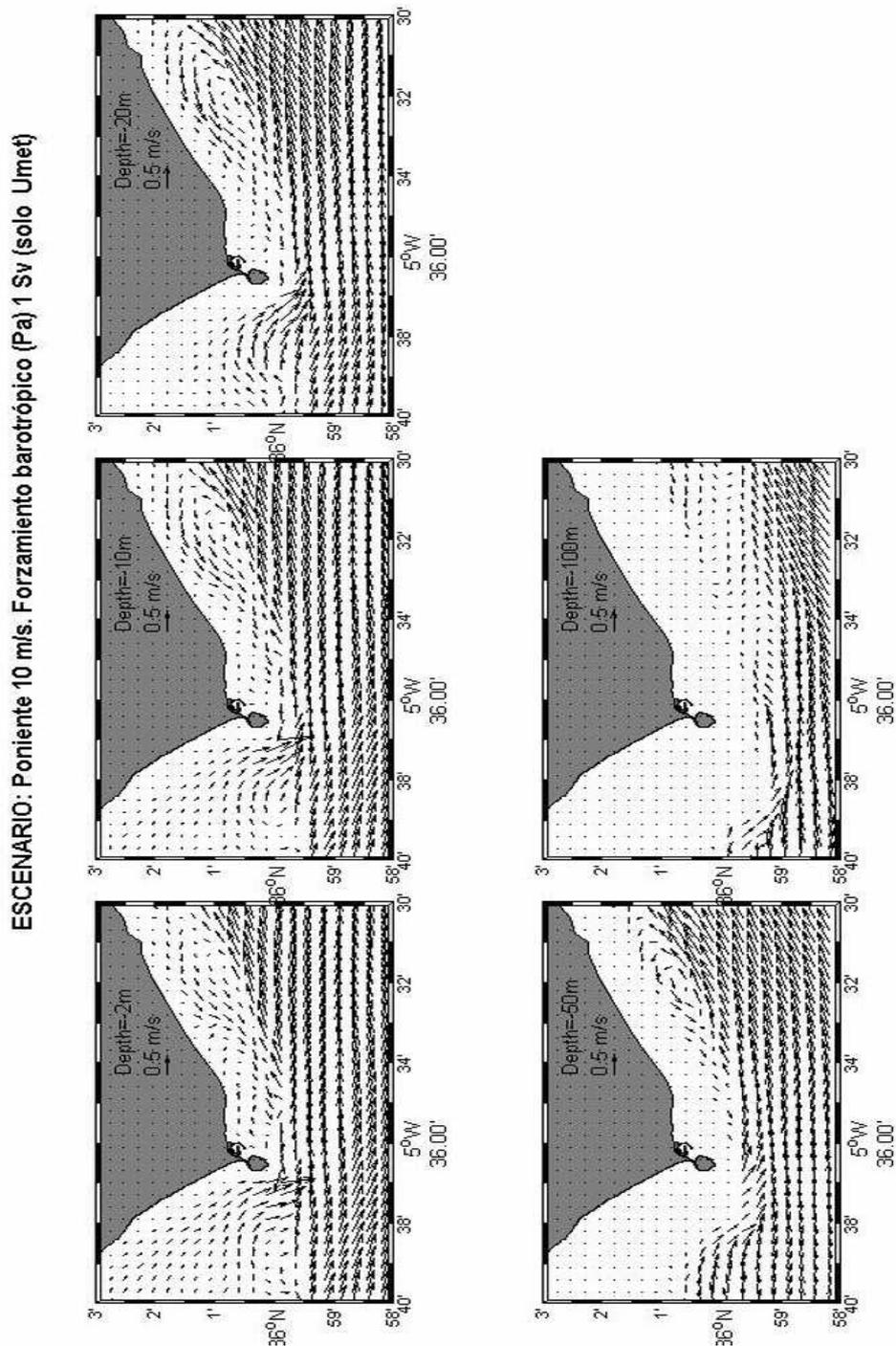


Figura 1.25. Mismo que Figura 1.22 para el forzamiento meteorológico creado en el **ESCENARIO 2**, Poniente con bajada de presión.

1.7.- Observaciones experimentales.

Se incluye este epígrafe para refrendar los resultados del modelo con observaciones recientes tomadas en la zona PT durante una campaña de medidas realizada en Mayo-Junio de 2009 a fin de avalar y justificar los resultados numéricos producidos por el modelo.

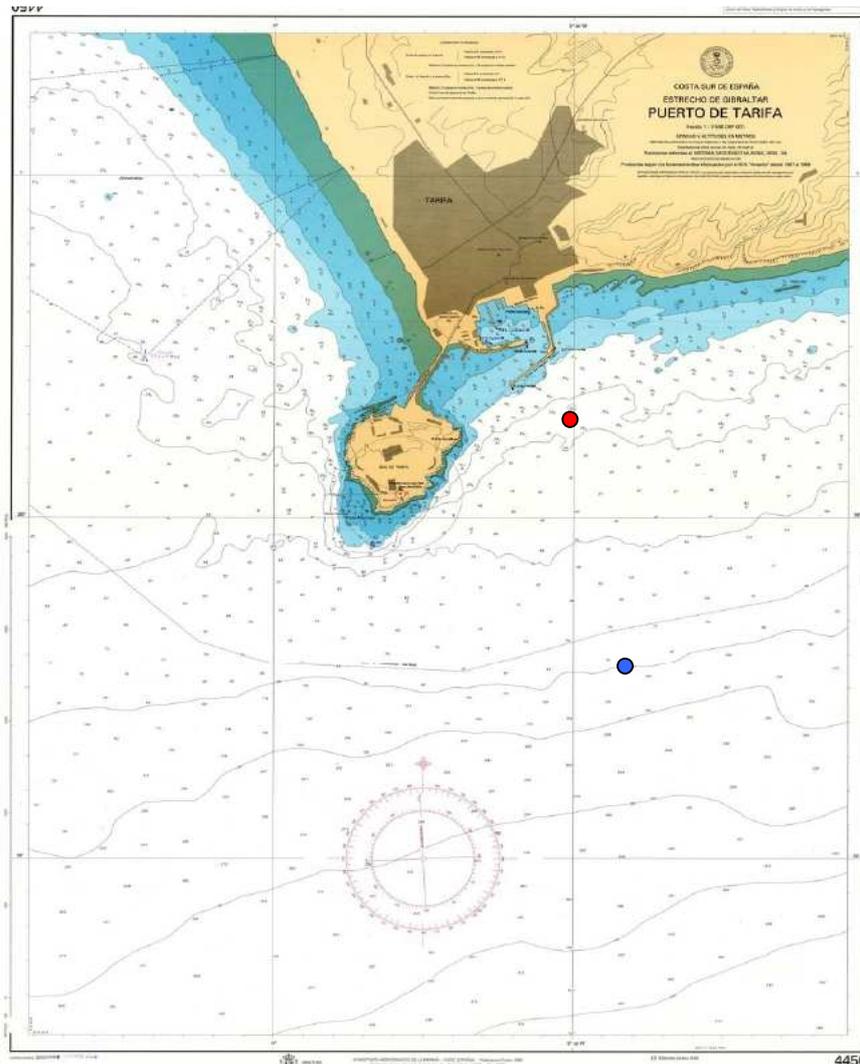


Figura 1.26. Carta náutica de las inmediaciones de la Isla y Puerto de Tarifa (Carta número 4450 del Instituto Hidrográfico de la Marina) donde se indican las posiciones de los dos fondeos de instrumentación oceanográfica desplegados en Mayo de 2009. El punto rojo señala la posición del AWAK-APBA, en la zona PT, en una sonda de unos 25 metros, y el azul la del RDI-GOFIMA-UMA, en la parte exterior en una sonda de unos 100 metros. Ver texto para más detalles

El 26 de mayo, desde el puerto de Tarifa a bordo del barco “Calima” de la APBA se procedió al fondeo del siguiente instrumental oceanográfico:

- Perfilador de corrientes por efecto Doppler (ADCP) modelo AWAK con trípode, propiedad de la APBA, en las coordenadas $36^{\circ} 00.328' N$ $5^{\circ} 35.879' W$ y en una profundidad de 23,4 metros. Quedó instalado a las 7:52 horas GMT. Se contó con el trabajo de dos buzos profesionales para la correcta colocación y anclaje del trípode en el fondo.
- Perfilador ADCP modelo RDI Sentinell con liberador acústico y sensor CT, propiedad de GOFIMA-UMA, en las coordenadas $35^{\circ} 59.588' N$ $5^{\circ} 35.730' W$ en una profundidad de 96 metros, a las 10:21 GMT. Las posiciones de ambos fondeos están indicadas en la Figura 1.26.

El 1 de Julio se recuperaron los instrumentos y los datos grabados de modo que se dispone de casi 36 días ininterrumpidos de observaciones. Solamente el primero de ellos se encuentra en la zona PT y solamente de los datos recogidos por él se habla en este epígrafe. El funcionamiento del instrumento fue correcto, perfiló toda la columna de agua en celdas de 1 m de espesor. Debido al ruido producido por la reflexión en superficie del pulso acústico, los primeros metros no pueden ser correctamente muestreados así que la información válida abarca los 20 metros más profundos a intervalos de 1 metro (de -24 a -5 metros) desde el 26 de Mayo al 1 de Julio de 2009. Esta información oceanográfica se ha completado con información meteorológica proveniente de la Agencia Española de Meteorología (AEMET) sobre vientos y presión atmosférica.

La Figura 1.27 muestra el perfil medio de velocidades en forma módulo (panel izquierdo) / argumento (derecho). Puesto que las gráficas han sido obtenidas promediando 36 días de observaciones, periodo que incluye varios ciclos de variabilidad meteorológica (estos ciclos tienen 5-7 días de pseudo-periodo normalmente), los promedios temporales son representativos de la dinámica media en el punto muestreado. La velocidad media es muy pequeña, entre 5 y 10 cm/s y con direcciones entre los 210 y los 145 grados referidos al Este², es decir hacia el Oeste en promedio. De hecho los valores medios (integrados verticalmente) de módulo y dirección son 6.6 cm/s a 171 grados, es decir corriente muy débil hacia el Oeste, tal y como predice el modelo en la zona PT.

Esta velocidad media cambia totalmente con la marea. Las fluctuaciones mareales se observan bien en la Figura 1.28 que muestra el llamado diagrama de barras de corrientes. En la representación de la Figura, la velocidad en un momento dado

² El criterio de direcciones de la corriente es el usual en un sistema cartesiano, es decir: 0° indica corriente hacia el Este; 90° hacia el Norte; 180°, hacia el Oeste; 270°, hacia el Sur.

viene representada por la barra correspondiente a ese momento. La intensidad de la corriente es la longitud de la barra medida en la escala del eje de ordenadas y la dirección viene dada por la orientación de la barra. Para visualizar mejor las corrientes se ha optado por girarlas 90° de modo que una barra perpendicular al eje de abscisas (paralela al de ordenadas) apuntando hacia arriba indica corriente **hacia el Este**, en tanto que si apunta hacia abajo indica corriente **hacia el Oeste**.

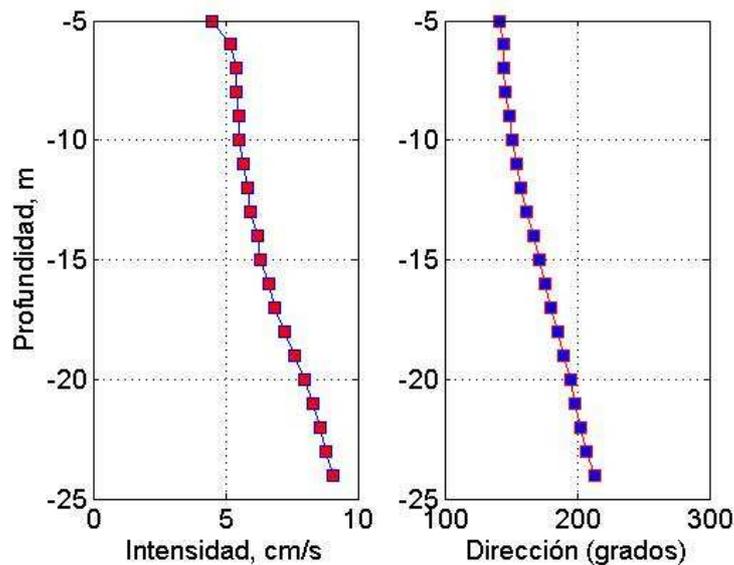


Figura 1.27. Perfil vertical de la velocidad media en la posición AWAK-APBA indicada en la carta náutica de la Figura 1.26. El panel de la izquierda es el módulo, el de la derecha el argumento (dirección) referida al Este. Ver texto para detalles acerca de la dirección.

Las fluctuaciones de la corriente son más de un orden de magnitud superiores a la velocidad media (las unidades de la escala de velocidad en el eje de ordenadas son m/s) y alternan en dirección con la esperada periodicidad de la marea. Si exceptuamos de momento el primero de los paneles, es evidente la asimetría entre el tamaño de las corrientes de creciente que se dirigen hacia el Oeste y las de vaciante que lo hacen hacia el Este. Son considerablemente más intensas las primeras, tal y como predice el modelo.

Una inspección más detallada de la Figura indica que las fluctuaciones son algo mayores en la capa superficial (en contra de lo que ocurre con el perfil medio) aunque ciertamente no existe casi disminución de amplitud con la profundidad excepto en las proximidades del fondo, como muestra el panel inferior. El segundo detalle importante a mencionar es que durante ciertos periodos de tiempo y especialmente en el nivel superior la asimetría de creciente/vaciante no es notoria. La razón de este comportamiento hay que buscarlo en el forzamiento

meteorológico. Dado el relativamente largo periodo durante el cual estuvo registrando datos el instrumento, se ha tenido la oportunidad de tomar mediciones bajo régimen de Levantes y régimen de Ponientes. Teniendo en cuenta la época más bien estival durante la cual se ha realizado la campaña de medidas, los episodios de forzamiento meteorológico encajan mejor con los ESCENARIOS 3 y 4 que con los 1 y 2.

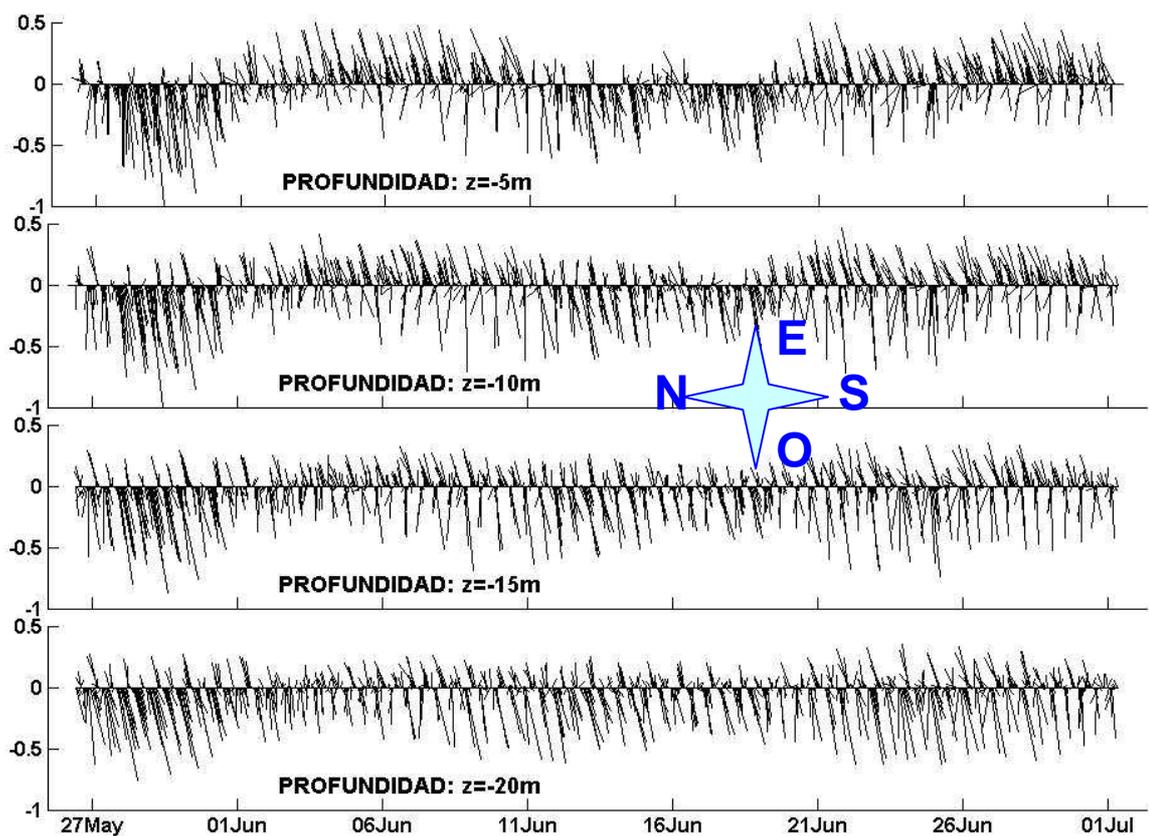


Figura 1.28. Diagrama de barras de valores horarios de velocidad a cuatro cotas. La escala de velocidad en el eje de ordenadas es m/s y la orientación geográfica de los vectores se indica por la estrella de cuatro puntas insertada. Las corrientes son bidireccionales, hacia el Este levemente giradas a Norte (barras por encima del eje de abscisas) y hacia el Oeste levemente giradas a Sur (por debajo), cambiando con el periodo de marea. Las últimas son mayores que las primeras.

La Figura 1.29 es el registro de vientos en Tarifa proporcionado por la AEMET durante el periodo de fondeo. En realidad se trata de datos filtrados para eliminar la alta frecuencia y, dada la bidireccionalidad característica de los vientos en el Estrecho, solamente se ha representado la componente zonal (Este-Oeste) con el criterio de direcciones cartesiano ya usado para las velocidades de corriente: valores positivos se corresponden con Ponientes, valores negativos con Levantes. Se ha empleado un código de color para representar tanto las direcciones (colores rojo/magenta para Ponientes, azules para Levantes) como intensidades (ver pie de

Figura). La gráfica ilustra el bien conocido hecho de que los Levantes son considerablemente más intensos que los Ponientes en Tarifa.

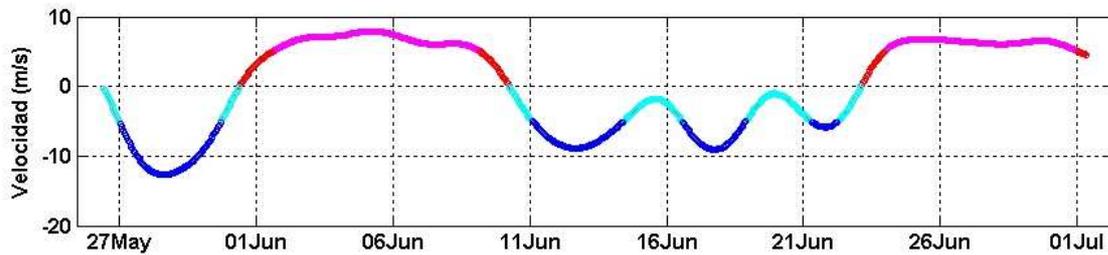


Figura 1.29. Componente zonal de los vientos medidos en Tarifa durante el periodo de medidas. Valores positivos son Ponientes, negativos son Levantes. Se han dibujado en magenta los Ponientes de intensidad mayor que 5 m/s, en rojo los de intensidad menor que 5 m/s, en tanto los Levantes menores de 5 m/s y mayores de 5 m/s lo están en azul claro y oscuro, respectivamente.

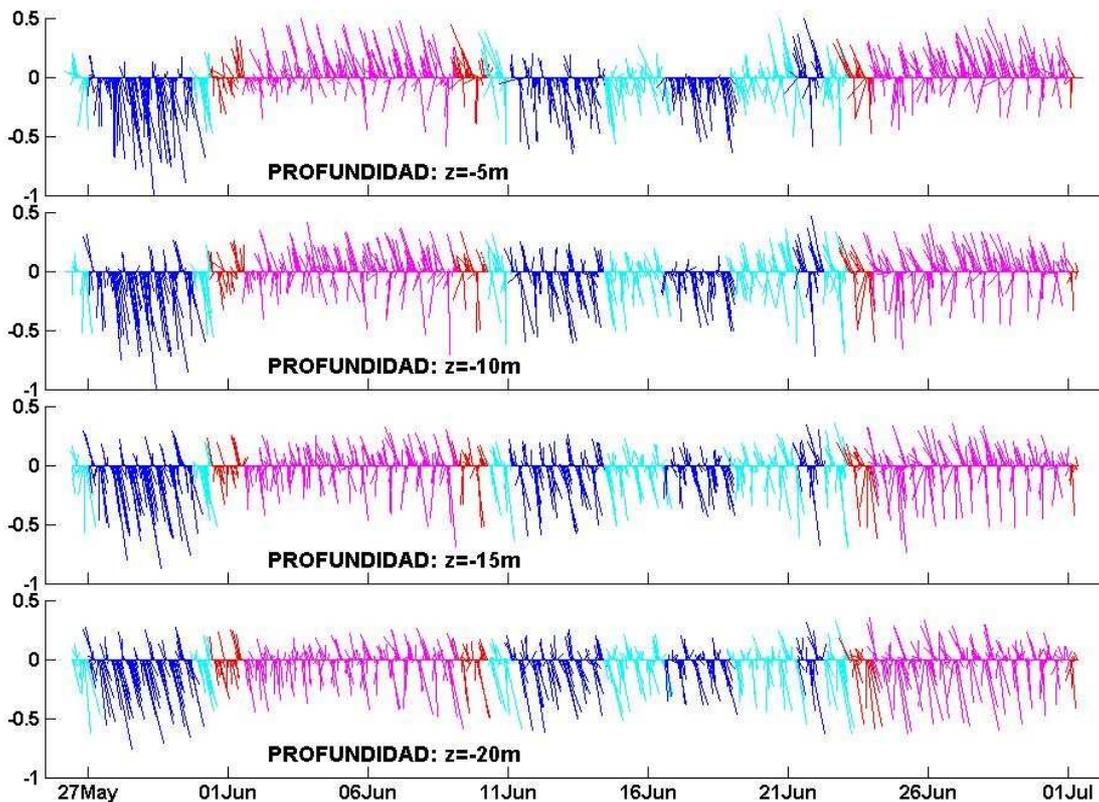


Figura 1.30. Mismo que Figura 1.28 pero con el código de color correspondiente a las intensidades de viento de la Figura 1.29

La Figura 30 repite la información presentada en la Figura 28 pero coloreando las barras de velocidad con distintos colores en función de la intensidad del viento. El código de color es el usado en la Figura 1.29. De esta forma, las barras de tonos magenta indican observaciones tomadas bajo condiciones de Poniente de cierta

intensidad (el equivalente al ESCENARIO 4 del epígrafe 5) en tanto que las azul oscuro lo han sido en condiciones de Levante intenso (ESCENARIO 3). Con referencia al primero de los paneles de la Figura 1.30 se aprecia perfectamente la intensificación de la vaciante bajo condiciones de Poniente (barras magenta) y la reducción de la creciente, tal y como predice el modelo forzado por el correspondiente escenario meteorológico. Es este efecto meteorológico el que enmascara la asimetría de corrientes de marea en el panel superior de la Figura 1.28 comentada anteriormente. Lo contrario ocurre con Levantes que acentúan la creciente y reducen la vaciante llegando a anularla bajo forzamiento extremo (finales de Mayo con Levante superior a 10 m/s, mediados de Junio también, en este caso no tanto por su intensidad sino, tal vez, por su persistencia o por ser periodo de mareas muertas)

Es también interesante notar cómo el efecto del viento va decreciendo con la profundidad. Por ejemplo la supresión de la vaciante comentada a finales de Mayo o mediados de Junio en $z=-5\text{m}$ ya no ocurre tan claramente a -10m , donde sí se dan inversiones y mucho menos a -15m y -20m donde la alternancia de creciente vaciante se da regularmente durante todo el periodo. Es más, el patrón regular observado a -20m (panel 4 de Figura 1.30) bien pudiera corresponder con el patrón de mareas esperable en ausencia de forzamiento meteorológico. En él se aprecia la asimetría creciente/vaciante predicha por el modelo muy claramente. Es también interesante notar que la amortiguación del efecto del viento con la profundidad observado en la Figura 1.30 queda también correctamente recogida por el modelo.

Como resumen de este análisis se concluye que las predicciones del modelo regional en la zona PT están avaladas por las mediciones recogidas en la posición AWAK-APBA, lo cual garantiza su correcto anidamiento con el modelo local del que se habla en el próximo Capítulo.