

## CAPÍTULO 5 – MODELO BAROTRÓPICO FORZADO POR VIENTOS Y MAREA

### 5.1 Introducción.

El esfuerzo del viento en la superficie es ampliamente reconocido como uno de los mayores forzantes de la variabilidad observada en el océano en escalas submareales. Desde el punto de vista del modelado, la respuesta barotrópica del océano forzada por el viento puede considerarse compuesta de tres componentes: (a) la capa superficial de Ekman impulsada por el viento local, (b) el campo de presiones y capas de fondo de Ekman asociadas que resultan de convergencias y divergencias del transporte de Ekman en la capa superficial y (c) efectos remotos transmitidos a la región de estudio a través de ondas costeras atrapadas (Greenberg *et al.*, 1997).

En este capítulo se analizarán los experimentos numéricos diseñados para investigar la respuesta de los Golfos Norpatagónicos frente a efectos del viento. En primer término se estudiará en detalle la respuesta a una distribución espacialmente uniforme desde el Oeste, o transversal a la costa (EO1) y temporalmente constante del esfuerzo del viento en superficie y de magnitud  $0.1 \text{ Pa}$  ( $1 \text{ dyn/cm}^2$ ). Estos son los vientos predominantes en la región. Para completar el estudio del efecto de la dirección del viento sobre la circulación se implementaron experimentos adicionales donde el océano es forzado por vientos que soplan de los tres cuadrantes restantes (Sur, Norte y Este). Finalmente se realiza un estudio de la evolución temporal anual de la circulación forzando el modelo con vientos climatológicos variables tanto espacial como temporalmente. Para cada forzante seleccionado, el modelo parte del reposo y se integra con el viento en superficie hasta alcanzar un estado cuasi-estacionario.

Por otra parte, y de acuerdo a lo analizado en el capítulo anterior, las mareas son extremadamente energéticas e importantes en la respuesta barotrópica de la región. El efecto de la marea sobre la circulación puede dividirse en dos partes: un efecto indirecto a través del incremento de la difusión vertical y la fricción de fondo, y otro directo a través de las corrientes residuales generadas por interacciones no-lineales entre la onda de marea y la geomorfología del lugar (ver sección 4.4). Para aislar el

efecto indirecto de la marea se van a comparar los resultados del modelo forzado con vientos y mareas simultáneamente pero donde se extraen las corrientes residuales de marea. El efecto directo de la marea sobre la circulación general se estudia agregando a la solución mencionada el efecto de las corrientes residuales de marea.

## 5.2. Golfos forzados por vientos del Oeste.

### 5.2.1 Proceso de spin-up

La Figura. 5-1, muestra la evolución temporal de la energía cinética promedio del flujo en un nodo central del dominio. El transitorio generado por la brusca imposición del viento produce un estado oscilatorio amortiguado que necesita aproximadamente 10 días para alcanzar un estado cuasi-estacionario aceptable, que tiende al estacionario en breve tiempo de simulación. Los resultados se analizarán considerando un promedio entre los días 30 y 60 de la simulación, donde el modelo permanece en estado estacionario (Fig. 5-1).

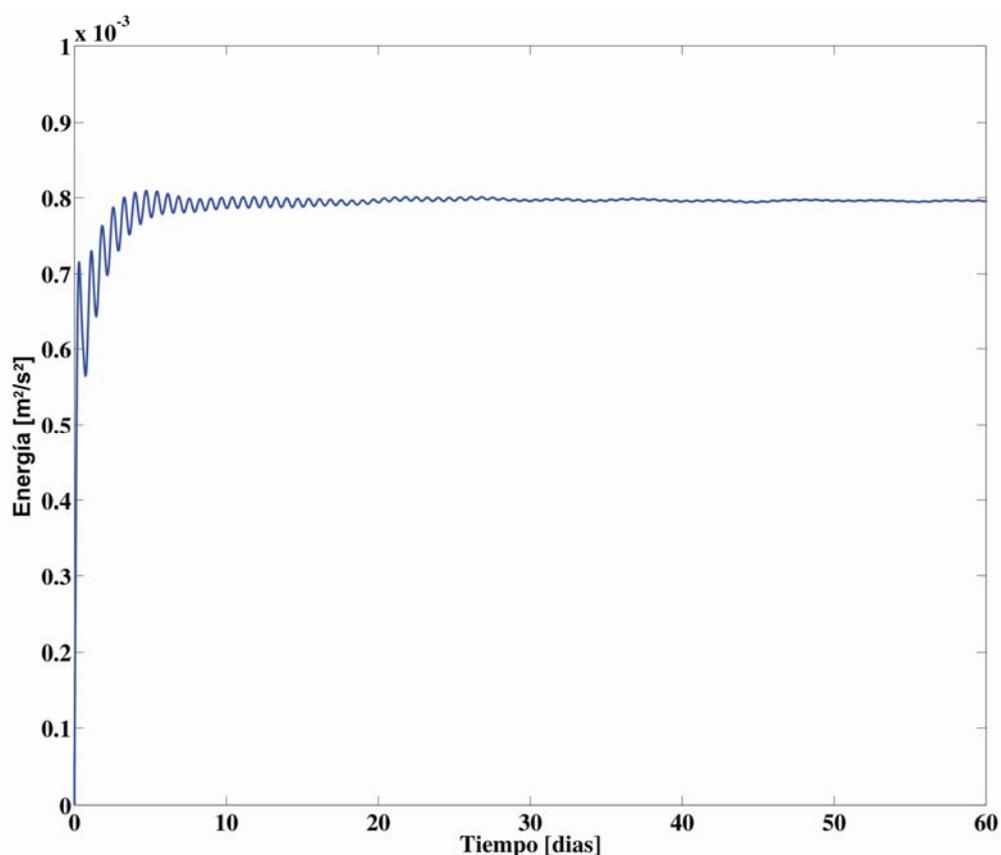


Fig. 5-1. Evolución temporal de la energía cinética en un nodo central del dominio computacional para el EO1.

### 5.2.2. Flujo medio y elevaciones de la superficie

La acción del viento sobre los Golfos afecta localmente una delgada capa límite superficial a través de la difusión (turbulenta) vertical. Para el resto del dominio los efectos de viento se comunican de manera indirecta a través de gradientes de presiones (elevación de la superficie libre) y flujos verticales que se generan por la presencia de la costa, que bloquea el movimiento horizontal del agua (Csanady, 1982).

La estructura horizontal de la respuesta para el EO1, se muestra en la Fig.5-2. Es importante destacar que la circulación en los tres golfos responde a un patrón general, separando cada golfo zonalmente en dos giros, uno anticiclónico (antihorario) en el Oeste y otro ciclónico (horario) en el Este. En el caso del Golfo San Matías (GSM) el giro Este es el que se comunica con la plataforma. En el caso de los Golfos Nuevo (GN) y San José (GSJ) la comunicación con el exterior se halla muy restringida. Posteriormente, con la inclusión de la marea y/o los cambios de dirección de los vientos se podrá ver cómo se va modificando este patrón.

En el GSM, la geometría de la boca presenta una restricción topográfica muy importante. Las isolíneas de elevación de la superficie libre muestran gradientes más intensos en la costa occidental y en la boca del Golfo, y pocas variaciones en el interior (Fig.5-2a). Estos gradientes producen, geostroficamente, flujos medios hacia el Sur en la costa y en la boca los cuales retornan luego por la zona más profunda del golfo (Fig.5-2a). Se genera de esta manera un sistema de doble giro separado zonalmente, uno anticiclónico, más estrecho y débil ( $\sim 0.01$  Sv,  $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ocupando la mitad occidental y otro ciclónico, semi-cerrado y conectado a la plataforma adyacente, más amplio e intenso ( $\sim 0.05$  Sv) ocupando la mitad oriental (Fig. 5-2b). En la zona Sur estos giros muestran intensos subgiros de recirculación, uno al SO (anticiclónico,  $\sim 0.06$  Sv) y otro al SE ( $\sim 0.05$  Sv). El intercambio total de agua entre el GSM y la plataforma adyacente, con agua ingresando por el borde Sur de la boca y saliendo por el borde Norte, es del orden de los 0.06 Sv.

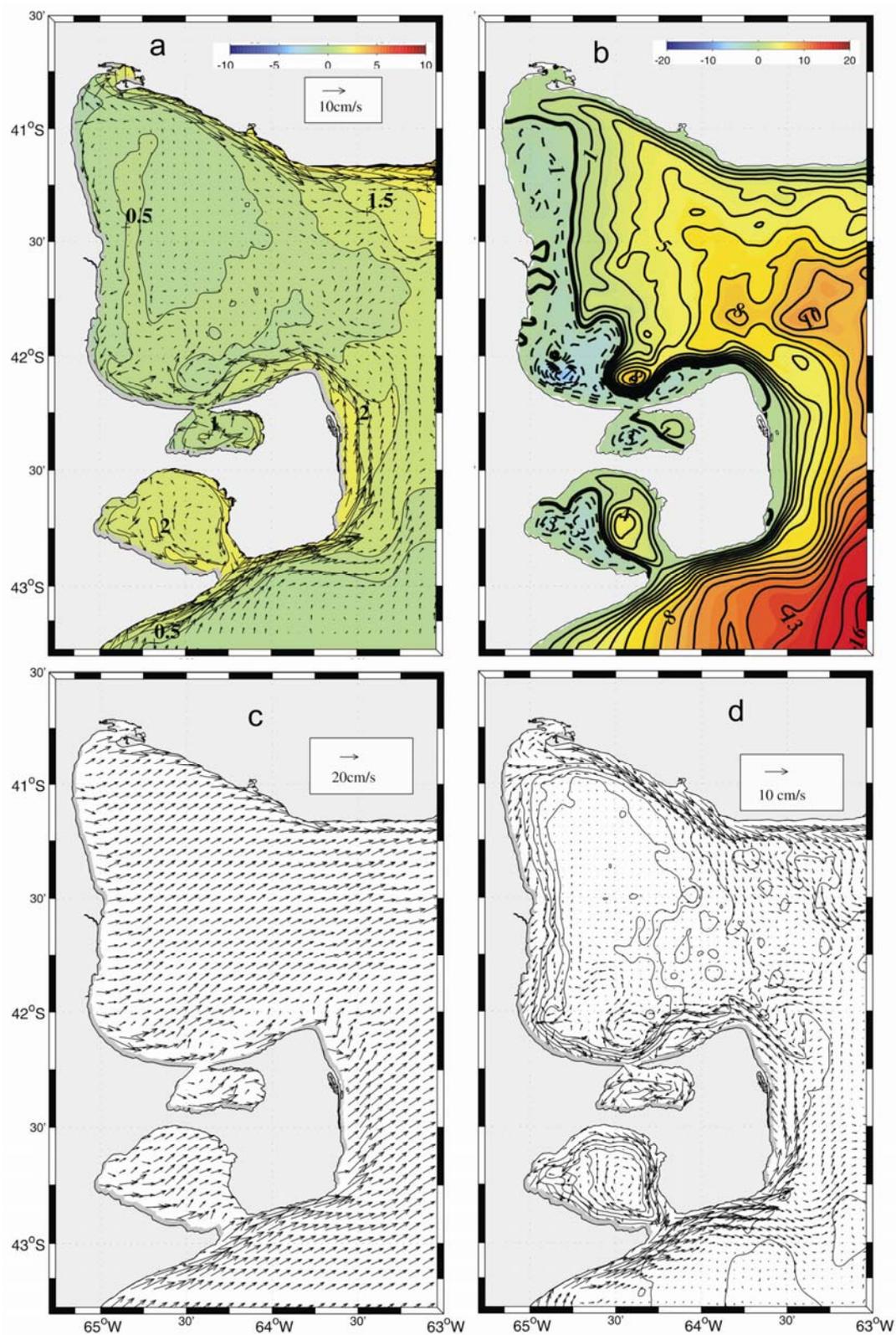


Figura 5-2. Circulación media para el E01. a) Elevación de la superficie libre en cm y vectores velocidad media. b) Función corriente para las velocidades promediadas en vertical. c) Vectores velocidad en superficie. d) Vectores velocidad en el fondo y topografía de fondo (líneas llenas).

Modelos numéricos previos forzados con vientos del Oeste (Akaprahamyan, 1991) muestran una estructura similar para el giro oriental, siendo el giro occidental casi inexistente y los subgiros de la costa Sur mucho más débiles. Esto podría deberse, entre otras causas, a la pobre representación batimétrica de ese modelo. En la región costera, desde el Sur del dominio y rodeando la Península Valdés (PV), y en la costa Norte del GSM, cuya orientación coincide mayormente con la dirección del viento, se producen las corrientes medias más intensas ( $\sim 15$  cm/s) (Fig. 5-2a).

### 5.2.3. Estructura vertical del flujo

Los aspectos tridimensionales de la respuesta forzada por vientos del Oeste se ilustran mediante mapas horizontales de los vectores velocidad en la capa superficial y de fondo (Fig.5-2c y 5-2d). El flujo superficial en los Golfos consiste en campos asociados a la capa de Ekman y al campo de presiones generado por el gradiente de elevaciones. La capa superficial no parece seguir ningún giro, pero debajo de la capa de Ekman el patrón de corrientes se asemeja a las corrientes medias.

En regiones profundas el flujo superficial gira hacia la izquierda respecto a la dirección del viento siguiendo la teoría de Ekman. En regiones donde la topografía es poco profunda (entrada del GSM), y en la costa Oeste de los Golfos, la dinámica está controlada mayormente por el gradiente de presiones (elevación) el flujo de la capa superficial se alinea más con la dirección del viento. Existen excepciones a esta regla que están relacionadas con la geometría de la costa. En el GSM, por ejemplo, las mayores velocidades superficiales se producen en la costa Norte, donde la dirección del viento es efectivamente a lo largo de la costa (Fig. 5-2c).

El flujo de fondo en el GSM presenta una estructura más compleja. Se observa que el agua que es expulsada del golfo en la capa superficial retorna en mayor medida por un flujo de fondo intenso de aguas de la plataforma que ingresa por el Norte de PV (Fig. 5-2d). En la costa Norte del Golfo, contrariamente, una parte del flujo de fondo se dirige hacia la plataforma exterior mientras que otra gira hacia el Sur y se une al flujo ingresante produciendo una surgencia generalizada en la costa Oeste del Golfo. Este giro de recirculación de fondo confirma la hipótesis de que a excepción de las zonas Sur y Norte de la boca, las aguas del Golfo por debajo de la

capa de Ekman se hallan en buena medida aisladas de la Plataforma exterior (Piola y Rivas, 1997).

#### 5.2.4. Circulación en los golfos GN y GSJ

La figura 5-3 muestra la respuesta del GN y GSJ en el experimento EO1. El GN responde con dos giros separados por una línea divisoria NO-SE en simetría con la orientación del golfo y ambos centrados zonalmente. El giro Oeste, alimentado por las corrientes sobre la costa Sur del golfo, es tiene una intensidad de  $3 \cdot 10^{-2}$  Sv y está compuesto a su vez, por dos sub-giros de recirculación internos antihorarios uno centrado la Bahía Nueva (en cuya costa de ubica la ciudad de Puerto Madryn) y otro de menor intensidad hacia el Oeste y generado principalmente por las corrientes sobre la costa Sur del golfo. El giro principal centrado al Este, con circulación de sentido horario y más intenso, transporta  $4.5 \cdot 10^{-2}$  Sv (Fig. 5-3a).

Esta distribución de circulación media es similar a la descrita por Rivas (1989) para el forzante de vientos del Oeste, aunque indica una menor importancia del giro horario y un desplazamiento del centro del mismo hacia el Norte. Por otro lado, la división que muestra el autor es más cercana a una meridional. Barros y Krepper (1977) describieron el giro antihorario en Bahía Nueva generado por vientos empleando un modelo cuasi-geostrófico, pero la circulación en el interior del golfo queda limitada a una circulación débil antihoraria, opuesta a nuestros resultados.

Los vectores de velocidad superficial (Fig. 5-3c) se muestran paralelos al viento en las costas Oeste y Sur, principalmente en Bahía Nueva donde la profundidad es reducida ( $< 40$  m). En las zonas profundas los vectores responden a la teoría de Ekman, rotando hacia la izquierda  $45^\circ$  en una estructura aproximadamente homogénea. Los vectores de velocidad de fondo muestran una mayor relación con las isobatas graficadas (Fig. 5-3e), generando un giro de sentido horario en la zona más profunda y un giro menos definido antihorario en Bahía Nueva, mientras que en la costa (Noreste y Sur) los flujos son hacia la boca. La estructura tridimensional es tal que el flujo va de la costa Sur a la Norte en superficie. Estas masas de agua se hunden en la costa Norte y vuelven a la costa Sur por dos caminos. Parte va hacia la boca y recircula volviendo por la parte profunda que luego gira hacia el Este

alimentando la costa Sur y el resto retorna por la costa Oeste rotando el flujo hacia el Sur.

El GSJ responde con dos giros bien definidos separados zonalmente de estructura similar a la mostrada por el GN, con la diferencia que la costa Sur del GSJ favorece la amplificación de las corrientes por su dirección paralela a la del viento. En la costa Oeste donde el viento se torna off-shore (hacia fuera de la costa), se produce una depresión en la costa generando un flujo hacia el Sur (por gradiente de elevaciones) y favoreciendo el giro antihorario sobre la mitad Oeste del GSJ que transporta  $3 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}$ . El giro sobre la costa Este es horario y menos intenso, transportando  $1.3 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}$  aproximadamente. Los vectores de la capa superficial responden en gran medida a la dirección del viento, ya que el golfo muestra poca profundidad en gran parte de su dominio. Las costas Sur y Norte poseen velocidades paralelas al viento, mientras que en la zona central (alejado de las costas Oeste y Este) los vectores rotan hacia la izquierda según indica la teoría de Ekman (Fig. 5-3d). Hacia las capas de fondo del golfo los vectores rotan generando dos giros de recirculación bien definidos (intensos), independientes de la topografía de fondo, los cuales regulan la circulación media (Fig. 5-3f). El sector Este queda dominado por un giro horario y el Oeste por un giro antihorario de mayores dimensiones.

La circulación forzada por vientos en el GN y GSJ, por su geometría podría asemejarse al comportamiento de grandes lagos, debido a la reducida conexión con el exterior. Csanady (1973) analizó el movimiento barotrópico inducido por vientos en el Lago Ontario, encontrando una circulación media compuesta por dos giros. El autor argumenta esta distribución a los intensos “jets” costeros generados por el esfuerzo directo del viento (y en la misma dirección) y el retorno del flujo por las zonas profundas, y que los efectos friccionantes son importantes sólo en la zona costera (~10 km) aunque no modifican sustancialmente la distribución. De esta manera, para un viento desde el Oeste, el flujo medio debería ser hacia el Este en las costas Sur y Norte y hacia el Oeste en la zona más profunda. Exceptuando la capa de Ekman, este parece ser el patrón general de circulación reproducido por el modelo (Fig. 5-3, paneles superiores e inferiores).

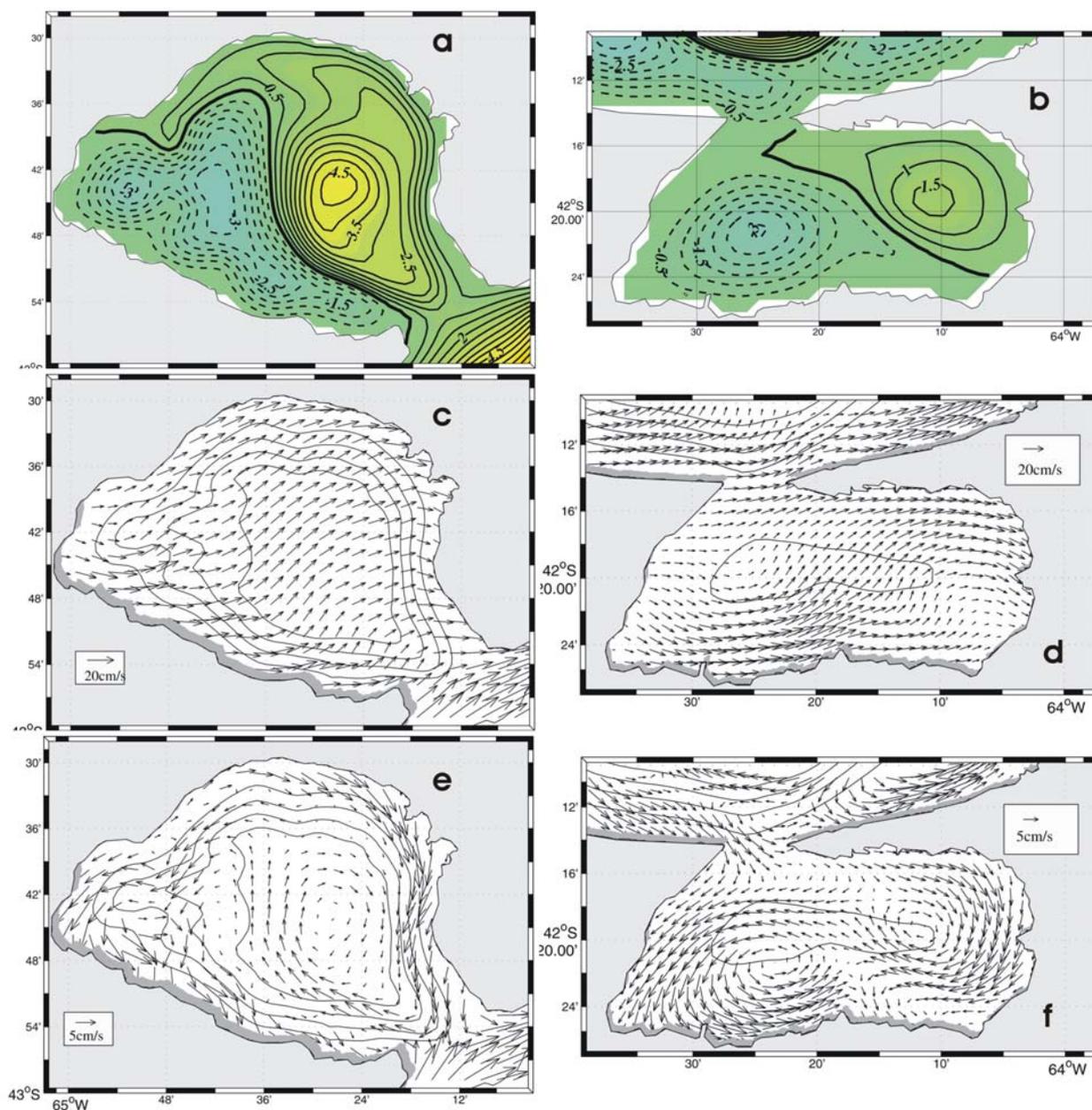


Figura 5-3. Circulación en GN (izquierda) y GSJ (derecha) para el EO1. a) y b) Función corriente para las velocidades promediadas en vertical ( $IC = 0.5 \cdot 10^{-2} Sv$ ). c) y d) Vectores de velocidad superficial. e) y f) Vectores de velocidad en el fondo.

### 5.3. Efecto de la mezcla marea sobre la circulación forzada por vientos del Oeste.

Como las corrientes de marea en la región son muy importantes (Capítulo 4), la inclusión de la marea es imprescindible para obtener el nivel adecuado de turbulencia y fricción de fondo. Para estudiar este efecto se realizó la configuración de una simulación forzada simultáneamente con vientos homogéneos e invariantes en el tiempo en superficie y 6 componentes de marea en los bordes abiertos ( $M_2$ ,

$N_2$ ,  $S_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$  y  $O_1$ ). La diferencia entre esta simulación y el experimento forzado sólo por mareas (Capítulo 4) nos proporciona las corrientes residuales generadas por el viento pero con la inclusión del efecto no-lineal disipativo de la marea (Davies and Lawrence, 1994). De aquí en adelante a este experimento lo denominaremos, EO2.

### 5.3.1. Flujo medio y elevaciones de la superficie

Los resultados del EO2 muestran un patrón diferente de elevaciones (Fig. 5-4a), donde los niveles se ven levemente reducidos ( $\sim 1\text{cm}$ ) y afectados principalmente en la zona de la boca del GSM y Norte y Este de PV. Se observa en general un suavizado de las variables, tanto en la densidad de isolíneas de elevación como el equiespaciado de las líneas de función corriente. Se puede observar una reducción en los vectores medios de velocidad en las costas de PV y costa Norte del GSM, mientras que en el interior de los golfos se ven afectados en menor medida. Se define una circulación más homogénea y reducida en el interior del golfo con altas velocidades en las costas y una reducción muy importante de las corrientes en la boca del GSM y zona de PV. Las intensas corrientes en las costas pueden explicarse, a partir de que el término del esfuerzo de viento en las ecuaciones integradas verticalmente actúa como  $\tau/h$ , siendo  $\tau$  el esfuerzo de viento y  $h$  la profundidad, por lo que en zonas reducidas (con viento homogéneo) el forzante será mayor (Davies y Hall, 2000).

La función corriente muestra una circulación más definida e intensa en el giro occidental antihorario del GSM con reducción del subgiro de la región sudoeste. El giro oriental es afectado en mayor medida, resultando más débil y abierto (Fig. 5-4b) con reducción del intercambio con la plataforma ( $\sim 0.03\text{ Sv}$ ). Este caso representa una situación más realista que el caso de viento solamente (EO1), debido a que el efecto de marea en la realidad es imposible de excluir y para la zona de estudio presenta uno de los forzantes más importantes para la circulación.

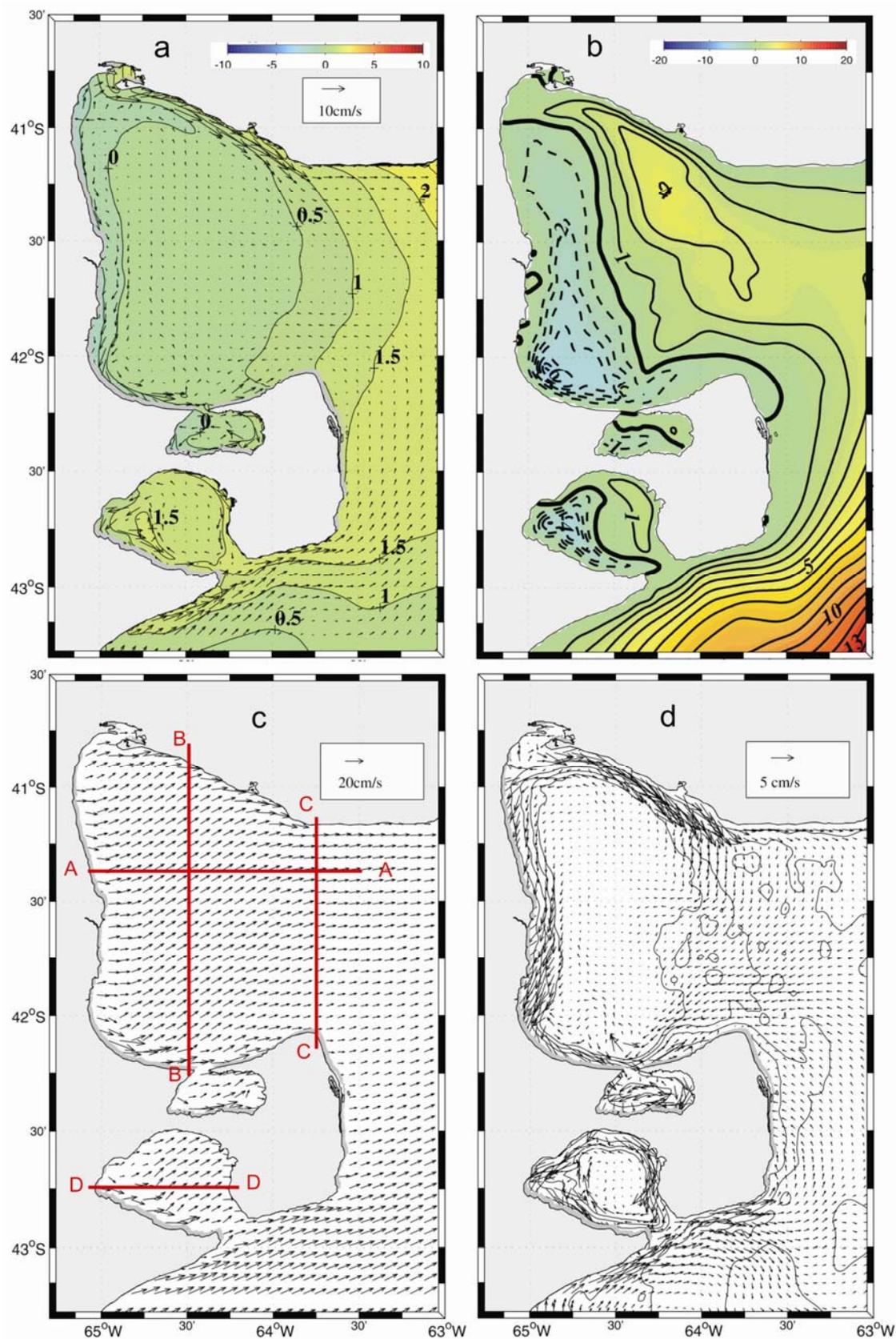


Figura 5-4. Circulación media para el EO2. a) Elevación de la superficie libre y vectores velocidad media. b) Función corriente para las velocidades promediadas en vertical. c) Vectores velocidad en superficie y transectas de análisis A-A, B-B, C-C y D-D. d) Vectores velocidad en el fondo. Notar el cambio de escala a la Fig. 5.3.

Davies y Lawrence (1994) realizaron experimentos de vientos constantes transversales y longitudinales en el Mar de Irlanda. Estos experimentos también incluyen el efecto disipativo de la marea mediante la una fricción de fondo calculada en base a las corrientes residuales de la componente  $M_2$ . Los autores encuentran efectos similares en cuanto a la reducción de las magnitudes y determinan que el suavizado es producido por la mayor capacidad de penetración de la energía del viento en profundidad dependiendo de la turbulencia local generada por marea.

### 5.3.2. Estructura vertical del flujo

Mediante el análisis tridimensional del flujo se puede observar en detalle las modificaciones generadas por la inclusión del efecto disipativo de la marea. Las corrientes en superficie (Fig. 5-4c) no denotan una variación importante, ya que como mencionamos, está gobernado principalmente por la dinámica de Ekman. A pesar de esto, en la zona de la boca del GSM, al Sur se observa una leve disminución de las magnitudes, producto del efecto disipativo de la marea, que alcanza en esa zona la totalidad de la columna de agua. Las corrientes en la capa del fondo (Fig. 5-4d), presentan grandes variaciones ya que es donde la mezcla por marea alcanza su mayor intensidad y por ende su efecto sobre la circulación inducida por viento es mayor. La modificación es principalmente sobre la magnitud y no en las direcciones, a excepción de la costa Sur del GSM, cercano a la boca del GSJ donde se inhibe un giro de recirculación. Las corrientes superficiales muestran una distribución mas uniforme que las de fondo, reflejando la naturaleza del forzante de viento uniforme (Davies y Lawrence, 1994).

### 5.3.3. Circulación en los golfos GN y GSJ

En similitud al GSM, observamos que se produce un efecto de suavizado en la circulación general con características más marcadas en las zonas de baja profundidad como las costas y bocas de los golfos (Fig. 5-5). El GN mantiene la estructura de circulación mostrada en el experimento EO1 con una reducción importante del transporte del giro horario del Noreste de  $4 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  a  $1.7 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$ . Se observa un aumento del transporte en los giros antihorarios en la costa Sur, donde el giro cercano a Puerto Madryn pasa de  $3 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  a  $4 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  y el giro antihorario sobre la zona más profunda sufre un mayor incremento hasta alcanzar  $4.7 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$ .

Se aprecia también un suavizado en la zona de la boca del GN, donde la fricción es importante generando altos niveles de mezcla en zonas de baja profundidad (Fig. 5-5a). Los vectores de velocidad en superficie no muestran una variación significativa con respecto al caso de forzante de viento solamente (Fig. 5-5c). Las corrientes del fondo se ven afectadas por inclusión de la disipación y se reducen en la zona central del golfo y boca, inhibiendo la estructura de giro en la zona mas profunda del golfo e intensas corrientes en la boca (Fig. 5-5e).

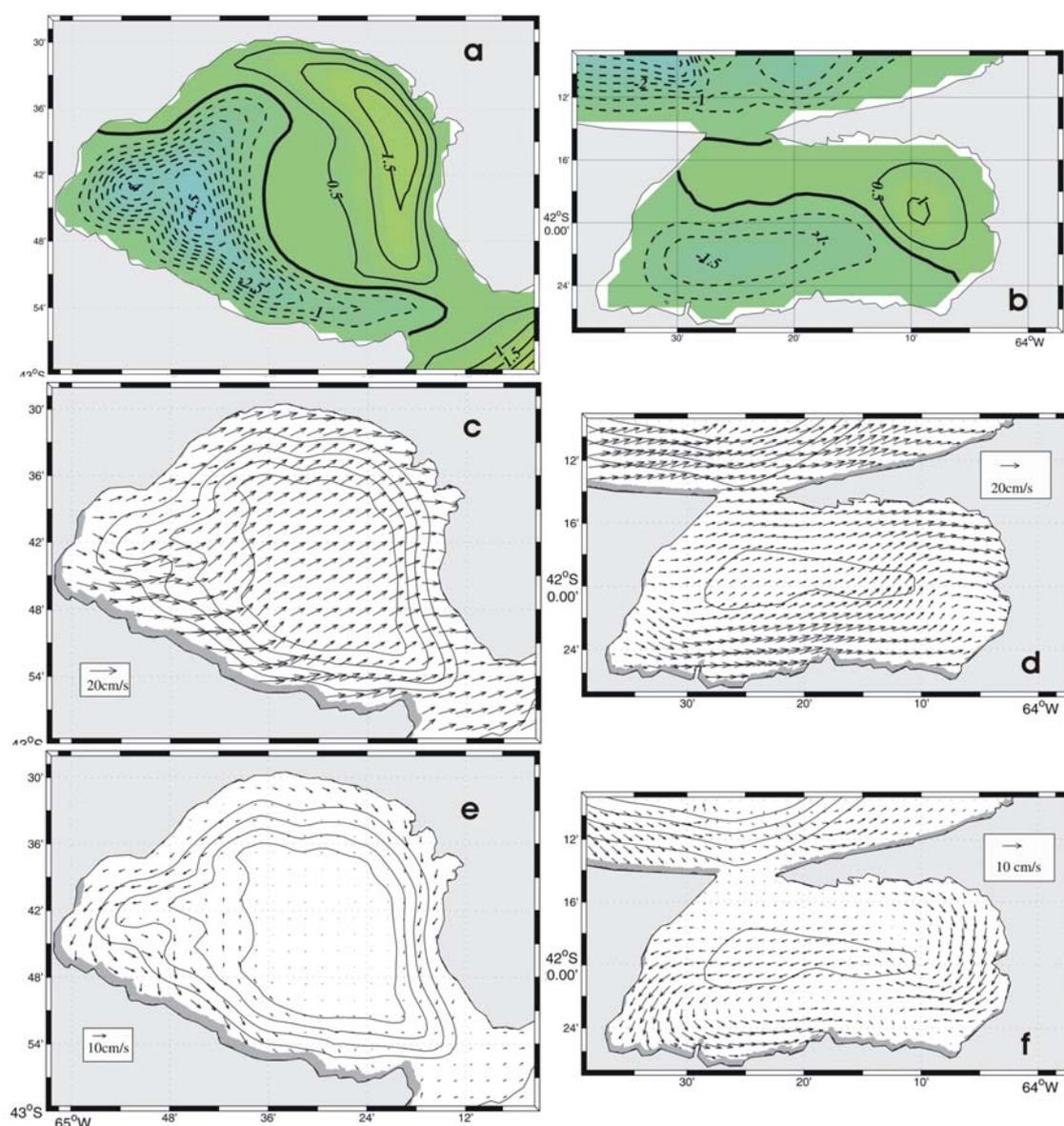


Figura 5-5. Circulación en GN y GSJ para el EO2. a) y b) Función corriente para las velocidades promediadas en vertical. c) y d) Vectores de velocidad superficial. e) y f) Vectores de velocidad en el fondo. Notar el cambio de escala con respecto a la Fig. 5.3.

El GSJ mantiene la estructura de circulación en dos giros separados zonalmente (5-5b). El giro antihorario del Oeste muestra una deformación de compresión en el sentido meridional y elongación en el sentido zonal, dejando desafectada la boca del GSJ. El giro del Este queda delimitado a un área más reducida sobre la costa Este y débilmente ligada a la boca del GSJ. Se observa una reducción del transporte de ambos giros, el antihorario de  $3 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  a  $1.4 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  (al Oeste) y el horario de  $1.3 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  a  $0.9 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  (al Este). Las velocidades en superficie no sufren alteraciones con respecto al caso de viento solamente (Fig. 5-5d). La distribución del flujo en la capa de fondo (Fig. 5-5e) resulta principalmente afectada al igual que en los otros golfos, con principal reducción de la magnitud de los vectores en la zona de la boca y costa Sur, manteniendo la estructura.

#### 5.3.4. Balances de momento para el GSM

El análisis de los términos de las ecuaciones de cantidad de movimiento (x componente transversal, mayormente cross-shore, y componente longitudinal, generalmente alongshore), nos proporciona una herramienta cuantitativa y concreta para comprender los mecanismos físicos que dominan la dinámica de la respuesta barotrópica en la región de los Golfos Norpatagónicos. Las ecuaciones que representan el balance de movimiento pueden escribirse como:

$$x) \frac{\partial U}{\partial t} - fV + ADV_x + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - DIF_x - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] = 0 \quad (5.1)$$

$$y) \frac{\partial V}{\partial t} + fU + ADV_y + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - DIF_y - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] = 0 \quad (5.2)$$

(1)    (2)    (3)    (4)    (5)    (6)

Donde (1) es el término de tendencia temporal (*tend*), (2) es el término de Coriolis (*cor*), (3) *ADV* incluye los términos no-lineales advectivos, (4) es el gradiente barotrópico de presiones (*gradpr*), (5) es el término de mezcla horizontal, y (6) el término de mezcla (difusión) vertical (*visc*). Notemos que en un sistema rotante ( $f \neq 0$ ) y débilmente no-lineal, la componente x del balance en estado estacionario se relaciona con la componente y de la velocidad (V), mientras que la componente y del balance lo hace con la componente x de la velocidad (U).

La contribución relativa de los términos principales del balance en la región varía dentro de cada golfo y con la distancia a la costa. Estas diferencias naturalmente son causadas por los cambios en las dimensiones y orientación de los golfos, las variaciones en la morfología batimétrica y la influencia relativa del forzante atmosférico y de marea.

Para poder analizar los efectos de estas variaciones estudiamos el balance de cantidad de movimiento en dos transectas en el interior del Golfo San Matías (A-A y B-B, Fig. 5-4), las cuales se consideraron de interés por la dinámica involucrada. Se muestran los balances dinámicos de las velocidades promediadas en la vertical, en la zona superficial (menor a 40 metros de profundidad) y zona de fondo (mayor a 40 metros), como muestra la figura 5-6 y 5-7.

El balance de cantidad de movimiento transversal a la costa ( $x$ ) integrado en la vertical en la sección A-A (Fig. 5.6b) muestra que en primer orden se establece un equilibrio entre el término de Coriolis ( $cor_x$ ), la difusión vertical ( $visc_x$ , es decir, básicamente el esfuerzo del viento en superficie) y el gradiente de presiones ( $grd_{prx}$ ). El esfuerzo del viento tiende a mover la masa de agua hacia el Norte (siguiendo la dinámica de Ekman), y el gradiente de presiones generado indirectamente por el viento tiende a moverla hacia el Sur. La importancia relativa de cada uno de ellos divide al GSM en tres zonas bien definidas. En la zona costera (0-15 km) el gradiente de presiones supera a la difusión vertical (el balance es mayormente geostrófico) y la corriente media se dirige hacia el Sur. En la zona central del Golfo, sin embargo, la difusión vertical es mayor al gradiente de presiones (el balance es mayormente de Ekman) y la corriente es hacia el Norte. En la zona cercana a la boca (80-100km) el gradiente de presiones se equilibra con la difusión vertical y la corriente media es muy débil. En la capa superficial (Fig. 5.6c) el balance tiene características similares a las descritas, con un jet costero hacia el Sur más adherido a la costa ( $< 10$  km) y la región central y de la boca dominadas por la dinámica de Ekman. En el fondo el balance es primariamente geostrófico y las corrientes siguen a las variaciones del gradiente de elevación hacia el Sur en la región costera y la boca y hacia el Norte en la zona central.

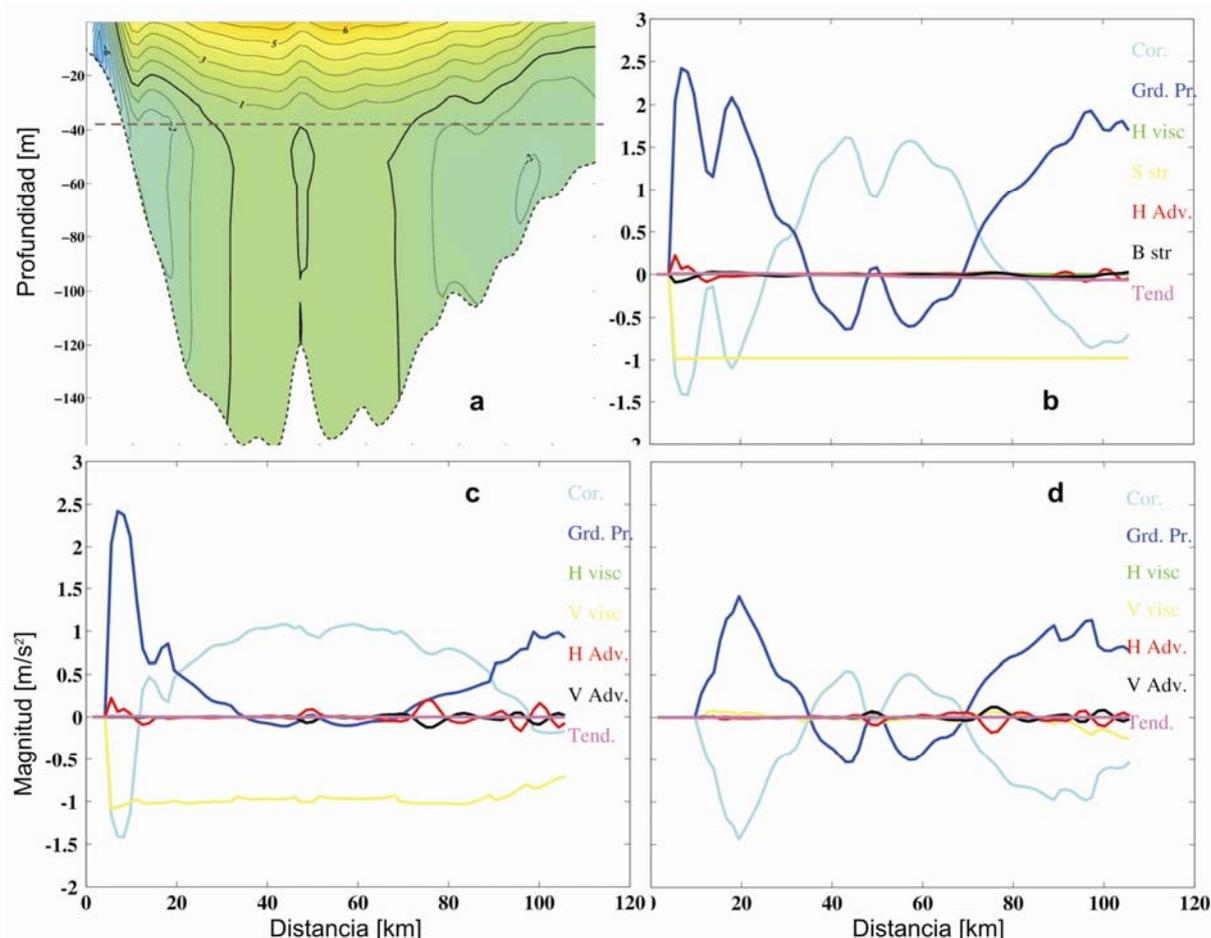


Figura 5-6. Balances de momento en dirección “x” y velocidades promediadas en la vertical para la transecta A-A. a) Velocidades medias transversales a la transecta. b) Balances de momento promediado en la vertical. c) Balance de momento de la capa superficial y d) Balance de momento de la capa de fondo.

La transecta meridional B-B muestra una estructura espacial de velocidades bien acentuadas, con altas velocidades en la costa (mayores a 10 cm/s al Norte y de 7 cm/s al Sur, ambas con dirección Este) y una reducción importante en el interior y zonas profundas del golfo (Fig. 5-7a). El balance de momento en dirección “y” promediado en vertical (Fig. 5-7b) es principalmente geostrófico, entre el gradiente de presión (grdpry) y la aceleración de Coriolis (cory) y según la importancia relativa de estos términos muestra dos zonas bien definidas: las zonas Sur y Norte, de un ancho aproximado a 20 km donde el balance alcanza sus máximas magnitudes. y una zona central ( $> 20$  km y  $< 130$  km) los términos del balance geostrófico se reducen notablemente (90 %) invirtiéndose el signo. En la zona costera, la advección horizontal (advy) adquiere cierta importancia y el flujo resultante es hacia el Este (saliendo del golfo). Los balances superficiales y de fondo (Fig. 5-7c y d)

muestran características similares al balance promedio. Las principales diferencias se aprecian en la zona Norte, donde el jet costero hacia el Este desaparece para profundidades mayores a 40 metros.

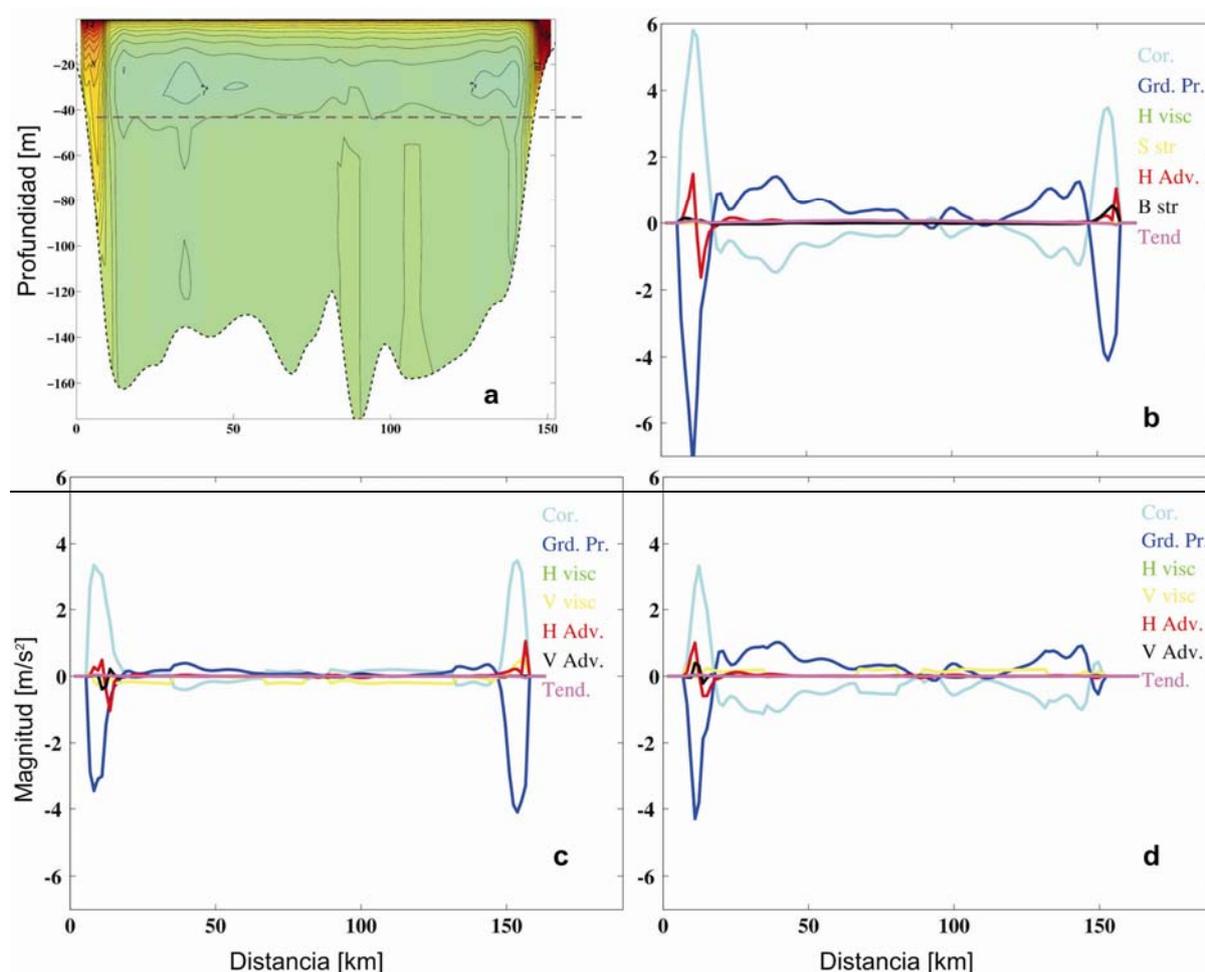


Figura 5-7. Balances de momento en dirección “y” y velocidades promediadas en la vertical para la transecta B-B. a) Velocidades medias transversales a la transecta. b) Balances de momento promediado en vertical. c) Balance de momento de la capa superficial y d) Balance de momento de la capa de fondo.

### 5.3.5. Sensibilidad a la magnitud del viento.

Completando el análisis del modelo forzado por vientos medios se analizaron dos experimentos adicionales de sensibilidad para analizar la respuesta ante variaciones en la magnitud del esfuerzo del viento. Un experimento EO2a el cual fuerza el modelo en superficie con una magnitud de 0.05 Pa (la mitad de la utilizada en EO2), y otro experimento EO2b que utiliza una magnitud homogénea de 0.2 Pa (duplicando a EO2) en todo el dominio.

La circulación muestra patrones generales de circulación similares al experimento EO2, modificando directamente la intensidad de los giros formados en el interior de los golfos y el transporte en aguas externas, a excepción del GN el cual modifica su estructura de circulación. En el caso del EO2a (Fig. 5-8a) el transporte del giro antihorario en la costa Oeste del GSM, muestra una dimensión mayor ocupando gran parte del golfo y manteniendo su centro en el Suroeste. El giro horario principal disminuye aproximadamente a la mitad de la intensidad. El GN muestra un dominio completo del golfo con un giro antihorario, debido a que la intensidad del viento no alcanza a definir el giro horario en el NO.

El experimento que duplica la intensidad (EO2b) incrementa la intensidad de la circulación y el transporte de manera regular en todo el dominio, a excepción de los giros antihorarios en las costas Oeste, que parecerían tener un impacto más directo de la componente del viento (Fig. 5-8b). Los transportes de intercambio en la boca del GSM y la intensidad de los giros del GN se incrementan notablemente junto con el aumento de la intensidad del viento (Fig. 5-8 paneles centrales). En estas curvas

la pendiente indica la dirección del flujo medio ( $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$ ), es decir pendientes

positivas flujo entrante, pendientes negativas flujo saliente. De esta manera, el máximo de las curvas representa el máximo transporte intercambiado a través de la sección. Cuando los vientos son de 0.5 Pa el transporte de intercambio en la boca es cercano a 0.01 Sv, mientras que si el esfuerzo de viento es 0.2 Pa el transporte aumenta hasta 0.06 Pa, comparado con 0.03 Sv que transporta el EO2 (Fig. 5-8c). Esto en parte es debido a que el transporte en aguas de la Plataforma aumenta junto con la intensidad del viento y esto favorece un mayor intercambio.

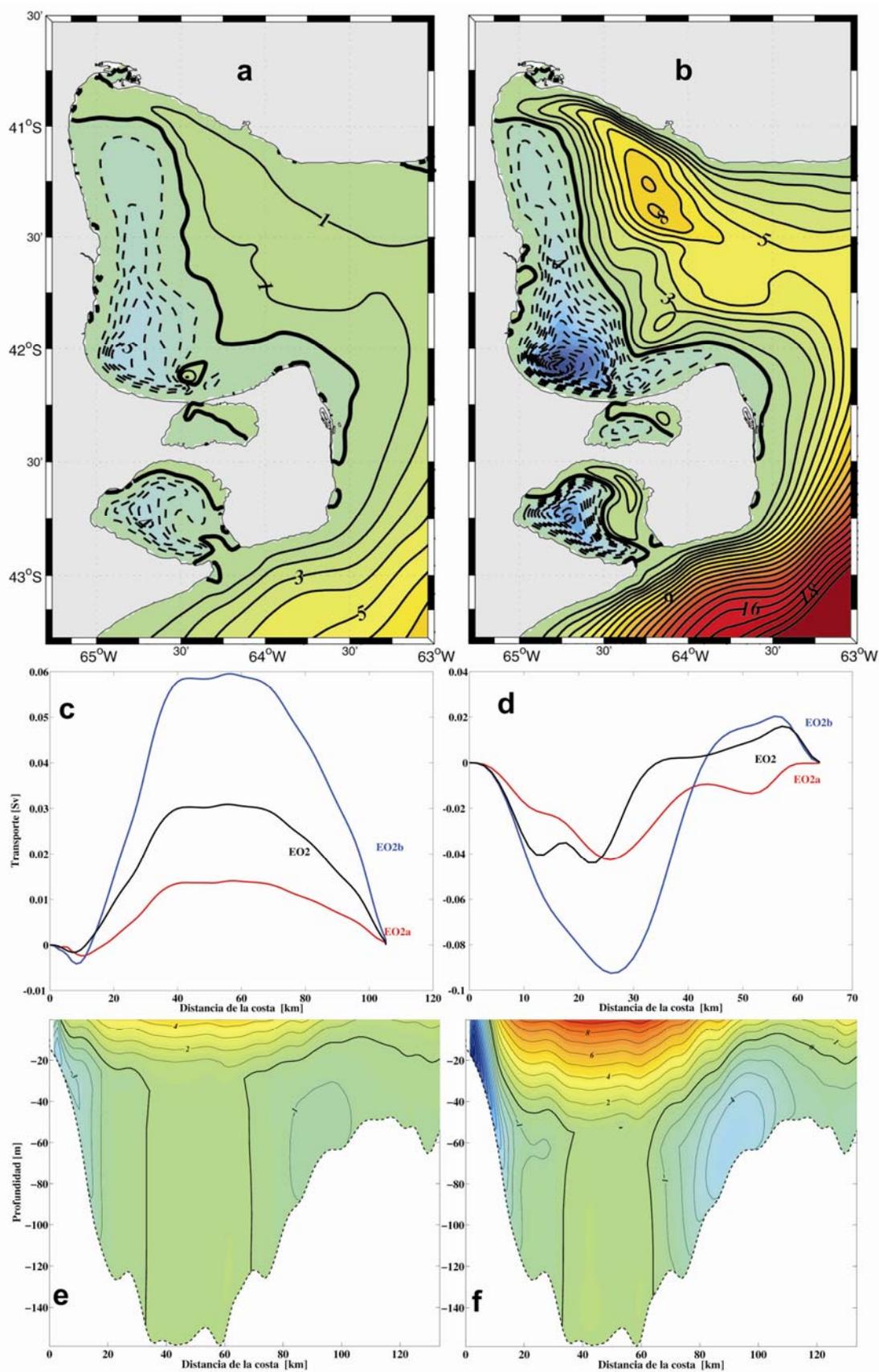


Figura 5-8. Estudio de sensibilidad a la magnitud del viento. Función corriente para las velocidades promediadas en vertical (paneles superiores),  $IC=1$ , y transportes en la boca del GSM e interior del GN (paneles medios) y velocidades meridionales en la transecta A-A (paneles inferiores). a), c) y e) EO2a y b), d) y f) EO2b.

En el interior del GN el giro antihorario sobre la costa Oeste transporta 0.04 Sv para el EO2a y 0.1 Sv para el viento duplicado (Fig. 5-8d). El caso EO2a para el GN, no muestra variación en la intensidad máxima del transporte en el giro antihorario con respecto al EO2, solo que este muestra dos subgiros y el EO2a pareciera unificar el giro (Fig. 5-8d).

La distribución vertical de las corrientes en el GSM, muestra ser muy sensible a la variación de la intensidad del viento, afectando tres procesos básicos de la circulación inducida por vientos. El impacto mas notorio es sobre la profundidad de capa de Ekman, donde el esfuerzo de viento tiene predominio y transmite el esfuerzo a través de las capas superficiales. Esta profundidad, como es de esperarse aumenta al intensificar los vientos, con profundidad cercana a los 40 metros (Fig. 5-8f) y disminuye (~ 20 m.) al reducir los vientos (Fig. 5-8e). Otro comportamiento observado es la intensificación del jet costero sobre la costa Oeste del golfo (Fig. 5-4f), producto de la intensificación del giro antihorario. Por último la intensificación de los flujos de retorno subsuperficiales en la zona cercana a la boca, los cuales ocupan un área subsuperficial mayor de retorno. En resumen, los experimentos numéricos muestran que la intensidad del viento impacta directamente sobre la intensidad de la circulación generada, tanto en la distribución bidimensional como tridimensional.

#### **5.4. Efectos del cambio en la dirección del viento.**

En esta sección se estudia la respuesta de los Golfos para forzante en direcciones complementarias de viento. Por un lado esto nos permitirá analizar con más herramientas el caso de vientos estacionales, ya que estos presentan componentes en todas las direcciones. Por otro lado, estos experimentos idealizados pueden ser útiles para la interpretación de mediciones que normalmente se realizan durante períodos cortos de tiempo y se hallan influenciados por eventos particulares de vientos. Los experimentos complementarios analizados son el caso de vientos desde el Este (EE2, hacia la costa), vientos del Sur (ES2, simula tormentas) y viento del Norte (EN2, genera zonas de surgimiento en la costa). En todos los casos se tiene en cuenta el efecto disipativo pero no las corrientes residuales de la marea. Los casos con la inclusión de las corrientes residuales de marea se analizarán en la sección siguiente.

### 5.4.1. Flujo medio y elevaciones de superficie

Los resultados muestran una estructura similar y opuesta de comportamiento para vientos zonales (Oeste y Este) y para los meridionales (Norte y Sur) tanto en elevaciones como en la función corriente. Debido a que el experimento es barotrópico (densidad constante en la vertical) y su único forzante es el viento, al invertirle el sentido su respuesta se podría estimar casi lineal. Sin embargo, la respuesta presenta leves no-linealidades atribuibles a las costas que presentan surgencia (upwelling) o subsidencia (downwelling) con respecto a la dirección del viento. En el análisis siguiente nos centraremos principalmente en esas diferencias.

#### *Experimento EE2 (viento zonal del Este)*

Para este caso las costas alongshore favorables para la surgencia son las costas Norte de los golfos las cuales muestran un leve aumento de las elevaciones y jet costeros producidos, con respecto al generado en las mismas costas por vientos del Oeste. Estas variaciones también dependen de las características topográficas del fondo, ya que los flujos en las capas inferiores modifican su convergencia o divergencia siguiendo estas variaciones (Davies y Lawrence, 1994). Las mayores elevaciones se producen en la costa Oeste del GSM y borde Sur del dominio, mientras que las máximas depresiones se producen en la zona Norte del dominio (Fig. 5-9b).

La circulación media muestra a los golfos divididos zonalmente por dos giros de recirculación. Un giro antihorario más intenso en la región nororiental y un giro horario más débil en la región suroccidental. Concordante con el aumento de intensidad de la corriente media en las costas del Norte de los Golfos se observa un incremento de intensidad de los giros antihorarios comparado con los respectivos giros horarios producidos por los vientos del Oeste (Fig. 5-10b).

#### *Experimentos EN2 y ES2 (vientos meridionales)*

Esta situación (EN2) favorece la producción de surgencia en la costa Oeste del GSM y PV. En el GSM las elevaciones máximas y los gradientes de elevación más intensos se dan en la costa Sur (Fig. 5-9c). La circulación media del GSM responde

con dos giros separados meridionalmente. Uno intenso y definido en el Norte centrado sobre la costa Oeste que transporta 0.1 Sv. y otro al Sur centrado sobre el Este del golfo de menor intensidad y menos definido que transporta 0.05 Sv. Los flujos medios para la dirección de viento offshore, muestran corrientes más intensas sobre las costas y retornos del flujo más débiles por las zonas más profundas (Davies y Hall, 2000). El GN muestra una respuesta similar a la del GSM, aunque la orientación de sus costas muestra una división de los giros más zonal, siendo el giro occidental muy intenso y el oriental horario y muy débil (Fig. 5-10c).

Los vientos desde el Sur caracterizan el pasaje de centros de baja presión (tormentas). Las corrientes medias más intensas se observan en la costa Oeste y Norte del GSM. Esta dirección de viento favorece la surgencia en las costas Este, las cuales son muy reducidas o inexistentes en la región de estudio. Aumenta la diferencia de flujos costeros entre vientos que favorecen el downwelling (Sur) (Fig. 5-9d) y el upwelling (Norte) (Fig. 5-9c), posiblemente por la longitud y orientación de la costa Oeste del GSM. Por ejemplo el jet costero Oeste del GSM es más intenso para el caso de vientos del Norte (Fig. 5-9c).

El flujo medio en el GSM presenta, dos giros separados meridionalmente, pero el sentido de giro está invertido a la situación forzada con vientos del Norte. El giro occidental es ahora horario y de intensidad (0.08 Sv) y el oriental antihorario y de intensidad (0.06 Sv), denotando la reducción del transporte en los giros horarios con respecto a los antihorarios generados por vientos del Norte (Fig. 5-10d). La reducción de los giros horarios también puede observarse en el GN donde el transporte pasa de 0.03 Sv a 0.01 Sv.

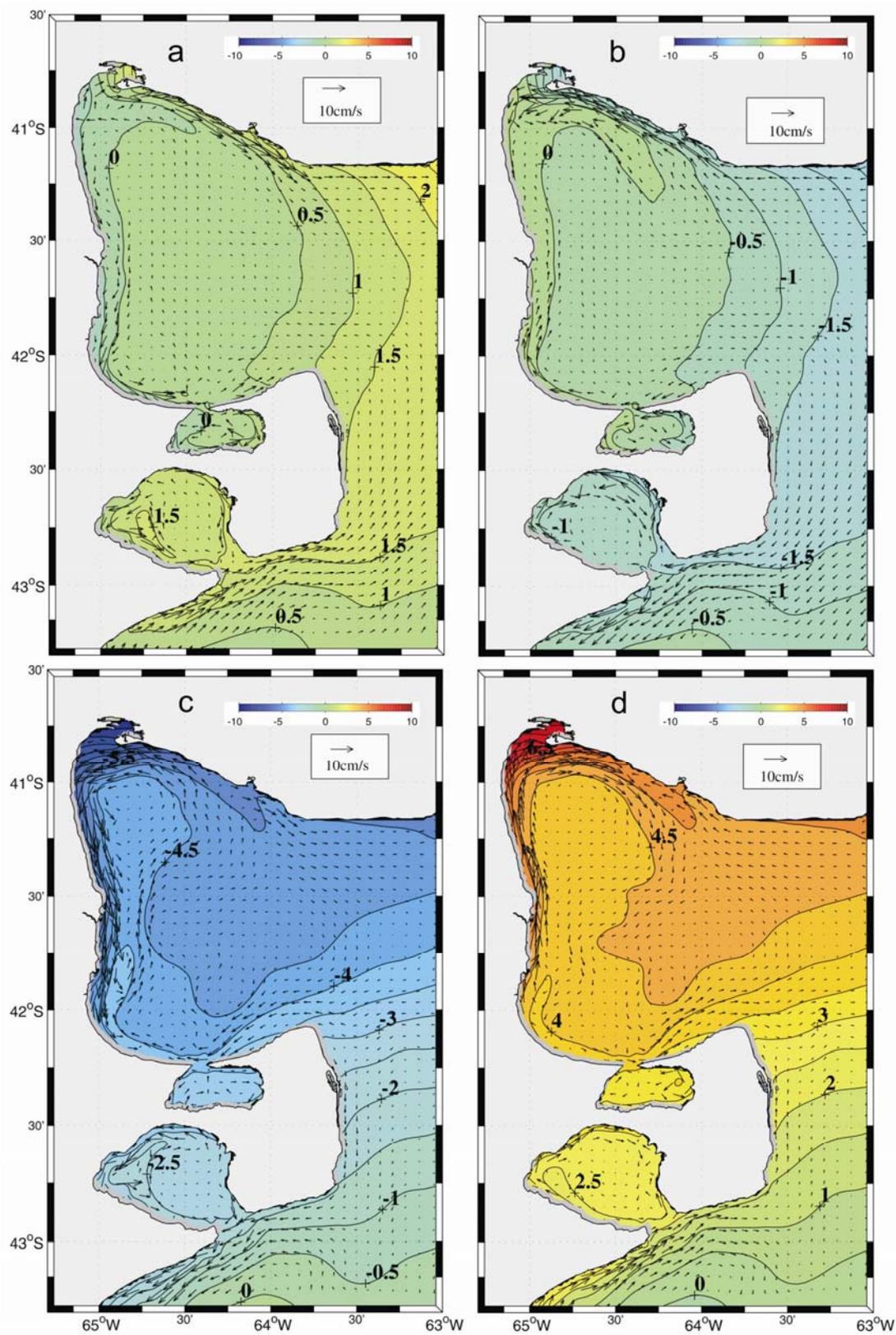


Figura 5-9. Flujo medio y elevaciones de la superficie. a) EO2, b) EE2, c) EN2 y d) ES2.

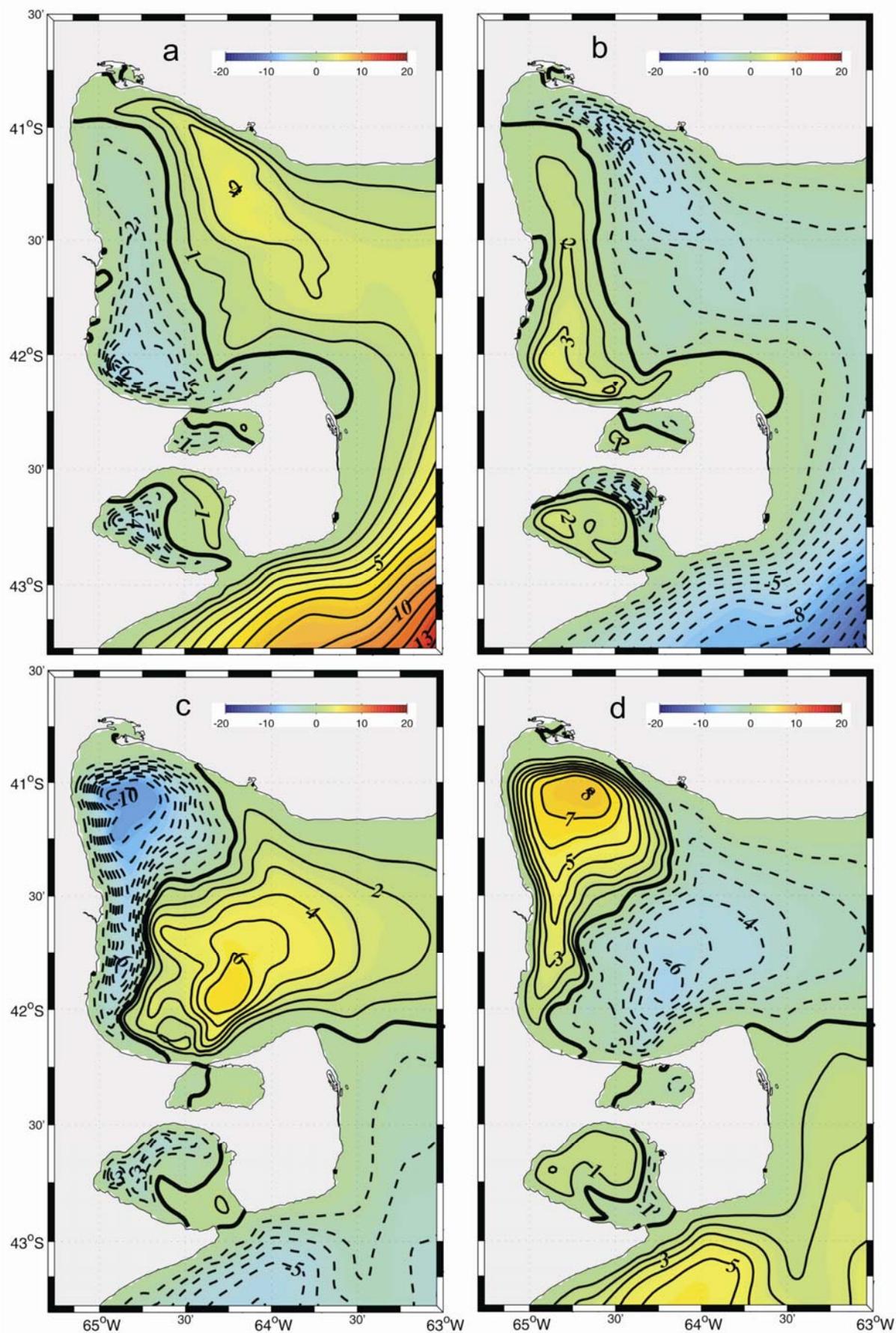


Figura 5-10. Circulación mediante la función corriente. a) EO2, b) EE2, c) EN2 y d) ES2.

#### 5.4.2. Estructura vertical del flujo

##### *Experimento EE2*

El flujo superficial (Fig. 5-11b) consiste en campos asociados a la capa de Ekman y al campo de presiones generado por el gradiente de elevaciones y con una mecánica similar al experimento con vientos del Oeste. Las corrientes de fondo (Fig. 5-12b) muestran (opuestas a EO2) una componente de dirección hacia la plataforma en la costa Oeste de los golfos con las máximas magnitudes (4 cm/s) en el sector Sur y costa Norte del GSM y GN. Estas componentes junto con el flujo superficial hacia la costa, favorecen el hundimiento sobre la costa Norte del GSM y GN (Fig. 5-13b).

El mecanismo es similar al upwelling generado en las mismas costas para el caso EO2. Este mecanismo también es aplicable a la costa Oeste, donde la inclinación de la línea de costa permite que los vientos Este tengan una componente perpendicular hacia fuera de la costa (off-shore) generando zonas de surgimiento (Fig. 5-22b). Observamos que las máximas magnitudes de corrientes son mayores en los casos que las costas favorecen el upwelling, con respecto al downwelling generado por vientos opuestos.

##### *Experimentos EN2 y ES2*

Para vientos del Norte, en el GSM, el flujo superficial egresa por toda la boca (Fig. 5-11c) mientras que el flujo en el fondo ingresa mayormente en la costa Sur, alimentando un flujo de recirculación antihorario en todo el GSM y GN (Fig. 5-12c). Con la excepción de la zona más profunda del Golfo, el flujo superficial es modificado por la topografía submarina y conserva cerca de la costa y en la boca del golfo una dirección paralela al viento (Fig. 5-11c). Las corrientes en el fondo son máximas en la costa Oeste y Norte del GSM. Estas condiciones de corrientes en el fondo y superficie dan lugar a velocidades verticales en zonas costeras que verifican la continuidad del flujo. La costa occidental y Norte del GSM y GN presentan zonas de surgencia mientras que las regiones de hundimiento se concentran en la costa Sur, cercanas a la boca del GSJ y costa Suroeste del GSM (Fig. 5-13c). Al Sur de la boca del Golfo Nuevo y PV se visualizan zonas de surgencia.

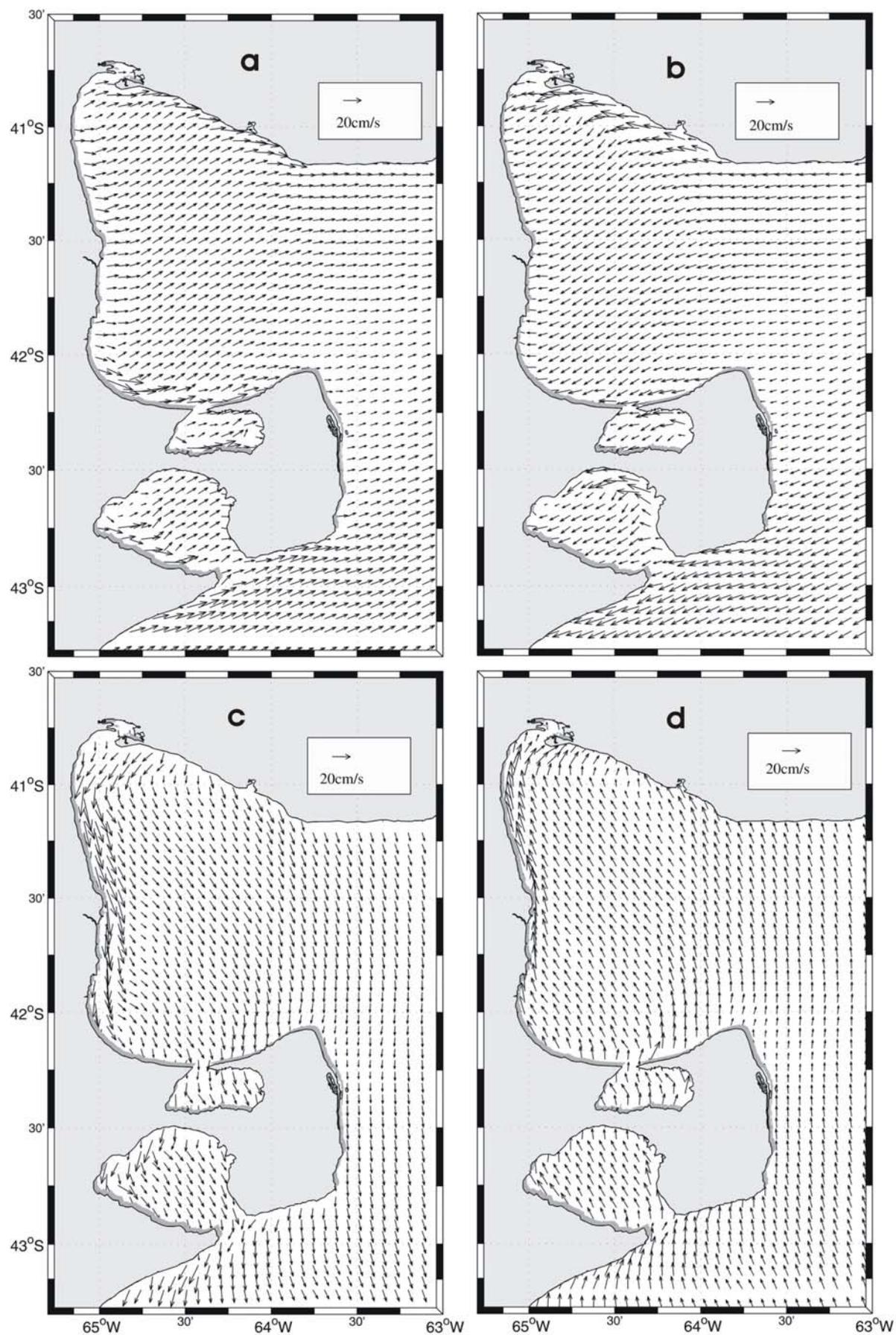


Figura 5-11. Vectores velocidad en la capa superficial. a) EO2, b) EE2, c) EN2 y d) ES2.

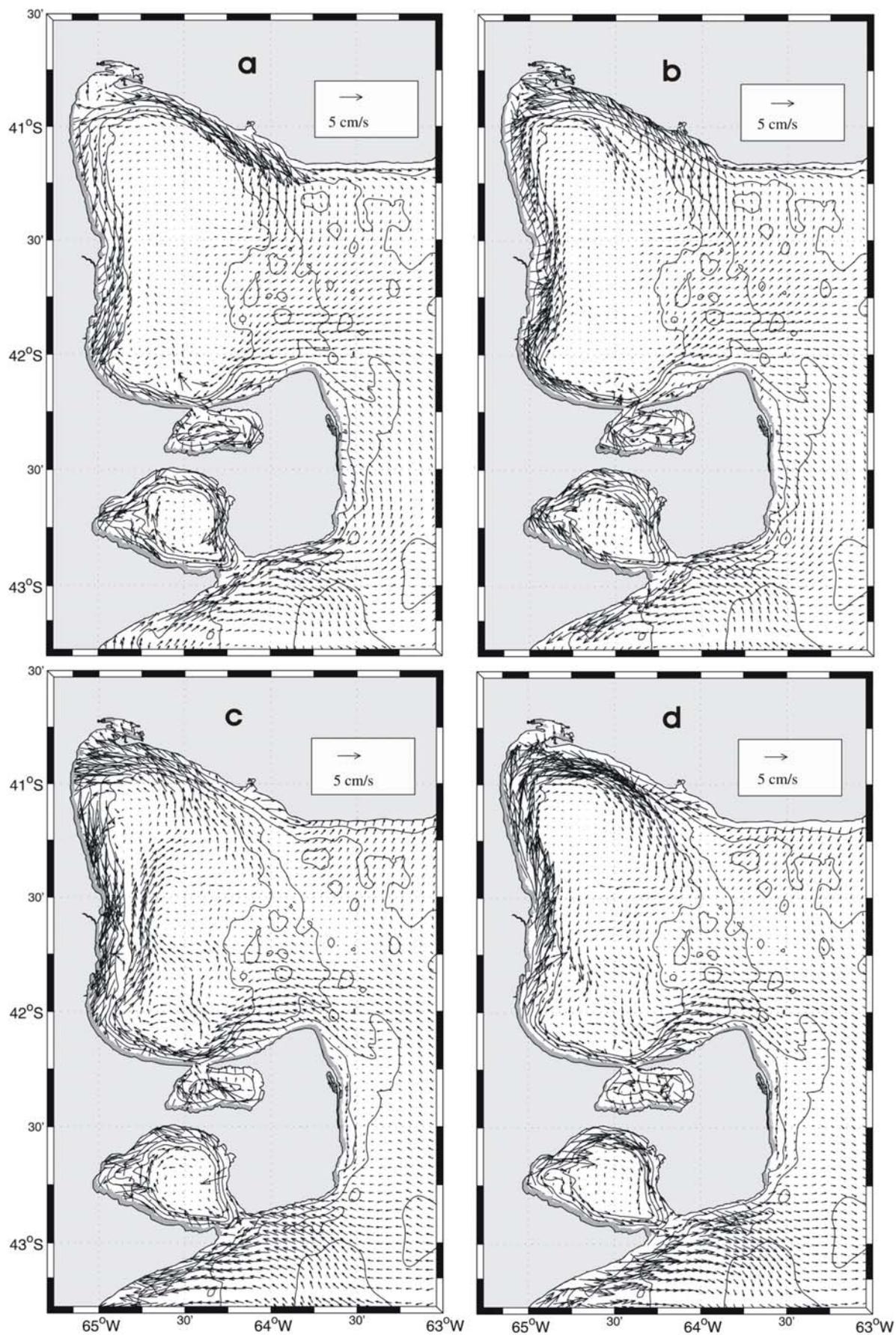


Figura 5-12. Vectores de velocidad en la capa de fondo. a) EO2, b) EE2, c) EN2 y d) ES2.

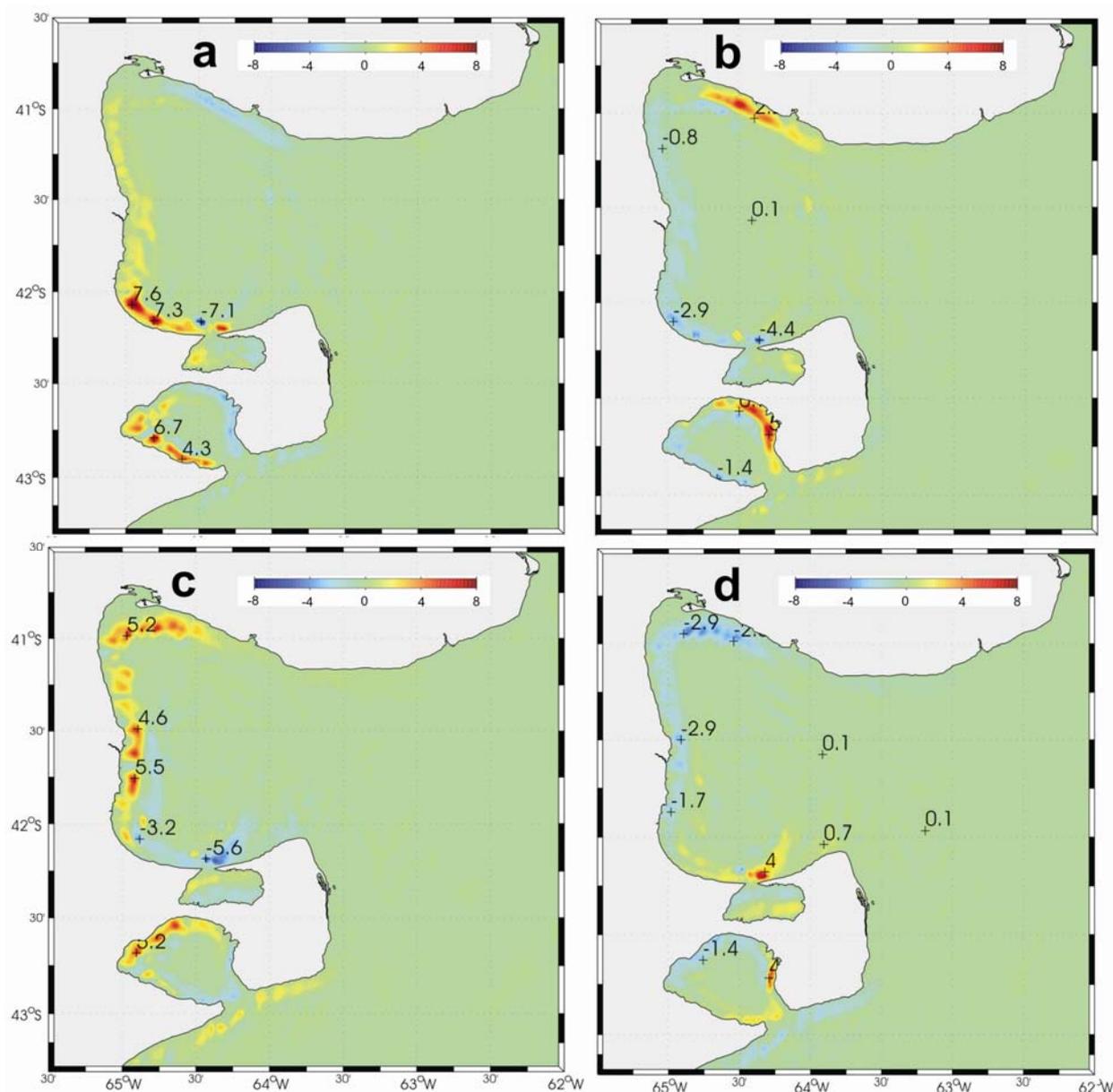


Figura 5-13. Mapa de vectores velocidad vertical en la capa de fondo. a) EO2, b) EE2, c) EN2 y d) ES2.

Cuando actúan vientos del Sur, en el GSM el flujo superficial se invierte (Fig. 5-11d) mientras que el flujo de retorno egresa por el fondo mayormente en la costa Sur (Fig. 5-12d). El flujo de fondo recircula en gran medida ciclónicamente en el interior del golfo (Fig. 5-12d). A diferencia de la respuesta mostrada por vientos del Norte, el giro ciclónico (horario) del flujo de fondo es mas acentuado en las costas, no aparece un subgiro de recirculación sobre la costa Oeste del GSM y las magnitudes de las corrientes en el fondo disminuyen en las zonas de hundimientos (Fig. 5-13d). La costa occidental y Norte del GSM y GN presenta hundimiento mientras que las regiones de surgencia se concentran en la boca y costa Sur del GSM, y Este del GN

(Fig. 5-13d). Los vientos del Sur generan un hundimiento de menor intensidad con respecto al surgimiento producido en la misma costa por vientos del Norte.

## **5.5. Golfos forzados por la acción simultánea del viento y la marea.**

### **5.5.1. Forzante de viento zonal del Oeste y marea**

Los experimentos forzados con marea y viento en cualquiera de los cuadrantes muestran un dominio completo de las elevaciones residuales de la superficie libre inducido por el forzante de marea. Por lo tanto, solo mostraremos aquí detalladamente el caso de vientos desde el Oeste y marea (EO3). Posteriormente se discutirán las diferencias de las cuatro direcciones a través de la función corriente media.

#### **5.5.1.1. Flujo medio y elevaciones de la superficie**

Las máximas elevaciones se presentan en la parte Este del dominio principalmente en el Norte y la costa Este del GSJ y GN, los valores alcanzan los 2 cm (Figura 5-14a). En la zona Norte de Península Valdés se presentan depresiones puntuales y abruptas que alcanzan los 15 cm. En la boca del GSM, se aprecia una zona de transición de elevación cercana a cero, en donde la mezcla por mareas es importante. Esta zona está delimitada por la zona de máxima disipación encontrada en el modelo forzado por mareas (Capítulo 4, Fig. 4-3b).

La circulación media en el interior del GSM es horaria, de intensidad débil y transporte cercano a los 0.08 Sv (Fig. 5-14b). Uno de los cambios que se producen con el agregado de la marea es la reducción del giro antihorario de la costa Oeste del GSM el cual permanece con menor intensidad en la zona Sur del golfo transportando 0.02 Sv. y desaparece en la costa noroeste del golfo. La circulación media cuando el GSM es forzado por vientos y mareas indica que el forzante de marea impone una circulación horaria que enmascara o inhibe la circulación impuesta por el viento, aún cuando la magnitud del viento sea importante ( $\sim 0.1$  Pa). Se visualizan claramente las estructuras de menor escala típicas de la circulación residual forzada por marea (Capítulo 4), los giros antihorarios al Norte de PV y los

cuadrupolos a la entrada del GSJ y GN producto de la rectificación de la onda de marea por variación en la línea de costa y la topografía de fondo.

El GN responde con un cambio importante en la distribución de la circulación con respecto a la circulación forzada por vientos. Se observa una estructura predominante de circulación horaria, mediante un giro principal centrado en la totalidad del golfo (dominado por las corrientes residuales de marea), y dos pequeños giros antihorarios de recirculación, uno en la Bahía Nueva y otro en el SE, cercano a la boca, más intenso y definido. El giro horario, transporta  $6.1 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  (Fig. 5-14b). El giro antihorario al SO, está principalmente regulado por la acción del viento en superficie y transporta  $2.6 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  sufriendo una disminución del transporte y una reducción importante de estructura espacial al adicionar el forzante de marea. Hacia el Sur, sobre la boca, el otro giro antihorario transporta  $5 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  y forma parte de la estructura de dipolo generada en la zona interna de intercambio. Este dipolo se forma con dos giros de recirculación, el antihorario ubicado sobre la costa Sur y otro horario conectado con la circulación principal del GN. En general el GN muestra un comportamiento principalmente regulado por la marea imponiendo una circulación horaria y permitiendo una contribución mayor del viento sólo en las zonas poco profundas.

El GSJ muestra una marcada influencia de las corrientes residuales de marea en la zona interna de la boca, generando un dipolo de giros de circulación que dominan prácticamente toda la dinámica en el golfo. El giro Oeste (horario) se halla definido en una zona reducida y está conectado con la circulación de aguas provenientes del GSM transportando  $0.9 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$ . El giro antihorario es más intenso y conectado con la circulación dentro del GSJ transportando  $3 \cdot 10^{-2} \text{Sv}$  (Fig. 5-14b). La costa Este del golfo, la cual presenta zonas poco profundas, muestra variaciones débiles influenciadas por los vientos del Oeste.

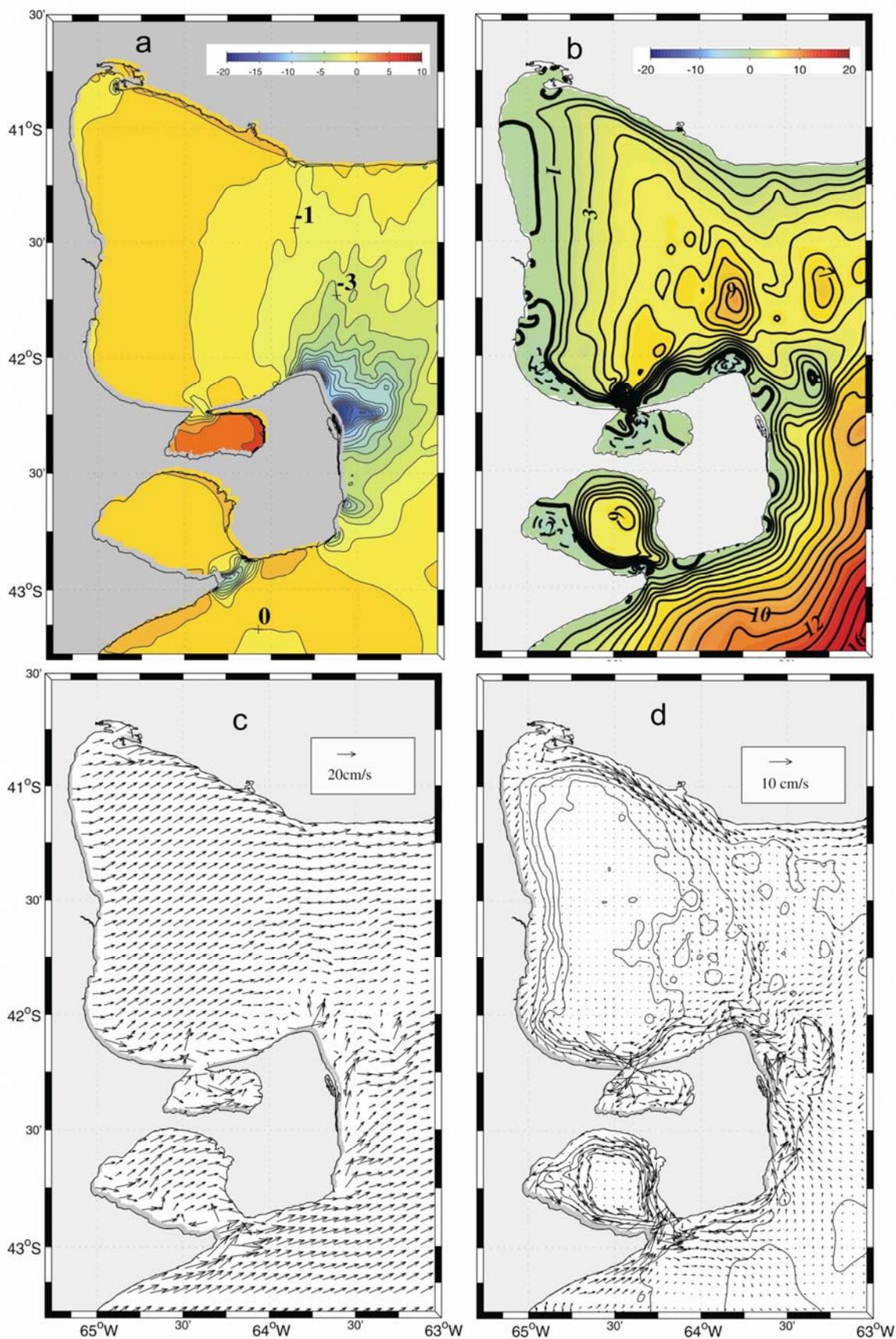


Figura 5-14. Circulación media para el EO3. a) Elevación de la superficie libre y vectores velocidad media. b) Función corriente para las velocidades promediadas en vertical. c) Vectores velocidad en superficie. d) Vectores velocidad en el fondo.

### 5.5.1.2. Estructura vertical del flujo

En el interior del GSM y GN y en aguas externas al golfo, las velocidades superficiales siguen la dirección del viento, con una pequeña inclinación hacia el NE como indica la teoría de Ekman (Fig. 5-14c). En la zona de transición delimitada entre la boca del GSM y el frente de PV, en la boca del GN y GSJ, las velocidades se reducen en módulo y la dirección no es tan precisa debido a que el factor dominante es la advección no-lineal generada por rectificación topográfica de la onda de marea (ver Capítulo 4, sección 4-4). Estas zonas están claramente delimitadas por las áreas de mayor disipación de energía mareal (Cap. 4, Fig. 4-3b) donde la mezcla por mareas se maximiza. Los flujos de fondo en el GSM muestran intensas corrientes en las costas y magnitudes relativamente despreciables en las zonas profundas del golfo (Fig. 5-14d). Las corrientes de fondo indican una circulación de sentido horario y máximas magnitudes donde la rectificación topográfica de la onda de marea es importante, como ser en la boca del GSJ y NE de PV (Fig. 5-14d).

El GN, muestra un comportamiento similar al GSM, con flujos de fondo que siguen la topografía, generando un giro horario que domina gran parte del golfo. En la zona de la costa Oeste, donde las profundidades son reducidas la circulación de fondo es confusa y poco definida (Fig. 5-14d). Las máximas corrientes de fondo se observan en cercanías de la boca donde el estrechamiento produce amplificaciones de las mismas (zona donde se detecta intensa disipación de energía por marea). Los flujos superficiales (Fig. 5-14c) están regulados por la capa de Ekman, rotando hacia la izquierda de la dirección del viento a excepción de las zonas poco profundas donde es paralela al viento y en la boca donde la columna se encuentra completamente mezclada siendo afectada por los flujos de marea.

El GSJ muestra una alta dependencia con el forzante de marea. Debido a que la profundidad del golfo es reducida y la amplitud de marea es macromareal, la energía de mezcla vertical es suficiente para regular la dinámica. Los flujos de fondo (Fig. 5-14d) no son definidos y marcan una estructura irregular con intensas corrientes en la zona de la boca, a excepción de la costa Este donde se observa una tendencia a la circulación horaria. En los flujos superficiales se observan dos zonas bien definidas: la mitad Este está regulada por la teoría de Ekman (viento) y

la zona Oeste y central son afectadas por la advección vertical impuesta por mezcla de marea (Fig. 5-14c).

Resumiendo, el forzante de mareas es dominante en la zona de estudio afectando la totalidad de las características de circulación impuestas por el viento a excepción de una capa superficial delgada. En zonas donde la mezcla por marea es máxima, el flujo superficial también es modificado (Fig. 5-14c).

### 5.5.1.3. Balances de momento para el GSM

En las figuras 5-15 y 5-16, observamos el análisis de los balances de momento en dirección “x” en la transectas A-A y dirección “y” para la transecta B-B, a partir de las velocidades medias para el experimento de forzante de marea más viento constante y uniforme del Oeste. En la figura 5-15 se muestran las velocidades transversales a la transecta A-A y los respectivos balances promediados en la vertical, en superficie (menor a 40 metros) y en el fondo (mayor a 40 metros). La Fig. 5-15a, muestra velocidades (positivas) hacia el Norte en superficie con máximos de 7 cm/s, hacia el Sur (negativas) en la costa Oeste alcanzando hasta 9 cm/s y cercano a la boca para profundidades mayores a 20 metros con magnitudes mas reducidas.

El balance en dirección “x” promediado en la vertical (Fig. 5-15b) muestra que la marea agrega un fuerte componente no-lineal al flujo (término advectivo) que domina toda la dinámica en la zona de la boca. La zona de la costa Oeste (< 60 km) tiene comportamiento similar al caso de forzamiento de viento solamente, donde la depresión en la costa generada por el viento ( $grad_{prx}$ ) se equilibra con el esfuerzo de viento ( $viscx$ ) más la aceleración de Coriolis ( $corx$ ), produciendo corrientes hacia el Sur. A medida que entramos en zonas más profundas, disminuye el gradiente de presión y el esfuerzo de viento es equilibrado por Coriolis produciendo velocidades hacia el Norte. Cuando nos acercamos hacia la boca del golfo, los términos advectivos son muy importantes debido a las altas corrientes residuales aportadas por las componentes de marea, dominando completamente la dinámica

El balance en superficie (Fig. 5-15c) muestra un claro dominio del esfuerzo de viento ( $viscx$ ) en la capa de Ekman con un transporte hacia el Norte. La zona de la costa Oeste (< 60 km) del balance promedio está completamente regulados por la capa

superficial (Fig. 5-15c). Observamos, que cercano a la boca (>80 km) la dinámica impuesta por marea (advx y grdprx) también afecta a la capa superficial. En el balance de fondo, para profundidades mayores a 40 metros (Fig. 5-15d), el esfuerzo de viento desaparece y la dinámica está completamente dominada por la advección (advx), que tiende a generar un flujo hacia el Este, y el gradiente de presión (grdprx), que tiende a generar flujos hacia el Oeste.

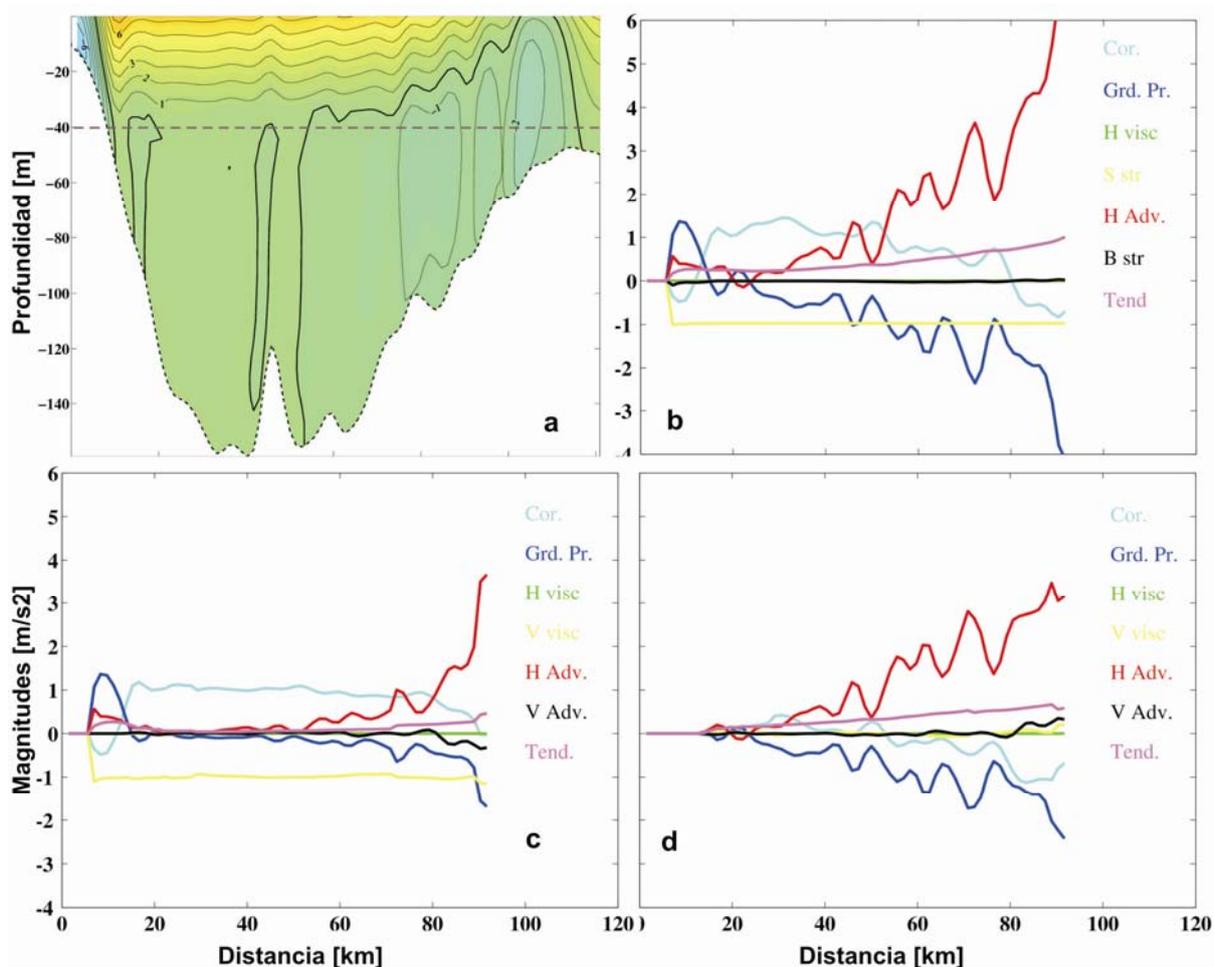


Figura 5-15. Balances de momento y velocidades promediadas en la vertical para la transecta A-A. a) Velocidades medias transversales a la transecta. b) Balances de momento promediado en vertical. c) Balance de momento de la capa superficial y d) Balance de momento de la capa de fondo.

La transecta meridional B-B (Fig. 5-16a) muestra corrientes muy intensas (jets) en las costas, circunscriptas a las zonas menos profundas y una reducción de las mismas en el interior del GSM. El flujo costero al Sur tiene velocidades hacia el Oeste (negativas) de hasta 14 cm/s y el flujo costero del Norte, hacia el Este (positivas) de 12 cm/s. En la distribución vertical de velocidades (excluyendo las

costas) se observa una dinámica de 3 capas. Los primeros 20 metros de profundidad se ven controlados por la dinámica de Ekman, transportando flujos hacia el Este (positivos). Entre 20 y 60 metros el flujo es hacia el Oeste (negativo), y en la capa más profunda ( $> 60$  m) los flujos son hacia el Este. Las velocidades de las corrientes residuales hacia el Oeste en la costa Sur, gobiernan sobre las producidas por el forzante de viento hacia el Este.

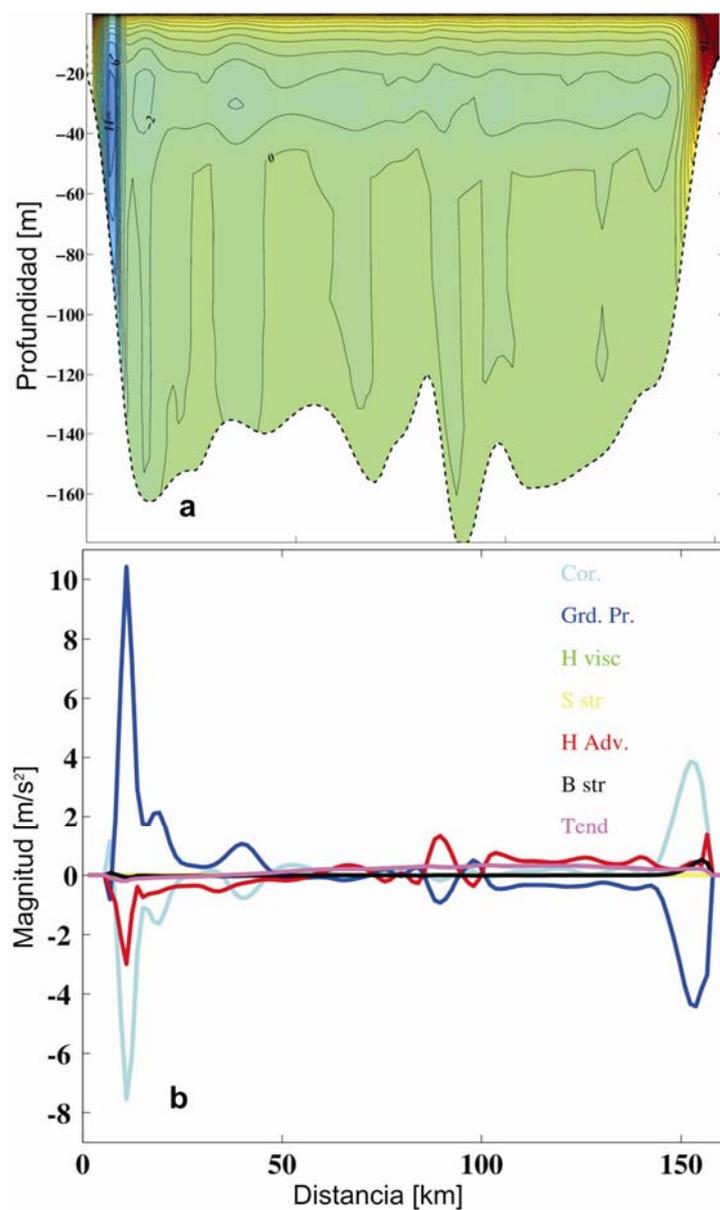


Figura 5-16. Balances de momento y velocidades promediadas en la vertical para la transecta B-B. a) Velocidades medias transversales a la transecta. b) Balances de momento promediado en vertical.

El balance promedio (Fig. 5-16b), muestra una mayor influencia del término advectivo en la costa Sur, debido a que la actividad de las corrientes residuales de

marea es mayor en este sector. El balance dinámico en esa región es entre la advección (adv) más la aceleración de Coriolis (cory) que tiende a mover la masa de agua hacia el Este equilibrando al gradiente de presión generado (grady). En la zona central del golfo, se reduce el término de Coriolis y el balance queda dominado por la advección y el gradiente de presión. El término de advección muestra una inversión de signo a medida que nos desplazamos de Norte a Sur, lo que coincide con lo observado en los jets costeros. En la costa Norte, el gradiente de elevaciones es equilibrado por la aceleración de Coriolis, generando un jet costero hacia el Este.

## **5.5.2. Efecto del cambio en la dirección del viento**

### **5.5.2.1. Flujo y circulación media**

Como la circulación media en la región de estudio está principalmente controlada por el forzante de marea, los experimentos de sensibilidad a la dirección del viento muestran pocas modificaciones con respecto a ciertas estructuras generadas por este forzante. Si hacemos una comparación de la circulación impuesta por marea solamente o para el caso de vientos homogéneos en cualquier dirección mas marea, encontramos tales patrones de circulación. Entre estos patrones podemos encontrar: giros principales horarios en el GN y GSM, dipolo en la boca del GN, cuadrupolo en la boca del GSJ y giros de recirculación al Norte y Este de PV. Estos patrones de circulación fueron analizados en detalle en el capítulo 4 sección 4-4 y en la sección 5.5.1 para el experimento de viento del Oeste y marea (EO3), por lo tanto el análisis del cambio de dirección se centrará solamente en las diferencias principales que muestra la sensibilidad al cambio de dirección del viento para los experimentos de viento del Este mas marea (EE3), viento del Norte mas marea (EN3) y viento del Sur mas marea (ES3).

Los vientos del Este controlan principalmente la costa Norte del GSM, generando un giro antihorario sobre la costa Noreste del GSM que se opone a la circulación (horaria) impuesta por marea, modificando levemente la circulación resultante (Fig. 5-17b). Este tipo de viento, debido al giro antihorario conectado a la boca, estaría aislando en parte el golfo debido a que las líneas de corriente que atraviesan la boca transportan un bajo caudal. Los vientos del Norte (upwelling) son aquellos capaces de producir mayores modificaciones en la circulación del GSM, ya que

tienen principal incidencia sobre la costa Norte que es afectada en menor medida por el forzante de marea. Este viento genera un intenso giro antihorario (0.08 Sv) centrado en el Noroeste y abarcando la totalidad de la costa Oeste reduciendo su dimensión hacia el Sur del golfo. Cuando los vientos son del Sur, se observa un desplazamiento del núcleo del giro horario hacia el Noroeste del golfo y se genera una circulación débil y poco definida antihoraria en la zona de la boca, aislando en parte el golfo.

El GN muestra una estructura robusta en el giro horario principal, el cual no sufre prácticamente modificaciones con el cambio de dirección de viento. Los pequeños cambios se producen sobre las zonas costeras generando giros antihorarios. Los vientos del Este provocan la formación de un giro antihorario sobre la costa Noreste de menores dimensiones (Fig. 5-17b). Los vientos del Norte generan un giro antihorario que abarca toda la costa Norte y Oeste del GN incluyendo la Bahía Nueva (Fig. 5-17c). Los vientos del Sur no alcanzan a generar modificaciones, ya que la zona afectada es principalmente en la boca donde la circulación está controlada por el dipolo por marea (Fig. 5-17d).

El GSJ muestra una estructura muy robusta del dipolo interno de circulación impuesto por marea que, debido a su reducida profundidad es muy difícil de romper o modificar por los vientos actuando en cualquier dirección. La zona que pareciera ser mas afectada por los esfuerzos del viento, es la costa Este que se encuentra mas alejada de la boca y en parte aislada de las intensas corrientes. Los vientos del Este intensifican el giro antihorario al Este sin modificar su estructura (Fig. 5-17b), mientras que los vientos del Norte afectan su circulación media con débiles giros antihorarios en las zonas costeras (Este y Oeste) (Fig. 5-17c).

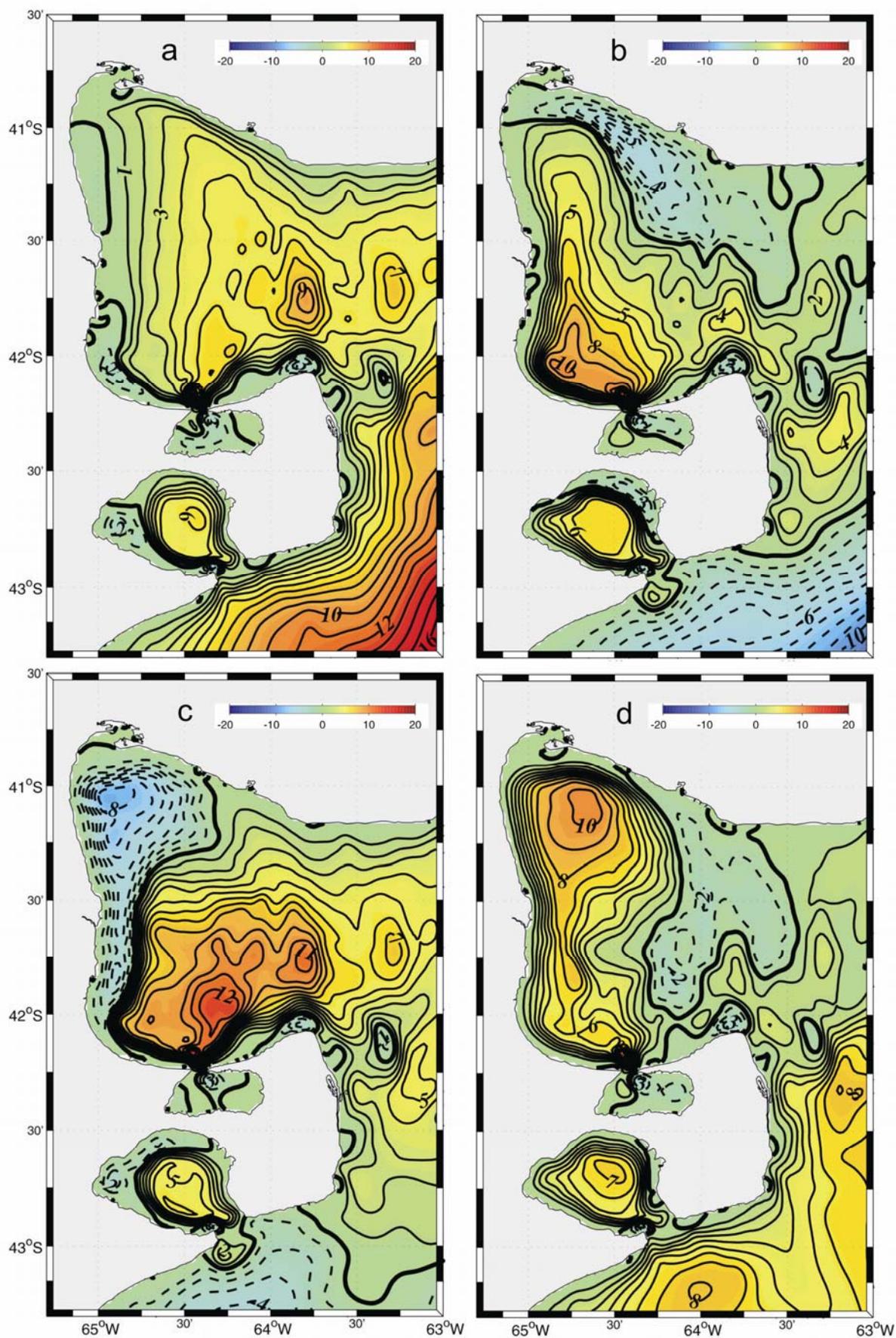


Figura 5-17. Circulación mediante la función corriente [Sv]. a) EO3, b) EE3, c) EN3 y d) ES3.

### 5.5.3. Flujo de intercambio en los golfos para los cuatro cuadrantes

En esta sección analizaremos con más detalle el flujo de intercambio entre los golfos y el océano adyacente (el GSM en el caso del GSJ). Los flujos en las bocas de los golfos son prácticamente simétricos para las direcciones opuestas de viento (zonales: Oeste-Este y meridionales: Norte-Sur). Los experimentos analizados son de viento con la inclusión del efecto disipativo de marea y viento más las corrientes residuales de marea.

#### *Vientos zonales*

En el caso de vientos solamente, el GSM (Fig. 5-18a, panel izquierdo), muestra un intercambio de flujo en la boca en dos capas. Los flujos son negativos (positivos) para vientos del Este (Oeste) en la capa superficial, ingresando (egresando) al golfo con máximos en la costa Norte en superficie de 12 cm/s. Para el caso de vientos del Oeste los máximos al Norte se amplifican, intensificando el jet costero (14 cm/s). La capa superficial de ingreso alcanza profundidades de 50 metros en la costa Norte mientras que en el centro y Sur no llegan a 20 metros. El retorno del flujo se realiza por el fondo en un área transversal mayor pero de menor intensidad (2 cm/s). El transporte máximo se produce a 40 km de la costa Sur y alcanza los 0.03 Sv para ambas direcciones (Fig. 5-19a).

Si incluimos las corrientes residuales de marea (Fig. 5-18c), la distribución del intercambio queda dominada en gran medida por las mismas (principalmente en los primeros 50 km), siendo la dirección del viento la que produce leves modificaciones sobre el transporte (mayormente a partir de los 50 km). En el caso de vientos del Oeste el intercambio es favorecido por el mismo, en mayor medida en las capas superficiales donde afecta la capa de Ekman. La zona Norte, combina el egreso del flujo impuesto por marea con el controlado por el viento aumentando la intensidad del intercambio con máximas velocidades en superficie (14 cm/s). Sobre la costa Sur, se aprecia una delgada capa donde se producen intensos egresos (positivos) de flujo. El transporte de intercambio que genera esta dirección de viento en la boca es superior a 0.08Sv (Fig. 5-19b).

En el caso de vientos del Este, la circulación se opone a la impuesta por marea y el transporte en la boca se reduce notablemente (0.04 Sv, fig. 5-19b), y se observa

una inversión (saliendo del golfo) del transporte a partir de los 50 km de la costa Sur.

El GN muestra un intercambio débil para vientos zonales (Fig. 5-18a, panel central). Con una distribución del flujo ingresando (egresando) en el caso de viento del Oeste (Este) por la parte central (zona mas profunda) en toda la columna de agua ( $<1\text{cm/s}$ ) y egresando (ingresando) por las costas Norte y Sur (menos profundas). El flujo máximo de egreso es de  $4\text{ cm/s}$  en superficie sobre la costa Norte. En la costa Sur se produce un flujo de ingreso que estaría indicando un giro de recirculación en la boca. Los transportes en la boca indican un comportamiento simétrico de ambas direcciones con el máximo a  $14\text{ km}$  de la costa Sur y valores cercanos a los  $1\text{e}^{-3}\text{ Sv}$  (Fig. 5-19c).

En los experimentos que incluyen las corrientes residuales de marea muestran un dominio completo de las mismas y variaciones casi despreciables en el intercambio de flujo en la boca. El flujo ingresa por el sector Sur de la boca, como indicaría el desplazamiento de la onda de marea que viaje en sentido NO, con máximas velocidades de  $12\text{ cm/s}$ . Egresas por la mitad Norte de la transecta con valores que superan los  $20\text{ cm/s}$  (Fig. 5-18c, panel central). Los transportes de intercambio se multiplican por un factor de 5 y alcanzan los  $51\text{e}^{-3}\text{ Sv}$  entre  $10$  y  $14\text{ km}$  de la costa Sur (Fig. 5-19d).

El GSJ cuando es forzado por vientos incluyendo el efecto disipativo (Fig. 5-18a, panel derecho) muestra una distribución del flujo de intercambio en dos capas. En el viento del Oeste (Este) el flujo egresa (ingresa) por una capa superficial de aproximadamente  $10$  metros y en el Este en toda la columna. El ingreso (egreso) del flujo se realiza por una capa de fondo centrada sobre la costa Oeste del golfo. Los máximos alcanzados en la capa superficial son similares en magnitud para ambos vientos, a diferencia que en el caso del viento Este se producen dos máximos en ambas costas sobre la capa superficial de  $2\text{cm/s}$ . La capa de fondo muestra magnitudes reducidas cercanas a  $1\text{ cm/s}$ . Debido a las dimensiones de la boca el transporte para el caso de vientos es muy reducido ( $<1\text{e}^{-3}\text{ Sv}$ ), y mostrando un comportamiento simétrico para ambas direcciones (Fig. 5-19e).

Si adicionamos las corrientes residuales de marea a los experimentos anteriores, se observa un aumento muy significativo del intercambio. La dinámica en este caso es

absolutamente dominada por la marea, ya que el transporte generado por la marea en la boca es 17 veces mayor al que muestra el viento. El flujo de ingreso por la costa Oriental alcanza velocidades de 20 cm/s y el de egreso por la costa Occidental de 16 cm/s (Fig. 5-18c, panel derecho). Los transportes alcanzan su máximo ( $16e^{-3}$  Sv para el caso Oeste y  $18e^{-3}$  Sv en el caso Este) a 7 km de la costa Oeste (Fig. 5-19f).

### *Vientos meridionales*

Si el forzante es de viento, en el GSM (Fig. 5-18b, panel izquierdo) el intercambio de flujo en la boca se realiza mediante dos zonas bien definidas. Una primer zona sobre la costa Sur de aproximadamente 20 km en superficie y ensanchándose hacia el fondo hasta los 60 km, por la cual ingresa (egresa) el flujo para vientos del Norte (Sur) con velocidades máximas de 2 cm/s, abarcando las zonas más profundas de la boca. La otra zona se encuentra definida principalmente por la costa Norte en toda la columna, de profundidades inferiores donde el flujo egresa (ingresa) para vientos del Norte (Sur). Las velocidades máximas se dan en superficie con valores que alcanzan los 4 cm/s. Los transportes se muestran simétricos entre sí y aumentan con respecto a los vientos zonales y alcanzan los 0.05 Sv a 40 km aprox. de la costa Sur (Fig. 5-19a).

En los experimentos que adicionan las corrientes residuales de marea, el GSM pareciera ser más afectado por la variación del viento, con una intensa reducción del transporte que genera la marea para vientos del Sur y un aumento importante sobre el de marea para los vientos del Norte. Se observa una intensificación del transporte que egresa (positivo) de la zona Norte debido a que el flujo de egreso (positivo) en superficie impuesto por el viento, favorece el impuesto por marea en la zona Norte logrando mayor intensidad. En el sector Sur, un dominio de las corrientes residuales de marea con flujo que ingresa al golfo (negativo) con máximos de 14 cm/s. Por lo tanto el flujo de retorno (egreso) impuesto por marea es favorecido por el viento en la zona Norte en profundidad (6 cm/s) (Fig. 5-18d). Los transportes alcanzados por el experimento con vientos del Norte es el mayor de todas las direcciones estudiadas (0.1 Sv) a 40 km de la costa Sur, mientras que los vientos del Sur generan un transporte inferior a 0.02 Sv, aislando en parte al GSM (Fig. 5-19b).

El GN en los experimentos de viento, muestra intensos intercambios en la zona superficial, limitados a la capa de Ekman con máximos de velocidad de 10 cm/s (Fig. 5-18b, panel central). Para vientos del Norte (Sur) el egreso (ingreso) se produce en superficie en una delgada capa (5 m.) y en la costa Norte en toda la columna de agua. El ingreso (egreso) del flujo al golfo se produce por la costa Sur y la zona más profunda de la boca con velocidades máximas más reducidas (2 cm/s). Los transportes para los vientos meridionales en la boca del golfo son máximos ( $\sim 3e^{-3}$  Sv) superando el doble de los generados por vientos zonales (Fig. 5-19c).

Los experimentos que incorporan las corrientes residuales de marea muestran en el GN una distribución similar del flujo para ambos vientos meridionales. La distribución es característica del intercambio dominada por corrientes residuales de marea. El flujo de ingreso (egreso) en superficie impuesto por el viento Sur (Norte), favorece (reduce) el impuesto por marea en la zona central. El ingreso (egreso) en el sector Norte impuesto por viento Sur (Norte) se opone al egreso del caso de marea, con lo cual reduce (intensifica) el egreso (Fig. 5-18d, panel central). Los transportes máximos en la boca se generan con vientos del Norte con valores cercanos a los  $8e^{-3}$  Sv a 12 km de la costa Sur (Fig. 5-19d).

En el GSJ (Fig. 5-18b, panel derecho) se genera un intercambio con el GSM en dos capas. Para vientos del Norte (Sur) el egreso (ingreso) del flujo se realiza por una capa superficial hasta los 10 metros aprox. gobernada completamente por Ekman. Mientras que el retorno del flujo o ingreso (egreso) se produce mas homogéneamente por la zona mas profunda de la boca con velocidades reducidas ( $\sim 1$ cm/s.). Los transportes en este golfo para vientos meridionales son inferiores a los generados por los zonales debido a la orientación de su boca (Fig. 5-19e).

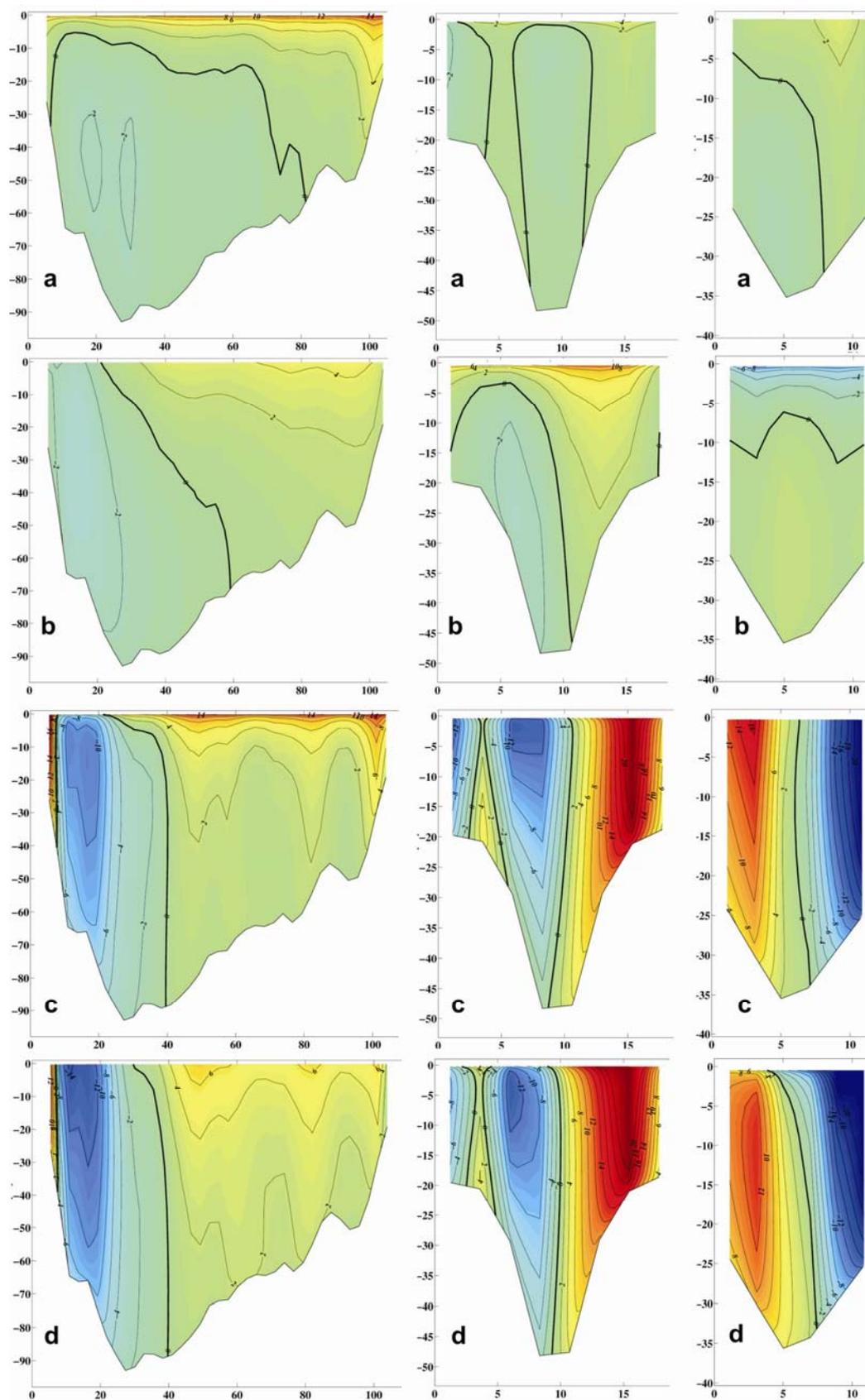


Figura 5-18. Flujo de intercambio a través de la boca de los golfos en [cm/s] para los experimentos con viento Oeste y Norte. GSM (Panel izquierdo), GN (Panel central) y GSJ (Panel derecho). a) EO2, b) EN2, c) EO3 y d) EN3.

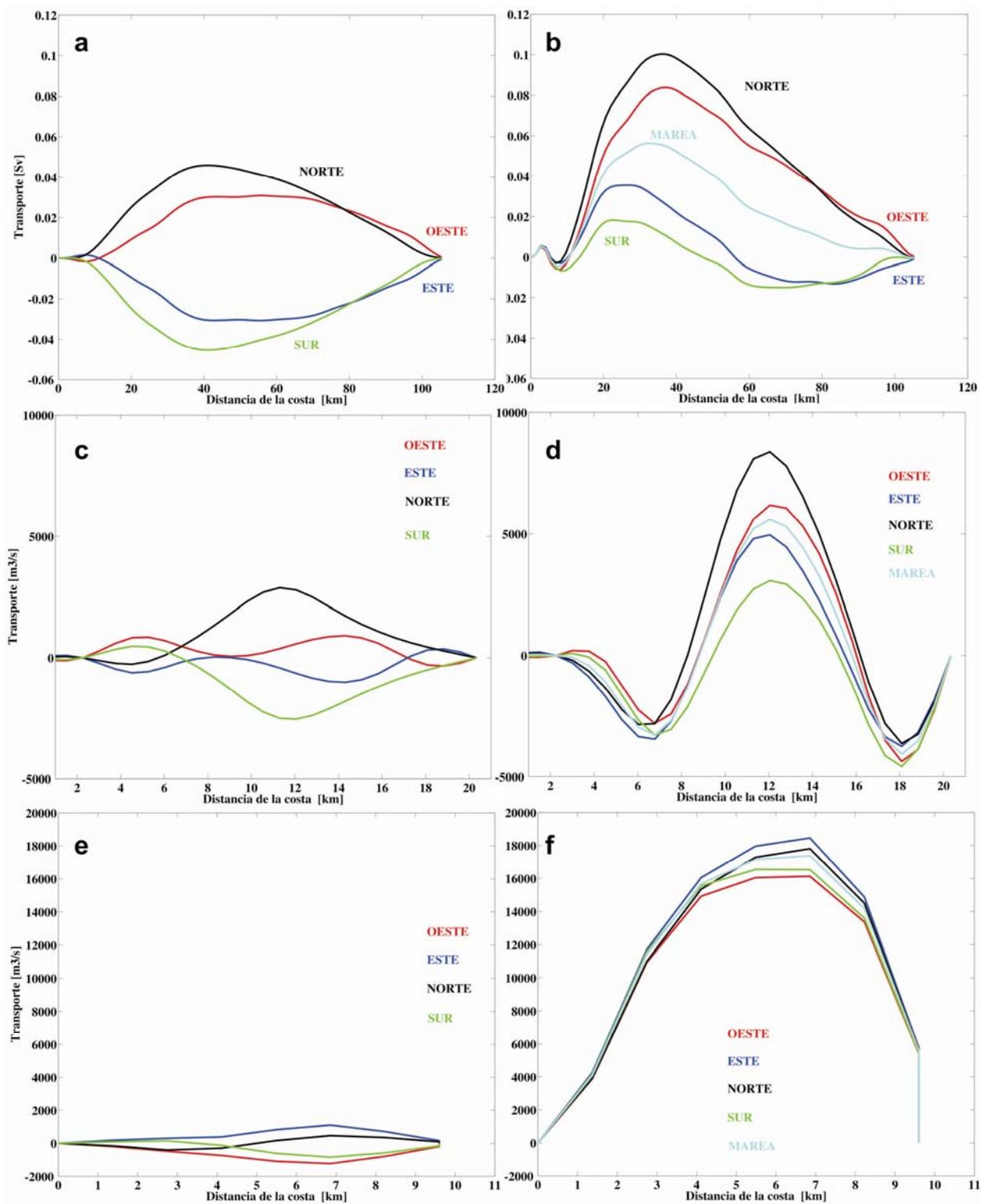


Figura 5-19. Transporte a través de la boca de los golfos para los experimentos de viento homogéneos. GSM (Panel superior), GN (Panel central) y GSJ (Panel inferior). a), c) y e) experimentos de viento incluyendo la disipación por marea. b), d) y f) Experimentos de viento y marea.

Si adicionamos la marea, el GSJ (Fig. 5-18d, panel derecho), el intercambio muestra una estructura dominada completamente por ese forzante. Para vientos del Norte se intensifica principalmente el ingreso (flujos negativos) en superficie favorecido por la dinámica impuesta por el viento (24 cm/s). El egreso (positivo) se reduce sobre la costa Oeste con máximos de 12 cm/s. Los transportes son de magnitudes similares para ambas direcciones (y a los vientos zonales), ya que el transporte generado por corrientes residuales es de orden muy superior al del viento (Fig. 5-19f).

## 5.6. Golfos forzados por vientos estacionales

Una vez determinada la respuesta de los golfos al forzante de viento homogéneo e invariante en el tiempo, para completar el análisis de la respuesta barotrópica de los Golfos nos resta conocer la dinámica impuesta por la variación de este forzante tanto espacial como temporalmente. Para forzar al modelo de esta manera, existen diversas bases de datos, algunas provenientes de mediciones históricas (Por Ej. Hellerman y Rosenstein, 1983, Da Silva, 1994), otras obtenidas con modelos numéricos atmosféricos y asimilación de datos (Por ej. NCEP, Kalnay *et al.*, 1994) y recientemente bases de datos provenientes de satélites. Todas estas bases de datos se encuentran en diversas resoluciones espaciales y frecuencia temporal.

Para nuestro análisis utilizaremos una de las bases de datos más actuales existentes con muy buena resolución espacial ( $1/4^\circ$ ). Se trata de una climatología de vientos de datos satelitales obtenida por Risien y Chelton, (2008) mediante el procesamiento de 8 años de medición (Septiembre del 1999 a Agosto del 2007) de campos de viento superficiales en la interfaz agua-aire realizados por el satélite QuikSCAT. La base de datos climatológicos (mensuales), conocida como Scatterometer Climatology of Ocean Winds (SCOW) consiste de 12 variables, de las cuales utilizaremos la componente de esfuerzo del viento. Los ciclos estacionales de SCOW fueron comparados con ciclos estimados desde NCEP/NCAR y demuestran que los SCOW logran capturar características de pequeña escala que son dinámicamente importantes tanto para el océano como para la atmósfera (Risien y Chelton, 2008)

### 5.6.1. Forzante de viento estacional: vientos SCOW (QuikSCAT)

Los campos de viento en la zona de los golfos norpatagónicos presentan una componente zonal preponderante offshore, presente en todo el ciclo anual, mientras que la componente meridional muestra una mayor variación espacial y temporal (Figura 5-20, línea roja y 5-21). Si observamos la evolución de los esfuerzos del viento para un punto central del GN (Fig. 5-20a), la componente zonal (línea roja) se mantiene siempre positiva (offshore) con máximos de 0.06 Pa en el mes de Julio, mientras que el esfuerzo meridional (línea azul) se mantiene siempre con valores negativos, es decir componentes Norte con máximos en el mes de Septiembre de 0.05 Pa. En el mes de Junio, la componente meridional es cero, siendo cercana a la máxima en la componente zonal. Hacia el mes de Diciembre ambas componentes se reducen notablemente. Podemos ver una distribución espacial homogénea en el golfo de las variaciones mencionadas (Fig. 5-21).

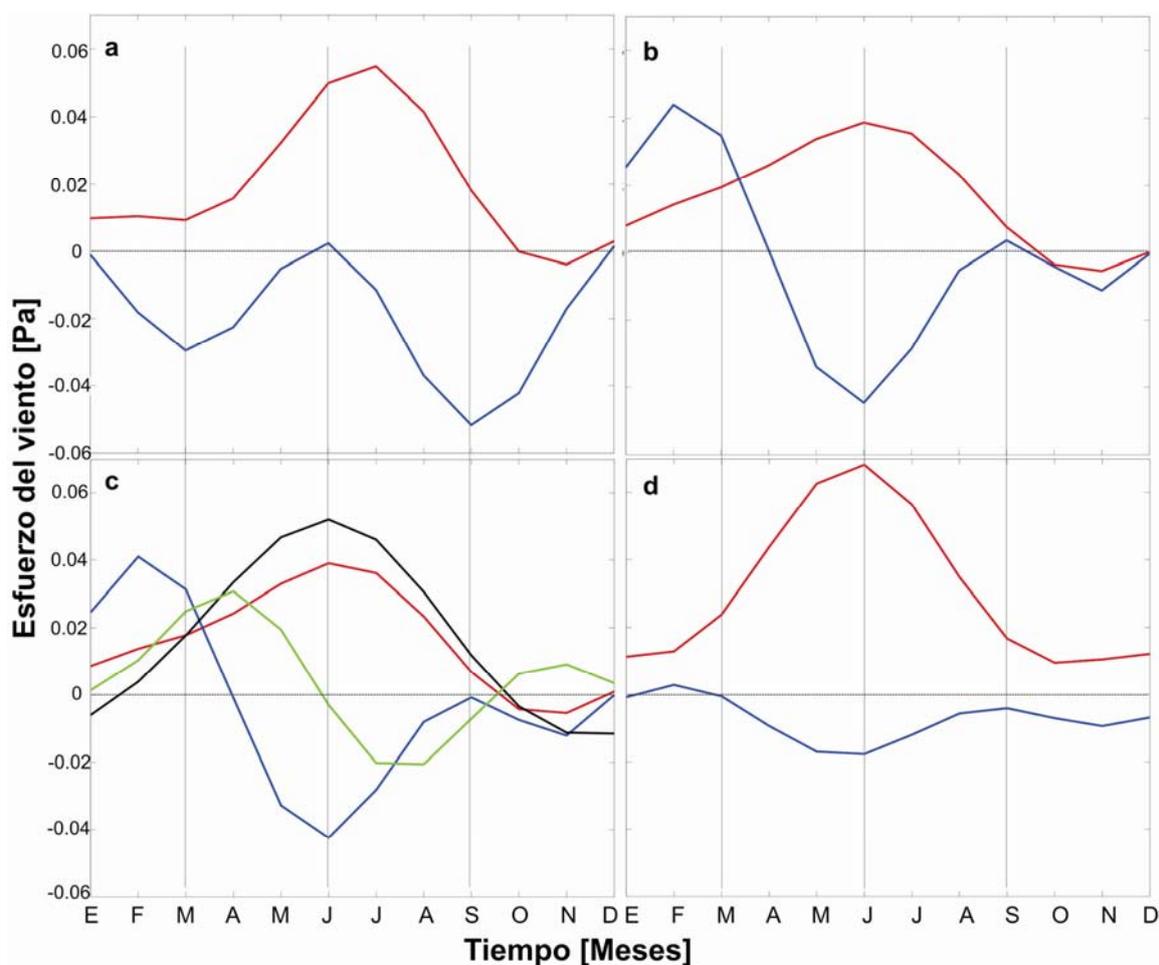


Figura 5-20. Variación mensual de los vientos SCOW (QuikScat) en un punto del dominio. La línea roja indica esfuerzo del viento en "x", la línea azul indica esfuerzo del viento en "y". a) centro del GN, b) centro del GSJ, c) Norte (líneas negra para "x" y verde para "y") y Sur del GSM y d) offshore PV.

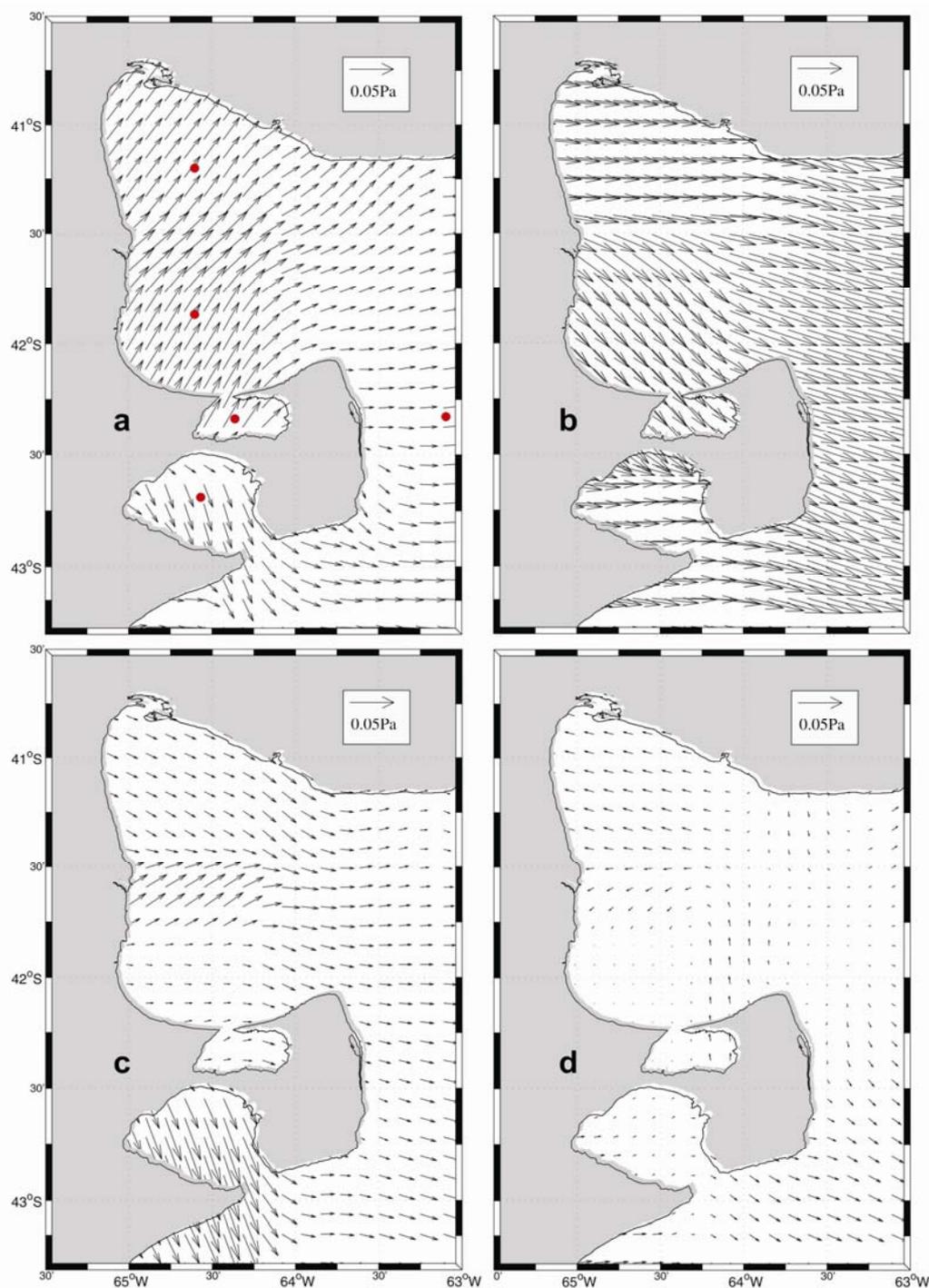


Figura 5-21. Campos de viento SCOW (QuikScat) y estaciones de análisis para los vientos (puntos rojos). a) Mes de Marzo, b) Junio, c) Septiembre y d) Diciembre.

En el GSJ (Fig. 5-20b), muestra un comportamiento de la componente zonal prácticamente offshore (Oeste) durante todo el ciclo anual, a excepción de los meses de Noviembre y Diciembre donde se torna desde el Este con una magnitud muy reducida. Los máximos se dan en el mes de Junio ( $\sim 0.04$  Pa). La componente meridional del viento muestra una variación mayor durante el ciclo anual, con

vientos Sur en los meses de verano con máximos de 0.04 Pa y el resto del año con vientos del Norte con máximos en Junio (0.04 Pa). La distribución espacial de las componentes del viento para esta resolución no muestra grandes variaciones (Fig. 5-21).

El GSM (Fig. 5-20c), muestra una fuerte componente zonal offshore en el ciclo anual a excepción de los meses de Noviembre y Diciembre, tanto para la zona Norte (línea negra) como la zona Sur (línea roja). Los máximos de esta componente se alcanzan en el mes de Junio (0.05 Pa al Norte y 0.04 Pa al Sur). Las componentes meridionales son Sur durante los meses de verano en la zona Sur y se mantienen en otoño para el Norte. Los máximos se dan en la costa Sur para el mes de Junio (0.04 Pa). En los meses de primavera las componentes de viento se reducen, como podemos observar en la distribución espacial (Fig. 5-21). La zona de Plataforma (Fig. 5-20d) muestra fuertes componentes offshore durante todo el año, con máximos de 0.07 Pa en Junio y componentes meridionales débiles del Norte.

#### **5.6.1.1. Circulación media estacional**

La circulación generada por vientos estacionales será analizada adicionando el efecto disipativo de la marea (EQ2) como fue analizado previamente en los experimentos de viento homogéneos y constantes. Como meses representativos de cada estación del año se analizarán los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre

La función corriente (Fig. 5-22) muestra una alta variabilidad dinámica estacional en respuesta a los campos de viento SCOW. Para el mes de Marzo (Fig. 5-22a) las componentes meridionales (desde el Sur) en el interior del GSM muestran una circulación principalmente horaria, débil y difusa, con giros de recirculación más intensos y máximos de transporte en la costa Norte (0.02 Sv) (comparar con Fig. 5-10d). La componente zonal (hacia el Oeste) aunque más débil, es responsable de la aparición del giro antihorario en la costa Sur (comparar con Fig. 5-10a) y de la perturbación del giro horario en la zona central. El GN se divide en dos giros separados zonalmente, sobre la costa occidental y Sur un giro antihorario (formados por la componente meridional desde el Norte que gobierna el 60 % del golfo y

transporta  $6 \cdot 10^{-3}$  Sv y el resto con patrones horarios muy débiles sobre la zona oriental y conectado a la boca con intercambio débil.

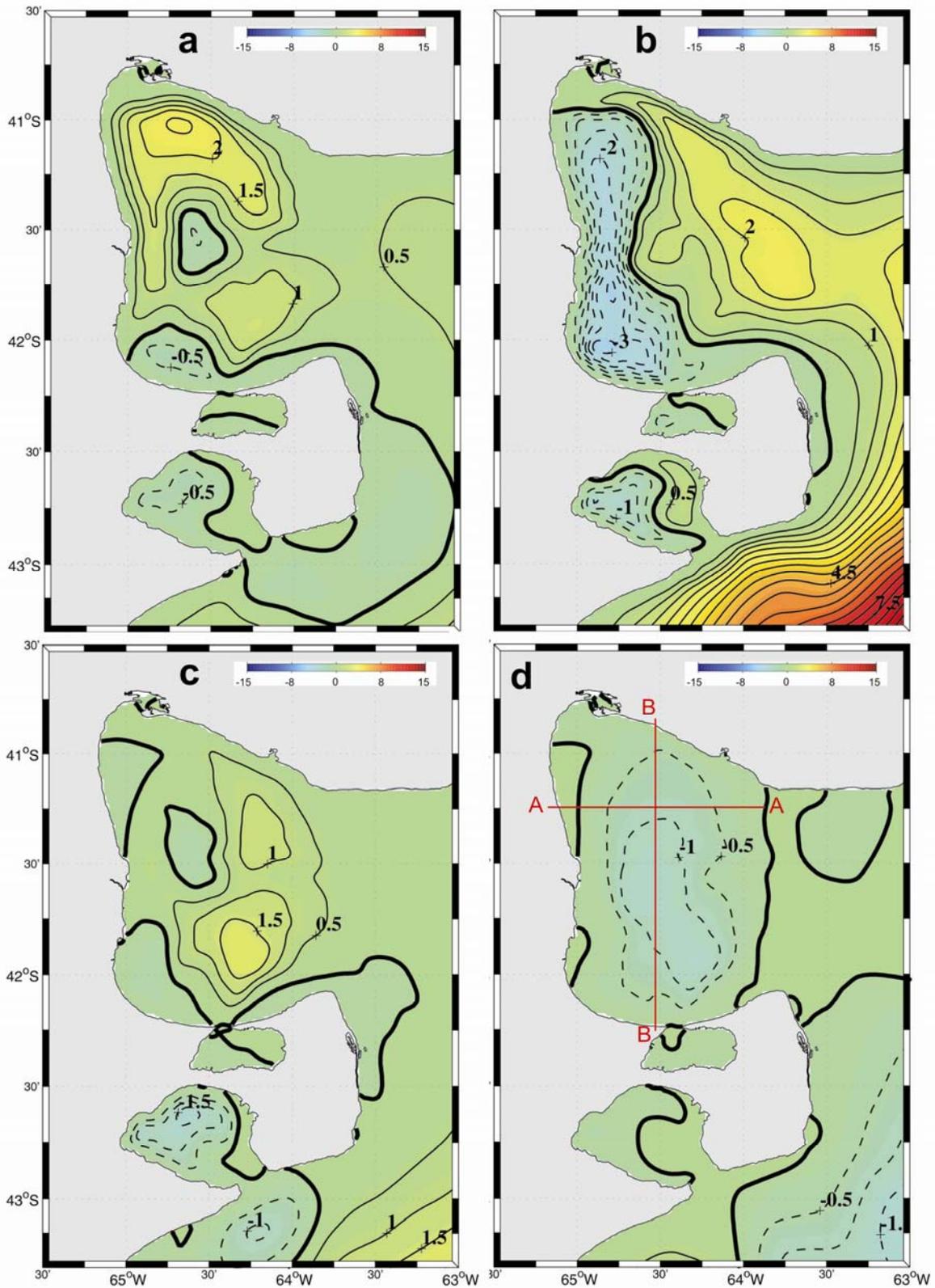


Figura 5-22. Función Corriente para el EQ2. a) Mes de Marzo, b) Junio, c) Septiembre y d) Diciembre. ( $IC=0.5$ ). Líneas llenas indican circulación horaria y líneas interlineadas indican sentido antihorario, transectas de análisis zonal A-A y meridional B-B.

El GSJ muestra una circulación media débil cuya estructura consiste en una división meridional en dos giros con escaso intercambio a través de la boca. En la zona externa a los golfos se muestra un patrón de circulación horaria con magnitudes muy débiles y estructura poco definida. El patrón de circulación para los vientos de Marzo, verifica gran parte de los patrones observados en las corridas de vientos homogéneos (combinados), a pesar de que las magnitudes (más débiles) no permiten definir claramente algunas estructuras de la circulación.

En el mes de Junio se incrementan las magnitudes del viento y las componentes meridionales se reducen, con lo cual obtenemos un campo de vientos en todo el dominio prácticamente off-shore, a excepción de la zona Sur del GSM donde se observa una componente meridional del Norte (Fig. 5-21b). En el GSM, la componente offshore genera un giro antihorario en la costa Oeste (0.03 Sv) y se intensifica en la mitad Sur (0.03 Sv) debido a la componente meridional (Fig. 5-22b). El resto del golfo se encuentra dominado por una circulación horaria débil conectada a la boca, similar a la mostrada por los experimentos de vientos homogéneos del Oeste. La circulación media en el GN mantiene una distribución similar a la del mes de Marzo con un incremento del transporte en el giro antihorario al occidente y del horario al oriente debido principalmente al incremento de las magnitudes en la componente zonal offshore del viento

En el mes de Septiembre (Fig. 5-22c) observamos una fuerte disminución de la circulación, básicamente debido a la reducción en la magnitud de los vientos zonales. La circulación media en el GSM resulta poco definida y débil. Está compuesta principalmente de la circulación horaria generada por los vientos zonales (transporte máximo de 0.01 Sv.) y un giro débil antihorario en la costa Suroeste del golfo generada por el aumento de la componente meridional en esa región. En el GN las fuertes componentes meridionales del viento generan un giro antihorario que domina prácticamente todo el golfo (comparar con Fig. 5-10c). El giro transporta 0.016 Sv, y se halla centrado sobre la costa Norte. En el GSJ no se observan patrones de circulación definidos.

La circulación del mes de Diciembre en el GSM muestra una diferencia importante con respecto al resto del año, la circulación es antihoraria (~0.01 Sv.) y tiene escasa comunicación con la plataforma exterior (Fig. 5.22d). Esto es consecuencia de la

combinación de vientos meridionales (desde el Sur) en la mitad Sur del Golfo con vientos zonales del Este (inshore) en la mitad Norte (Fig. 5-21d). Como observamos en los experimentos de vientos homogéneos para estos casos, el Golfo queda prácticamente aislado de aguas externas (Fig. 5-10 b y d).

#### **5.6.1.2. Análisis de la variabilidad estacional en el GSM**

Un detalle de la variación estacional de la circulación dentro del GSM se puede observar en la figura 5-23. En los paneles laterales izquierdos observamos la evolución temporal del transporte meridional (transecta A-A) y zonal (transecta B-B) promediado en la vertical (ver Fig. 5-22d).

En la transecta A-A (Fig. 5-23a) existe una variación intensa estacional del transporte meridional sobre la costa Oeste (< 20 km) del golfo. Los flujos son hacia el Norte en los meses de verano y máximo en Marzo ( $1.3 \text{ m}^2/\text{s}$ ) y hacia el Sur en los meses de invierno con máximo de  $1.2 \text{ m}^2/\text{s}$  en el mes de Julio. El balance cross-shore en el mes de Marzo muestra un comportamiento similar al forzante de viento homogéneo desde el Sur, con una débil componente zonal Oeste. El viento desde el Sur, produce un desplazamiento de la masa de agua hacia la costa Oeste (set-up) que induce geostroficamente, una intensa corriente hacia el Norte (Fig. 5-23a). A medida que el golfo se hace más profundo el efecto es menos intenso y responde al giro horario existente en esta zona, siendo el balance entre la aceleración de Coriolis y el esfuerzo de viento off-shore en equilibrio con el gradiente de presión, generando un jet costero hacia el Sur (Fig. 5-23a). En la zona cercana a la boca del golfo (> 80 km) los flujos se tornan hacia el Sur, aunque su intensidad es la mitad del jet costero Oeste. Vuelve a ser influyente la circulación inducida por el viento Sur (giro horario), mostrando flujos hacia el Sur que están en equilibrio entre el gradiente de presión y Coriolis más esfuerzo de viento off-shore.

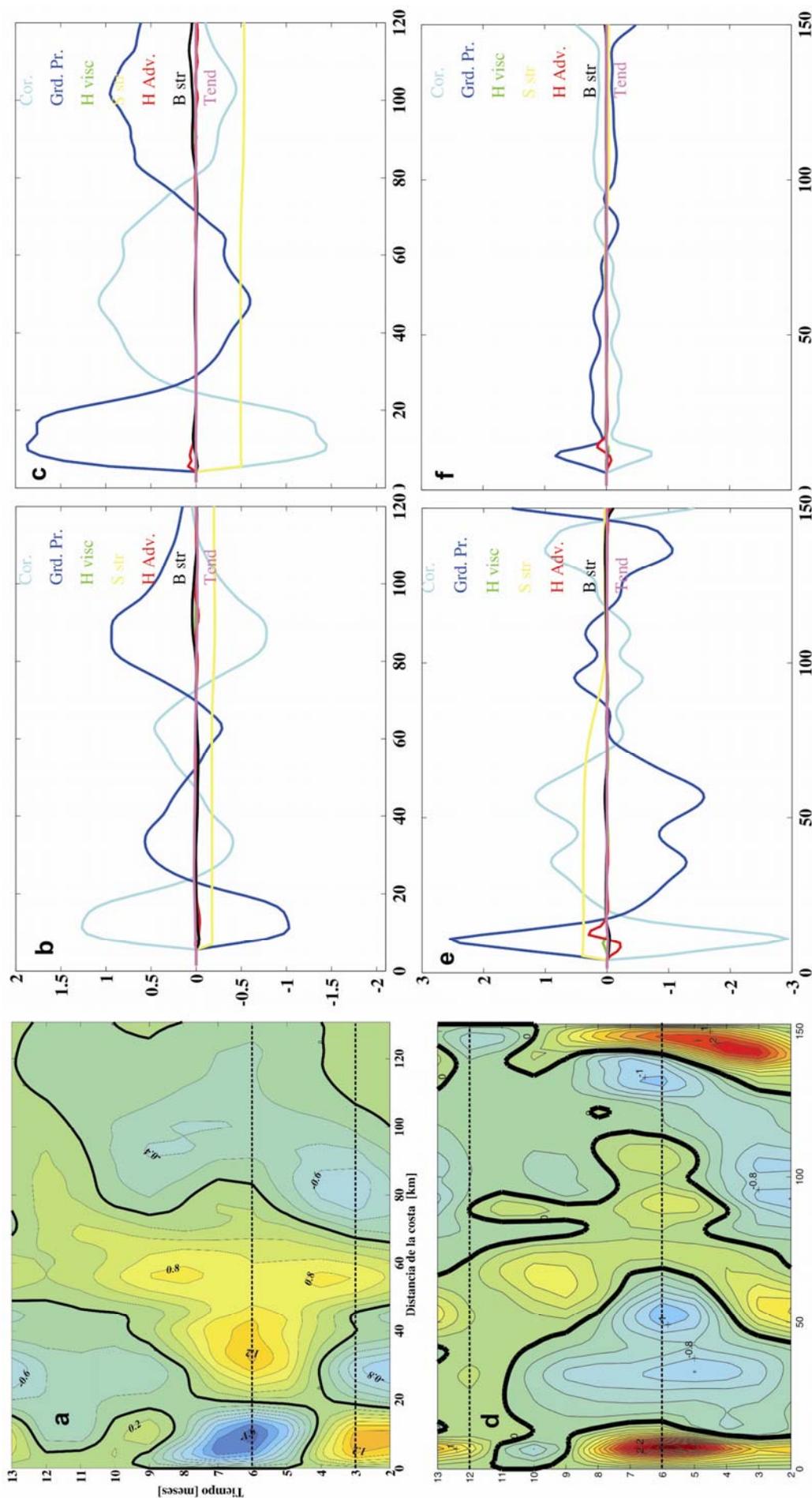


Figura 5-23. Balances en dirección transversal a la costa (zonal) con forzante de vientos SCOW. a) Diagrama Hovmoller del transporte transversal para la transecta A-A. b) balance de momento para el mes de Marzo. c) balance de momento para el mes de Junio. c) balance de momento para el mes de Diciembre. d) Hovmoller del transporte transversal para la transecta B-B. e) balance de momento para el mes de Julio. e) Hovmoller del transporte transversal para el mes de Diciembre.

El mes de Junio, muestra un comportamiento diferente, ya que el mismo está regulado por los vientos preponderantemente desde el Oeste (off-shore), con componentes meridionales casi nulas. Este caso es similar al estudiado con vientos constantes desde el Oeste, donde se produce un jet costero intenso hacia el Sur sobre la costa. El mecanismo de formación es el explicado en los casos idealizados. La depresión generada en la costa por los vientos off-shore produce por geostrofia transportes hacia el Sur, el cual va disminuyendo a medida que se hace más profunda la topografía, obteniendo un balance entre el esfuerzo del viento y la aceleración de Coriolis en la zona profunda, con flujos hacia el Norte.

La transecta B-B (meridional), muestra un comportamiento del transporte menos dependiente de la variación estacional de los vientos y más dependiente de la topografía. Las principales variaciones estacionales se producen en las costas con flujos hacia el Este desde Febrero hasta Septiembre (Fig. 5-23d). El balance de momento en dirección “x” promediado en la vertical para el mes de Junio (Fig. 5-23e) muestra un balance principalmente geostrófico en la costa Oeste (gobernado por los vientos off-shore) con magnitudes importantes del término advectivo y la componente meridional del esfuerzo del viento existente en la mitad Sur del GSM. Este comportamiento se observó cuando el golfo es forzado por componentes zonales off-shore. En la zona profunda del golfo, se invierte la circulación con el mismo mecanismo de los vientos idealizados. En la costa Norte la circulación forzada por los vientos off-shore genera, por balance geostrófico, transporte hacia el Este.

En el mes de Octubre se reducen notablemente las magnitudes y los patrones de viento se tornan irregulares, derivando en velocidades débiles hacia el Oeste en la costa Sur. En el mes de Diciembre (Fig. 5-23f) se reducen las magnitudes a la cuarta parte del mes de Junio y desaparece el dipolo en la costa Oeste, con lo que se observa un balance netamente geostrófico entre el gradiente de presión y la aceleración de Coriolis en toda la transecta, esto es debido a que las pequeñas componentes in-shore del viento repercuten sobre la costa Norte generando débiles transportes hacia el Oeste. La costa Sur mantiene una circulación hacia el Este, mientras que en la costa Norte los vientos in-shore gobiernan el transporte hacia el Oeste (se observa la inversión de los signos en los términos), así el golfo está dominado por un giro antihorario en balance geostrófico.

### 5.6.1.3. Análisis de la variabilidad estacional en el GN y GSJ

Para el análisis detallado, presentamos la función corriente de los meses más contrastantes, Julio (Figura 5-24b) y Diciembre (Figura 5-24c). En Julio el GN se divide zonalmente, con un giro antihorario de  $17 \cdot 10^{-2}$  Sv centrado sobre la costa Oeste y que ocupa gran parte del golfo mientras que sobre la costa Este es controlada por un giro horario de menor intensidad ( $8 \cdot 10^{-2}$  Sv). La estructura observada de circulación es similar a la del mes de Junio (Fig. 5-22b). Esto genera un flujo sobre la costa Oeste hacia el Sur observado en el diagrama de Hovmoller de velocidades meridionales en la transecta C-C (Fig. 5-24a). El sector Oeste (Bahía Nueva) responde durante todo el ciclo anual con velocidades hacia el Sur y máximos en el mes de Julio. El centro de la transecta (entre 10 km y 60 km) presenta baja variación estacional con velocidades reducidas dirigiéndose hacia el Norte. Esto se observa en los flujos de retorno de los giros en la zona profunda.

En el mes de Diciembre debido a la reducción en intensidad de los vientos, la circulación se debilita notablemente aunque mantiene la estructura de los giros de Julio. El giro antihorario se reduce a  $0.002$  Sv y el giro horario, tiene magnitudes casi despreciables. Resumiendo, la magnitud del transporte en el GN tiene una alta variabilidad estacional, mientras que la estructura espacial de la circulación (dos giros) no se modifica sustancialmente.

La variación estacional de las corrientes meridionales en el GSJ muestra intensos flujos en la costa en relación a los de la zona más profunda, siendo de mayor magnitud en la costa Este (Fig. 5-24d). Sobre la costa Oeste ( $< 5$  km) entre los meses de Marzo y Noviembre los flujos meridionales son hacia el Sur con máximos en el mes de Junio de  $3.5$  cm/s y hacia el Norte en los meses de verano con magnitudes muy reducidas. Algo similar ocurre en la costa Este (últimos 10 km), mostrando una mayor permanencia estacional de los flujos hacia el Sur. Esto se observa en la circulación en el mes de Junio (Fig 5-24e), que presenta dos giros separados zonalmente, uno antihorario al Este (occidental) que transporta  $0.006$  Sv y uno horario al Oeste (oriental) que transporta  $0.003$  Sv. La zona central presenta flujos hacia el Norte muy débiles y poco definidos, a excepción del mes de Junio que se generan flujos de retorno hacia el Norte entre los 35 y 40 km de la transecta.

Para el mes de Diciembre la circulación se torna muy débil y se pierde la estructura espacial de los giros (Fig. 5-24f).

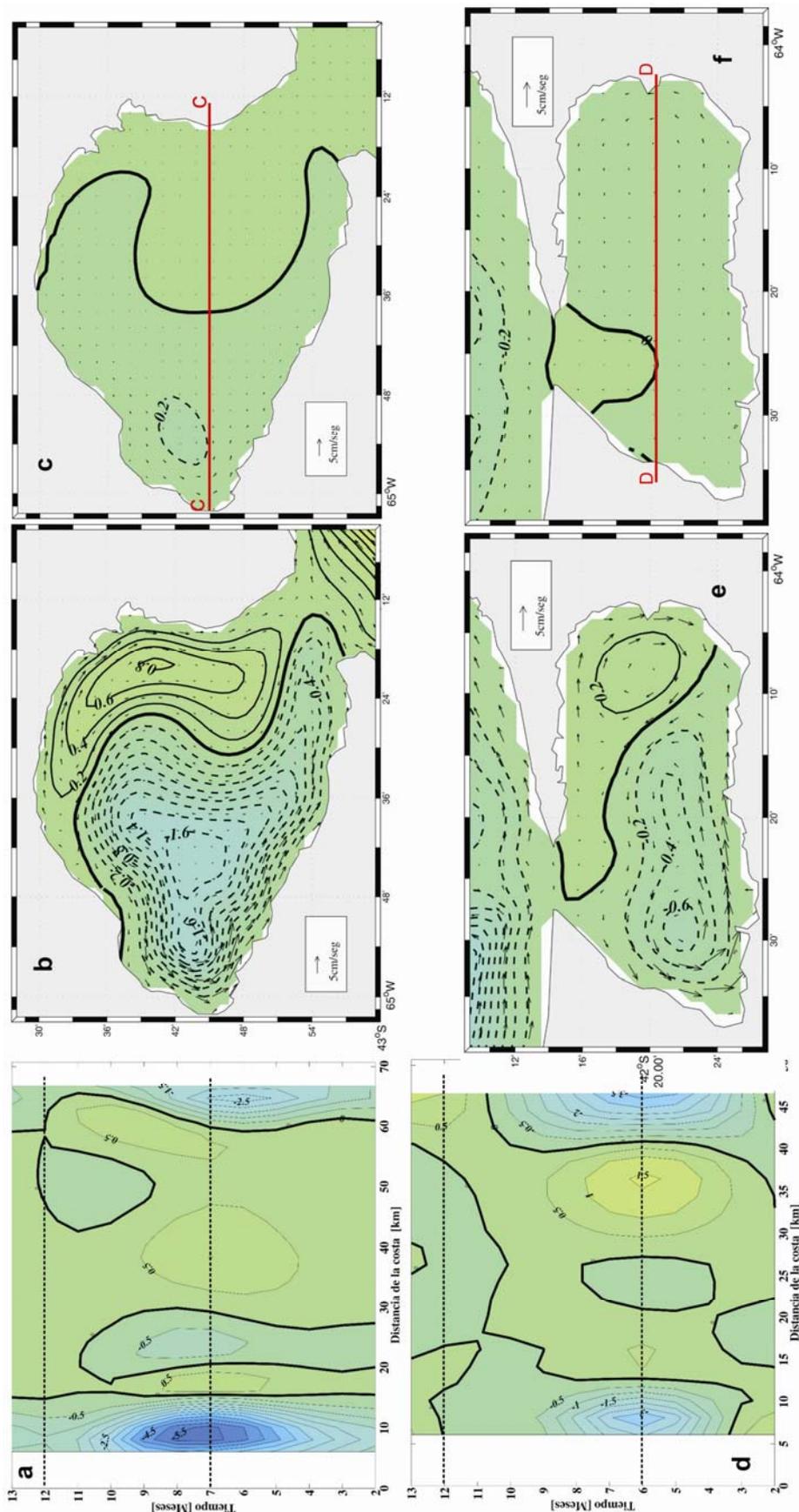


Figura 5-24. Estacionalidad de la circulación. a) Diagrama Hovmöller para la transecta C-C en el GN. b) Función corriente en el GN mes de Julio. c) Función corriente en el GN mes de Diciembre. Transecta de análisis C-C en línea roja. d) Hovmöller para la transecta D-D en el GSJ. e) Función corriente en el GSJ para el mes de Julio. f) Función corriente en el GSJ para el mes de Diciembre. Transecta de análisis D-D en línea roja.

## 5.6.2. Forzante de viento estacional SCOW (QuikSCAT) y marea

### 5.6.2.1. Circulación media estacional

La circulación media de los golfos cuando son forzados por vientos estacionales y marea (EQ3) puede observarse en la figura 5-25 y 5-26. La estructura de circulación resultante, presenta gran similitud para cada uno de los meses con patrones de circulación impuestos por marea, denotando la influencia del forzante por sobre el forzante de viento estacional al igual que en los casos idealizados. La circulación forzada por mareas y por mareas y vientos homogéneos fue analizada previamente, por lo tanto mostraremos aquí las diferencias principales que produce el forzante estacional de viento en la circulación media a través de los dos meses (Junio y Diciembre) que presentan la mayor variabilidad (sección 5.2.1). Debido a que los valores máximos (módulo máximo en el mes de Junio  $\sim 0.08$  Pa y  $\sim 0.04$  Pa en el mes de Diciembre) medios de los vientos estacionales son inferiores a los utilizados para experimentos de vientos medios (0.1 Pa), el efecto del forzante de viento sobre la circulación es sustancialmente menor en el caso estacional que en los casos idealizados.

Consistentemente con la magnitud de los vientos en ese mes, en Junio se producen las mayores modificaciones a la circulación impuesta por marea. Sobre la costa Oeste del GSM se genera una distribución de la circulación similar a la generada por los vientos zonales offshore y máxima magnitud, con un giro antihorario de 0.01 Sv. La influencia sobre esta costa modifica sustancialmente el giro horario en la zona Norte del GSM, con respecto al mes de Marzo (Fig. 5-25a). El GN modifica totalmente el sentido de circulación pasando de ser anticlónica a ciclónica. Sólo sobrevive un pequeño giro antihorario centrado en Bahía Nueva con un transporte de 0.01 Sv (Fig. 5-26a). El GSJ pareciera fortalecer mas la estructura del giro antihorario del dipolo interno, generando un subgiro sobre la costa Oeste.

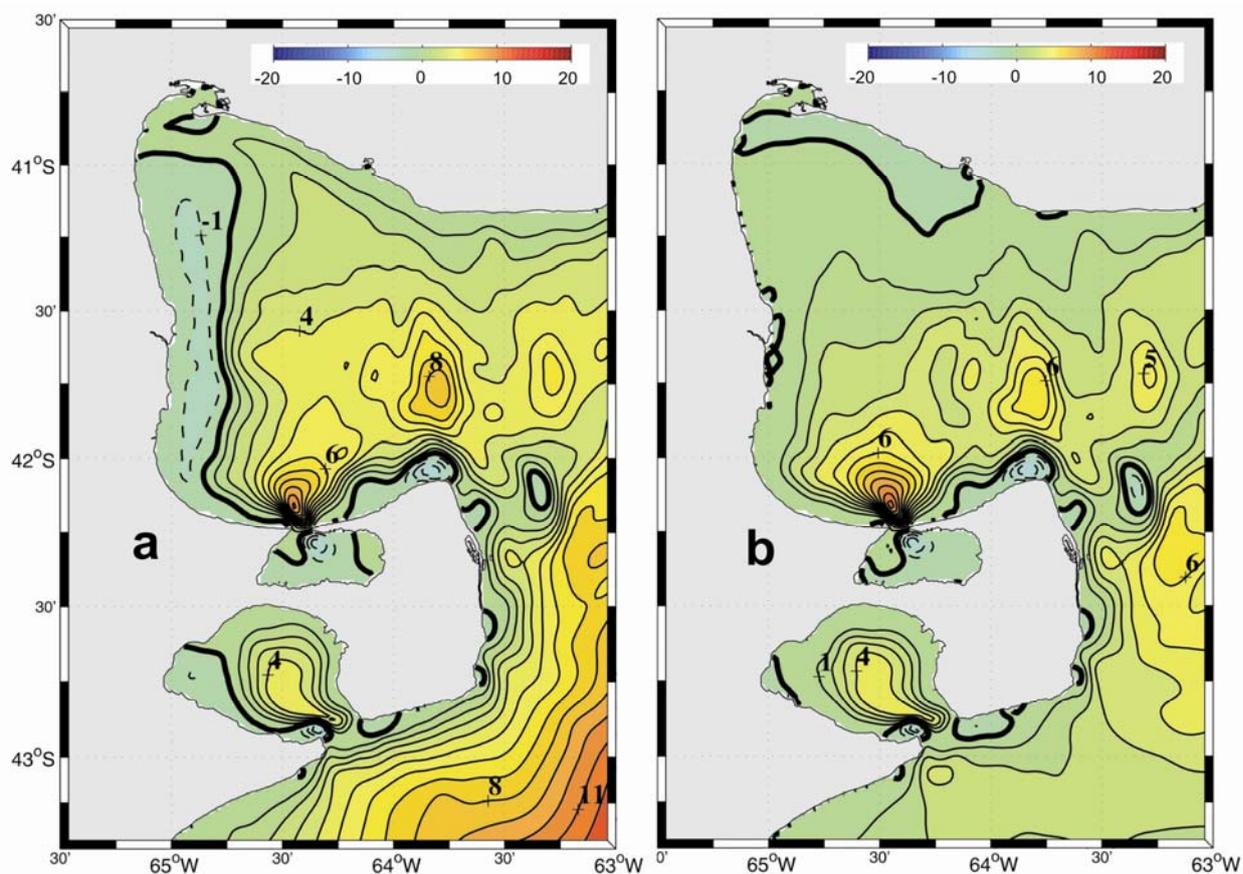


Figura 5-25. Función Corriente del EQ3 a partir de las velocidades medias. a) Junio y b) Diciembre. (IC=1) Líneas llenas indican circulación horaria y líneas interlineadas indican sentido antihorario.

En Diciembre, cuando el forzante de viento es de menor intensidad, la circulación cambia también de sentido e intensidad en el GSM transformándose en ciclónica y prácticamente dominada en su totalidad por el forzante de marea. Un débil giro antihorario sobrevive en la costa Norte (Fig. 5-25b). El GN no muestra modificaciones en intensidad en el giro horario y se inhibe el giro antihorario sobre la costa Oeste (Fig. 5-26b). El GSJ intensifica levemente el giro horario del dipolo interno ocupando un mayor sector sobre la costa Oeste del golfo (Fig. 5-26b).

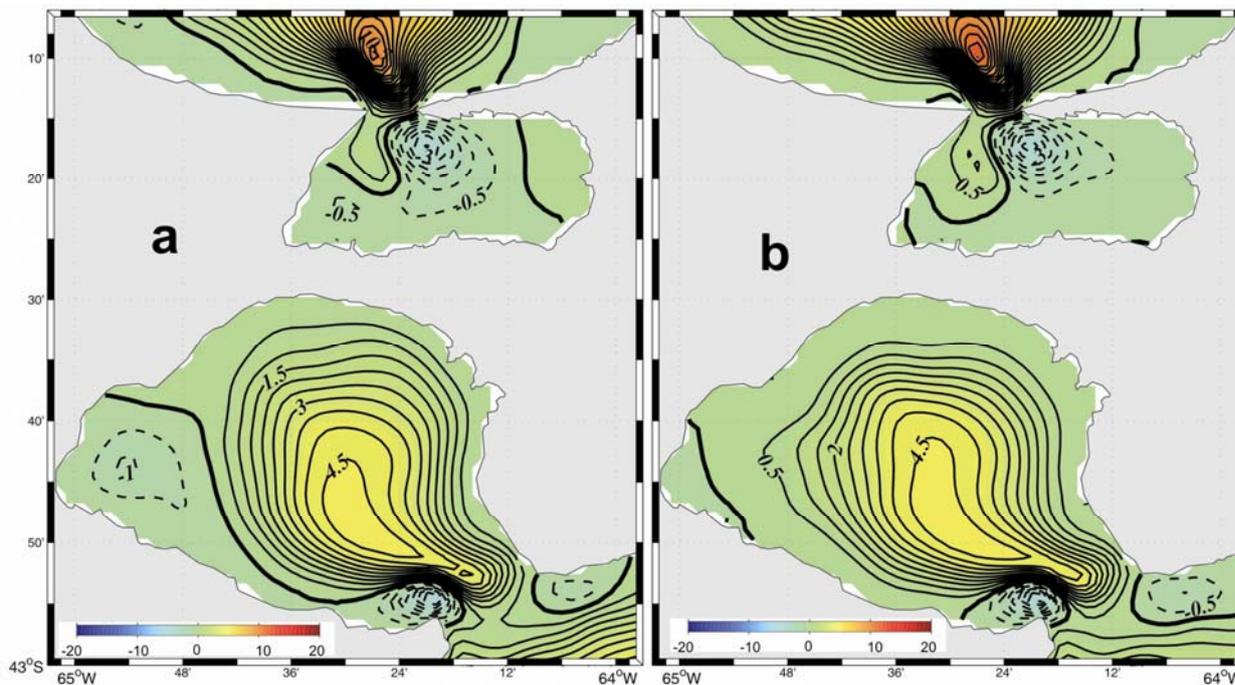


Figura 5-26. Función Corriente del EQ3 a partir de las velocidades medias para los golfos GN y GSJ. a) Mes de Junio y b) Diciembre. ( $IC=0.5$ ) Líneas llenas indican circulación horaria y líneas interlineadas indican sentido antihorario.

### 5.6.3. Flujo de intercambio en la boca de los golfos

En esta sección analizaremos el flujo de intercambio en la boca de los Golfos. Con el fin de tener una fácil visualización y comparación de las variaciones debido al forzante estacional, se muestran los transportes acumulados a través de las bocas para los cuatro meses característicos y para los experimentos de forzante de viento climatológico (EQ2) y forzante de viento climatológico más marea (EQ3). El signo positivo de la pendiente denota que el flujo ingresa a los golfos y los negativos, egreso.

El GSM, para el EQ2, muestra leves variaciones inter-mensuales del transporte en la boca, a excepción de los meses de invierno donde el viento genera grandes transportes relativos ( $0.025 \text{ Sv}$ ) con máximos a los 40 km de la costa Sur (Fig. 5-27a). En el resto del año las magnitudes de intercambio son muy débiles. Si adicionamos las corrientes residuales de marea, en relación a lo observado previamente, la marea controla la dinámica del transporte y en el caso del mes de Junio intensifica este transporte alcanzando un máximo de  $0.075 \text{ Sv}$  a 40 km de la costa Sur (Fig. 5-27b).

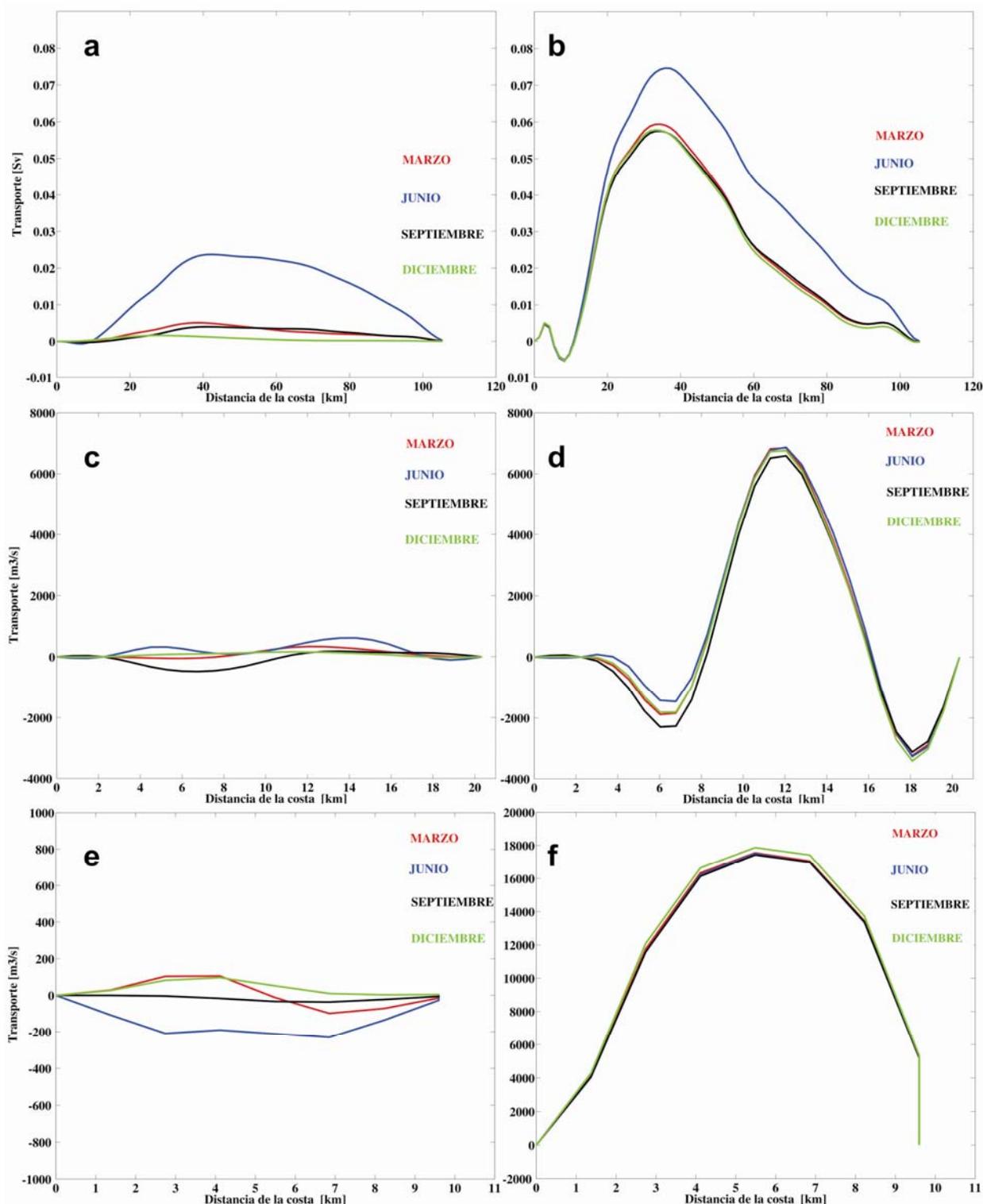


Figura 5-27. Transporte a través de la boca de los golfos para los experimentos de viento SCOW. GSM (Panel superior), GN (Panel central) y GSJ (Panel inferior). a), c) y e) EQ2. b), d) y f) EQ3.

En el GN y GSJ los transportes generados en la boca por el EQ2 son muy débiles alcanzando máximos de  $0.5 \cdot 10^{-3}$  Sv en el caso del GN para vientos de Septiembre y

$0.2 \cdot 10^{-3}$  Sv para el GSJ en los vientos de Junio (Fig. 5-27c y 5-27e). El transporte queda en su totalidad dominado por la marea (experimento EQ3) para ambos golfos. En el caso del GN se pueden observar leves variaciones en los primeros 10 km desde la costa Sur, pero el resto permanece invariante para el ciclo anual en magnitud y dirección (Fig. 5-27d). El GSJ, no muestra variaciones intermensuales significativas (Fig. 5-27f).

## 5.7. Discusión y conclusiones parciales

Rivas (1989) utilizó un modelo bidimensional lineal para estudiar el efecto de la intensidad y dirección del forzante de viento sobre las corrientes oceánicas en el GN. La acción disipativa de la marea fue incluida indirectamente mediante el aumento *ad-hoc* del coeficiente de fricción de fondo. El autor simuló tres experimentos durante 22 hrs aprox., uno con vientos del Oeste otro con vientos del Sur espacialmente homogéneos y un tercero (simulado por 2 días aprox.) con vientos variables cada una hora también espacialmente homogéneos. De acuerdo al análisis de la sección (5.2.1) ese tiempo de simulación parece corto comparado con el tiempo de respuesta de nuestro modelo. Los resultados indican que se generan flujos en la dirección del viento y paralelos a las costas que retornan por la zona central donde las variaciones de profundidad son más suaves. A pesar de que este comportamiento induciría patrones definidos de circulación (giros) dentro del GN similares a los calculados con nuestro modelo, no se hace mención a los mismos en el trabajo.

Glorioso y Simpson (1994) emplearon un modelo bidimensional de diferencias finitas para analizar la circulación barotrópica en la región de estudio. El énfasis del trabajo fue puesto en el la disipación de energía mareal en la región de PV y no se incluyen estudios del efecto de viento. Estos autores presentan un mapa de corrientes residuales de marea, pero la pobre resolución espacial del modelo no permite discernir patrones definidos de circulación en los Golfos San Matías y Nuevo. Mazio *et al.*, 2004 analizan las elevaciones y corrientes instantáneas inducidas por la marea en el GN y plataforma adyacente mediante un modelo bidimensional barotrópico, pero no describen la circulación residual resultante de la acción de la marea ni efectos del viento.

Akaprahamyan (1991) construyó el primer modelo numérico barotrópico de la región del GSM mediante la aplicación del modelo oceánico Bryan-Cox de diferencias finitas. La resolución espacial horizontal del modelo es escasa ( $\sim 15$  km) y utiliza una condición en la superficie denominada de tapa rígida, con lo cual no es posible simular la propagación de ondas superficiales (por ejemplo la marea). Se realizaron simulaciones mensuales forzadas con vientos constantes analíticos y con vientos climatológicos de Hellerman y Rosenstein (1983). Los resultados del modelo muestran que existen dos sistemas de circulación dentro del GSM forzados por los vientos predominantes del Oeste. Uno de ellos está compuesto por un giro antihorario al SO del Golfo y otro de circulación horaria, cercano a la boca del mismo, que realiza el intercambio de agua con la plataforma adyacente. El agua ingresaría de esta manera por el S y saldría por el N. Estos giros descritos se ajustan con buena aproximación a nuestros resultados para vientos del Oeste, aunque la intensidad descrita por los autores en el giro conectado a la boca y corrientes en PV pareciera ser mayor. Cuando comparamos con el EO2, desaparece el giro horario al Sur del GSM, denotando que quizás los autores utilizan una disipación menor a la generada naturalmente por nuestro modelo (a través del forzante mareal y el esquema de mezcla turbulenta). Los experimentos realizados con vientos del NO y SO comparan bastante bien con nuestros experimentos EN2 y ES2, con algunas diferencias lógicas de los vientos combinados. Los experimentos con vientos estacionales muestran que el intercambio del Golfo con la plataforma es más intenso en invierno-otoño que en primavera-verano. Sin embargo, salvo en los meses de mayor intensidad de viento (Junio) los patrones de circulación mostrados en los experimentos estacionales difieren en gran medida con los de nuestro modelo, posiblemente por las diferencias presentes entre las bases de datos de viento empleadas.

Los trabajos mencionados, aunque han contribuido a acrecentar el conocimiento sobre la circulación en la región, han dejando varias incógnitas sin resolver acerca de la tridimensionalidad y distribución vertical de campos de velocidad, respuesta dinámica a variaciones atmosféricas como fluctuaciones en la intensidad y magnitud del viento y efectos directos e indirectos de la marea en la circulación residual. En este Capítulo hemos tratado de responder algunas de esas preguntas analizando en detalle la respuesta barotrópica de los golfos Norpatagónicos cuando son forzados

simultáneamente con vientos y marea. Las conclusiones parciales que podemos extraer son las siguientes:

- La circulación inducida por viento del Oeste en los tres golfos responde a un patrón general, separando cada golfo zonalmente en dos giros, uno antihorario en el Oeste y otro horario en el Este. En el caso del GSM el giro Este es el que se comunica parcialmente con la plataforma. En el caso de los Golfos Nuevo y San José la comunicación con el exterior se halla muy restringida.
- El flujo superficial para el EO1 en los Golfos consiste en campos asociados a la capa de Ekman y al campo de presiones generado por el gradiente de elevaciones. En regiones profundas el flujo superficial gira hacia la izquierda respecto a la dirección del viento siguiendo la teoría de Ekman. El flujo de fondo presenta una estructura más compleja. Se observan giros de recirculación horarios en el GN y GSM que confirman la hipótesis de que a excepción de las zonas Sur y Norte de la boca, las aguas del Golfo por debajo de la capa de Ekman se hallan en buena medida aisladas de la Plataforma exterior. El GSJ muestra una estructura compuesta de dos giros tanto en superficie como en el fondo debido a la reducida profundidad.
- Cuando adicionamos el efecto disipativo de la marea se define una circulación más homogénea y reducida en el interior de los golfos con altas velocidades en las costas y una reducción muy importante de las corrientes en las bocas y zona NE de PV, aunque se mantienen los patrones de distribución de circulación anteriormente descriptos.
- Los balances de movimiento en dirección zonal muestran que en primer orden se establece un equilibrio entre el término de Coriolis, la difusión vertical y el gradiente de presiones, que controlan el giro antihorario sobre la costa Oeste del GSM. En la zona costera (0-15 km) el gradiente de presiones supera a la difusión vertical (el balance es mayormente geostrófico) y la corriente media se dirige hacia el Sur. En la zona central del Golfo, sin embargo, la difusión vertical es mayor al gradiente de presiones (el balance es mayormente de Ekman) y la corriente es hacia el Norte. El balance de

momento en dirección meridional es principalmente geostrófico, entre el gradiente de presión y la aceleración de Coriolis y según la importancia relativa de estos términos muestra dos zonas bien definidas al Sur y Norte de acuerdo a sus magnitudes.

- Los experimentos numéricos de sensibilidad a la magnitud del viento muestran que la misma impacta directamente sobre la intensidad de la circulación generada, tanto en la distribución espacial como tridimensional. A mayor intensidad del viento se intensifican los giros antihorarios sobre la costa Oeste e indirectamente los horarios, como así también el transporte en la boca del GSM y se profundiza notablemente la capa de Ekman afectada por los flujos superficiales.
- Los cambios de dirección en el viento muestran una estructura similar y opuesta de comportamiento para vientos zonales (Oeste y Este) y para los meridionales (Norte y Sur) tanto en elevaciones como en la función corriente. Sin embargo, la respuesta presenta leves no-linealidades dependiendo básicamente de la orientación de las costas que presentan surgencia (upwelling) o subsidencia (downwelling) con respecto a la dirección del viento. En el EE2 las costas alongshore favorables para la surgencia son las costas Norte de los golfos las cuales muestran un leve aumento de las elevaciones y jet costeros producidos, con respecto al generado en las mismas costas por vientos del Oeste. En los experimentos forzados con vientos meridionales la circulación media general responde con dos giros separados zonalmente cuyos centros se hallan en dirección NO. El giro Norte se halla completamente aislado de la plataforma externa mientras que el giro Sur establece una mejor conexión que los casos de viento zonal. El sentido de circulación de estos giros depende de la dirección del viento, siendo ciclónico (anticiclónico) el giro Norte y anticiclónico (ciclónico) el giro Sur para vientos del Sur (Norte). En el EN2 esta situación favorece la producción de surgencia en la costa Oeste del GSM y PV. Finalmente para el ES2 la dirección de viento favorece la surgencia en las costas Este, las cuales son muy reducidas o inexistentes en la región de estudio. Aumenta la diferencia de flujos costeros entre vientos que favorecen el downwelling (Sur) y el

upwelling (Norte), posiblemente por la longitud y orientación de la costa Oeste del GSM.

- Si adicionamos las corrientes residuales de marea la circulación media queda en gran medida dominada por estas últimas y se visualizan las características típicas analizadas en detalle en el Capítulo 4, como son los giros antihorarios al Norte de PV, los cuadrupolos a la entrada del GSJ y GN y el giro horario en el GSM y GN, producto de la rectificación de la onda de marea por variación de la topografía de fondo. Se hace necesaria la presencia de vientos de gran intensidad y principalmente del Norte o Este para romper algunas de las estructuras mencionadas. El balance dinámico impuesto por la marea se halla claramente representado en la boca del GSM y mayormente costa Sur del GSM entre fuerzas de advección (términos no-lineales) y gradiente de presión. Algo similar ocurre en las entradas del GSJ y GN. El forzante de viento tiene preponderancia mayormente en zonas cercanas a la costa donde la profundidad es baja y el gradiente de elevaciones puede ser comparativamente alto y equilibrado con la aceleración por Coriolis (balance geostrófico). Esto se puede visualizar en la costa Oeste del GSM y GN para vientos desde el Oeste y Costa Norte y Oeste de los mismos golfos para vientos desde el Norte.
- En los experimentos forzados con vientos y mareas podemos destacar que el GSM queda más aislado de aguas externas para los casos de viento Este y Sur, mientras que los golfos GN y GSJ logran variaciones en intensidad en los flujos de intercambio pero sin modificar su dinámica, siendo principalmente dominada por las corrientes residuales de marea. Los máximos transportes en el GN y GSM se obtienen para los vientos meridionales del Norte, tanto para el caso de viento y marea como viento solo. En el GSJ las variaciones del transporte de intercambio son mínimas con los cambios de dirección de viento.
- La circulación media forzada por vientos estacionales muestra una estructura más intensa y definida en las estaciones de Otoño e Invierno con patrones de circulación similares a los casos de viento homogéneo, mientras que en las

estaciones de primavera y verano la circulación es más débil y menos definida. El GSM muestra un giro horario con variaciones de intensidad en la parte central y giro antihorario sobre la costa Oeste en la estación de invierno. El GN muestra un giro antihorario que gobierna gran parte del golfo durante todo el ciclo anual y el GSJ con una circulación débil y poco definida.

- La inclusión de las corrientes residuales de marea modifica completamente la circulación media estacional, imponiendo una distribución muy similar a la generada por la marea. El GSM logra romper la estructura del giro horario sobre la costa Oeste y aparece un giro antihorario propio de los vientos offshore sólo en los meses de Junio y Julio. El GN modifica radicalmente su estructura de circulación manteniendo un giro horario durante todo el ciclo anual con leves modificaciones sobre Bahía Nueva y zonas de poca profundidad. El GSJ mantiene la estructura de circulación del dipolo interno durante todo el año, modificando de acuerdo al viento la costa Este de baja profundidad.
- Los aspectos generales del intercambio de flujo en las bocas de los golfos Norpatagónicos cuando son forzados con vientos estacionales muestran una mayor actividad de intercambio en los meses de invierno donde las componentes zonales intensifican la circulación en el interior y los jets costeros. El GSM, muestra una dependencia estacional del viento en el intercambio sobre la costa Norte, mientras que en la costa Sur, al igual que en los GN y GSJ, su intercambio está principalmente regulado por las corrientes residuales de marea.