

## CAPÍTULO 4 – MODELO BAROTRÓPICO FORZADO CON MAREA

### 4.1 Introducción

En este capítulo nos proponemos analizar la respuesta de los golfos Norpatagónicos cuando son forzados por las mareas. El flujo de energía de las mareas sobre la Plataforma Continental Argentina es uno de los más grandes del mundo, particularmente frente a península Valdés y en la entrada del GSM (Glorioso y Flather, 1997, Simionato *et al.* 2004, Palma *et al.*, 2004a) y ha despertado en el pasado interés para la generación de energía eléctrica (Palma, 2002). La mezcla inducida por estas intensas corrientes de marea genera altos niveles de disipación y en zonas de bajo fondos puede llegar a inhibir la formación de la termoclina estacional, dando origen en primavera y verano a frentes térmicos que definen la frontera entre aguas estratificadas y verticalmente mezcladas. Debido a la significativa importancia de este forzante en la región es de sumo interés profundizar su análisis y conocimiento para la interpretación de la dinámica oceánica en el dominio de estudio. Los experimentos numéricos de marea se realizaron forzando el modelo con seis componentes principales de marea ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$  y  $O_1$ ) en los bordes abiertos (Sur, Este y Norte) durante un ciclo anual completo. La grilla utilizada y las condiciones de borde impuestas para los experimentos fueron detalladas en el capítulo 3.

Las amplitudes y fases de las elevaciones y velocidades medias de las componentes semidiurnas y diurnas fueron derivadas de un análisis armónico de datos horarios de elevaciones de la superficie libre y de componentes de la velocidad (medias en la vertical) tomadas del modelo numérico. Con esta información se construyeron las cartas cotidales y de isoamplitudes, junto con las elipses de marea. En el comienzo del capítulo se analiza con más detalle la componente semidiurna  $M_2$ , que contribuye a más del 80% de la energía mareal. Se comparan los resultados obtenidos de elevación en superficie en áreas costeras (15 estaciones) y las corrientes medias con mediciones existentes además de aspectos relacionados con el balance energético mareal. Posteriormente, se analizan las características del resto de las componentes. Finalmente se presenta un estudio

detallado del comportamiento de las corrientes residuales de marea junto con un análisis del balance de vorticidad.

## 4.2 Análisis de la Componente Semidiurna $M_2$

### 4.2.1 Cartas Cotidales e Isoamplitudes

La onda de marea ingresa al dominio desde el Sur y se propaga hacia el noroeste sobre la plataforma patagónica como una onda costera de Kelvin con la amplitud decreciendo aguas afuera. El sistema anfidrómico para esta componente en la plataforma patagónica está compuesto de tres anfidromos. Uno localizado aproximadamente en 47°S, 62°W, otro al Sur de las islas Malvinas y el tercero ubicado al Norte del GSM (Glorioso y Simpson, 1994, Glorioso y Flather 1997, Palma *et al.*, 2004a, Simionato *et al.*, 2004, Tonini, *et al.*, 2006). Este último, se aprecia claramente ubicado en 41° 30'S y 61°W en la Fig. 4.2a y domina la propagación de la onda en la región, los otros dos no se hallan dentro del dominio analizado. La amplitud de la onda presenta considerable variación espacial, con rangos que van desde 180 cm en la boca del GSM a más de 300 cm en el noroeste del GSM. La onda de marea pierde gran parte de su energía luego de ingresar al GSM y por lo tanto más hacia el Norte las amplitudes costeras se reducen considerablemente (menos de 50 cm. cerca de la desembocadura del Río Negro). La boca del GN, parece presentar una mayor restricción a la del GSM. La variación de amplitudes va desde 150 cm en la boca a 185 cm en la zona de Puerto Madryn (en concordancia con mediciones de Hidrografía Naval). En el GSJ, las amplitudes alcanzadas son cercanas a los 300 cm, sin gran diferencia de amplitud entre la boca y la región costera.

La distribución espacial de cotidales e isoamplitudes es similar a la obtenida con modelos de menor resolución (Glorioso y Simpson, 1994; Glorioso y Flather, 1997, Palma *et al.*, 2004a, Simionato *et al.* 2004), aunque la ubicación del anfidromo del GSM presenta variaciones espaciales. En particular en los trabajos de Glorioso y Simpson (1994) y Glorioso y Flather (1997), el anfidromo se encuentra desplazado hacia la costa con respecto a los resultados presentados en este trabajo, posiblemente debido a la menor resolución espacial de dichos modelo. En un trabajo reciente, Moreira (2008) emplea el modelo HAMSON (Backhaus, 1983) en

forma de tres grillas anidadas (con la de mayor resolución en la región de estudio) y reproduce el anfidromo en un lugar similar al de nuestro estudio y con gran coincidencia en la ubicación y distribución de líneas cotidales. Las isoamplitudes en el GSM, GN y GSJ de la componente  $M_2$  también están en muy buena concordancia con las obtenidas por Moreira (2008).

#### 4.2.2 Elipses de marea

Para el cálculo de las elipses de marea se siguió el procedimiento de conversión geométrica planteada por Pugh (1987) y desarrollada numéricamente por Xu (2002). La elipse puede ser construida por dos vectores radiales circulares rotantes de manera opuesta, donde la dirección del vector radial circular mayor indica dirección de rotación de la elipse y el *eje semi-mayor* indica la máxima velocidad de corriente. (Fig. 4-1). La *excentricidad* es el radio del eje semi-menor con respecto al semi-mayor. Los valores negativos indican que la elipse está en rotación horaria. La *inclinación* es el ángulo entre el eje x (Este) y el semi-eje mayor y la *fase* es el ángulo que las dos componentes circulares rotantes recorren desde el punto de inicio hasta el final (Fig. 4-1). Partiendo del campo de velocidades residuales eulerianas de marea integradas en la vertical, tenemos las componentes “**u**” (dirección Este positiva) y “**v**” (dirección Norte positiva).

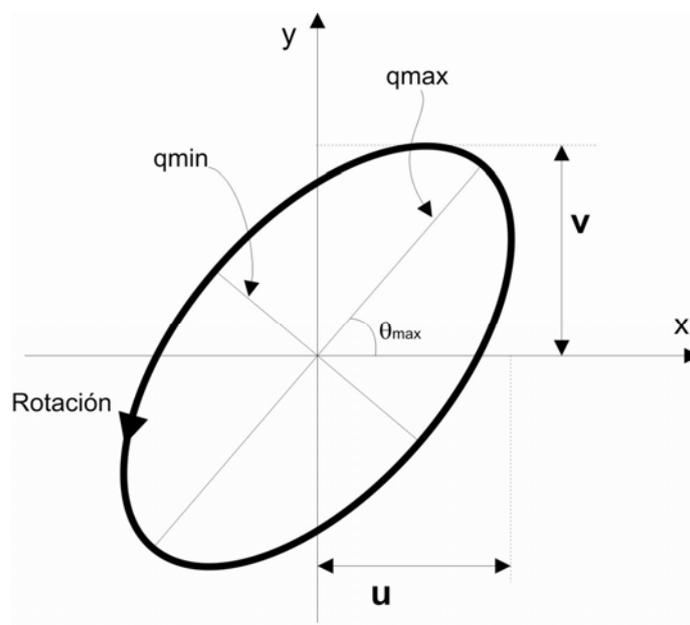


Fig. 4-1. Parámetros básicos de una elipse de marea (Adaptado de Pugh, 1987). Siendo  $\phi_u, \phi_v$  las fases para cada una de las componentes,  $\theta_{max}$  la inclinación del semieje mayor y  $q_{max}$  y  $q_{min}$  la amplitud del semieje mayor y semieje menor.

Estas componentes las podemos expresar en el siguiente modo:

$$u = a_u \cos(\omega t - \phi_u) \quad (4-1)$$

$$v = a_v \cos(\omega t - \phi_v) \quad (4-2)$$

Donde  $a_u, a_v$  son las amplitudes y  $\phi_u, \phi_v$  las fases para cada una de las componentes,  $\omega$  es la frecuencia angular de marea y  $t$  el tiempo. Luego, mediante un simple cálculo algebraico es posible calcular  $\theta_{\max}$  (inclinación del semieje mayor),  $q_{\max}$  (amplitud del semieje mayor) y  $q_{\min}$  (amplitud del semieje menor) en función de las amplitudes y fases de las componentes (Pugh, 1987) (Fig. 4-1).

El sentido de rotación se determina por la diferencia de fases de las componentes:

$$0 < \phi_u - \phi_v < \pi \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} > 0 \quad \text{rotación antihoraria.}$$

$$\pi < \phi_u - \phi_v < 2\pi \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} < 0 \quad \text{rotación horaria.}$$

$$\phi_u - \phi_v = 0, \pi \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad \text{flujo rectilíneo.}$$

Las elipses de marea para la componente  $M_2$  muestran un flujo cuasi rectilíneo cerca de la entrada del GSM (Fig. 4-2b) donde se encuentran las corrientes más intensas ( $\sim 2$  m/s), estos valores muestran concordancia con los obtenidos por Moreira (2008), el cual calcula valores cercanos a 1.8 m/s en la zona de la boca del GSM. Una comparación detallada con mediciones directas se realiza en una sección posterior. En el interior del GSM, en las zonas profundas, el patrón de las elipses es más circular. Los vectores velocidad rotan en forma horaria en casi toda la región, con la excepción del NE de Península de Valdés donde las corrientes son más intensas. Glorioso y Flather (1997) especulan que este cambio puede estar relacionado con una resonancia a la frecuencia semidiurna. En la región Este del dominio y de Sur a Norte las elipses son muy reducidas con respecto a la zona costera, mientras que en la costa Sudoeste el patrón de elipses es mas circular.

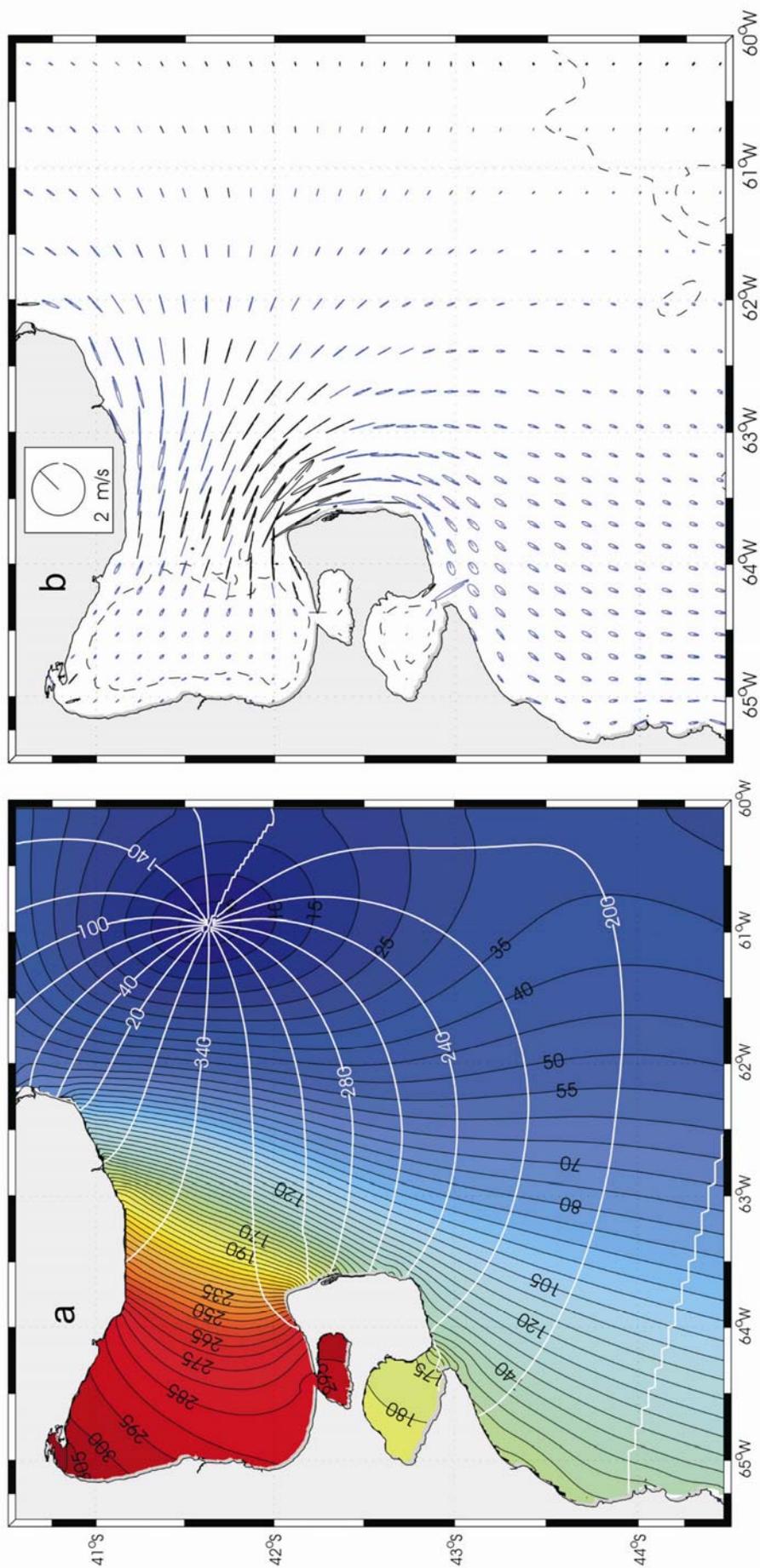


Figura 4-2. Análisis de la componente M2. a) Líneas cotidales (líneas blancas,  $IC= 20^\circ$ ) y de isoamplitudes (líneas negras,  $IC=5cm$ ). b) Elipses de marea. Color azul denota giro ciclónico y negro anticiclónico.

En el GN las velocidades tienen aproximadamente un orden de magnitud menor, con máximos en el interior de 0.2 m/s. La distribución de elipses dentro del golfo es de sentido casi completamente horario, a excepción de la zona Sur de la boca donde el sentido de circulación es antihorario. El patrón de elipses es rectilíneo en general con grandes amplificaciones en la zona de la boca, un resultado descrito en trabajos recientes (Moreira, 2008). El GSJ presenta un dominio antihorario en la zona de la boca y centro del golfo, mientras que en las costas Este y Oeste el dominio es horario. Fuera de la zona de la boca las elipses son débiles al igual que en el GN con valores entre 0.3 y 0.5 m/s. El patrón de las elipses es más circular en la zona central y se hace más rectilíneo hacia las costas mientras que disminuye en magnitud.

Las elipses calculadas a partir del flujo de fondo tienen patrones similares en los tres golfos a las del flujo promediado en vertical, solo que la magnitud se muestra reducida por fricción de fondo (figuras no mostradas aquí).

#### 4.2.3 Disipación y flujos de Energía.

Si partimos de las ecuaciones linealizadas de aguas poco profundas (modo externo del modelo) y la multiplicamos escalarmente por el vector velocidad podemos hallar una ecuación para el balance de energía mecánica en la forma (Khanta y Clayson, 2000):

$$\frac{\partial E_M}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{F}_H = \dot{W} - D_b \quad (4-3)$$

Donde  $E_M$  = energía mecánica = K (energía cinética) + P (energía potencial),  $\vec{F}_H$  = vector flujo de energía,  $\dot{W}$  = potencia (astronómica) entregada,  $D_b$  = disipación de fondo y:

$$E_M = K + P = \frac{\rho_o}{2} D(\vec{U} \cdot \vec{U}) + \frac{\rho_o}{2} g\eta^2 \quad (4-4)$$

$$\vec{F}_H = \rho_o g D \eta \vec{U} \quad (4-5)$$

$$D_b = \vec{U} \cdot \vec{\tau}_b \quad , \quad \text{con } \vec{\tau}_b = \rho_o C_d \vec{U} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4-6)$$

Donde  $Cd$  es el coeficiente adimensional de fricción de fondo y que tomamos igual a  $2.5 \cdot 10^{-3}$ . Si ahora promediamos sobre un ciclo de marea (o varios ciclos) el término de variación temporal desaparece y el balance en estado estacionario queda:

$$\langle \nabla \cdot \vec{F}_H \rangle = \langle \dot{W} \rangle - \langle D_b \rangle \quad (5) \quad \langle \bullet \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \bullet dt \quad (4-7)$$

Esta última ecuación nos indica que la divergencia del flujo de energía mareal en un elemento de área es igual a la diferencia entre la potencia astronómica entregada y la disipación de fondo promediados durante un período de marea. Si esta diferencia es positiva, el exceso de energía es exportada (divergencia positiva); si es negativa debe haber una convergencia de flujo de energía proveniente de otras áreas. En general la potencia astronómica es entregada en el océano abierto y las corrientes de marea se encargan de transportarla a las regiones costeras poco profundas donde es disipada. En nuestro caso, la potencia astronómica entregada en el dominio de estudio es despreciable frente al flujo de energía a través de los bordes abiertos por lo que la ecuación (4-7) queda:

$$\langle \nabla \cdot \vec{F}_H \rangle = -\langle D_b \rangle \quad (4-8)$$

Esto indica un equilibrio entre la divergencia del flujo de energía y la disipación de fondo. En lo que sigue vamos a analizar los patrones de distribución de flujo de energía y disipación para la región de los Golfos Norpatagónicos. El vector flujo de energía promedio puede calcularse empleando los resultados del análisis armónico en la forma (Pugh, 1987):

$$\langle \vec{F}_H \rangle = 0.5 \rho_o g D \eta_0 [U_0 (\varphi_{\eta_0} - \varphi_{U_0}), V_0 (\varphi_{\eta_0} - \varphi_{V_0})]^T \quad (4-9)$$

Donde  $\eta_0$  y  $U_0, V_0$  son la amplitud de la elevación de la superficie libre y las componentes de la velocidad correspondiente a la componente analizada y

$(\varphi_{\eta 0}, \varphi_{U 0}, \varphi_{V 0})$  son las fases de elevación y velocidad respectivamente. T indica un vector traspuesto.

En la figura 4-3a se muestra el flujo de energía de la componente  $M_2$  de marea para el dominio de la simulación. En concordancia con trabajos previos (Glorioso y Flather, 1997; Palma *et al.*, 2004a, Moreira, 2008) esta componente es la que presenta las mayores magnitudes de flujo. En el área circundante a Península Valdés las velocidades son muy altas y el flujo de energía alcanza valores de  $7 \cdot 10^5$  W/m. Los flujos de energía más importantes se observan en la zona costera y disminuyen a medida que nos desplazamos hacia aguas de la plataforma (Fig. 4-3a). El flujo de energía ingresa desde el Sur al golfo San Matías bordeando la costa y egresa por el Norte con una magnitud de energía muy inferior, mostrando un giro horario en todo el golfo. Lo que nos induce a pensar, que la disipación de energía dentro de los golfos y en Península Valdés es importante, reduciendo el flujo de energía que continúa hacia el Norte de la plataforma (~7 % del total) (Fig. 4-3a).

Debido a la restricción que representa la boca del GN, el flujo de energía sufre una alta disipación en esa zona y sólo logra ingresar una pequeña porción (~3%). El flujo de energía en el interior circula en sentido horario, ingresando por el Sur recorriendo todo el golfo y egresando por el Norte y disminuyendo hacia la costa. Las magnitudes del son del orden de los  $2 \cdot 10^4$  W/m. El GSJ muestra una gran diferencia de magnitudes entre el sector de la boca (dipolo interno) y el interior del golfo, lo que implica una débil circulación del flujo de energía en el interior. Los valores de flujo en el interior son reducidos cercanos a las costas y las zonas afectas por la boca tienen magnitudes de  $3 \cdot 10^4$  W/m, un 4 % del flujo que circula en el GSM. El sentido de circulación del flujo de energía es antihorario en la mitad Este y horario sobre la costa Oeste. (Glorioso y Simpson, 1994; Glorioso y Flather 1997) y más recientemente, Moreira (2008) con un modelo de alta resolución muestra patrones similares de flujo de energía de la componente  $M_2$ , aunque el giro horario dentro del GSM pareciera ser menos definido y los flujos de energía en la boca del GSJ y GN menos intensos.

La disipación media de energía por unidad de área puede ser calculada a partir de las componentes medias de velocidad como:

$$\langle D_b \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{U} \cdot \vec{\tau}_b dt = \frac{\rho_o C_d}{T} \int_0^T \vec{U} \cdot \vec{U} \sqrt{U^2 + V^2} dt = \frac{\rho_o C_d}{T} \int_0^T (U^2 + V^2)^{\frac{3}{2}} dt$$

(4-10)

La figura 4-3b muestra la distribución de disipación de energía calculada a partir de las velocidades de la capa de fondo para la componente  $M_2$ . En el sector Este de Península Valdés, encontramos dos centros de disipación de energía bien marcados. El primero y más intenso al Este de la albufera existente cerca de Punta Bajos, donde las disipaciones alcanzan valores de más de 7 W/m<sup>2</sup> y se extiende hasta alcanzar Punta Norte y hacia el Este hasta alcanzar un banco de 30 metros de profundidad. El otro centro, menos intenso, se visualiza cercano a Punta Delgada hacia el Norte y su área de influencia es menor. Esta región de alta disipación de energía fue reportada previamente en modelos de baja y alta resolución (Moreira, 2008) aunque los valores máximos puntuales son mayores para los casos de menor resolución (~ 50 W/m<sup>2</sup>, Glorioso y Simpson, 1994). La magnitud total de la disipación en dominio de estudio es cercana a los 12.3 GW algo inferior a la reportada por Moreira (~15 GW). Aparecen también zonas de alta disipación, aunque no tan intensas como las de PV, como ser la boca del Golfo Nuevo (>3W/m<sup>2</sup>) y la boca del GSJ (>1W/m<sup>2</sup>), estos sectores no fueron detectados por Moreira (2008), quizás debido a la subestimación de las corrientes de fondo en el modelo de coordenadas geopotenciales (z).

En la Fig. 4-3b también se puede observar que, hacia el Norte, Sur de PV y dentro del GSM, la energía de disipación presenta contornos con valores que superan los valores medios del dominio general (0.1 W/m<sup>2</sup>), delimitando una zona de transición hacia aguas de la plataforma y hacia el interior del GSM. Esta zona tiene una alta correlación con las regiones donde se detectan los frentes térmicos en trabajos previos (Gagliardini *et al.*, 2004, 2008; Amoroso *et al.*, 2009). La fuerte disipación por marea indica la potencialidad de mezcla vertical que desarrolla la componente  $M_2$  en la zona. Esta energía de mezcla, en estaciones donde el flujo de calor es intenso, logra mantener la columna totalmente mezclada (con temperaturas relativamente menores) mientras que en la zona de baja disipación el flujo incidente sobre las capas superficiales logran estratificar parte de la columna desarrollando una termoclina intensa. De esta manera se logra una zona divisoria entre aguas

bien mezcladas y estratificadas denominadas “frentes térmicos”. Este tema se discutirá en detalle en el Capítulo 6.

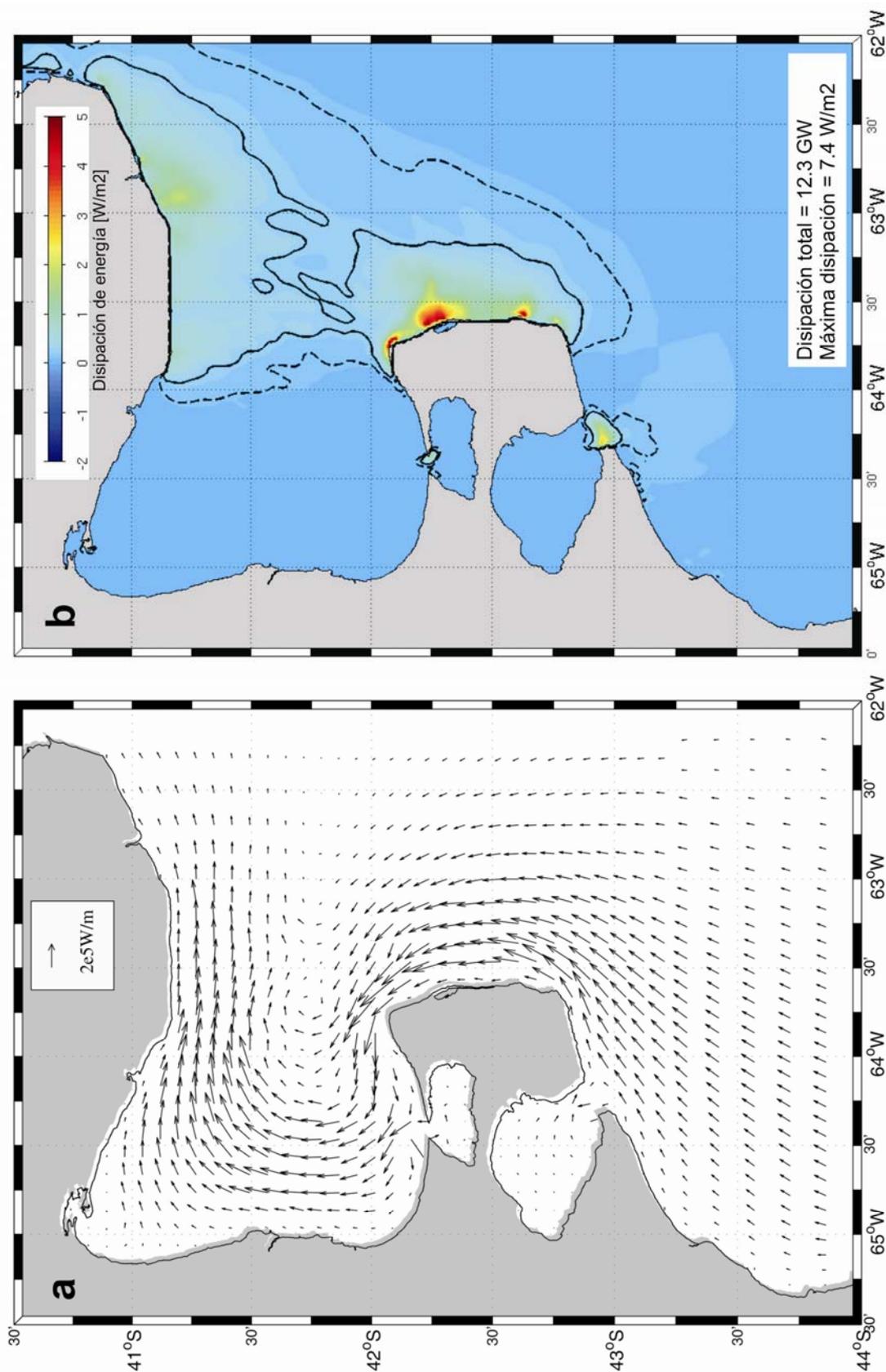


Figura 4-3. Análisis energético componente M2. a) Flujo de energía. b) Disipación de Energía. Los colores rojos indican los máximos. La línea punteada llena indica contornos de  $0.25 \text{ W/m}^2$  y las líneas punteadas indican el contorno de  $0.1 \text{ W/m}^2$ .

### 4.3 Análisis de las Componentes restantes

#### 4.3.1 Cartas Cotidales e Isoamplitudes.

En la componente  $S_2$  (Fig. 4-4a) el anfídromo cercano al GSM, se encuentra levemente desplazado hacia el NO, ubicado en  $41^\circ\text{S } 61^\circ 30'\text{W}$ . La distribución espacial de cotidales e isoamplitudes es similar a la obtenida con modelos de menor resolución (Glorioso y Flather, 1997) y en modelos de similar resolución (Moreira, 2008). En la componente  $N_2$  (Fig. 4-4b), este anfídromo se desplaza al NE, quedando cercano al borde Norte del dominio. La amplitud de la onda dentro del GSM posee variación espacial entre 50 y 60 cm entre la boca y la costa Oeste. El GN presenta amplitudes reducidas para la componente  $N_2$  (35 cm) y el GSJ tiene amplitudes máximas similares al NO del GSM (60 cm). Hacia el Norte del dominio las amplitudes costeras se reducen considerablemente. Los valores de amplitud para esta componente son similares a los reportados por Moreira, 2008. La componente  $K_2$  (Fig. 4-4c), muestra amplitudes máximas dentro del GSM y del GSJ de 45 cm y de 30 cm en el GN, y la distribución de las cotidales muestra una concordancia con el resto de las componentes semidiurnas. Los resultados de esta componente son similares a la reportada por Moreira (2008), aunque las isoamplitudes son superiores.

El rango de amplitudes en las componentes diurnas es considerablemente menor a las semidiurnas. En el caso de la  $K_1$  (Fig. 4-4d), variando entre valores de 12 y 16 cm para la zona cercana a la costa. La onda tarda aproximadamente 14 h 40' en recorrer el dominio de Norte a Sur y 1h 20' en recorrer el GSM. El sistema anfídromico está compuesto por un anfídromo ubicado en  $43^\circ 40'\text{S } 60^\circ 45'\text{W}$ . Modelos previos encuentran este punto anfídromico más cercano a Península Valdés para la componente  $K_1$  (Glorioso y Flather, 1997, Moreira, 2008). Si observamos la respuesta para la componente  $O_1$  (Fig. 4-4e), en zonas costeras y dentro de los golfos Norpatagónicos las amplitudes permanecen invariables. Aparece el anfídromo cercano a Península Valdés, detectado en la componente diurna  $K_1$ , aunque mas desplazado hacia la costa y Norte, ubicado en  $43^\circ 10'\text{S } 62^\circ 30'\text{W}$ . Este anfídromo también ha sido reportado en trabajos previos (Glorioso y Flather, 1997). Una característica de las componentes diurnas es que su área de influencia es mayor en zonas más profundas alejadas de la línea de costa. Los

valores de amplitud y distribución de líneas cotidales están en concordancia con resultados previos de menor resolución espacial y nos dan una base sólida de confianza para los posteriores experimentos de modelado.

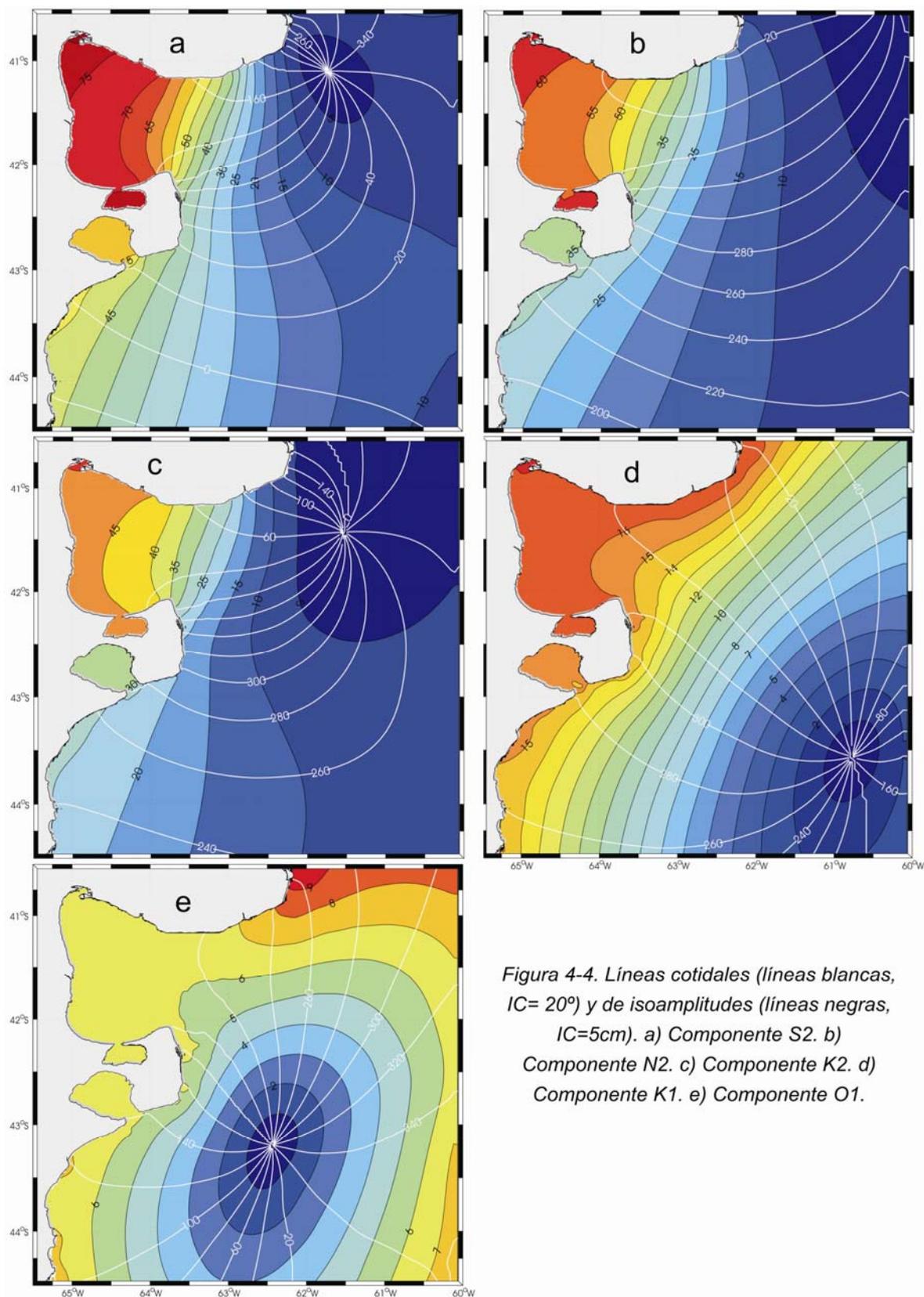


Figura 4-4. Líneas cotidales (líneas blancas, IC= 20°) y de isoamplitudes (líneas negras, IC=5cm). a) Componente S2. b) Componente N2. c) Componente K2. d) Componente K1. e) Componente O1.

### 4.3.2 Elipses de marea

Las componentes semidiurnas restantes ( $N_2$ ,  $S_2$  y  $K_2$ ) muestran un comportamiento similar y distribución de las elipses promediadas en la vertical (medias) a excepción de la componente  $N_2$  que muestra una menor influencia dentro de los sectores costeros y aislados de aguas de plataforma. Las corrientes medias de las componentes diurnas se pueden observar en la figura 4-5. La componente diurna  $K_1$  (Fig. 4-5a) muestra una distribución de amplitudes notoriamente diferente a las semidiurnas. Las elipses mayores se visualizan al Este de PV y en las zonas hacia la plataforma, en buena concordancia con el trabajo de Glorioso y Flather (1997). Las velocidades máximas se alcanzan al Este de Península Valdés con valores cercanos a 0,1 m/s. El patrón de las elipses mayores es más circular y la costa Sur presenta patrones más rectilíneos comparados con el caso de las semidiurnas. En cuanto a la rotación de las elipses, la zona externa de la plataforma posee rotación anticiclónica junto con el Norte de PV. El GSM está dominado por rotación horaria junto con el resto del dominio y el GN una distribución compleja y poco definida en la zona de la boca con magnitudes reducidas (un orden de magnitud inferior al GSM). El resto del dominio muestra elipses más circulares y de circulación horaria. El GSJ presenta corrientes medias de magnitud similares a las del GN, con altas velocidades en la zona de la boca. El sentido de circulación a diferencia de las componentes semidiurnas, es horario en el sector Oeste y costa Este y antihorario en la zona de la boca. En las elipses de marea para la componente diurna  $O_1$  (Fig. 4-5b) se observa un patrón de elipses más circular y reducido que la componente  $K_1$ . La influencia de esta componente es muy baja, alcanzando velocidades máximas inferiores a 0.1 m/s (Fig. 4-5b). El sentido de rotación antihorario es predominante en la zona de Plataforma en toda su extensión. El GSM y PV están gobernados por circulación horaria. Esta componente tiene menor impacto en la zona costera e interior de los golfos que la otra componente diurna ( $K_1$ ), por lo que las máximas amplitudes se observan en el borde Este del dominio amplificándose de Norte a Sur.

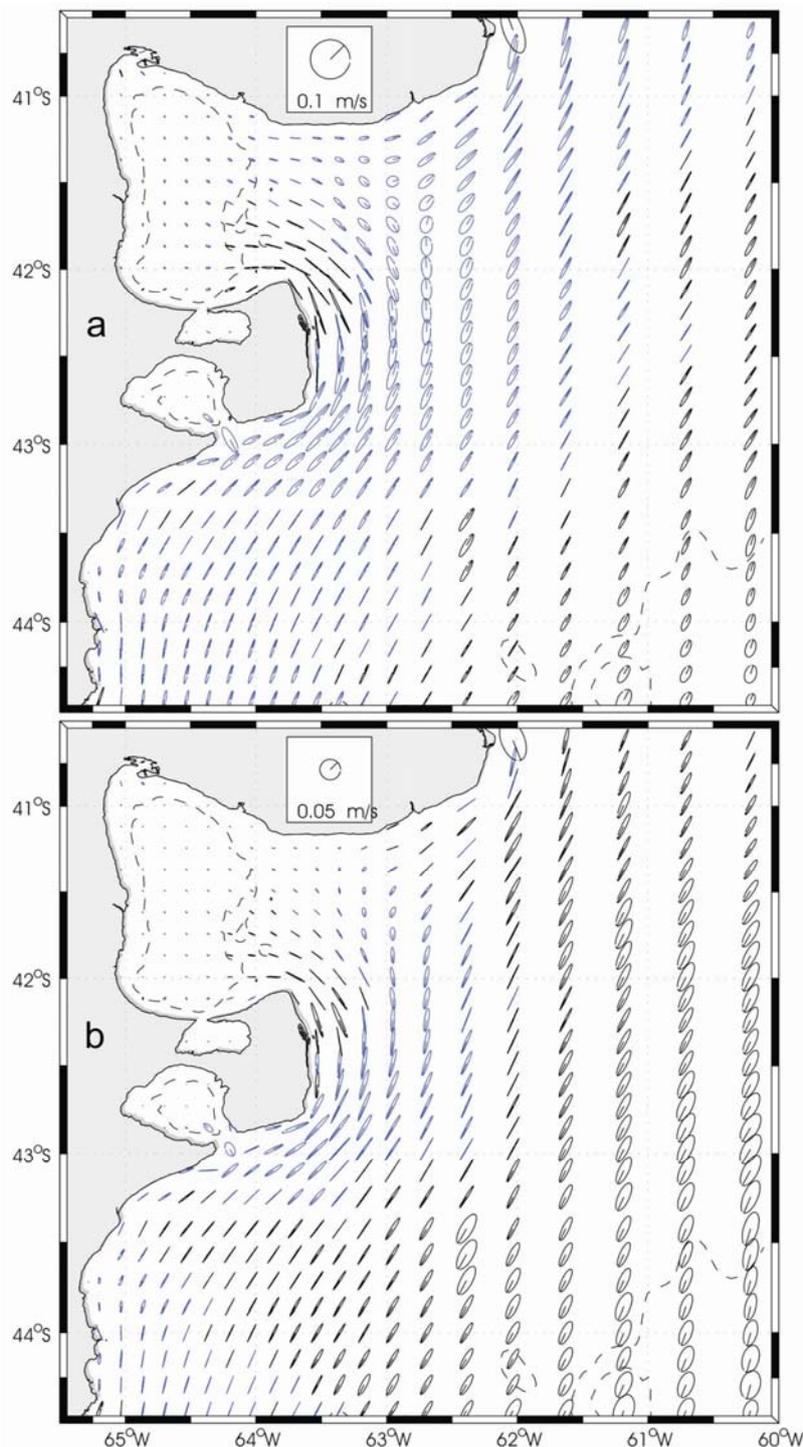


Figura 4-5. Elipses de marea. Color azul denota giro ciclónico y negro anticiclónico. a) Componente  $K_1$ . b) Componente  $O_1$ .

El GN indica una predominancia de circulación horaria y magnitudes muy reducidas con una distribución compleja y poco definida en la boca, donde existen sectores de circulación antihoraria, posiblemente debido a un dipolo generado en el ingreso del golfo (ver análisis del balance de vorticidad). El GSJ, muestra un dominio antihorario de la mitad Oeste y horario en el Este con valores de corrientes medias

comparables a los del GN y la quinta parte de los que presenta la circulación de Plataforma.

### 4.3.3 Flujo de energía.

Para analizar la influencia de cada componente de marea en el interior de los golfos, se calculó el porcentaje de flujo de energía que ingresa a los golfos para cada componente y el que llega y egresa del dominio por el Norte (Tabla 4-1). Para el caso del GSM, las componentes semidiurnas denotan una gran influencia, ya que un gran porcentaje del flujo de energía que accede por la costa Sur ingresa al dominio, pero observamos que gran parte del mismo es disipado en el interior, egresando un bajo porcentaje por el borde Norte. Para el caso de la componente  $M_2$ , solo egresa alrededor del 7 % de la que ingresa al golfo, siendo el resto de la energía disipada en el mismo.

Las componentes diurnas muestran una influencia menor en la zona costera, ya que las máximas magnitudes del flujo se observan hacia el talud y por lo tanto un porcentaje muy reducido ingresa a los golfos, en coincidencia con lo expuesto por Glorioso y Flather (1997). A los golfos GN y GSJ, debido a su restricción en la boca los flujos de energía de las componentes semidiurnas acceden en un porcentaje muy reducido, disipando gran parte de la energía en la zona de las bocas, como se observa en la figura (4-3). Si observamos el porcentaje de egreso del flujo de energía por el Norte, vemos que gran parte de la energía de las componentes semidiurnas es disipada en las zonas costeras, egresando un porcentaje casi despreciable.

	<b>Flujo E. Máx.</b>	<b>GSM</b>		<b>GN</b>		<b>GSJ</b>		<b>Egreso Norte Energía</b>	
<b>M2</b>	7.06E+05	7.06E+05	100.00%	2.00E+04	2.83%	3.00E+04	4.25%	5.00E+04	7.08%
<b>S2</b>	9.50E+04	9.50E+04	100.00%	2.00E+03	2.11%	6.00E+03	6.32%	1.00E+03	1.05%
<b>N2</b>	5.70E+04	5.70E+04	100.00%	8.00E+02	1.40%	4.00E+03	7.02%	2.50E+02	0.44%
<b>K2</b>	2.96E+04	2.96E+04	100.00%	6.00E+02	2.03%	1.00E+03	3.38%	2.00E+02	0.68%
<b>K1</b>	4.45E+03	1.00E+03	22.47%	2.00E+02	4.49%	1.00E+02	2.25%	2.00E+03	44.94%
<b>O1</b>	3.50E+03	2.00E+02	5.71%	1.00E+02	2.86%	4.00E+01	1.14%	5.00E+02	14.29%

Tabla 4-1. Resumen de los flujos de energía en los golfos Norpatagónicos. Los valores del flujo de energía están en W/m.

#### 4.4 Comparación con mediciones existentes

En este apartado realizamos la comparación de valores de elevación de la superficie libre (ESL) en 16 estaciones costeras, con datos de la tabla de marea elaborada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y con elipses elaboradas de mediciones de corrientes (Fig. 4-6). La figura 4-6a muestra la ESL medida en *cm* en la ordenada y las estaciones mencionadas de Sur a Norte en la abscisa. La gráfica indica una muy buena correlación de los valores medidos y las observaciones, con máximos de error para la componente  $M_2$  inferior al 2 % (máximo de 5.5 cm). La componente que presenta mayor error relativo es la  $S_2$  (cercano al 10 %). La componente  $K_1$ , muestra también una buena correlación de las observaciones, salvo dentro del GSJ, en San Román donde el error es mayor. Esto puede ser debido a que en un dominio tan restringido como es el GSJ, es necesaria una mayor resolución espacial. Una característica importante es la amplificación que sufre la componente  $M_2$  dentro del GSM, con amplitudes donde el máximo supera los 3 m.

Se compararon también los resultados obtenidos con el modelo y observaciones directas de corrientes medias en dos puntos cercanos al GN Rivas (1997) (Fig. 4-6b, 4-6c y 4-6d) y en zonas costeras del interior del GSM (Moreira et al, 2009) (Fig. 4-6e). Se compararon los datos con el nivel vertical más cercano a la profundidad del fondeo, de acuerdo a la discretización vertical seleccionada. La componente  $M_2$  muestra una subestimación leve (1,5 %) de la amplitud en la boca del GN, con valores de 0.43 m/s y una buena coincidencia en la dirección de la corriente media. El fondeo más alejado de la boca muestra una amplitud de 0.35 m/s que difiere en un 7% a la observación directa con la dirección levemente rotada (Fig. 4-6b). En las estaciones dentro del GSM y GSJ la comparación con los datos publicados por Moreira et al (2009) para esta componente es muy buena, con errores dentro de lo esperable para un modelo no calibrado (máximos de 20° grados en la inclinación y 20% en la magnitud de las corrientes).

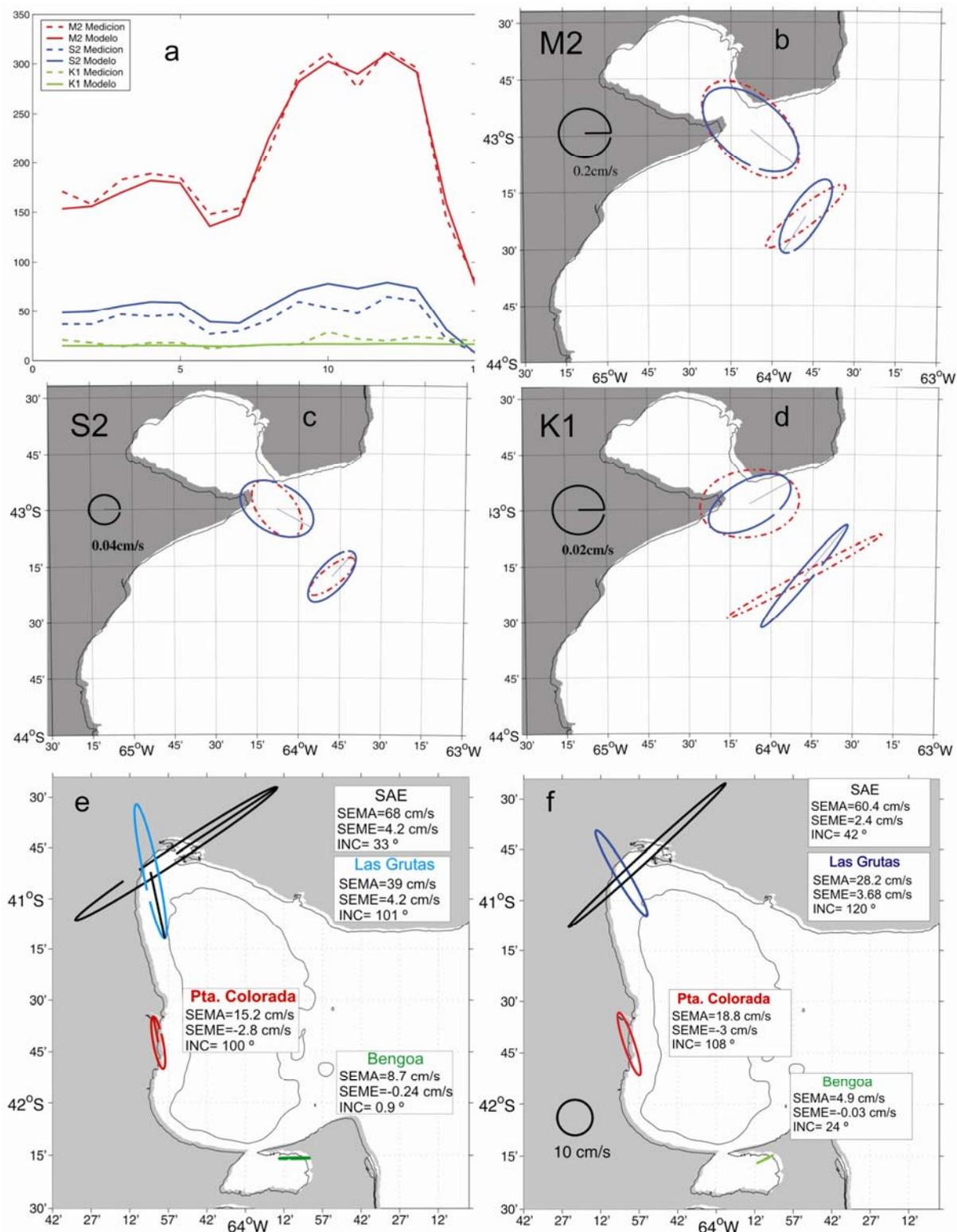


Figura 4-6. Comparación de observaciones directas. a) Elevación de la superficie libre. b), c) y d) Elipses de marea de la componente  $M_2$ ,  $S_2$  y  $K_1$  respectivamente. Las líneas punteadas indican las mediciones y las líneas llenas los resultados del modelo. e) Elipses de marea de la componente  $M_2$  analizadas por Moreira et al. 2009 y f) resultados del modelo en las mismas estaciones.

Los patrones principales presentes en las observaciones, la diferencia de amplitud de corriente entre el GSJ y el GSM, y el aumento de velocidad hacia el Norte en la costa Oeste del GSM son correctamente capturados por el modelo. La componente  $S_2$  en el fondeo en la boca del GN, sobreestima la amplitud de la corriente en un ~10 % en dirección transversal a la boca del golfo (0.1 m/s) (Fig. 4-6c). La estación más alejada de la boca presenta una discrepancia similar en amplitud (0.08 m/s) y la dirección es la correcta. Esta componente es la que presenta mayores diferencias. La componente  $K_1$  tiene un alto grado de correlación entre las observaciones y salidas del modelo (entre el 2 y 3%). Las amplitudes son de 0.037 m/s en la estación cercana a la boca del GN y 0.05 m/s en la estación más alejada (Fig. 4-6d). Su mayor discrepancia es en la dirección de la elipse del fondeo alejado de la boca del GN.

En resumen, podemos concluir que el modelo de mareas se muestra confiable y robusto comparado a trabajos anteriores (Glorioso y Flather, 1997; Simionato et al., 2004, Palma et al., 2004, Moreira, 2008) y mediciones, logrando reproducir las características principales de la onda de marea con alta resolución espacial, sobre todo dentro de dominios semicerrados de pequeñas dimensiones como son el Golfo San José o el Golfo Nuevo.

#### **4.5 Corrientes residuales de marea**

Incluido en el flujo periódico de la marea se halla el movimiento neto del agua conocido como circulación residual, cuya magnitud es generalmente menor al de las corrientes de marea. Aquí definimos la corriente residual como el promedio euleriano de las corrientes instantáneas (Robinson, 1983). El principal agente responsable de este flujo residual es la interacción no-lineal del flujo oscilatorio con la topografía irregular del fondo, la geometría costera y la fricción de fondo. La Figura 4-7 muestra las corrientes eulerianas residuales y la función corriente asociada calculadas por el modelo forzado con las 6 principales componentes de marea  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$  y  $O_1$ , luego de un promedio de 60 días. Se realizaron experimentos adicionales de períodos más extensos (1 año) y las corrientes residuales de marea indican un comportamiento similar.

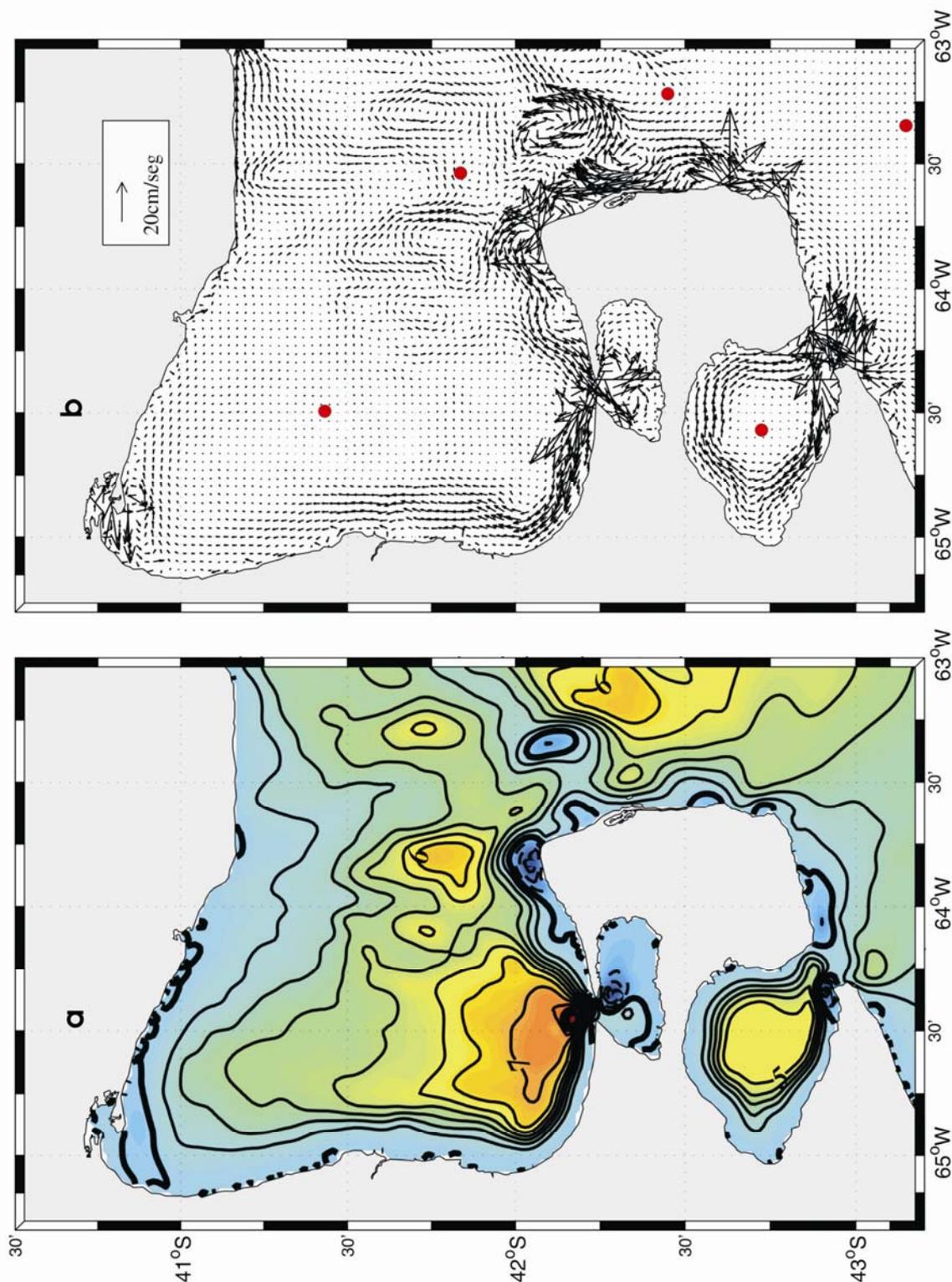


Figura 4-7. Corrientes residuales de marea. a) Función corriente. Línea llena indica circulación horaria y línea cortada circulación antihoraria. (IC=0.01 Sv). b) Vectores velocidad de las corrientes residuales medias y puntos de evaluación de magnitudes correspondientes.

Al Norte de Península Valdés (Fig. 4-7b) se observan intensas corrientes residuales ( $\sim 30$  cm/s) que forman giros de recirculación horarios y antihorarios. Este resultado es consistente con resultados de simulaciones previas en la región (Glorioso and Simpson, 1994). Los giros son producidos por rectificación topográfica de la onda de marea (Park and Wang, 1994) y el sentido de giro es tal que dejan las regiones

menos profundas a la izquierda, lo cual es consistente con resultados teóricos y numéricos previos de circulación en bancos de regiones macromareales (Lynch and Naimie, 1993).

Las corrientes residuales muestran un dominio principalmente horario en la mayor parte de la región. El GSM, presenta los máximos de transporte ( $0.08 \text{ Sv}$ ,  $\sim 0.01 \text{ Sv}$ ,  $1 \text{ Sv} = 1\text{e}6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en la zona Sur cercano a la boca del GSJ en un giro ciclónico definido. En el resto del dominio el giro dentro del GSM es horario y de menor intensidad. Al Norte de PV, sobre la costa, se genera un giro de pequeñas dimensiones y muy intenso ( $0.03 \text{ Sv}$ ) de sentido antihorario. Al Noreste de PV se observa otro giro de dimensiones similares al del Norte, pero más débil ( $0.01 \text{ Sv}$ ).

En la boca del Golfo Nuevo y San José, se observan estructuras de cuadrupolos que dominan la dinámica de intercambio con el océano exterior. El GN, se encuentra dominado por circulación horaria con transportes máximos de  $0.05 \text{ Sv}$  con una distribución de líneas de corriente que siguen la batimetría del golfo. El GSJ, muestra una dinámica dividida zonalmente y gobernada por el dipolo interior existente en la boca. La zona Este se halla dominada por un giro antihorario ( $0.025 \text{ Sv}$ ), que se debilita hacia las costas; la zona Oeste, por un giro de circulación horaria de menor intensidad. Aunque existe poca evidencia observacional directa que confirme las magnitudes o los patrones de corrientes residuales, las estructuras descritas son particularmente intensas y robustas y serán analizadas posteriormente mediante modelos idealizados y balances de vorticidad.

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>
<b>Longitud O</b>	63.7154	64.5487	63.3788	63.7154	64.5487
<b>Latitud S</b>	43.2692	42.7422	42.3739	41.8795	41.3813
<b>Vel. max. <math>M_2</math> [cm/s]</b>	42.4	7.61	146.08	124.02	19.83
<b>Vel. min. <math>M_2</math> [cm/s]</b>	12.87	0.72	1.95	6.68	7.14
<b>V. Residual [cm/s]</b>	0.378	0.09	2.74	4.2	0.41

*Tabla 4-2. Comparación entre las velocidades medias de las elipses de la componente  $M_2$  y módulo de corrientes residuales en cinco estaciones (ver Fig. 4-7b).*

En la tabla 4-2 se puede observar la relación existente entre las velocidades medias máximas y mínimas correspondientes a la componente de marea semidiurna mas

importante ( $M_2$ ) y el módulo de la velocidad residual en cinco puntos del dominio. Los resultados demuestran que las magnitudes de la corriente residual son entre uno y dos órdenes de magnitud inferior a las corrientes máximas y mínimas que indican las elipses de marea, de acuerdo a la ubicación espacial.

#### 4.5.1. Experimentos Idealizados

La circulación forzada por marea en la zona de los Golfos Norpatagónicos constituye uno de los factores más importantes en la circulación general. En el transcurso de este trabajo veremos que muchas características y efectos dinámicos producidos por el forzante de marea prevalecen y/o influyen notablemente en la circulación, tanto barotrópica como baroclínica inducida por otros forzantes (i.e., vientos, flujos de calor).

Con el objeto de analizar con más detalle la generación de las estructuras residuales observadas en el modelo realista se realizaron un conjunto de experimentos adicionales. En esta sección se analizan experimentos idealizados y los balances de vorticidad, en la sección siguiente se analizan experimentos realistas. Los experimentos idealizados intentan representar las principales características de la geomorfología realista, para poder determinar la influencia de la forma del fondo y de las costas sobre la circulación media mediante variables geométricas regulables. Los experimentos idealizados tienen una resolución espacial de 1 km x 1 km.

En primer lugar, se configuró un experimento que simula la estructura geométrica del GN, con el fin de representar el cuadrupolo de vórtices en la zona de la boca y el giro de circulación interior. La geometría del modelo idealizado del GN, tiene profundidad constante de 30 metros en la zona externa y profundidad con variación parabólica (isobatas concéntricas) en el interior del golfo con profundidades máximas de 120 metros, el diámetro utilizado en el golfo es de 40 km aprox. (Fig. 4-8). Las dimensiones de la boca son regulables, por ejemplo en la distancia de estrangulación ( $B$ ). Se utilizaron tres distancias diferentes para evaluar la influencia de esta distancia sobre la formación de dipolos internos. En el caso GN1 (control) el valor de  $B$  es 15 km, cercana al valor real, mientras que para el caso GN2,  $B$  se reduce a 8 km y en GN3 la apertura de la boca es total.

En la figura 4-8, se observa para el experimento GN1 la función corriente y las velocidades medias luego de 30 días de simulación computacional. La estructura de cuadrupolos queda perfectamente definida en el caso idealizado (Fig 4-8a y b), donde en la zona externa del golfo los vórtices de circulación muestran una simetría, mientras que el dipolo del interior se muestra asimétrico dependiendo de la apertura de la boca (GN2 y GN3, Fig. 4-9). En la zona externa, se genera un giro ciclónico (al Norte) de aproximadamente 0,015 Sv cerrado y definido de 10 km de diámetro. Al Sur de la zona externa se genera un giro cerrado casi simétrico al del Norte pero de sentido de circulación inverso e inferior en intensidad (0.01 Sv). En el interior el dipolo se desarrolla mas que en el exterior y se observa un claro dominio del giro ciclónico con intensidades cercanas a los 0.2 Sv. La estructura de cuadrupolo en el sector de la boca se encuentra en concordancia con la estructura mostrada por el modelo realista (Fig 4-7) a pesar de que en este caso, debido a la forma irregular del fondo, los giros sufren deformaciones. Los vectores de corrientes residuales muestran el comportamiento medio de los giros de circulación en las cercanías de la boca del golfo (zona de estrangulación). Los vectores se amplifican en la zona cercana a las paredes donde el flujo se estrangula y en la zona de interacción de los dos vórtices donde se produce un jet intenso hacia fuera en la zona externa y hacia el interior en el dipolo interno.

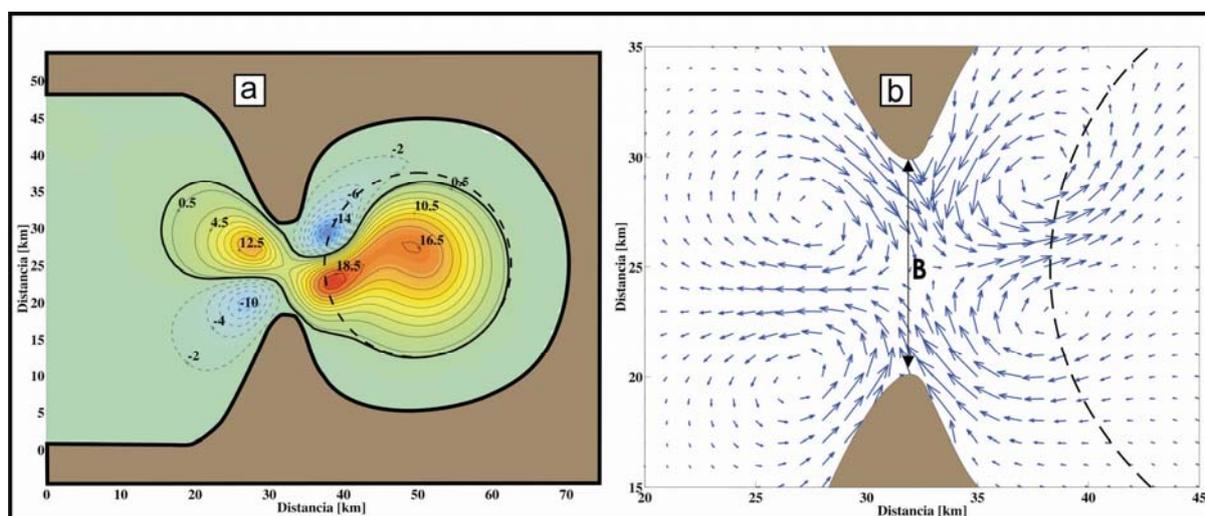


Figura 4-8. Golfo idealizado de control (GN1). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Función corriente de las velocidades medias ( $IC= 0.5 e^{-3}$  Sv). b) Vectores de las corrientes medias residuales.

Mediante los experimentos de sensibilidad (Fig. 4-9) podemos determinar la influencia de la variable B en la estructura de cuadrupolos. El caso GN2, tiene un

valor de B inferior al GN1, es decir que produce una mayor estrangulación del flujo en el intercambio del golfo con aguas externas. La característica más importante que se observa es una amplificación del giro anticiclónico en el interior, logrando dominar gran parte del golfo. El giro ciclónico del cuadrupolo en el interior aumenta en intensidad pero se reduce espacialmente. El dipolo en la zona externa permanece casi invariante espacialmente y alcanza intensidades mayores. Este efecto es debido a que al tener una mayor estrangulación el fluido, las corrientes se incrementan en la zona de la boca, aumentando a su vez los términos de fricción de fondo y fricción en las paredes laterales, el análisis posterior de vorticidad explicará algunos de estos puntos. El experimento que muestra el golfo abierto a aguas externas muestra una circulación ciclónica débil en el interior del golfo y en el resto del dominio (Fig. 4-9b). El mecanismo es inverso al caso GN2, donde la menor restricción del flujo de intercambio, reduce notablemente las intensidades de las corrientes y la circulación queda dominada por la advección y por la topografía de fondo.

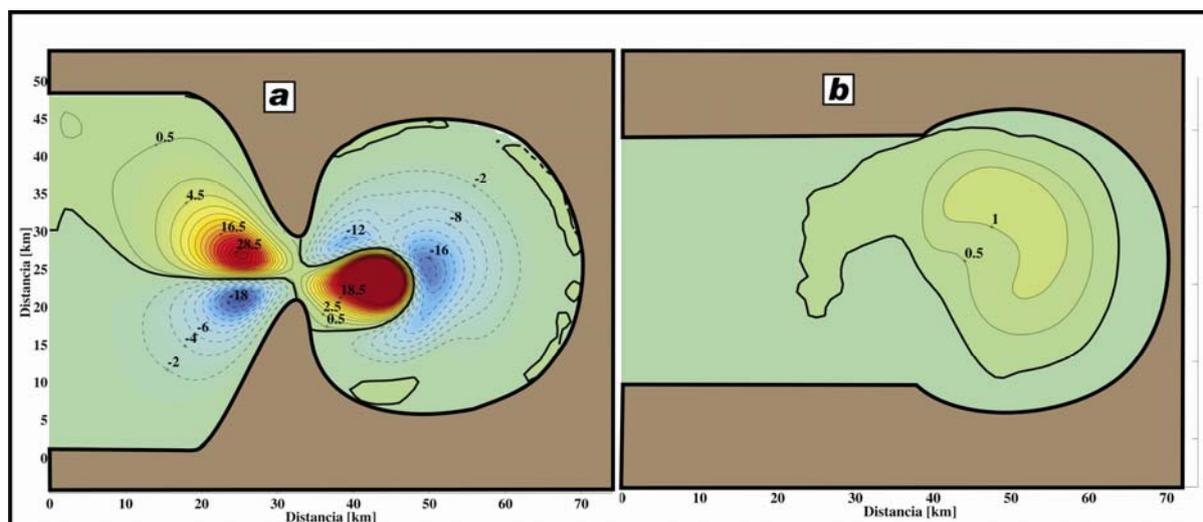


Figura 4-9. Función corriente de las velocidades medias ( $IC= 0.5 e^{-3} Sv$ ). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Experimento GN2. b) Experimento GN3.

Por otro lado, se condujeron experimentos idealizados del GSM (GSM1 y GSM2), con la intención de determinar los mecanismos responsables de la intensidad de los giros internos. El modelo se configuró con profundidades constantes de 20 metros en todo el dominio a excepción de las concavidades propias del golfo. En este caso, para determinar la variación de intensidad de los giros de circulación, se ubicó la concavidad (profundidad parabólica) del golfo desplazada hacia el Norte (GSM1) y

otro experimento donde se modela con dos cuencos de profundidad parabólica (~140 m) de idénticas características, uno al Norte y otro en el Sur (GSM2), el cual se asemeja más al caso realista.

En el experimento GSM1, donde la concavidad se encuentra desplazada hacia el Norte, observamos una circulación ciclónica que gobierna la mayor parte del golfo con intensidad máxima de 0.19 Sv. y en zonas costeras de profundidad constante una circulación anticiclónica (Fig. 4-10a). Al adicionar al mismo dominio una concavidad de idénticas característica en la zona Sur (Fig. 4-10b) la circulación media muestra dos giros de recirculación, con diferente intensidad. El giro ubicado al Sur, alcanza 0.26 Sv de intensidad, mientras que el del Norte alcanza 0.19 Sv. Esto demuestra que la intensidad del giro aumenta a medida que el centro del mismo se ubique hacia el Sur, siendo idéntica la batimetría de los cuencos.

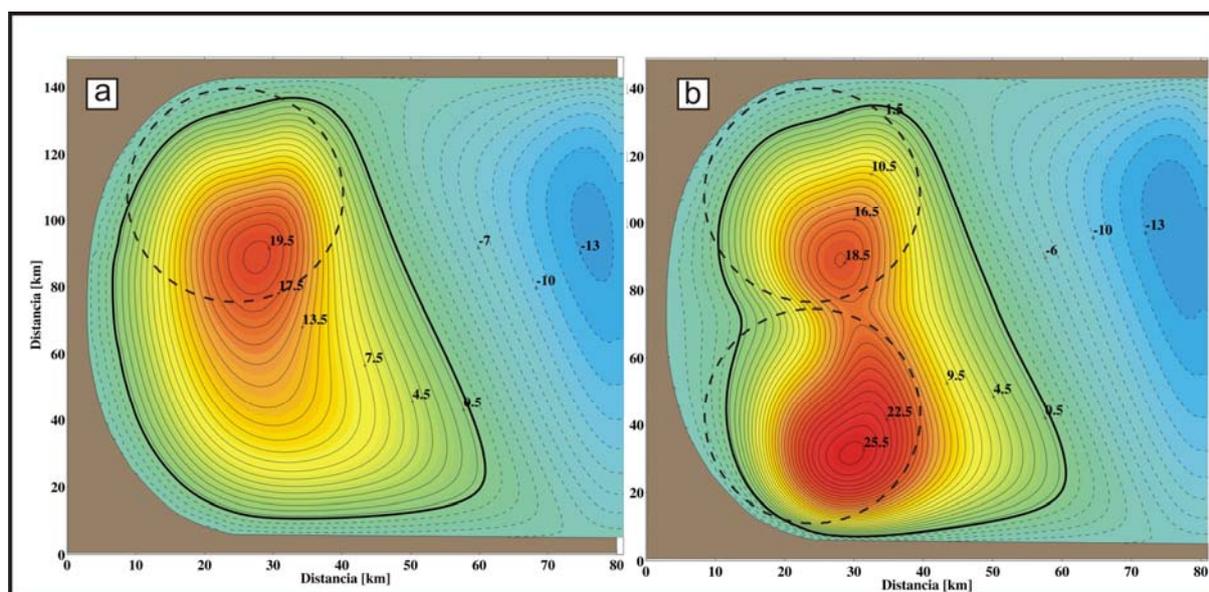


Figura 4-10. Función corriente de las velocidades medias ( $IC= 0.5 \text{ e-}3 \text{ Sv}$ ). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Experimento GSM1. b) Experimento GSM2.

#### 4.5.1.1 Balance de vorticidad

Tomando el rotor de las ecuaciones integradas en vertical (modo externo) en coordenadas cartesianas se llega a la ecuación de balance de vorticidad (Robinson, 1983):

$$\begin{aligned}
 & \overline{\text{I}} \quad \overline{\text{II}} \quad \overline{\text{III}} \\
 & \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{D} \left( \frac{\partial(DV)}{\partial t} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{D} \left( \frac{\partial(DU)}{\partial t} \right) \right) \right] + \frac{f}{D} \left[ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla D \right] - \beta V = \\
 & \overline{\text{IV}} \quad \overline{\text{V}} \quad \overline{\text{VI}} \\
 & \text{curl}_z \left[ (-ADV + DIFF) / D \right] - \left[ \frac{\partial \left( \frac{\tau^b}{D} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left( \frac{\tau_x^b}{D} \right)}{\partial y} \right] - \left[ \frac{\partial \left( \frac{\tau_y^w}{D} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left( \frac{\tau_x^w}{D} \right)}{\partial y} \right] \quad (4-10)
 \end{aligned}$$

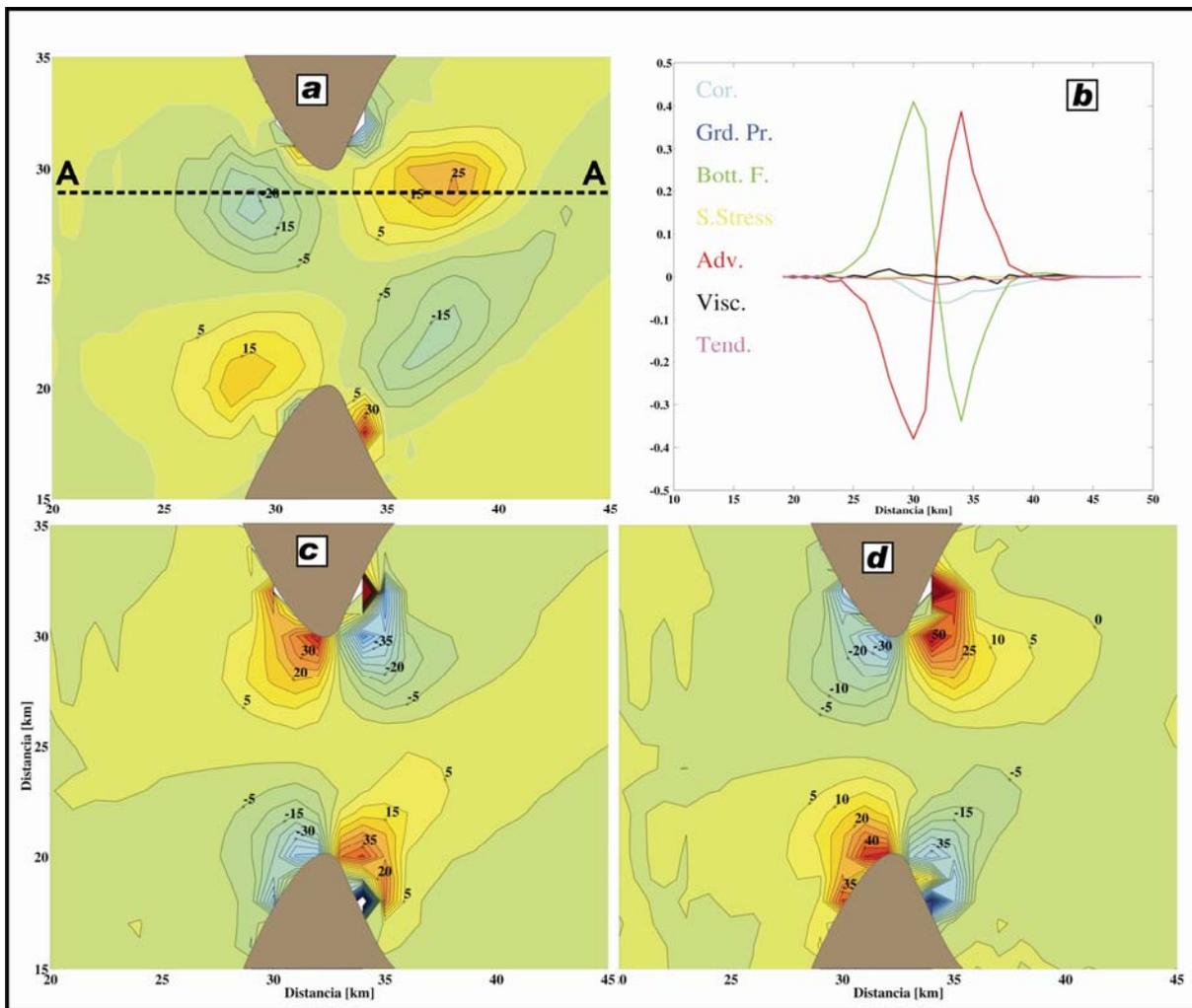


Figura 4-11. Vorticidad del experimento GN (Intervalos de contorno =  $5e^{-3} \text{ s}^{-2}$ ). La línea punteada gruesa indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Vorticidad residual y transecta de análisis A-A en línea negra punteada. b) Balance de vorticidad para la transecta A-A, los términos involucrados representan el rotor de Coriolis (Cor), del gradiente de presión (Grd Pr), de la fricción de fondo (Bott F.), del esfuerzo en superficie (S Stress), advección (Adv), viscosidad (Visc) y del término temporal (Tend). c) Rotor de la fricción de fondo (V) y d) rotor de la advección (IV).

Donde el término I representa la **tendencia (variación temporal)**, el II **stretching**, el tercer término (III) es **Beta**, el IV es el rotor de la **advección**, V es el rotor de la **fricción de fondo** y el VI es el rotor de la tensión del **viento**. Para el caso que nos ocupa, el término VI es cero. La vorticidad residual tiene origen en la transferencia de la vorticidad de marea al flujo medio residual. Por lo tanto, la producción de la vorticidad de marea es esencial para producir los vórtices residuales. La vorticidad mareal puede ser clasificada en la siguiente forma: vórtices de cuenca, vórtices de promontorios y vórtices topográficos (Ridderinkhof, 1989).

Con el fin de determinar los términos principales del balance en el dominio de estudio se llevó a cabo un análisis de balance de vorticidad del caso idealizado del GN1 (control). La figura 4-11a muestra la vorticidad residual luego de 30 días de simulación. La zona donde aparecen los cuatro núcleos de los giros muestran una respuesta altamente no lineal, producto de la rectificación de de la onda de marea por cambios bruscos de dirección (advección). Los signos de la vorticidad residual son tales que aparecen negativos en los giros ciclónicos y positivos en los anticiclónicos. La línea punteada negra indica la transecta de análisis del balance de vorticidad (Fig. 4-11b). El balance en la zona de los vórtices es entre el rotor de la advección (IV) y el rotor de la fricción de fondo (V), siendo el resto de los términos prácticamente despreciables. El balance (Fig. 4-11b) muestra un claro aumento de los términos de vorticidad en la zona de los vórtices (puntualmente en los núcleos), mientras que en el resto del dominio los valores son un orden de magnitud inferior. Este balance coincide con estudios similares en vórtices de promontorios (Pingree, 1978; Pingree & Maddock, 1985). En el giro ciclónico en la zona externa al golfo, la fricción de fondo adquiere valores positivos y la advección negativos al igual que la vorticidad residual. Los mapas de advección y fricción de fondo se pueden visualizar en las figuras 4-11c y 4-11d, los cuales revelan una alta concordancia del balance de vorticidad en trabajos previos (Ridderinkhof, 1989, Zimmerman, 1978, 1980a).

Realizando un análisis mas detallado del término de fricción de fondo, podemos determinar con precisión el balance de fuerzas actuantes en la zona de los vórtices. De la ecuación (4-10) la fricción de fondo (V) se puede desglosar en:

$$\overbrace{\left[ \frac{\partial \left( \frac{\tau_y^b}{D} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left( \frac{\tau_x^b}{D} \right)}{\partial y} \right]}^{\text{V}} = \overbrace{\left( \nabla D \right) \times \frac{\nabla \lambda}{D^2}}^{\text{VI}} - \overbrace{\frac{2\lambda \left( \nabla D \right)}{D^3} \times \nabla D}_{\text{VII}} - \overbrace{\frac{\lambda}{D^2} \left[ \frac{\partial \left( \nabla D \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left( \nabla D \right)}{\partial y} \right]}^{\text{VIII}}$$

(4-11)

VI es dependiente del gradiente del flujo medio (corte lateral), existe aún con topografía constante y es cero para parametrizaciones lineales de la fricción. VII aparece en presencia de topografía de fondo variable (variaciones normales a la dirección local del flujo) y es diferente de cero para parametrizaciones lineales del término de fricción. VIII es la disipación irreversible de vorticidad por fricción de fondo (Notar que el coeficiente  $\lambda/D^2$  es siempre positivo).

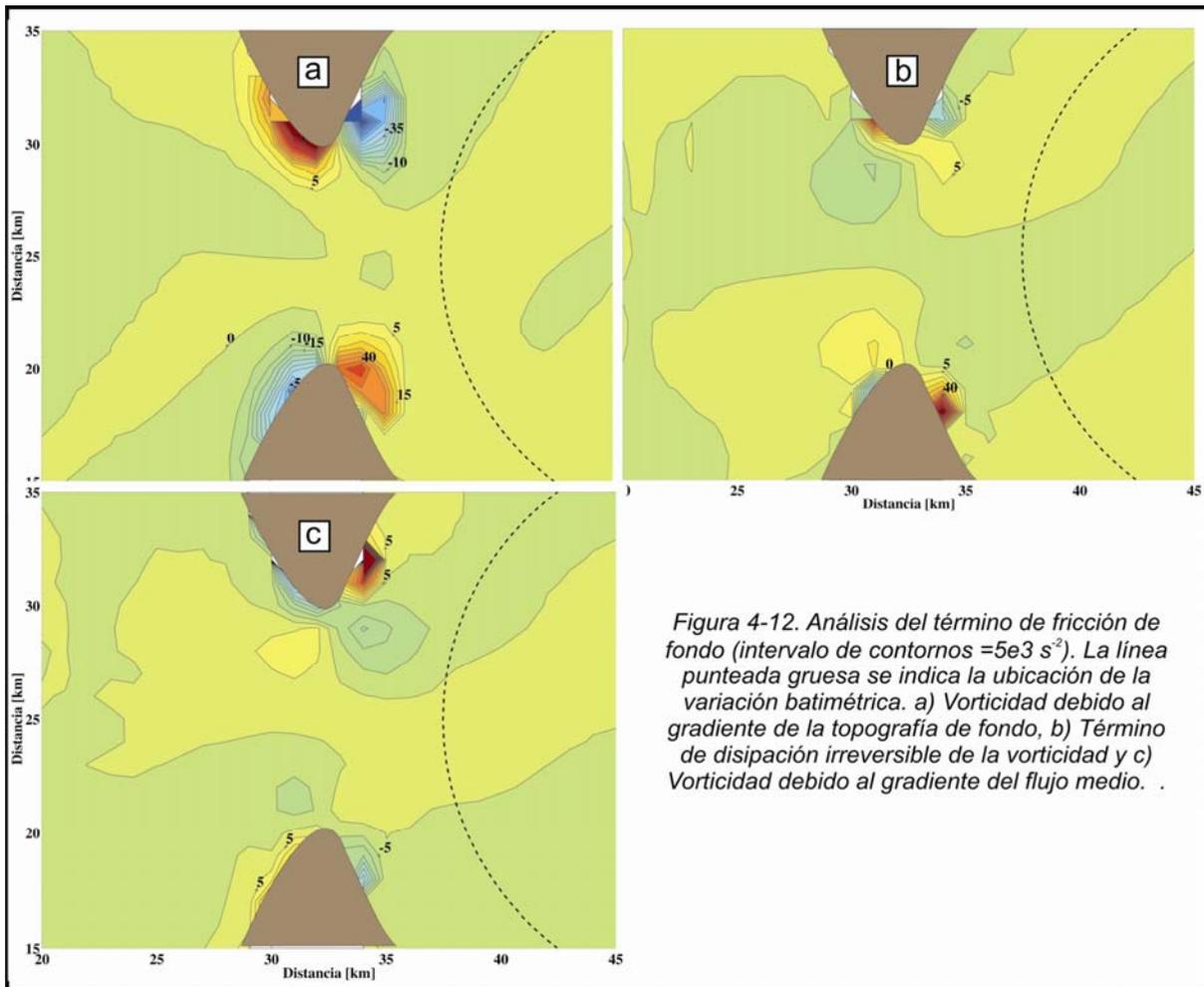


Figura 4-12. Análisis del término de fricción de fondo (intervalo de contornos =  $5 \times 10^3 \text{ s}^{-2}$ ). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Vorticidad debido al gradiente de la topografía de fondo, b) Término de disipación irreversible de la vorticidad y c) Vorticidad debido al gradiente del flujo medio.

En la figura 4-12, se graficaron los términos desglosados del rotor de la fricción de fondo, la disipación irreversible (Fig. 4-12a), la fricción debido a la pendiente de la topografía de fondo (Fig. 4-12b) y la fricción debido al gradiente del flujo medio (Fig. 4-12c). Gran parte de la fricción está controlada por la disipación generada por el cambio brusco de dirección, mientras que el segundo factor importante es el debido al gradiente de la topografía de fondo (Fig. 4-12c).

Se llevaron a cabo otros experimentos idealizados con diferentes discretizaciones espaciales (no incluidos en el trabajo) que muestran características similares a las observadas, lo cual indica un grado de independencia con el tamaño de grilla utilizada, no así con la forma de línea de costa en la boca de los golfos (modificando la variable B) lo cual queda demostrado con los experimentos GN2 y GN3.

#### **4.5.2. Experimentos de sensibilidad realistas.**

Aplicando la clasificación de Ridderinkhof (1989), podemos realizar un análisis para nuestro caso de estudio realista. (Fig. 4-13a). Las bocas de los golfos GSJ y GN, debido a su estrecha comunicación con aguas externas, poca profundidad en la boca y forma de fondo en el interior actuando bajo un flujo oscilatorio de marea, generan corrientes residuales con estructura de cuadrupolos de vórtices en las zonas cercanas a las bocas. Esta estructura puede incluirse en la clasificación de Ridderinkhof como Vórtices de Promontorio o de variaciones repentinas de dirección de la línea de costa. Dos de estos vórtices se ubican en la zona externa en forma de dipolo, uno horario y otro antihorario. El segundo dipolo se ubica en la zona interna con sentido de giro opuesto al dipolo externo. Los modelos idealizados previos muestran una estructura de cuadrupolos simétricos con respecto al eje central de la boca y con respecto al interior y exterior. Tanto en la boca del GN como en la del GSJ, la estructura de cuadrupolo aparece fuertemente marcada, con la diferencia en el caso realista de que los giros sufren modificaciones (cuadrupolos degenerados), en intensidad, ubicación y dimensiones. El dipolo externo del GSJ, al estar conectado con el giro ciclónico interno del GSM es advechado hacia el Oeste. Como consecuencia, el vórtice antihorario queda suscripto a la costa, tendiendo a desaparecer y el vórtice horario queda centrado en la zona central de la boca, sufriendo un aumento adicional de intensidad debido a la forma topográfica del

fondo. El dipolo interno del GSJ se comporta similar al caso idealizado por ser de menor profundidad, dominando casi completamente la dinámica interna del GSJ.

En el GN ambos vórtices horarios (exterior e interior al GN) se encuentran inmersos en la circulación residual externa al dipolo, siendo modificados con respecto al cuadupolo ideal. En la zona interna, la forma de la costa en la boca difiere (la Norte con respecto a la Sur) en que su cambio de pendiente es menos abrupto, produciendo un desplazamiento del vórtice horario hacia el interior del golfo el cual es capturado por el intenso giro horario interno. El vórtice antihorario en la costa Sur es más definido y queda limitado a la zona costera. Al Norte de PV, también se observa un giro antihorario que podría clasificarse como vórtice de promontorio, generado por el cambio repentino de dirección de la costa en Punta Norte de PV.

En la zona de la boca del GSM y al Este de PV podemos identificar lo que se denominan Vórtices Topográficos, debidos a variaciones repentinas de la forma de fondo como puede ser un banco o depresión. La batimetría en la zona y la vorticidad residual generada tienen un alto grado de concordancia (generando vorticidades positivas en zonas de bancos y negativas en las depresiones). Por otro lado, el experimento realizado con batimetría constante de 100 m (Fig. 4-13b) demuestra que tales vórtices no se generan mediante el mecanismo de fricción de fondo en presencia de topografía variable, aunque sí se genera la vorticidad producida por la parametrización cuadrática de la fricción en presencia de topografía plana, en el caso de baja profundidad (50 metros) (experimento no mostrado).

La circulación residual dentro de los golfos GN y GSM, responde mayormente a Vórtices de Cuenca. En nuestros experimentos idealizados (GN1, GSM1) observamos que las corrientes residuales de marea en estos dominios responden con circulación horaria con líneas de corriente que siguen aproximadamente las isobatas. La producción de vorticidad está dada por la interacción de la advección no-lineal y fricción de fondo en presencia de topografía variable y modificada por la aceleración de Coriolis.

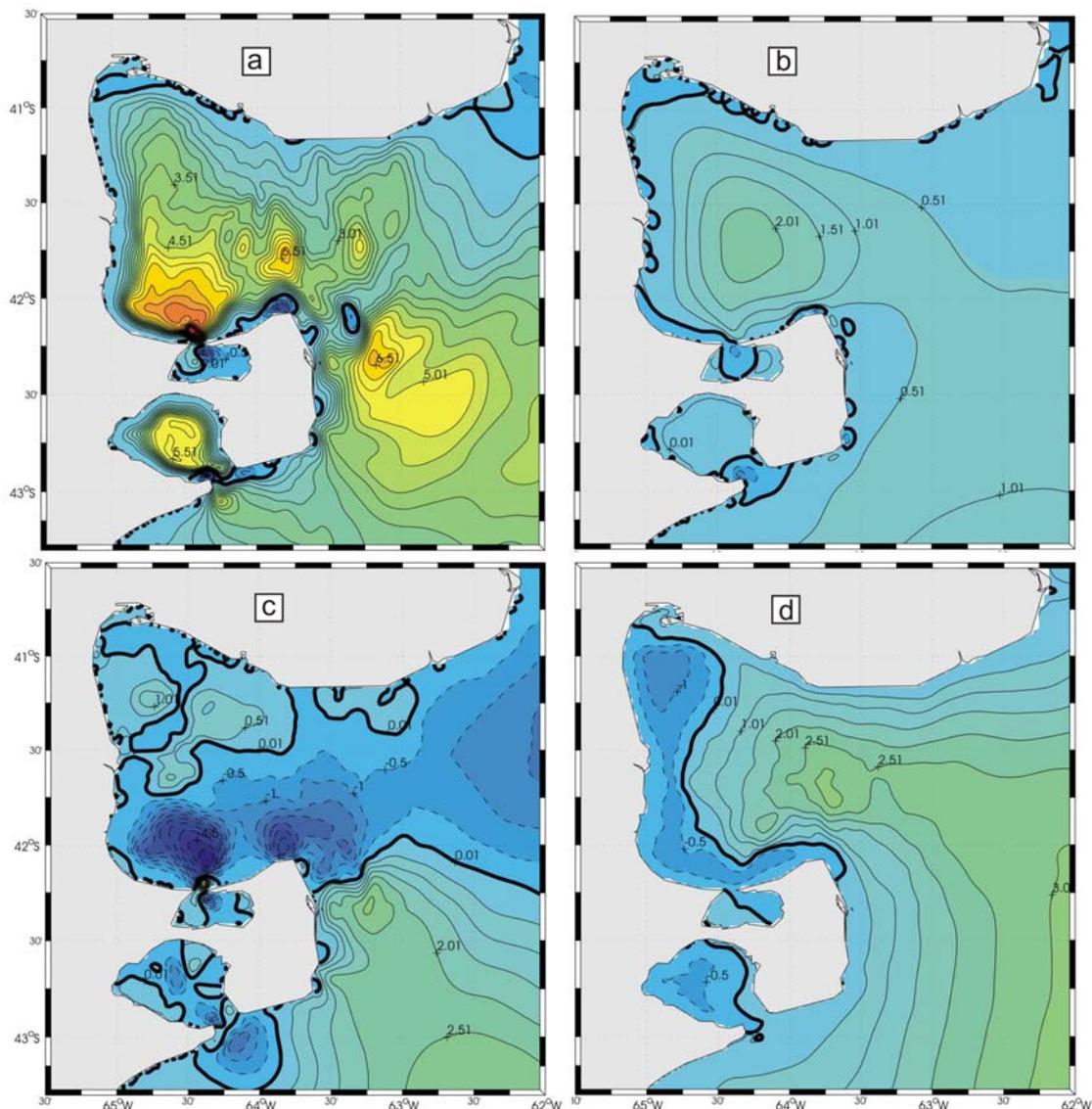


Figura 4-13. Circulación residual mediante la función corriente para los experimentos forzados con marea. a) Exp. Control, b) Exp. Profundidad 100m c) Exp. sin Coriolis, d) Exp. sin termino de advección

El sentido de circulación depende de la pendiente de fondo (concavidad) y del signo del parámetro de Coriolis. En el hemisferio Sur, si la concavidad del fondo es positiva (cuenco) el giro es ciclónico, mientras que si la concavidad es negativa (p.e. un islote sumergido en el centro) la circulación sería anticiclónica. Mediante el experimento sin el término de Coriolis (Fig. 4-13c), observamos que la circulación es altamente irregular e indefinida, tanto para el GN como para el GSM. Una de las características importantes para este experimento es que el dipolo formado en la boca del GSJ del lado interior del GSM sufre otro tipo de degeneración. Ya que la circulación intensa horaria es inexistente, el dipolo está más centrado en la boca que el caso de control y el giro antihorario correspondiente al dipolo se ve

abruptamente amplificado por la variación topográfica del interior del GSM (evento que sucede para el giro horario en el exp. de control (Fig. 4-13a)). En el experimento sin el término de advección (parte no-lineal) (Fig. 10d), la producción de vorticidad y en conclusión los vórtices de cuenca, los de promontorios y los topográficos son inexistentes, demostrando que la principal fuente de producción de vorticidad es la advección no-lineal. Para el experimento de profundidad constante los vórtices de cuenca al ingreso de los golfos se mantienen (aunque más débiles), ya que el principal mecanismo de producción es el rotor de advección, pero existe un aporte importante del rotor de fricción de fondo en presencia de topografía variable.

#### 4.6. Conclusiones parciales.

De este capítulo se pueden extraer las siguientes conclusiones parciales:

- Las amplitudes y fases de la onda de marea y las velocidades (elipses de marea) modeladas concuerdan en gran medida con modelos regionales previos de menor y similar resolución de la región (Glorioso y Simpson, 1994, Glorioso y Flather, 1997, Simionato *et al.*, 2004, Palma *et al.*, 2004a y Moreira, 2008), amplitudes extraídas de tablas de marea y las escasas observaciones de corrientes disponibles.
- Los máximos valores de disipación energía mareal alcanzan los  $7 \text{ W/m}^2$  y se concentran mayormente al NE de PV, coincidiendo en ubicación con los resultados del modelo previo de mareas de alta resolución (Moreira, 2008). La magnitud total de la disipación en el dominio de estudio es cercana a los 12.3 GW algo inferior a la reportada por Moreira. Cabe destacar que trabajos previos de menor resolución (Glorioso y Simpson, 1994) indican valores puntuales de disipación mayores a  $50 \text{ W/m}^2$ .
- El flujo de energía de la componente principal  $M_2$ , muestra flujos de Sur a Norte, ingresando un alto porcentaje en el GSM siguiendo la línea de costa y egresando un porcentaje inferior de la energía, mostrando relación con la disipación generada en la boca del GSM. En el GN, también se produce una gran disipación de energía en la boca, resultando en flujos de energía despreciables en el interior.

- Aunque existen algunas discrepancias puntuales menores en los valores de amplitud y fase de algunas componentes es importante destacar que el objetivo de este modelo de mareas no fue construir una herramienta predictiva sino investigar las características dinámicas más relevantes y robustas de este forzante para su posterior utilización en problemas más complejos (Capítulos 5 y 6). La correcta respuesta del modelo en cuanto a elevaciones, corrientes medias, flujos energéticos y tasas de disipación nos brinda confianza en ese sentido.
- Las corrientes residuales marcan características de circulación básicas para la comprensión de la circulación media, tales como giros de recirculación (vórtices) al Norte de PV, sobre bancos de baja profundidad y estructura de cuadrupolos en las bocas del GN y GSJ. En el interior del GN y GSM la circulación residual debida a la marea forma giros ciclónicos.
- Los giros en el interior de los golfos, se pueden clasificar como Vórtices de Cuenca, y son debidos a la advección y efecto de Coriolis en presencia de topografía variable. En el GN este giro está regulado principalmente por la estrangulación del flujo en la boca, mientras que la intensidad de los giros en el GSM está regulada por la ubicación de los cuencos de máxima profundidad, con mayor intensidad en el cuenco Sur.
- La estructura de cuadrupolos en la boca del GN y GSJ, se genera por el flujo oscilatorio de la marea (rectificación no-lineal) en un canal de restringidas dimensiones. Están regulados principalmente por el rotor de la advección y el rotor de la fricción de fondo, el cual es altamente dependiente de forma de la línea de costa.
- Experimentos de sensibilidad con modelo el realista muestran la importancia fundamental del término advectivo no-lineal y de la correcta representación de la topografía de fondo y forma de costa en la circulación residual forzada por la marea. Por ejemplo, en los experimentos sin el término de advección desaparecen las estructuras básicas encontradas: cuadrupolos, vórtices de recirculación (topográficos) y giros ciclónicos en el interior de los golfos.