

DINÁMICA OCEÁNICA EN LA REGIÓN DEL TALUD PATAGÓNICO

Eugenia Ascuaga^a, Elbio D. Palma^b y Ricardo P. Matano^c

^a*Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur.
(8000) Bahía Blanca, Argentina (e-mail: eascuaga@uns.edu.ar)*

^b*Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur y IADO-CONICET.
(8000) Bahía Blanca, Argentina (e-mail: uspalma@criba.edu.ar)*

^c*College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University, USA
(8000) Corvallis, Oregon, USA (e-mail: rmatano@coas.orst.edu)*

Palabras clave: Corrientes de talud, surgencia, talud patagónico.

Resumen. La región del talud de la Plataforma Continental Argentina es considerada una de las áreas de mayor productividad primaria del océano mundial. A diferencia de otras regiones de alta productividad caracterizadas por surgencia (*upwelling*) costera generada por el viento estacional, estudios recientes indican que en el caso de la plataforma y talud patagónico la surgencia estaría favorecida por la intrusión de nutrientes relacionados al flujo de la Corriente de Malvinas. Este trabajo se propone como objetivo ampliar estos estudios analizando la naturaleza de los procesos físicos básicos asociados al intercambio dinámico de propiedades entre la plataforma continental y el océano profundo mediante el empleo de modelos oceánicos simplificados. En el mismo se analiza la sensibilidad del mecanismo de intercambio ante variaciones ambientales (pendiente del talud, pendiente de la plataforma, fricción de fondo) y del forzante (intensidad y distribución transversal de la corriente incidente) con especial énfasis en la región Patagónica. Los resultados analíticos y numéricos sin variación longitudinal de la topografía muestran que la intensidad del intercambio a través del talud y la surgencia asociada aumenta con la intensidad de la corriente del talud, la pendiente del talud y el rozamiento del fondo. Variaciones en la forma del perfil de velocidades en el talud y del transporte de la corriente indican que la surgencia aumenta con el aumento del transporte, siendo la magnitud del flujo incidente en el borde de talud (punto de quiebre entre la pendiente de plataforma y talud) la variable con mayor incidencia en la intensidad de la surgencia. Por otro lado, la presencia de una corriente de plataforma en la misma dirección que la corriente de talud contrarresta la surgencia, pudiendo llegar, en algunos casos, a invertir el movimiento vertical en el borde de talud.

1 INTRODUCCION

La alta productividad primaria del océano no se halla uniformemente distribuida sino que se encuentra concentrada en regiones relativamente pequeñas y definidas, normalmente denominadas áreas de surgencia (upwelling). Usualmente, este término se emplea para describir procesos que causan el movimiento vertical de masas de agua desde profundidades del orden de 100 a 300 m hacia la superficie. Como generalmente la temperatura del océano disminuye con la profundidad, el agua surgente es más fría que las aguas superficiales a las cuales desplaza. Frecuentemente tiene más altas concentraciones de nutrientes (nitratos, fosfatos y silicatos) que las aguas superficiales, las cuales son usualmente pobres debido su utilización por el fitoplancton. Por lo tanto, las zonas de surgencia son generalmente regiones de alta productividad biológica. En Sudamérica, estas regiones se localizan sobre la costa chilena-peruana, el talud de la Plataforma Continental Argentina y regiones costeras de Uruguay y el sur de Brasil (Fig. 1.1.a) (Acha et al, 2004) y son consideradas entre las áreas económicas más importantes del mundo (Ecosistemas de Clase I, Bisbal, 1995; Constanza et al, 1997). La intensidad del fenómeno es particularmente notable en el talud continental argentino, donde la trayectoria de la Corriente de Malvinas se halla delimitada por un angosto e intenso florecimiento (bloom) de clorofila (Fig. 1.1.b). Esta elevada concentración de clorofila, una medida indirecta de la biomasa del fitoplancton, en el sector sur de la plataforma patagónica, sustenta una gran variedad de especies de bivalvos bentónicos, peces, aves, mamíferos, y una considerable riqueza ictícola (Acha et al., 2004; Bogazzi et al., 2005; Campagna et al., 1998).

La visión tradicional de los florecimientos de clorofila en otras regiones costeras de alta productividad, como la costa Chilena-Peruana está asociada a la surgencia de aguas de fondo producidas por el viento regional. Otra posible fuente de energía para el desarrollo de la surgencia en el talud lo presentan las inestabilidades (meandros y remolinos) de las corrientes de borde que están generalmente asociadas a regiones de alta estratificación (p.e. Corriente del Golfo, Loder et al, 1998). Aunque los florecimientos observados a lo largo de la trayectoria de la Corriente de Malvinas son indicativos del aporte de nutrientes de esta corriente a las capas superficiales, los mecanismos físicos responsables parecen ser diferentes a los mencionados. Por un lado, en la región patagónica los vientos medios son predominantemente de dirección costa afuera y por lo tanto no son favorables para el surgencia en el talud (Palma et al, 2004). Por otro lado, la estratificación oceánica en la región es débil (excepto por una capa superficial poco profunda en verano, Romero et al, 2006) y la corriente de Malvinas parece seguir una trayectoria sumamente estable a lo largo del talud (Matano et al, 2010). De esta manera, permanecen abiertos varios interrogantes sobre los posibles mecanismos físicos responsables del intercambio de propiedades entre el talud y la plataforma continental (p.e. nutrientes) que sustentan la alta productividad primaria observada en la Plataforma Argentina y cómo se comparan con los procesos existentes en otras regiones (p.e. la costa Chilena-Peruana).

La débil estratificación de la Plataforma patagónica junto con la estabilidad de la trayectoria de la Corriente de Malvinas permite el empleo de modelos teóricos simplificados para estudiar los intercambios con el océano profundo. Por ejemplo, Matano y Palma (2008) basados en la teoría de la Onda Topográfica Atrapada (OTA; Csanady, 1978), postularon que el mecanismo de surgencia sobre el talud continental patagónico estaría asociado a divergencias del flujo de la Corriente de Malvinas generado por efectos de fricción sobre topografía variable (Fig. 2) y verificaron la hipótesis mediante el empleo de un modelo

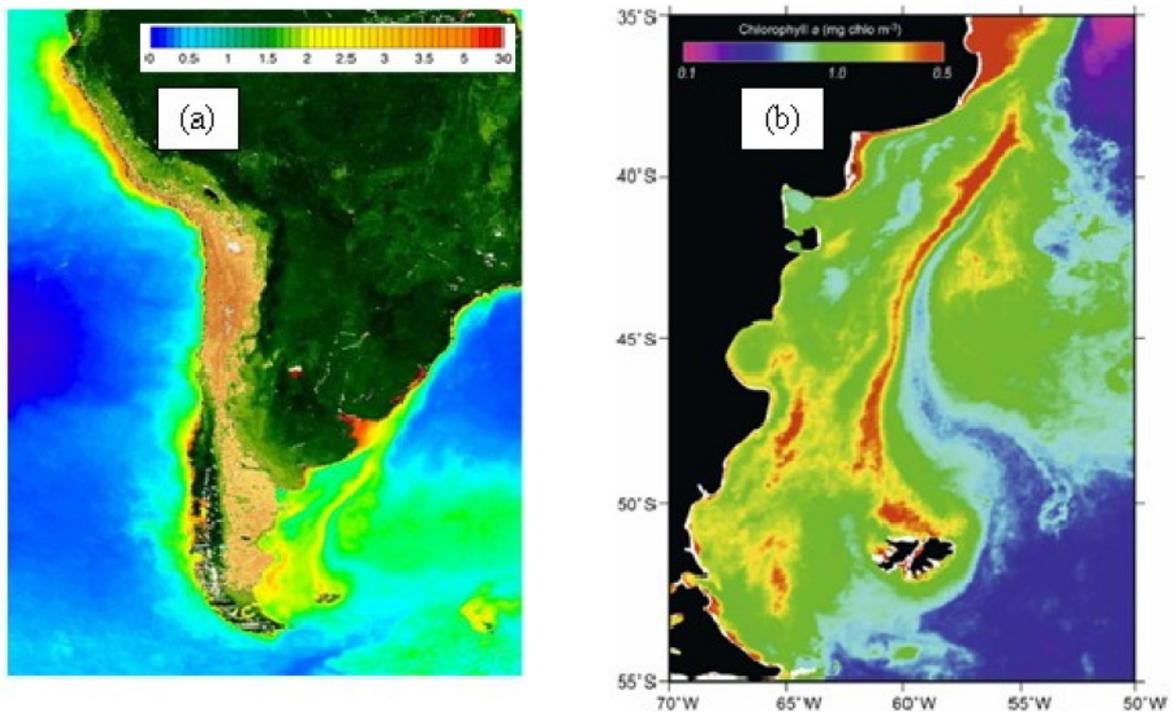


Figura 1: (a) Imágen de cloro_a superficial (mg/m³) sobre la costa de Sudamérica basada en datos del radiómetro espectral SeaWiFS de NASA. Se aprecian claramente las regiones de surgencia en la costa chilena-peruana y plataforma patagónica. (b) clorofila satelital en verano sobre la plataforma patagónica. Nótese el incremento de clorofila en concordancia con el talud (adaptado de Romero et al, 2006).

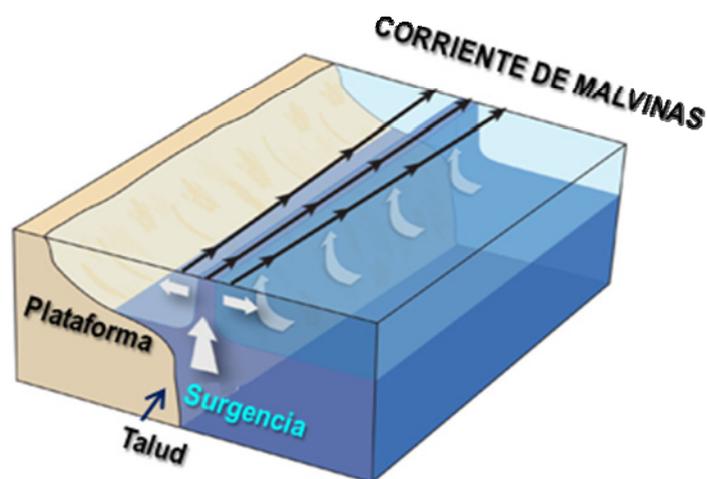


Figura 2: Diagrama esquemático que muestra la Corriente de Malvinas fluyendo hacia el Norte sobre el talud continental (flechas negras). La divergencia del flujo de esta Corriente por efectos de fricción generaría surgencia de aguas más frías (azul más intenso) hacia las capas superiores del océano (azul más claro). Adaptado de Matano y Palma (2008).

numérico tridimensional (Princeton Ocean Model, Blumberg y Mellor, 1987). La misma teoría de la OTA predice que la penetración de la corriente de Malvinas sobre la plataforma debería ser inversamente proporcional a la pendiente del talud (Hill, 1995). Regiones con pendiente más intensa deberían generar un menor intercambio que pendientes menos abruptas. Este trabajo se propone como objetivo ampliar estos estudios previos analizando la naturaleza de los procesos físicos básicos asociados al intercambio dinámico de propiedades entre la plataforma continental y el océano profundo mediante el empleo de modelos oceánicos simplificados. En el mismo se analiza la sensibilidad del mecanismo de intercambio ante variaciones ambientales (pendiente del talud, pendiente de la plataforma, fricción de fondo) y del forzante (intensidad y distribución transversal de la corriente incidente) con especial énfasis en la región Patagónica.

El trabajo está organizado en cuatro secciones. Luego de esta Introducción, en el Sección 2 se realiza un análisis físico detallado del modelo simplificado de OTA y sus limitaciones. En la sección 3 se presentan soluciones numéricas a las ecuaciones del modelo y se verifica su funcionamiento con soluciones analíticas conocidas. Posteriormente se emplea el modelo para identificar el efecto de los parámetros de la solución sobre el mecanismo de surgencia producida por corrientes de talud. Por último, en la sección 4 se presentan una discusión general de los resultados y las conclusiones.

2 METODOLOGIA

2.1 Ecuaciones del modelo

Partimos de las ecuaciones de continuidad y movimiento de aguas poco profundas (integradas en la vertical) y en estado estacionario (Csanady, 1982):

$$\nabla_H (D\bar{U}) = 0 \quad (1)$$

$$fD\mathbf{k} \times \bar{\mathbf{U}} = -gD\nabla_H \eta + \tau_w - \tau_b \quad (2)$$

donde

$$\bar{\mathbf{U}} = \frac{1}{D} \int_{-H}^{\eta} \mathbf{U} dz \quad (3)$$

es la velocidad media (promediada) en la vertical, H es la profundidad, η la elevación de la superficie libre, $D=H+\eta$ es la profundidad total, f es el parámetro de Coriolis, τ_b la fricción de fondo y τ_w el esfuerzo del viento en la superficie. En lo que sigue vamos a suponer que la fricción de fondo tiene una dependencia lineal con la velocidad promediada en la vertical:

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = -r(U, V) \quad (4)$$

donde τ_{bx}, τ_{by} son las componentes del vector fricción de fondo, r es un parámetro de fricción y U y V las componentes horizontales del vector velocidad \bar{U} . La forma final (expandida) de las ecuaciones a emplear en este trabajo queda entonces:

$$\frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (5a)$$

$$-fV = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - r \frac{U}{H} \quad (5b)$$

$$fU = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - r \frac{V}{H} \quad (5c)$$

Se puede obtener una simplificación adicional de las ecuaciones (5) si se considera que la topografía de fondo sólo varía en la dirección transversal a la costa (x) y que la escala de longitudes del fenómeno a estudiar en la dirección a lo largo de la costa (y) es mucho mayor que la transversal ($L \gg W$) (ver por ejemplo Miller et al, 2011). Si adicionalmente suponemos que no hay viento actuando en superficie, las ecuaciones se reducen a:

$$\frac{\partial(DU)}{\partial x} + \frac{\partial(DV)}{\partial y} = 0 \quad (6a)$$

$$-fV = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (6b)$$

$$fU = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - r \frac{V}{H} \quad (6c)$$

lo que equivale a despreciar la fricción de fondo en la dirección x . Si ahora tomamos el rotor de (6b) y (6c) y empleamos (6a), la ecuación resultante de vorticidad es:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} = -r \frac{\partial V}{\partial x} \quad (7)$$

Derivando (6b) según x y reemplazando en (7) se obtiene:

$$\frac{r}{f} g \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + g \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

La ecuación (8) es la denominada denomina Ecuación de Onda Topográfica Atrapada (OTA; Csanady, 1978) y será empleada en los experimentos numéricos presentados en la próxima sección.

Una vez obtenida la elevación de la superficie libre η , las componentes horizontales de la velocidad se obtienen de las ecs. (6b) y (6c). Para hallar la velocidad vertical integramos la ecuación de continuidad del flujo tridimensional:

$$\int_{-H(x,y)}^0 \frac{\partial w}{\partial z} dz = - \int_{-H(x,y)}^0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz \quad (9)$$

la cual bajo la hipótesis de flujo estacionario y tapa rígida ($w(0)=0$) se puede escribir en función de la divergencia de la velocidad horizontal promedio como:

$$w(-H) = H \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (10)$$

y tomando la divergencia de (6a,b) obtenemos finalmente:

$$w(-H) = -\frac{rH}{f} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V}{H} \right) = -\frac{r}{f} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{rV}{fH} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (11)$$

2.2. Física del problema

Consideremos el problema de determinar el estado estacionario del movimiento del océano en un dominio rectangular cuya distancia a lo largo de la costa (y) es L , la distancia perpendicular a la misma (x , transversal a la costa) es W y la profundidad varía solamente en la dirección transversal a la costa ($H = H(x)$). Ver esquema en las Figs. 3.1.a y b. Siguiendo las simplificaciones analizadas en la sección anterior, la ecuación que gobierna este problema (la elevación de la superficie libre) es la (8), la cual puede escribirse:

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} + \kappa \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0 \quad (12)$$

donde hemos definido : $s = \frac{\partial H}{\partial x}$ y $\kappa = \frac{r}{sf}$.

Si la pendiente topográfica es constante, entonces el factor $\kappa = r/(sf)$ es el equivalente a un coeficiente de difusión térmica que podríamos llamar coeficiente de difusión topográfica, donde r es el parámetro de fricción, f el parámetro de Coriolis y s la pendiente de la batimetría. Las condiciones de borde serían las siguientes:

i) En la costa ($x=0$), el flujo transversal debe ser nulo: $U = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0$

ii) En el borde oceánico ($x = W$) suponemos que la perturbación de elevación tiende a un valor constante: $\eta \rightarrow \eta_0$

iii) En el borde norte ($y=L$) proponemos: $\frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = 0$

Finalmente, el movimiento es inducido por una perturbación de la elevación impuesta en el borde sur ($y=0$) $\eta = \eta_s(x)$. Para ciertos perfiles de elevación es posible encontrar una solución analítica a este problema mediante el uso de transformadas de Laplace (Csanady, 1978). A pesar de su simplicidad, esta ecuación ha sido una herramienta importante para investigar las interacciones de la plataforma con el océano abierto. En el trabajo original de Csanady (1978) no había flujo en el talud y la pendiente de la plataforma era uniforme. La ecuación (12) es válida también si el dominio está compuesto de dos sectores con pendiente uniforme, pero diferentes en la región de la plataforma y en la del talud (s_1 y s_2 , Fig. 3b). Las soluciones obtenidas en cada región se unifican sometidas a la condición de continuidad de elevación de la superficie y velocidad en el borde de talud. Wang (1982) y Chapman (1986) consideraron la solución del modelo OTA incluyendo pendientes diferentes en la plataforma y en el talud pero estudiaron efectos de gradientes longitudinales en la zona profunda (Wang, 1982) o de flujos sobre la plataforma y el talud (Chapman, 1986). Fue Hill (1995) el primero que analizó aisladamente el efecto de una corriente de talud sobre la plataforma.

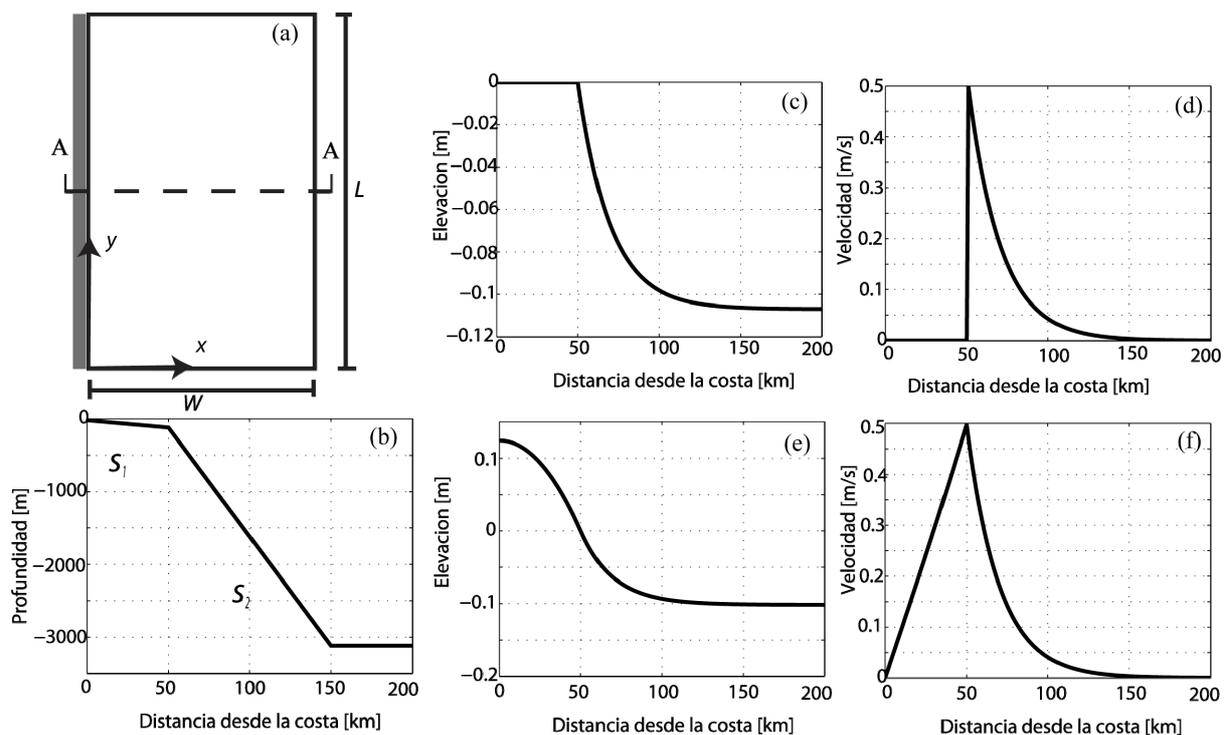


Figura 3: (a) Dominio del problema. (b) topografía del fondo a través de la sección A-A. (c) Elevación de la superficie libre en el borde sur para flujo en el talud (d) velocidad meridional (+y) asociada. (e) Elevación de la superficie para para flujo en la plataforma y el talud. (f) velocidad meridional asociada.

La Fig. 4 muestra la solución analítica del caso analizado por Hill (1995) y Miller et al, (2011) para una corriente impuesta en el talud (en el borde Sur) a través de una dada distribución de elevación de la superficie libre ($\eta_s(x)$, Fig. 3c) y para tres valores del coeficiente de difusión topográfico del talud (κ). En el primer caso, $\kappa = 0$ la plataforma se halla completamente aislada del flujo en el talud (Fig. 4a). En los casos siguientes, se observa que el gradiente de elevación impuesto en el borde sur se relaja (derrama) sobre la plataforma

en la dirección de propagación de las ondas costeras (hacia el norte en este caso) produciendo un balance estacionario de vorticidad, donde el mecanismo de estiramiento de tubos de vorticidad se compensa con el torque de la fricción de fondo (ec. 7). De acuerdo con la analogía del flujo de calor, pendientes más suaves (mayor s) deben permitir mayor penetración de aguas profundas que pendientes más pronunciadas (s más pequeño). Claramente, en el caso de menor pendiente (Fig. 4b) hay mucha más penetración que en el caso de mayor pendiente (Fig. 4c), consistente con la visión de que las pendientes más abruptas de talud son más efectivas a la hora de aislar la plataforma del talud. Recientemente, Miller et al (2011) extendieron la solución analítica del problema al caso de flujo en plataforma y talud. Este caso se analizará posteriormente.

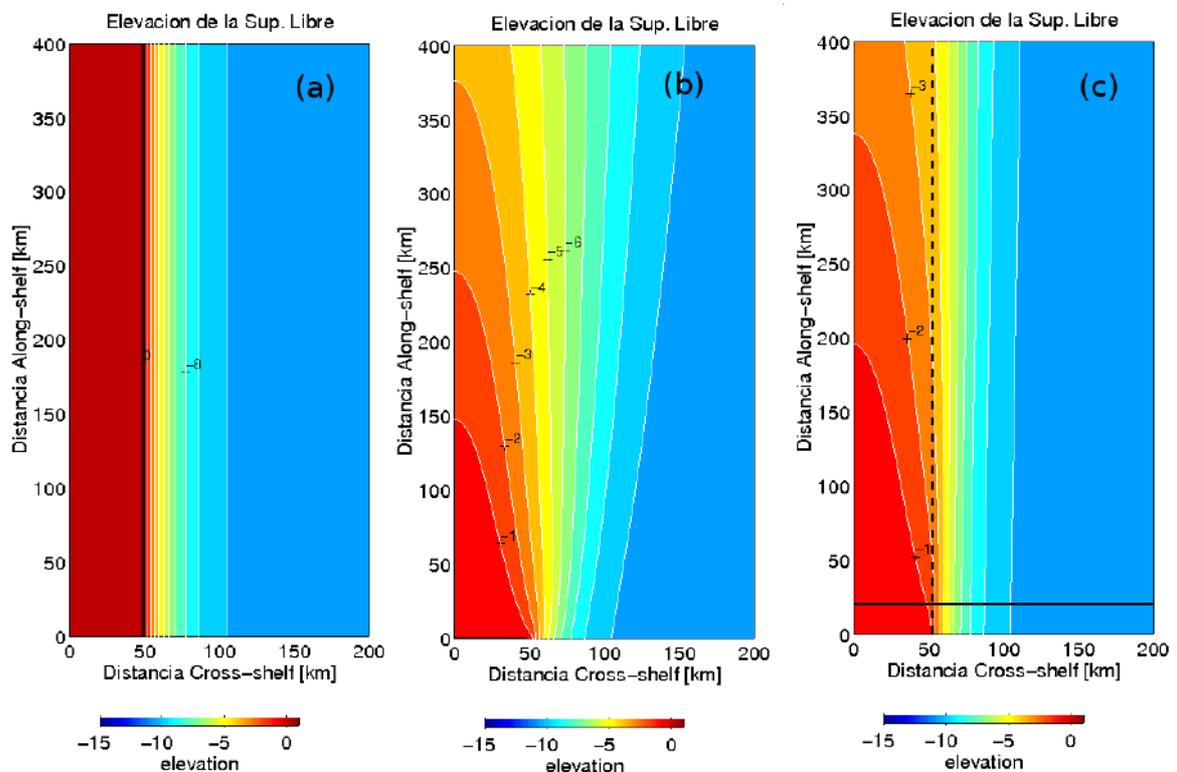


Figura 4: Elevación de la superficie libre para tres valores diferentes del coeficiente de difusión topográfico (a) $\kappa=0$, (b) $\kappa=1 \times 10^{-4}$, (c) $\kappa=5 \times 10^{-5}$. La línea punteada en el panel (c) marca la ubicación del borde del talud, la línea negra llena indica la sección transversal mostrada en la Fig. 5.

2.3. Hipótesis de la surgencia en el talud patagónico.

Las principales características de la región patagónica son una estratificación débil y una intensa corriente de talud (la Corriente de Malvinas). Para mostrar cómo éstas características conllevan al desarrollo de surgencia en la zona del talud consideremos nuevamente la ecuación (12). Las soluciones analíticas muestran que a medida que la corriente de talud avanza hacia el norte se abre en dirección perpendicular a la costa, extendiéndose en parte sobre la plataforma, mientras que el eje se desvía hacia aguas profundas (Fig. 4b y c). Matano y Palma (2008) plantean la hipótesis de que tales desplazamientos llevan a divergencia en el campo de velocidades próximo al talud, generando surgencia en dicha zona.

Observando los valores de velocidad vertical para las soluciones analíticas calculadas empleando la ec. (11) se encuentra que el derrame de aguas profundas sobre la plataforma está íntimamente relacionado con el fenómeno de surgencia. En la Fig. 5 se muestran gráficas de la velocidad vertical correspondientes a la solución analítica para $\kappa=5 \times 10^{-5}$, en un corte transversal (Fig. 5a) y otro longitudinal (Fig. 5b). Podemos ver que los valores que toma la velocidad resultan positivos y presentan un máximo que se encuentra precisamente sobre el borde de talud. La velocidad vertical además disminuye longitudinalmente desde el borde sur aunque permanece positiva por grandes distancias.

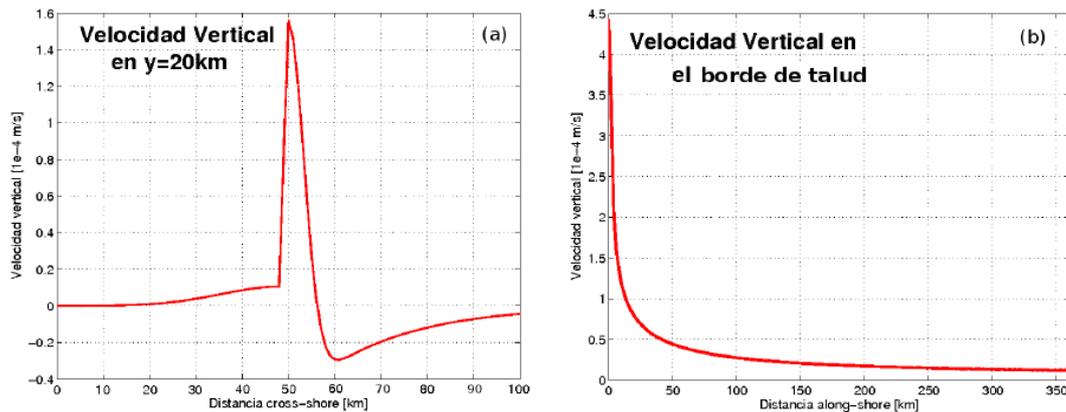


Figura 5: Cortes de la velocidad vertical para la solución analítica de Hill (1995) para $\kappa=5 \times 10^{-5}$, (a) transversal y (b) longitudinal. Los cortes se indican en la Fig.4c.

Dada la poca flexibilidad que presenta la resolución analítica para resolver casos con distintos perfiles de velocidad incidentes o con variaciones topográficas en la dirección de propagación, es evidente la necesidad de trabajar con soluciones numéricas que permitan estudiar una variedad de casos mucho más amplia. Para resolver numéricamente la ecuación gobernante del modelo OTA asociamos la coordenada longitudinal (y) con el tiempo y empleamos un método de diferencias finitas con esquema semi-implícito (en y) y diferencias centradas de segundo orden (en x). La verificación del funcionamiento del modelo numérico se realizó comparando con soluciones analíticas conocidas.

3 RESULTADOS

3.1. Reproducción de soluciones analíticas y surgencia.

Se mencionó anteriormente que el problema OTA en un dominio rectangular de dimensiones $W \times L$ km (Fig. 3a) tiene solución analítica para ciertas formas del perfil de elevación en el borde Sur ($\eta_s(x)$) (Miller et al, 2011). El perfil de elevaciones más general, que incluye flujo tanto en el talud como en la plataforma se muestra en la Fig. 3e junto con la velocidad de la corriente correspondiente Fig. 3f. El caso analizado por Hill (1995) corresponde a las Figs. 3c y d coincide sólo en la zona del talud, a partir de los 50 km de la costa, siendo el flujo nulo sobre la plataforma.

Para realizar la comparación con la solución numérica seleccionamos para las pendientes de plataforma y talud los valores $s_1=2 \times 10^{-3}$ y $s_2=3 \times 10^{-2}$ respectivamente, el rozamiento en el fondo, $r=1 \times 10^{-3}$ m/s, y la elevación de la superficie en el borde queda determinada por $\eta_0=0.1$, con una distancia de decaimiento $w=20$ km (Fig. 3c y e).

En la Fig. 6 se muestran los resultados de estado estacionario para la solución analítica (Fig. 6a) y numérica (Fig. 6b) del problema. El máximo valor de la diferencia entre la elevación de la superficie libre de ambas soluciones en cada punto fue de 2×10^{-3} . La Fig. 6c muestra la velocidad vertical en puntos sobre el borde de talud para ambas soluciones, y en el panel inferior un corte transversal de esa variable a 20km del borde Sur. Se observa buen acuerdo entre las soluciones.

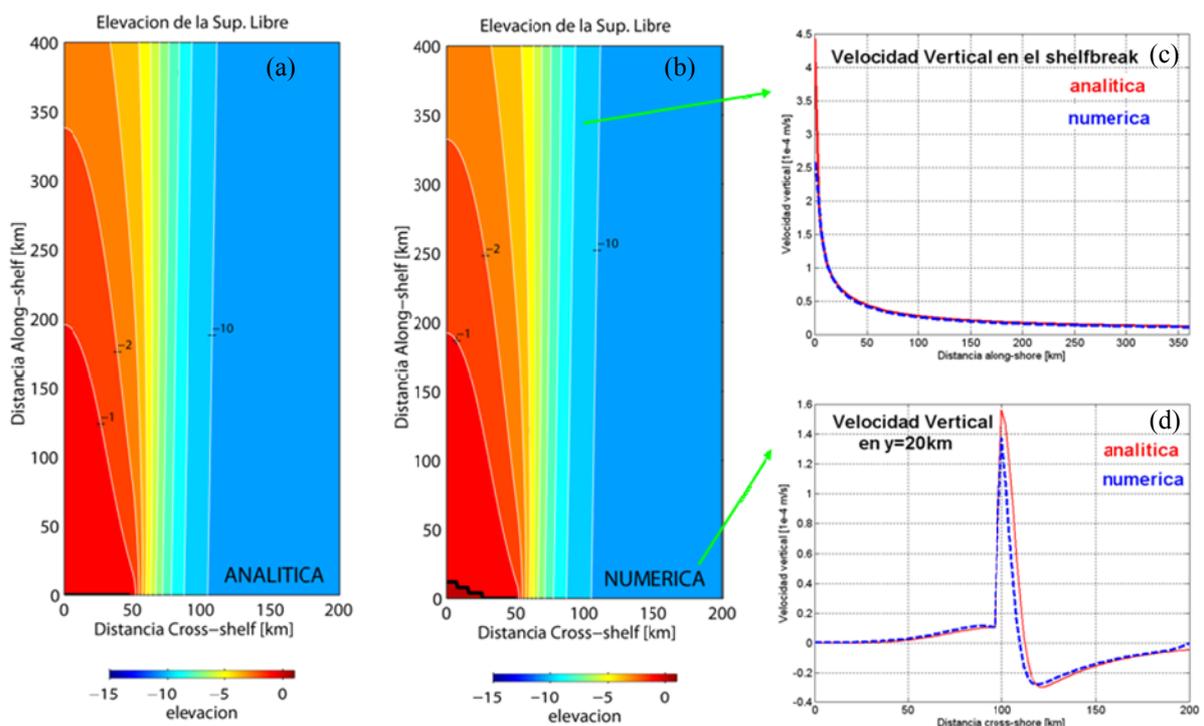


Figura 6: Comparación de solución analítica con el modelo OTA para el caso con flujo sobre el talud. Elevación de la superficie libre para la solución analítica (a) y numérica (b). Comparación de la velocidad vertical en el borde de talud para ambas soluciones (c) y en un corte transversal a la costa a 20km del borde Sur (d).

Recientemente Miller et al, (2011) extendieron la solución analítica de Hill para permitir la inclusión de flujo en la plataforma. En la Fig. 7 se muestra una comparación entre las soluciones analítica y numérica para este caso. Los paneles (a) y (b) muestran la elevación de la superficie obtenida en forma analítica y numérica respectivamente. La máxima diferencia que se encuentra entre ambas es menor a 1.1×10^{-3} . La Fig. 7c muestra un corte longitudinal de la velocidad vertical en los puntos situados sobre el borde de talud, y la Fig. 7d la velocidad vertical en un corte transversal a 20km del borde Sur. Es interesante notar que la adición del flujo en la plataforma disminuye en casi un orden de magnitud la surgencia en el borde de talud comparado con el flujo en el talud solamente (Fig. 6).

Como se observa en las gráficas, los resultados obtenidos en forma numérica reproducen los resultados analíticos de manera muy satisfactoria. Podemos decir que la rutina utilizada es confiable. Las soluciones analíticas empleadas para los experimentos analizados en esta sección pueden consultarse en Miller et al (2011).

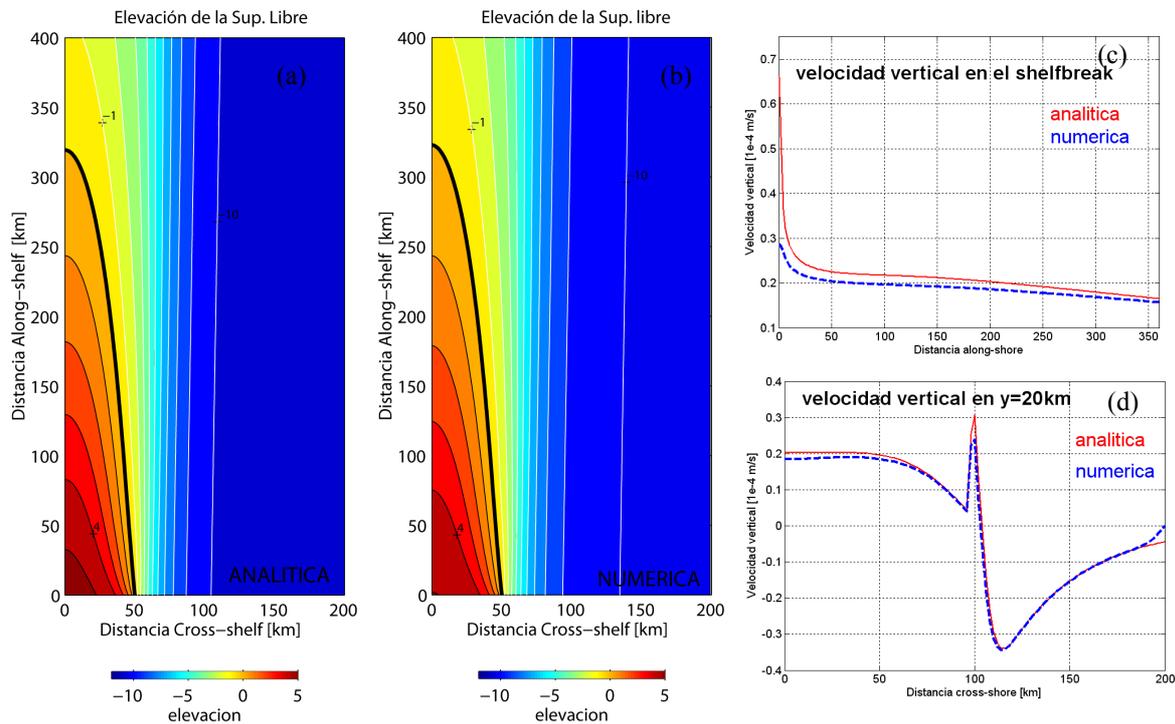


Figura 7: Comparación de solución analítica con el modelo OTA para el caso con flujo sobre el talud y plataforma. Elevación de la superficie libre para la solución analítica (a) y numérica (b). Comparación de la velocidad vertical en el borde de talud para ambas soluciones (c) y en un corte transversal a la costa a 20km del borde Sur (d).

3.2. Estudio Paramétrico

Una vez reproducidas con éxito las soluciones analíticas, se realizaron una serie de estudios paramétricos en el mismo dominio, con el fin de estudiar la variación de la surgencia en la zona del talud en función de los distintos parámetros del problema.

3.2.1. Pendiente topográfica.

En primer lugar se realizó una serie de experimentos variando el valor de la pendiente del talud, manteniendo los restantes parámetros fijos: pendiente de la plataforma, perfil del flujo incidente, rozamiento de fondo y parámetro de Coriolis. La corriente de talud consiste en un flujo uniforme de 0.5 m/s, el rozamiento de fondo $r = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ y el parámetro de Coriolis $f = -1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Se realizaron simulaciones para 20 valores distintos de pendiente de talud (s_2), manteniendo el valor de la pendiente de la plataforma (s_1) fija. Esto se repitió para tres valores de s_1 distintos.

La resolución en el eje x (transversal) es de 1 km y en el eje y (longitudinal) de 2 km. Para todos los experimentos se observó el valor de la componente vertical de la velocidad en un punto a 51 km de la costa, y 10 km del borde sur. La distancia al borde sur se eligió de manera tal que no haya perturbaciones debido a la cercanía al borde, y la distancia a la costa se determinó observando cuál era la zona de mayor surgencia, que resulta coincidente con el borde de talud. En la Fig. 8 se muestran los resultados obtenidos para valores de pendiente de la plataforma de 1×10^{-2} , 2×10^{-3} y 2×10^{-4} respectivamente. El valor de la pendiente de talud se

varió desde 1×10^{-2} a 2×10^{-1} .

Como se observa en la Fig. 8a la velocidad vertical se intensifica a medida que el talud se hace más empinado. A su vez, el efecto es más notorio en el caso en que la pendiente de la plataforma es menor, aunque todos los casos parecen converger al mismo valor cuando la

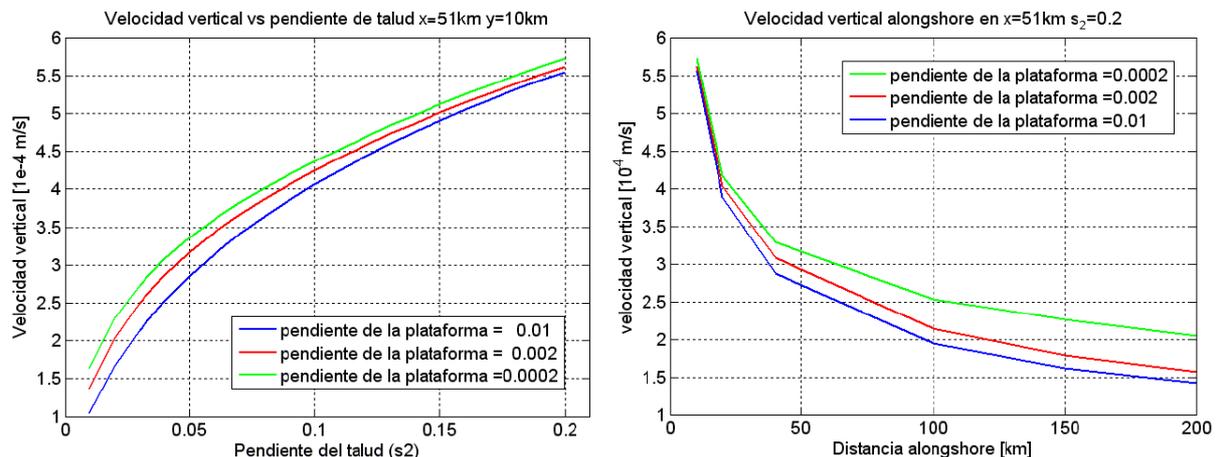


Figura 8: (a) Velocidad vertical en un punto situado sobre el borde de talud y a 10km del borde Sur, en función de la pendiente del talud, para tres valores distintos de pendiente en la plataforma. (b) Velocidad vertical a lo largo de la costa sobre el borde de talud para una pendiente de talud de 0.2, y para tres valores de pendiente en la plataforma distintos.

pendiente del talud es mayor. Es decir que a partir de cierto valor de pendiente en el talud las variaciones en la pendiente de la plataforma no introducen variaciones significativas en el valor de la velocidad vertical sobre el borde de talud en la zona cercana al borde Sur. El parámetro determinante es la pendiente del talud. Por otro lado, en la Fig. 8b se muestra la variación longitudinal de la velocidad vertical para el máximo valor de pendiente de talud analizado anteriormente. Como se observa en la gráfica anterior, cerca del borde Sur en todos los casos se alcanza un valor similar para la velocidad, pero a medida que nos alejamos, si bien el comportamiento de las tres es similar, el de menor pendiente en la plataforma persiste una distancia mayor. Nuevamente, para el caso en el que la diferencia de pendiente entre plataforma y talud es mayor, los valores de la velocidad vertical también lo son.

3.2.2. Fricción del fondo

Se estudió también el comportamiento de la surgencia a medida que se varía el rozamiento en el fondo. Se mantuvieron fijos los valores de las pendientes, $s_1 = 2 \times 10^{-3}$ y $s_2 = 3 \times 10^{-2}$, y el flujo incidente era uniforme de velocidad 0.5 m/s, aplicado sobre el talud. El valor de la fricción en el fondo se hizo variar desde 1×10^{-4} hasta 1×10^{-2} m/s. En la Fig. 9 se muestra el resultado obtenido para distintos puntos del dominio. Los puntos que se observaron están situados sobre el borde de talud, y avanzan a lo largo de la costa, alejándose del borde sur. Se observa que tanto los valores de velocidad vertical, como la tasa de crecimiento de los mismos son mayores cerca del borde sur, a medida que nos alejamos del mismo el efecto disminuye. En la curva correspondiente al resultado a 200km del borde Sur se observa que el valor de la velocidad vertical tiende a un valor constante. Esto indicaría que el efecto debido a un aumento en el rozamiento se difunde antes de los 200km, a medida que la corriente avanza longitudinalmente, siendo la velocidad en este punto independiente del rozamiento, para

valores del parámetro mayores a 2×10^{-3} .

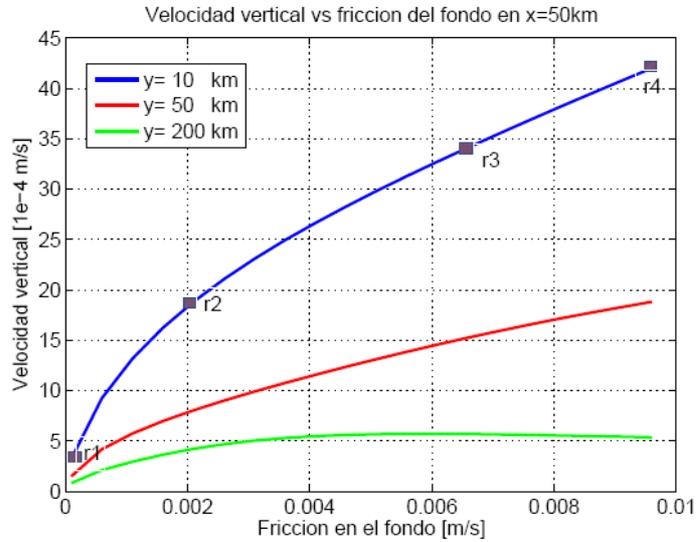


Figura 9: Velocidad vertical para puntos situados sobre el borde de talud en función de la fricción del fondo, a 10, 50 y 200km del borde Sur respectivamente.

En la Fig. 10 se muestra la elevación de la superficie para cuatro valores de rozamiento distintos, indicados en la Fig. 9. Como se ve a medida que aumenta el rozamiento la surgencia crece, lo cual se ve reflejado en un mayor derrame de la elevación de la superficie sobre la plataforma.

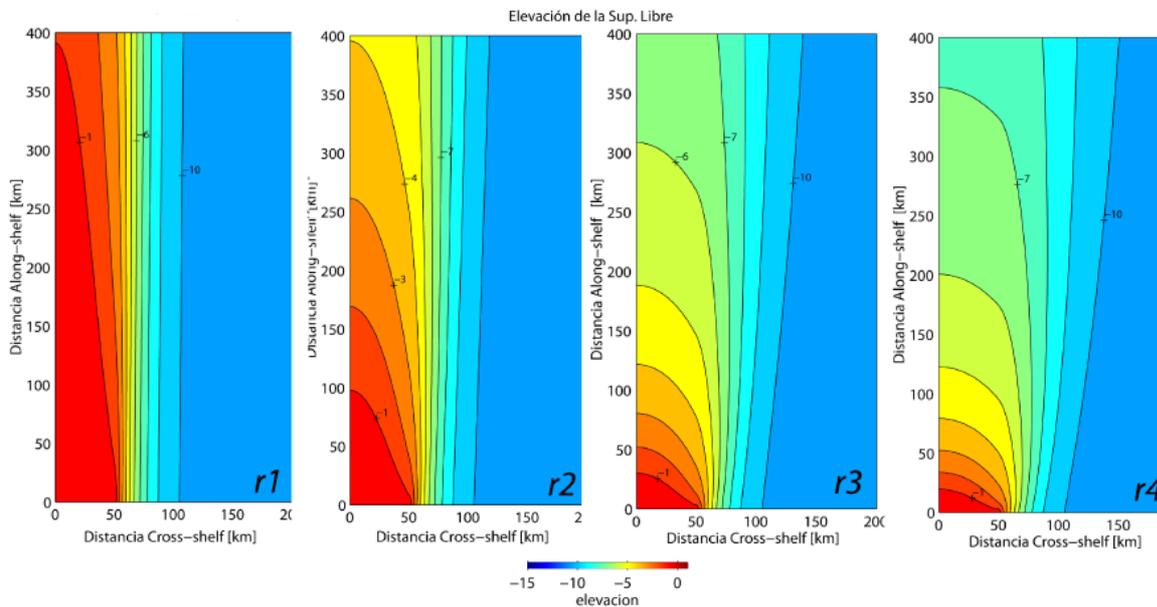


Figura 10: Elevación de la superficie para cuatro valores distintos de fricción en el fondo. Los valores son los señalados en la curva azul de la Fig.9.

3.2.3. Intensidad y forma del flujo incidente

En esta sección se estudió cómo varía la surgencia ante variaciones en el perfil de velocidad del flujo incidente en el borde Sur. Para observar el efecto del shear (corte) de la

corriente incidente sobre el talud, manteniendo el valor del flujo sobre el borde de talud fijo, se propone un perfil triangular cuyo valor máximo se encuentra en el punto medio del talud. Luego, se estudia el efecto de la intensidad del flujo incidente sobre el talud utilizando perfiles de velocidad uniforme a lo largo de todo el talud. Por último, se observó la variación de la surgencia en función de la corriente incidente sobre la plataforma, manteniendo el perfil triangular sobre el talud.

En la Fig. 11 se presentan los resultados para los perfiles prescritos. A la izquierda se muestran los perfiles de flujo incidente y a la derecha, con el mismo color que el perfil que la genera, la velocidad vertical sobre el borde de talud en un corte longitudinal. En los paneles (11a) y (11b) se muestra el efecto del corte. La línea sólida azul es prácticamente equivalente al caso sin corte. Puede observarse que la surgencia en el borde Sur presenta esencialmente el mismo valor para todos los casos, el cual decae hasta un valor final, diferente en cada caso, que persiste a lo largo del resto del dominio. A medida que aumenta el corte de la corriente incidente el valor de la velocidad vertical presenta un valor final mayor a lo largo del borde de talud. En los paneles (11c) y (11d) se muestra el efecto de la intensidad de flujo sobre el borde de talud. Los perfiles utilizados son de velocidad uniforme, y sólo varía su intensidad. Se observa que el aumento de flujo sobre el borde de talud produce un aumento en la surgencia a lo largo de todo el dominio. A igual valor del flujo en el borde de talud, sin embargo, la ausencia de corte produce un decaimiento a lo largo del dominio más rápido (comparar la curva azul de la Fig. 11b con la curva negra del panel 11d). Finalmente los paneles (11e) y (11f) presentan los resultados del efecto de variaciones de flujo incidente sobre la plataforma. Se observa claramente que a medida que aumenta la corriente incidente sobre la plataforma la velocidad vertical disminuye, es decir que este tipo de flujo contrarresta el efecto generado por el flujo sobre el talud.

Teniendo en cuenta estos resultados podemos decir que la magnitud del flujo incidente en el borde de talud es la que controla la magnitud de la surgencia, y el corte afecta a la persistencia de la misma sobre el borde de talud. Es decir, a igual flujo en el borde de talud la magnitud de la surgencia se mantiene por más distancia a lo largo de la costa si el flujo en el talud tiene un cierto corte. Realizando un análisis de la ecuación de la OTA (3.1) puede verse como aparece implícitamente este efecto. Teniendo en cuenta que las componentes de la velocidad horizontal pueden escribirse como:

$$u \sim \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad ; \quad v \sim \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (13)$$

y la ec. (12) queda:

$$u \sim \frac{\partial v}{\partial x} \quad (14)$$

lo que muestra como, aumentos en el corte (gradiente transversal) de la velocidad longitudinal (v) producen aumentos en la velocidad transversal (u), es decir que favorece el intercambio entre la plataforma y el océano profundo. Por último, si el flujo en plataforma es en la dirección del flujo en el talud la surgencia decae, si la corriente de plataforma se invierte en la plataforma interna y media la surgencia en el borde de talud se ve menos afectada aunque se mantiene inferior al caso sin flujo en plataforma.

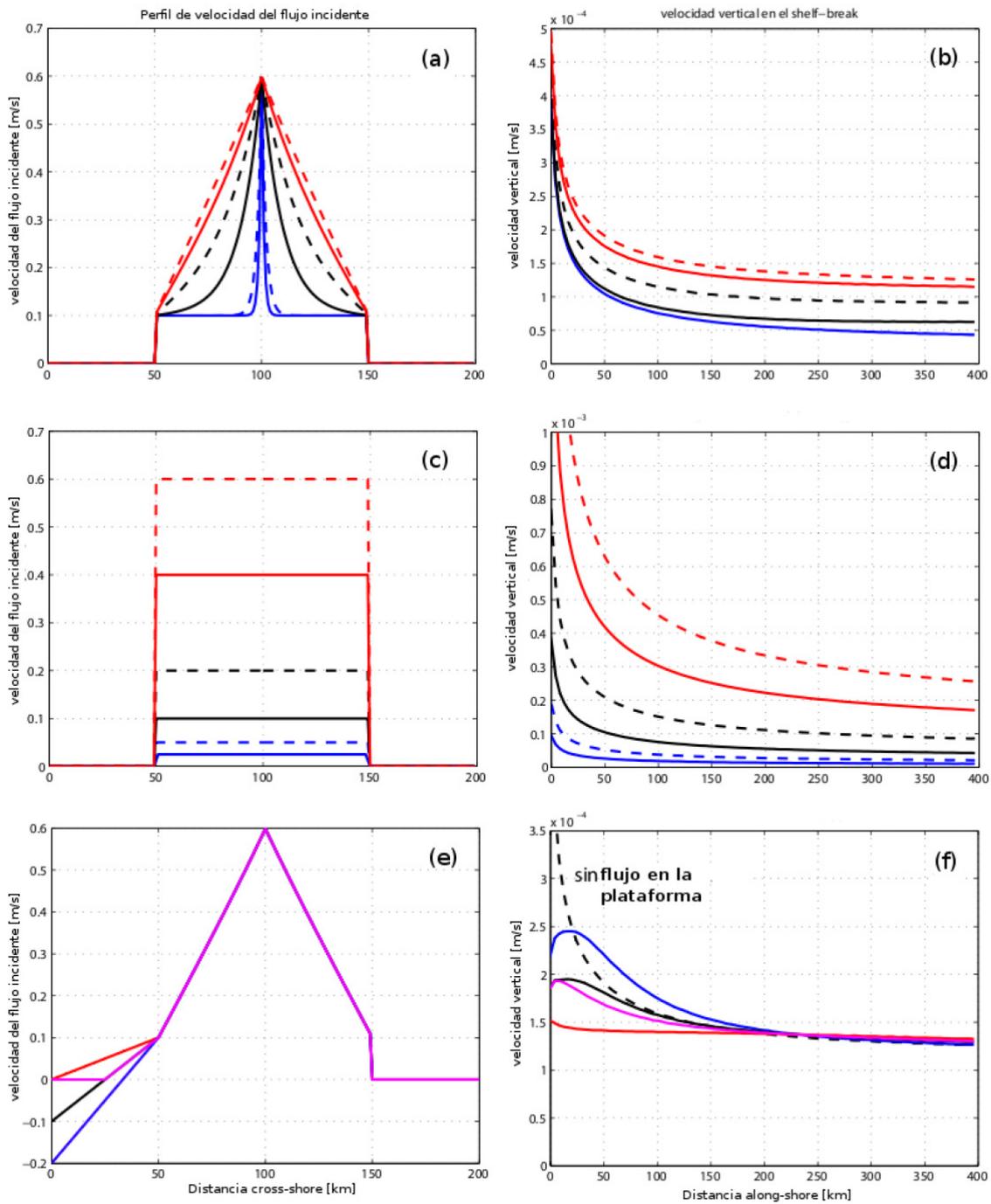


Figura 11: Paneles de la izquierda, perfiles de velocidad del flujo incidente, (a) variación del corte, (c) flujo uniforme sobre el talud, (e) variación del flujo incidente sobre la plataforma. Paneles de la derecha, corte longitudinal de la velocidad vertical para puntos sobre el borde de talud correspondientes a cada caso indicado.

Para completar el análisis, se llevaron a cabo dos corridas de veinte experimentos cada una, con el fin de conocer la forma en que varía la surgencia en función de la intensidad del flujo incidente. La simplicidad del modelo propuesto permite realizar cada una de estas simulaciones en pocos minutos. Trabajamos con flujos uniformes, primero sobre el talud, variando su intensidad entre 0.05m/s y 0.5m/s. Los resultados se muestran en la Fig. 12. Se puede observar que existe una clara dependencia lineal entre ambas magnitudes, y que al incrementarse el flujo incidente, aumenta la velocidad vertical sobre el borde de talud. A su vez se observa que a medida que la corriente avanza hacia el Norte, la intensidad del efecto disminuye, aunque no desaparece, al menos hasta los 200km del borde Sur, contrariamente a lo que sucedía en el caso del rozamiento. Es decir, la distancia en la que se difunde el efecto de un aumento en la corriente incidente es mayor a la del aumento de rozamiento. A modo de comparación adicional, agregamos en la misma figura tres puntos que corresponden a valores de velocidad vertical en el caso de flujo en el borde de talud de 0.1 m/s pero máximo corte,

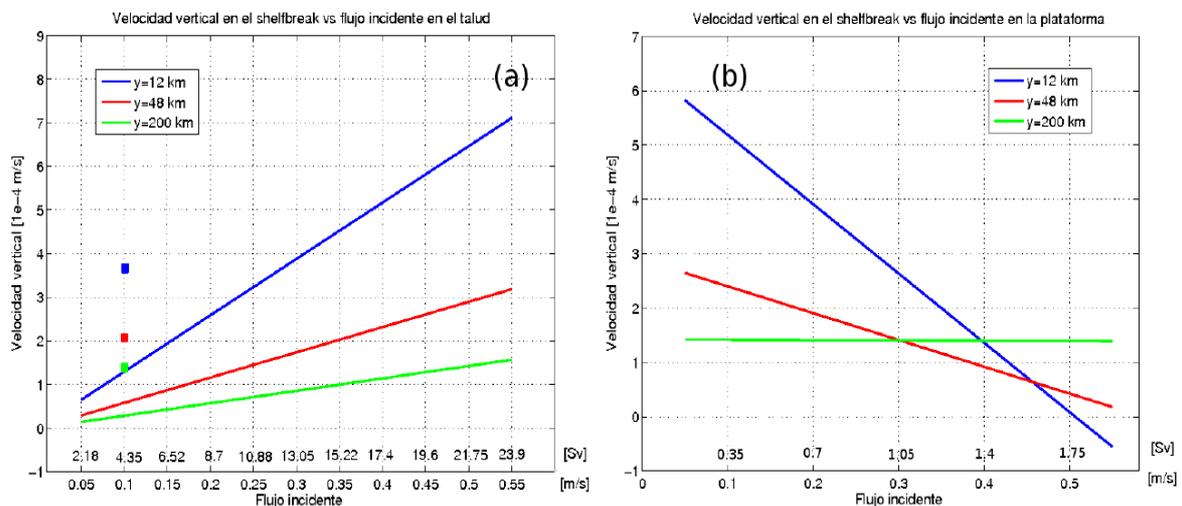


Figura 12: (a) Velocidad vertical en tres puntos situados sobre el borde de talud a 12, 48 y 200km del borde Sur respectivamente, en función del flujo de corriente incidente en el talud. Los puntos corresponden a un flujo con máximo corte y con flujo sobre el borde de talud de 0.1m/s. (b) Velocidad vertical en tres puntos situados sobre el borde de talud a 12, 48 y 200km del borde Sur respectivamente, en función del flujo de corriente incidente en la plataforma. Para todos los casos la corriente incidente sobre el talud es uniforme y con una intensidad de 0.5 m/s.

para las distancias a lo largo de la costa de 12 km (azul), 48km (rojo) y 200km (verde). Aquí volvemos a verificar el importante aumento de la surgencia que promueve el incremento del corte con valores cercanos a los correspondientes a un flujo uniforme de 0.35 m/s sobre el talud. El segundo experimento consistió en variar el flujo incidente sobre la plataforma, manteniendo en el talud un flujo fijo de 0.5m/s. En este caso el efecto observado es por el contrario inversamente proporcional a la intensidad del flujo incidente, (Fig. 12b). A medida que aumenta la velocidad de la corriente incidente, la velocidad vertical resultante decrece, llegando en el caso extremo a alcanzar valores negativos, dando cuenta de la generación de hundimiento. Aquí también, a medida que la corriente avanza hacia el Norte el efecto observado es menor, llegando a ser prácticamente nulo a 200km del borde Sur. Allí la velocidad vertical está gobernada por el flujo incidente sobre el talud, esto puede observarse comparando el valor constante de la velocidad vertical en el panel (b) con el valor alcanzado en el panel (a) para el mismo punto. Comparando entonces ambos efectos, nuevamente el

efecto de la variación de flujo sobre el talud persiste por distancias mayores que el correspondiente al aumento de flujo sobre la plataforma.

4 RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia la naturaleza de los procesos físicos básicos asociados al intercambio dinámico de propiedades entre la plataforma continental y el océano profundo mediante el empleo de modelos oceánicos simplificados. Particularmente se analiza la sensibilidad del mecanismo de intercambio ante variaciones ambientales (pendiente del talud, pendiente de la plataforma, fricción de fondo) y del forzante (intensidad y distribución transversal de la corriente incidente) con especial énfasis en la surgencia e intercambios plataforma-océano abierto en la región Patagónica.

Las principales características de esta región son una estratificación débil y una intensa corriente de talud (la Corriente de Malvinas). Las soluciones del modelo OTA de Hill (1995) muestran que a medida que la corriente de talud avanza hacia el Norte se derrama en dirección perpendicular a la costa, extendiéndose en parte sobre la plataforma, mientras que el eje se desvía hacia aguas profundas. Basándose en estos resultados Matano y Palma (2008) plantean la hipótesis de que tales desplazamientos llevan a divergencia en el campo de velocidades próximo al talud, generando surgencia en dicha zona. En este trabajo se extienden estudios previos empleando las soluciones numéricas del modelo OTA (topografía de fondo variando sólo en la dirección transversal a la costa) y su relación con la surgencia producida por una corriente de talud. Primeramente se comparan las soluciones numéricas del modelo con soluciones analíticas conocidas obteniéndose muy buena concordancia entre ambas. Posteriormente se extienden los resultados de Hill (1995) y Matano y Palma (2008) mediante un estudio paramétrico. Los resultados muestran que la surgencia aumenta con el incremento de la pendiente del talud y disminuye con el aumento de la pendiente de la plataforma. A su vez, el efecto es más notorio para el caso en que la pendiente de la plataforma es menor, aunque todos parecen converger al mismo valor cuando la pendiente del talud es mayor. Es decir que el parámetro topográfico determinante es la pendiente del talud. A partir de cierto valor de ese parámetro las variaciones en la pendiente de la plataforma no introducen variaciones significativas en el valor de la velocidad vertical sobre el borde de talud. Por otro lado, para un valor dado de pendiente de talud, la persistencia de la surgencia a lo largo del borde de talud es mayor cuanto menor es la pendiente de la plataforma. La surgencia también aumenta con la fricción del fondo, aunque no lo hace uniformemente a lo largo del dominio; más allá de los 200km del borde Sur los efectos debido a cambios en el parámetro de fricción son despreciables.

Los cambios en la magnitud y distribución lateral del flujo incidente en el borde Sur también afectan la magnitud de la surgencia. En particular, la surgencia es directamente proporcional a la intensidad de la corriente de talud y disminuye con el incremento de la corriente de la plataforma. Estos resultados son concordantes con los encontrados por Matano y Palma (2008) mediante el empleo de un modelo numérico diferente al desarrollado en este trabajo. Un resultado interesante se obtuvo al variar la distribución de flujo incidente en el borde sur. La magnitud del flujo incidente en el borde de talud es la que controla la magnitud de la surgencia, y el corte (shear) afecta a la persistencia de la misma sobre el borde de talud. Es decir, a igual flujo en el borde de talud la magnitud de la surgencia se mantiene por más distancia a lo largo de la costa si el flujo en el talud tiene un cierto corte.

REFERENCIAS

- Acha, E.M., H.W. Mianzan, R.A. Guerrero, M. Favero, and J. Bava, Marine fronts at the continental shelves of austral South America: Physical and ecological processes, *J. Mar. Syst.*, 44: 83-105, 2004.
- Bisbal, G. A., The Southeast South American shelf large marine ecosystem: Evolution and components, *Mar. Policy*, 19(1): 21-38, 1995.
- Blumberg, A. F., y G. L. Mellor, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three Dimensional Coastal Ocean Models*. Coastal Estuarine Sci., vol 4, edited by N. Heaps, 1-16, AGU Washington, D. C., 1987.
- Bogazzi, E., A. Baldoni, A. Rivas, P. Martos, R. Reta, J. M. Orensanz, M. Lasta, P. Dell'Arciprete, y F. Werner, Spatial correspondence between areas of concentration of Patagonian scallop (*Zygochlamys patagonica*) and frontal systems in the southwestern Atlantic. *Fish. Oceanogr.* 14:359-376, 2005.
- Campagna, C., F. Quintana, B. J. Le Boeuf, S. B. Blackwell, y D. E. Crocker, Diving behaviour and foraging ecology of female southern elephant seals from Patagonia., *Aquat. Mamm.*, 24(1): 1-11, 1998.
- Chapman D. C., A simple model on the formation and maintenance of the Shelf/Slope front in the Middle Atlantic Bight, *J. of Phys. Oceanogr.*, 1273-1279, 1986.
- Costanza, R., et al, The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387:253-280, 1997.
- Csanady, G.T., The Arrested Topographic Wave, *J. of Phys. Oceanogr.*, 8:47-63, 1978.
- Csanady, G. T., *Circulation in the Coastal Ocean*, Springer, 1982.
- Hill, A.E., Leakage of barotropic Slope Currents onto the Continental Shelf, *J. of Phys. Oceanogr.*, 1617-1621, 1995.
- Loder, J., B. Petrie, and G. Gawarkiewicz, *The coastal ocean of northeastern North America: A large-scale view.*, The Sea, A.R. Robinson and K.H. Brink, Eds., Vol.11, The Global Coastal Ocean, Wiley, 105-133, 1998.
- Matano, R. P., E. D. Palma, and A. R. Piola, The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation, *Ocean Sci.*, 6:983-995, 2010.
- Matano, R.P., and E.D. Palma, On the Upwelling of Downwelling Currents, *J. of Phys. Oceanogr.*, 38: 2482-2500, 2008.
- Miller R., R. P. Matano and E. D. Palma, Shelfbreak upwelling induced by alongshore currents: analytical and numerical results, *Journal of Fluid Mechanics* (in press), 2011.
- Palma, E.D., R. P. Matano, and A. R. Piola, A Numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf Circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing, *Journal of Geophysical Research*, 109, CO8014, doi:10.1029/2004JC002315, 2004.
- Romero, S.I., A.R. Piola, M. Charo and C.A.E. Garcia, Chlorophyll-a variability of Patagonia based on SeaWiFS data, *Journal of Geophysical Research*, 111, C05021, doi:10.1029/2005JC003244, 2006.
- Wang, D. P., Effects of Continental Slope on the mean Shelf Circulation, *J. of Phys. Oceanogr.*, 12:1524-1526, 1982.