



Ciencia y Tecnología del Mar

ISSN: 0716-2006

cona@shoa.cl

Comité Oceanográfico Nacional

Chile

Salinas, Sergio; Hormazábal, Samuel

Capacidad de transporte de la constricción de Meninea para un flujo de dos capas y el efecto de la corriente de marea

Ciencia y Tecnología del Mar, vol. 27, núm. 1, 2004, pp. 5-15

Comité Oceanográfico Nacional

Valparaíso, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62427101>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE LA CONSTRICCIÓN DE MENINEA PARA UN FLUJO DE DOS CAPAS Y EL EFECTO DE LA CORRIENTE DE MAREA

TRANSPORT CAPACITY OF THE MENINEA CONTRACTION WITH RESPECT TO TWO-LAYER FLOW AND THE EFFECT OF TIDAL CURRENT

SERGIO SALINAS (*)
SAMUEL HORMAZÁBAL (**)

(*) Escuela de Ciencias del Mar,
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

(**) PROFC,
Universidad de Concepción.

Recepción: 10 de marzo de 2003 – Versión corregida aceptada: 20 de noviembre de 2003.

RESUMEN

En la primavera de 1995, se instaló un anclaje con dos correntómetros sobre el umbral de la constricción de Meninea para un análisis inicial de corrientes. El experimento fue parte del programa multidisciplinario Cimar 1 Fiordos.

Durante 61 días se obtuvo las mediciones cada 30 minutos. Los correntómetros estaban instalados a 25 m y 40 m bajo la superficie del mar, en la profundidad de 60 m. La velocidad promedio fue de $15,9 \text{ cms}^{-1}$ hacia el norte en el correntómetro superior y de $2,0 \text{ cms}^{-1}$ hacia el sur en lo profundo. La variabilidad de las corrientes fue dominada por la corriente de marea de tipo semidiurno M2. Debido a la corriente de marea, crece la capacidad de transporte de la constricción con respecto al sistema de dos capas. El tiempo de residencia de las aguas al sur de la constricción es del orden de los 10 meses.

Palabras claves: Constricción, fiordo, marea, capacidad de transporte, Chile.

ABSTRACT

In the spring of 1995 an array of two current meters was deployed over the sill in the Meninea contraction for an initial examination of currents. The experiment was part of the multidisciplinary program Cimar-Fiordo 1. For 61 days data were recorded every 30th min. The current meters were placed 25 and 40 m below the sea surface, the bottom depth was 60 m. The mean velocity was 15.9 cms^{-1} to the north and 2.0 cms^{-1} to the south in the deepest one. Tidal currents M2 dominated the current's variability. Owing to the tidal current the transport capacity of the Meninea contraction relative to the two water masses increases. The residence time for the water on the southern side of the contraction is about 10 months.

Key words: Contraction, fjord, tide, transport capacity, Chile.

INTRODUCCIÓN

El intercambio de agua entre un estuario y el mar y los procesos físicos que lo afectan es un problema de creciente interés en el estudio del

extenso sistema estuarino austral de Chile (Pickard, 1971; Sievers & Prado, 1994; Pinochet & Salinas, 1996; Silva *et al.*, 1995; Silva *et al.*, 1998; Valle-Levinson *et al.*, 2002; Guzmán & Silva, 2002). Los estuarios que conectan los ríos con el mar tienen

una gran variedad de formas con diferente longitud y topografía. Esto determina la respuesta de cada estuario a los forzantes como descarga de agua, marea, viento y olas. Las corrientes que se originan y los diferentes procesos de mezcla determinan la intensidad del transporte, dispersión y depósito de los sedimentos proveniente de los ríos que descargan en el estuario.

El estudio del intercambio gravitacional de dos fluidos de diferente densidad, a través de una constricción que conecta una cuenca semi cerrada con el mar, fue desarrollado por Stommel & Farmer (1953) y, posteriormente, por Stigebrandt (1977), Long (1980) y Largier (1992), quienes estudiaron la capacidad de transporte de una constricción entre un estuario y el mar en un sistema estuarino de dos capas. La constricción puede controlar la salinidad en un estuario, imponiendo un límite máximo a este parámetro aunque aumente la energía de mezcla puesta en el estuario para un sistema de intercambio de dos capas. Esto debido a que la constricción tiene una capacidad de transporte con un límite superior, lo que restringe la profundidad de la capa superficial. Stigebrandt (1977), Long (1980) y Largier (1992) utilizan la relación de flujo hidráulico para dos capas para un flujo no viscoso y sin mezcla entre las capas en la región de control sobre la constricción:

$$(1) G^2 = F_1^2 + F_2^2 \quad G: \text{flujo hidráulico} \quad F_i: \text{número de Froude. } F_i = u_i^2 / g' H_i; \quad g' = g(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$$

Con u_i , H_i , ρ_i ($i=1,2$): velocidad, profundidad y densidad de la capa superior e inferior.

Para un aporte débil de agua fresca al estuario, Stigebrandt (1977) obtiene para el límite de máximo transporte la relación de control hidráulico sobre la constricción:

$$(2) G^2 = u_1^2 / g' H_1 + u_2^2 / g' H_2 = 1 \quad H_1 \approx H_2 \approx H/2$$

En un fiordo con fuerte constricción, un intenso efecto de marea con una corriente barotrópica mayor que la corriente estuarina, puede anular el control hidráulico dado por la ecuación (2) y así aumentar la capacidad de transporte de la constricción (Stigebrandt, 1980).

El tiempo de residencia de las aguas profundas en un fiordo, está determinado principalmente por la capacidad de transporte de la constricción, la tasa de disminución de la densidad del agua profunda y es casi insensible a la variación del ancho de la constricción, cuando el efecto de la corriente barotrópica es importante (Stigebrandt, 1979).

La circulación gravitacional en un estuario es afectada por el viento. Rattray & Hansen (1965) sugieren que inclusive un viento débil puede tener un efecto notable sobre la circulación. Esto originaría variación del tiempo de residencia al sur de la constricción de Meninea.

La variación temporal de densidad al sur de la constricción en el canal Moraleda (Fig. 1), permitiría calcular el transporte de nutrientes y la variación de la concentración de oxígeno en el interior del fiordo.

De la investigación desarrollada en los fiordos escandinavos (Gade 1973, Aure & Stigebrandt, 1990) se obtiene que el intercambio de agua entre los fiordos y el mar, transporta nutrientes hacia los fiordos en un factor veinte veces mayor que el transporte vertical de nutrientes de origen vegetal desde la superficie y antropogénico. En forma análoga, el transporte de nutrientes en el fiordo Aysén, sería gobernado principalmente por la capacidad de transporte del tipo de intercambio de agua entre las cuencas sobre la constricción.

El objetivo de este trabajo es estudiar el tipo de corriente y determinar el rango del tiempo de residencia de las aguas en la cuenca al sur de Meninea en el canal Moraleda mediante observaciones en la constricción de Meninea. Además se analizan las condiciones del control hidráulico y la máxima capacidad de transporte de la constricción por el efecto de la corriente de marea.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la constricción de Meninea en el canal Moraleda (45° 15',6 S; 73° 39',6 W) se realizó un estudio de las corrientes mediante dos correntómetros, ubicados en un anclaje, a 25 m y 40 m de profundidad en el veril de 60. Las mediciones se realizaron en el período comprendido entre el 3 de septiembre y 8 de noviembre de 1995, durante la campaña de mediciones del proyecto Cimar 1 Fiordos. Los datos que se analizan son series de rapidez y dirección de la corriente en cms^{-1} a intervalos de 30 minutos sobre el umbral de la constricción de Meninea y nivel del mar medido en la estación de Melinka (43° 54' S; 73° 45' W).

Para el análisis estadístico básico se calculó las componentes ortogonales y se determinó el ángulo de máxima varianza, asociado al eje de máxima varianza, para las dos profundidades. Como forma de estimar el desplazamiento de una porción de agua en un campo homogéneo, no



Fig. 1: Ubicación del anclaje de dos correntómetros sobre la constricción de Meninea.
 Fig. 1: Location of the array of two currents meter over the Meninea contraction.

acelerado, se calculó el vector progresivo de la corriente en las dos profundidades.

Para el análisis de la onda de marea, se obtuvieron las componentes principales de la corriente de marea aplicando el método de Foreman (1993). La circulación residual estuarina se obtuvo restando las componentes astronómicas del flujo oscilante de marea de la serie de mediciones de corriente.

La serie de tiempo de dirección y rapidez del flujo, medido por cada instrumento, se descompuso en componentes ortogonales en la dirección de la máxima y mínima varianza de la corriente. Cada componente fue filtrado mediante un filtro de paso bajo Lanczos con período de corte de 34 horas, para separar las oscilaciones de marea de las fluctuaciones de corrientes residual asociada con el forzamiento distinto a la marea.

Para obtener el tiempo de residencia en la cuenca encerrada por la constricción de Meninea, se aplicó un modelo de dos capas de conserva-

ción de masa y volumen; se calculó el volumen de los cuerpos de agua mediante la estimación de área y profundidad a partir de la carta N° 800 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y para el caudal mensual de agua del río Aysén (Tabla I) se utilizó la información de la empresa INGENDESA.

Tabla I. Aporte medio mensual del río Aysén.

Table I. Supplies of freshwater from Aysén river.

MES	QMM (m^3s^{-1})	MES	QMM (m^3s^{-1})
ENE.	616	JUL.	611
FEB.	497	AGO.	623
MAR.	424	SEP.	653
ABR.	535	OCT.	706
MAY.	811	NOV.	847
JUN.	692	DIC.	785

Para el análisis por espectro rotacional las series de corriente y nivel del mar se filtraron con un filtro triangular de tres pesos (0,25 0,5 0,25) y luego se remuestreó cada una hora. Las series

horarias se utilizaron para el análisis espectral (espectro rotatorio). Por otra parte, las series horarias se filtraron con un coseno Lanczos de 181 pesos y una amplitud media de 60 horas.

Para calcular la capacidad máxima de transporte de la constricción de Meninea se utilizó la relación (2) propuesta por Stigebrandt (1977). Se estimó la profundidad de 60 m para la constricción, 30 m ($H_1=H_2$) para cada capa y valores de σ_t de 22,0 ($\pm 0,5$) kgm^{-3} para la capa superior y 24,0 kgm^{-3} para la capa profunda. Se obtuvo la corriente media para cada capa. Además se utilizan los parámetros de la constricción de Meninea dado en la Tabla II.

Tabla II. Parámetros de la cuenca al sur para calcular la capacidad de transporte de la constricción de Meninea.

Table II. Southern basin parameters to compute transport capacity of the Meninea contraction.

a= 1,0 m	H= 60 m
T= $4,5 \cdot 10^4$ s	g= 10 ms^{-2}
A= $2,4 \cdot 10^9 \text{ m}^2$	V= $2,9 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$

a: amplitud de la marea; T: período de marea M_2 ; A: área superficial cuenca sur; H: profundidad del agua en la constricción; V: volumen total de la cuenca sur.

RESULTADOS

En la constricción de Meninea, en el período de estudio, las corrientes medidas a 25 m de profundidad se encuentran alineadas con el eje del canal Moraleda (Fig. 1). El eje de máxima varianza de $357^\circ,9$ explica el 98% de la varianza total de la serie. La componente a lo largo de la constricción tiene un promedio de $15,9 \text{ cm}^{-1}$ hacia el norte, con un valor máximo de $104,8 \text{ cm}^{-1}$ hacia el norte y de $94,1 \text{ cm}^{-1}$ hacia el sur. El correntómetro ubicado a 40 m de profundidad muestra corrientes alineadas con el eje del canal. El eje de máxima varianza de $351^\circ,8$ explica el 93% de la varianza total de la serie del correntómetro profundo. La componente a lo largo de la constricción tiene un promedio de $2,0 \text{ cm}^{-1}$ hacia el sur, con un valor máximo de $75,1 \text{ cm}^{-1}$ hacia el norte y de $77,3 \text{ cm}^{-1}$ hacia el sur.

Las corrientes de ambos correntómetros pre-

Tabla III. Componentes armónicas de la corriente de marea.

Table III. Harmonic constituents of tidal currents.

H (m)\Velocidad (cm^{-1})	M2	S2	N2
25	58,5	17,5	12,2
40	44,5	13,9	8,4

sentaron una gran variabilidad causada por la onda de marea que se propaga a través del canal Moraleda. Las principales componentes armónicas de la marea corresponden a las semidiurnas, dadas en la Tabla III. El desplazamiento de una partícula, bajo la influencia de la onda semidiurna, es del orden de 13 km a 25 m de profundidad y de 10 km a 40 m de profundidad.

Los resultados del análisis espectral (Fig. 2) indican que la mayor energía en ambos correntómetros se encuentra en la banda de período 12,6 horas; y en menor grado en los períodos 6,2 horas y 26,4 horas. Esto indica el carácter semidiurno de las fluctuaciones de la corriente.

El diagrama de vector progresivo de la corriente (Fig. 3), indica que una partícula afectada por un campo homogéneo de corrientes durante el período de estudio, se desplazaría 900 km hacia el norte, a 25 m de profundidad, y 200 km hacia el sudeste a 40 m de profundidad.

En las series filtradas de la corriente en las dos profundidades (Fig. 4), se observa la predominancia de la circulación de tipo baroclina saliendo desde la cuenca hacia el norte por la capa superficial y penetrando hacia el sur por la capa profunda durante eventos entre 1 y 10 días, con velocidades del orden de 15 cms^{-1} . En la figura 4 se observan eventos de flujo barotrópico entre el 14 y 16 de septiembre en que se tiene una anomalía positiva del nivel del mar en la estación de Melinka con una corriente residual hacia el sur en toda la columna de agua. Otro evento barotrópico de menor intensidad se observa el 25 de septiembre con flujo hacia el sur en toda la columna. Un flujo residual barotrópico débil hacia el norte se tiene el 11 de octubre. Las corrientes transversales a la constricción en ambos correntómetros (Fig. 5), son de baja intensidad y gran variabilidad.

Aplicando el principio de conservación de masa y salinidad al sistema encerrado por la constricción de Meninea y considerando que la cuenca recibe un aporte significativo de agua dulce, para un flujo superficial que sale a través de una capa de 30 m de espesor con una velocidad media en el período de medición de 16 cms^{-1} y que el flujo profundo penetra por una capa de 30 m de espesor, se obtiene un tiempo de residencia de las aguas de 12 meses. Si se usa el volumen total encerrado por la constricción al sur de Meninea de $2,9 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$ ($\pm 10\%$); un alcance del desplazamiento de 13 km ($\pm 1\%$) durante la marea semidiurna de 12,5 horas; un ancho promedio del estuario de 15 km ($\pm 5\%$) y una variación media del nivel del mar

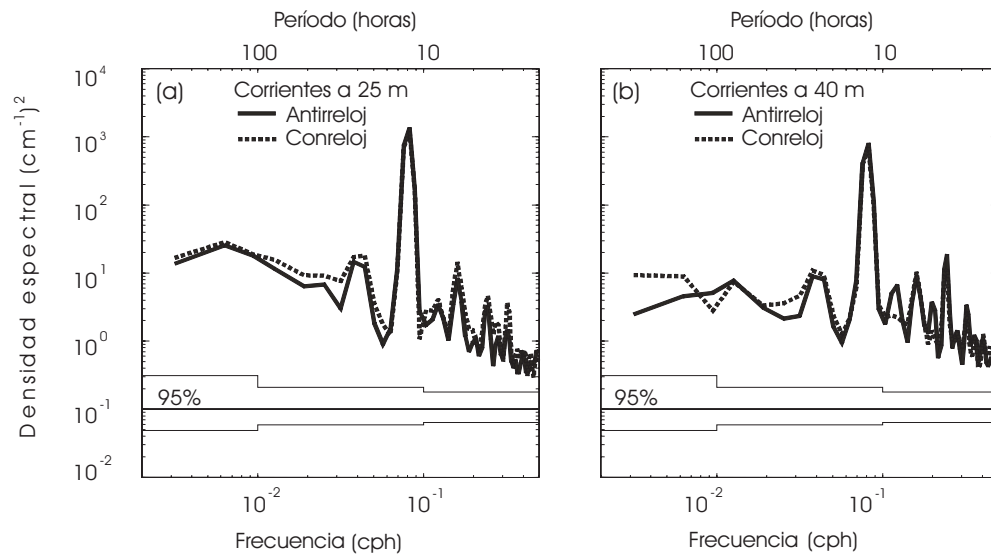


Fig. 2: Espectro de frecuencia de la corriente a) 25 m b) 40 m.

Fig. 2: Spectral frequency of current. a) 25 m b) 40 m.

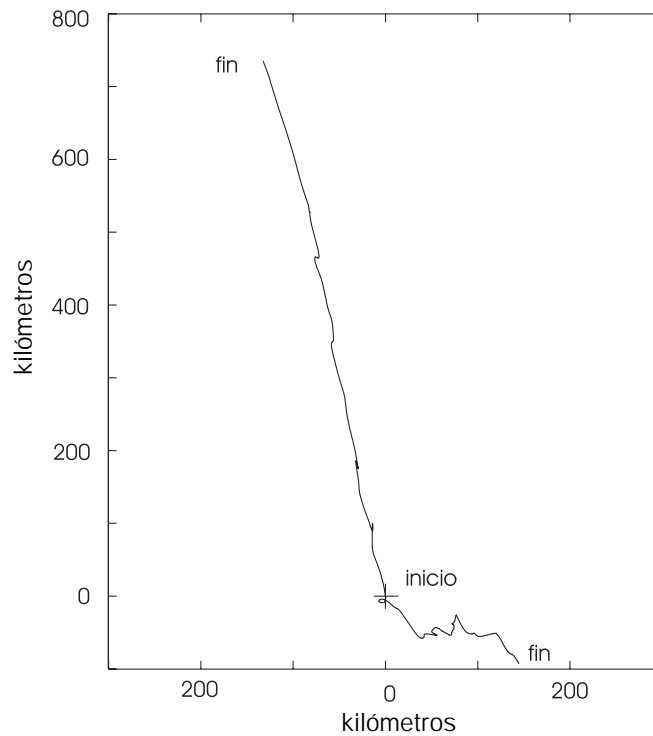


Fig. 3: Diagrama de vector progresivo: a) 25 m profundidad b) 40 m profundidad.

Fig. 3: Progressive vector diagram: a) 25 m depth b) 40 m depth.

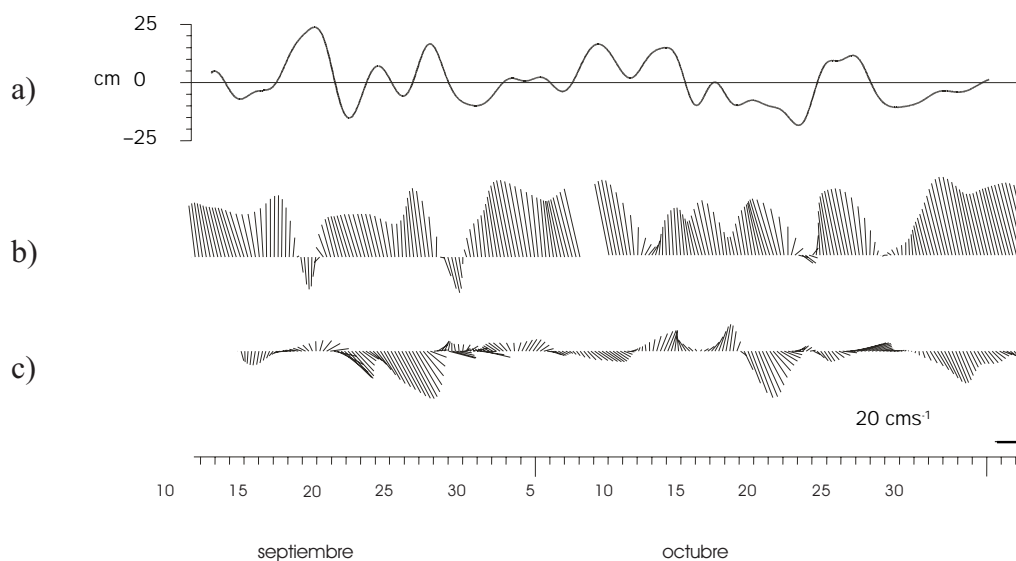


Fig. 4: Series filtradas de: a) nivel del mar, b) vector de corrientes a 25 m, c) vector de corrientes a 40 m.

Fig. 4: Time series of: a) sea level, b) currents vectors at 25 m depth, c) currents vectors at 40 m depth.

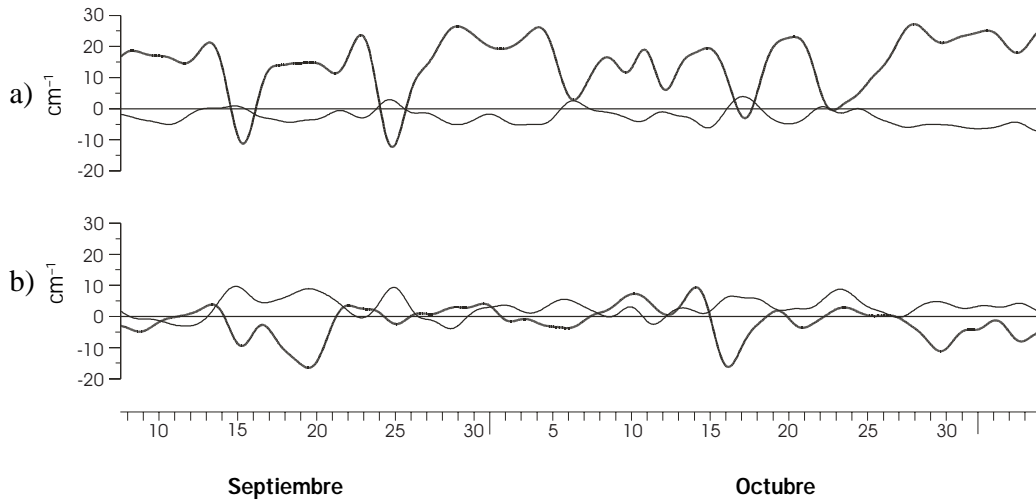


Fig. 5a: Series de tiempo las corrientes a 25 m: (-) transversal a la constricción u , (-) a lo largo de la constricción v .

Fig. 5a: Time series at 25 m depth: (-) cross contraction currents u , (-) along channel currents v .

Fig. 5b: Series de tiempo las corrientes a 40 m: (-) transversal a la constricción u , (-) a lo largo de la constricción v .

Fig. 5b: Time series at 40 m depth: (-) cross contraction currents u , (-) along channel currents v .

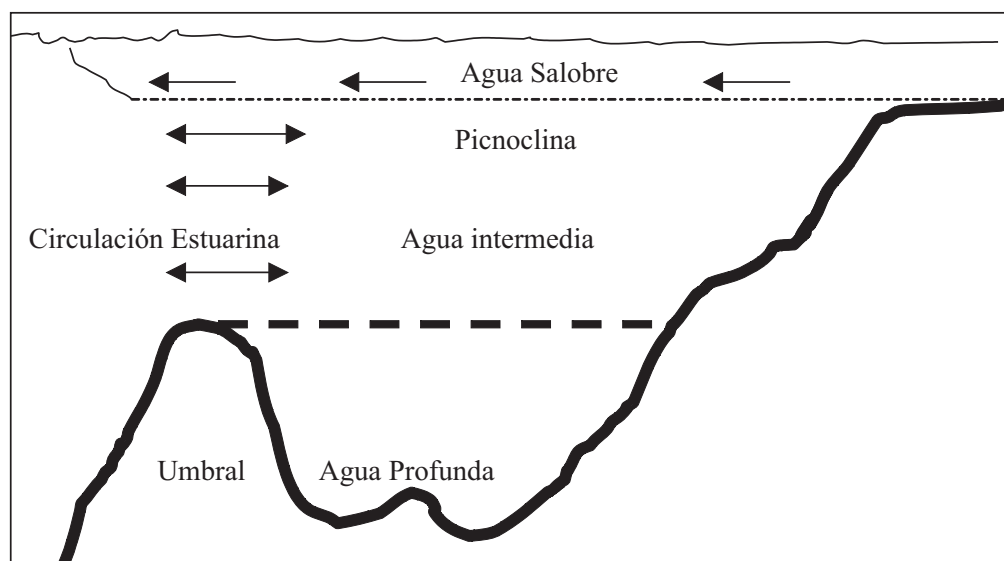


Fig. 6: Esquema a lo largo de un fiordo con los tres tipos de agua: salobre, intermedia y profunda.

Fig. 6: Sketch along a fjord with the three types of water: brackish water, intermediate water and deep water.

durante un ciclo de marea de 1 m ($\pm 10\%$) el tiempo de residencia sería de 12 meses (± 3 meses).

Utilizando la relación para tiempo de renovación de la fracción media de agua fresca (Dyer, 1973) con un aporte estimado de agua fresca de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, con la salinidad medida durante el período de medición en la constricción de Meninea, $\Delta S/S = 0,065$ se obtiene un tiempo de residencia de 7 meses.

El balance de masa y salinidad del sistema para el período, implica un aporte promedio de agua dulce del orden $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y una corriente promedio de la capa de fondo del orden de los 24 cm^1 . Esta velocidad difiere del promedio obtenido con el correntómetro profundo (2 cm^1), por lo cual este valor no sería representativo del campo de velocidad de entrada a la cuenca.

En la constricción de Meninea de 60 m de profundidad se tiene un control hidráulico del sistema ($G=1$) con una estratificación en la densidad de 0,002, si las corrientes en cada capa son iguales o menores que $77,5 \text{ cm}^1$.

DISCUSIÓN

En sistemas como la constricción de Meninea que separa el canal Moraleda en una cuenca norte y una sur, el intercambio de agua entre los fiordos y las aguas costeras adyacentes (Fig. 6) se produce principalmente a través de tres sistemas de

circulación (Stigebrandt, 1990). Uno es la circulación estuarina que depende de la magnitud de la descarga de agua dulce hacia el fiordo que aporta mayormente el río Aysén. Tiene un flujo de salida por la capa superficial del fiordo causado por la descarga de agua fresca del río Aysén y aguas lluvias, estimado del orden de los $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Para esta capa la velocidad media a 25 m de profundidad durante el período fue $15,9 \text{ cm}^1$. El grosor y salinidad de esta capa superficial depende de la magnitud del aporte de agua fresca, área superficial del fiordo, ancho de la boca del fiordo y velocidad del viento. Bajo la capa superficial y hasta la profundidad del umbral se tiene el agua intermedia penetrando hacia el fiordo, con una velocidad media de 2 cm^1 . El intercambio de aguas intermedias a través de la constricción es bastante intenso (Silva *et al.*, 1998; Guzmán & Silva, 2002) y en ambos lados de la constricción se tienen masa de agua que presentan gran homogeneidad.

Otro sistema de circulación está relacionado con las aguas profundas, ubicadas bajo el nivel del umbral de 60 m en el fiordo de Moraleda Sur. Estas aguas profundas pueden salir desde el fiordo si son elevadas a niveles más altos que el umbral. Esto se produce si existen procesos suficientemente intensos de mezcla vertical (Stigebrandt, 1976), que puede ser generado por eventos de viento de gran intensidad y duración o por la propagación de ondas internas.

El tercer mecanismo de intercambio de agua entre el fiordo y las aguas costeras es el bombeo de marea. Una parte del agua del fiordo sale durante el reflujo y penetra durante el flujo, siendo esto proporcional al área de la superficie del fiordo y al rango de marea. La corriente de marea medida en la constricción de Meninea es de gran intensidad y la magnitud del armónico de marea dominante en la constricción, M^2 alcanza valores de $58,5 \text{ cm}^{-1}$. En el espectro de densidad de las corrientes de ambos correntómetros (Fig. 2) se observa la mayor variabilidad para el período semi-diurno de 12,6 hr.

En la descripción de las aguas provenientes desde el océano a través de la boca del Guafo y canal Moraleda, por Silva *et al.* (1998), se tiene una temperatura superficial que fluctúa entre 9,2, y 11,4 °C y una temperatura profunda homogénea entre 6,5 y 9,5 °C. En la zona central del Moraleda se presentaron en los primeros 20 metros un leve gradiente térmico y una capa relativamente homogénea en profundidad con temperaturas entre 9 y 10 °C. La estratificación vertical es débil y presenta variaciones de densidad $2-3 \text{ kgm}^{-3}$ en la columna de agua. En los antecedentes entregados por Silva *et al.* (1995) se tiene que bajo 30 m las isolinias muestran una instrucción neta hacia el sur de aguas de características oceánicas, conformadas especialmente por ASAA y ASAAM que se ubican entre los 30 y 150 metros y agua de origen ecuatorial sub-superficial, bajo los 150 metros.

La constricción de Meninea por la baja profundidad de su umbral (60 m) sólo permite que las aguas provenientes de la cuenca norte del Moraleda, en la capa sub-superficial entre los 30 a 150 m de profundidad, puedan continuar hacia el sur (Guzmán & Silva, 2002). Estas masas de agua (Silva *et al.*, 1997) presentan bajas concentraciones de fosfato ($<1,6 \text{ } \mu\text{M}$), nitrato ($<16 \text{ } \mu\text{M}$) y valores altos de oxígeno ($>5,5 \text{ m/l}$). Estos antecedentes muestran el alto grado de intercambio de agua que se produce a través de la constricción de Meninea forzado por uno o más de los procesos descritos anteriormente.

El flujo específico generado por la constricción puede ser la fuente de energía dominante para la turbulencia capaz de realizar mezcla vertical en el fiordo (Stigebrandt, 1980). Es así como Stigebrandt (1979), encuentra, para el fiordo de Oslo, que las ondas internas generan toda la energía para la mezcla vertical bajo la pycnoclina. Utilizando la relación de máxima transferencia de energía para fiordos afectados

por la marea (McClimans, 1980) a la sección de Meninea:

$$A_s = 8,4A(a/gT_2)^{1/2}$$

T: período mareal; A: área superficial de la cuenca, a: amplitud de marea; g aceleración de gravedad.

Se obtiene que la sección transversal de Meninea, $1,2 \cdot 10^5 \text{ m}^2$, es aproximadamente igual al valor de máxima transferencia de energía, $1,4 \cdot 10^5 \text{ m}^2$.

Los fiordos de la zona austral de Chile son profundos (Pinochet & Salinas, 1996) y por lo tanto las corrientes y mareas en el interior de los fiordos son débiles. La existencia de constricciones verticales u horizontales hacen que las mareas pierdan energía (Stigebrandt, 1979). Si las aguas que circundan el umbral están verticalmente estratificadas, las ondas internas podrían ser generadas por las mareas en el umbral. Cuando el agua está verticalmente estratificada, un número de Froude basado en la velocidad de la marea a través del umbral y la estratificación vertical, es un parámetro importante en este mecanismo. Stigebrandt (1977) utiliza:

$$\text{número de Froude densimétrico: } F_m^2 = 4u^2/(g'H)$$

H: profundidad del agua en el umbral; u_b : corriente barotrópica; $g' = g\Delta\rho/\rho$

Si el número de Froude densimétrico es subcrítico ($F_m < 1$) (Stigebrandt, 1978) se pueden generar ondas internas y para flujos supercríticos ($F_m > 1$) no se generan ondas directamente en el umbral, y la situación es entonces similar a una sin estratificación.

Cuando el largo de la constricción, como el de Meninea, es pequeño comparado con la longitud de una onda de marea, el flujo en la constricción puede ser tratado como un flujo de canal semi estacionario.

En las mediciones de densidad realizadas en la constricción de Meninea se tiene una gran homogeneidad bajo los treinta metros en cuatro estaciones medidas en el área de Meninea (reporte de datos Cimar 1 Fiordos). Esto estaría indicando capas de fondo turbulento producidas por fuertes corrientes de marea. Las mareas pueden desarrollar una capa turbulenta mediante el arrastre viscoso en el fondo. Si las corrientes de mareas son suficientemente intensas, esta capa de fondo puede expandir hasta la superficie, incluso en regiones de gran aporte de agua fresca.

En los fiordos sobre mezclados, como puede ser el caso de la cuenca al sur de Meninea, el agua profunda puede ser intercambiada continuamente.

Stigebrandt (1978) obtiene la relación de transporte máximo de una constricción para el número de Froude estuarino F_e

$$(3) F_e^2 = Q_0^3 / (g' H^3 Q_1 B^2)$$

H: profundidad total; B: ancho de la boca del fiordo; Q_0 : aporte de agua fresca al fiordo; Q_1 : flujo de salida por la capa superficial.

Esta relación establece la capacidad de transporte que tiene la desembocadura de un estuario y depende de la magnitud del aporte de agua dulce que recibe el fiordo y las dimensiones de la constricción. Para valores pequeños de F_e el punto máximo de Q_1/Q_0 es aproximadamente

$$(4) Q_1/Q_0 = (4 F_e)^{2/3}$$

Con un aporte de agua fresca del orden de $1.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ se obtiene que $F_e = 2 \cdot 10^{-3}$ para la constricción de Meninea. La máxima capacidad de transporte de la constricción se tendría cuando las dos capas tuvieran la misma profundidad $H_1 = H_2 = 30 \text{ m}$. Utilizando la relación 4, se obtiene un transporte superficial hacia el norte de $25000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y hacia el sur de $24000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Esto entrega un tiempo de residencia de 5 meses y para un menor aporte de agua fresca de $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ el tiempo de residencia resultante es de 10 meses. En este caso el flujo de salida desde la cuenca por la capa superficial con una velocidad media en el rango entre $20\text{-}42 \text{ cm}^{-1}$ y para la capa de fondo penetrando en el fiordo de $20\text{-}40 \text{ cm}^{-1}$. Estas corrientes están dentro del rango de corrientes medidas en la constricción, durante el estudio realizado en primavera, con máximos de $104,8 \text{ cm}^{-1}$ hacia el norte y $77,3 \text{ cm}^{-1}$ hacia el sur.

Los eventos de capacidad de transporte máximo sobre la constricción correspondería a valores de salinidad de $29,8 \text{ psu}$, si consideramos que el valor típico de la salinidad de las aguas profundas es de $31,0 \text{ psu}$.

Los procesos físicos que se producen en fiordos con fuerte constricción llevan a tener una gran influencia de la marea. Para un sistema de dos capas, como el que se produce en la constricción de Meninea, se cumple el control hidráulico de $G=1$ para la estratificación en la densidad de $0,002$ y corrientes en cada capa igual o menor que $77,5 \text{ cm}^{-1}$. Estos valores de velocidad están

comprendidos entre los rangos medidos por los correntómetros, por lo cual, de acuerdo al modelo de dos capas, estacionario y sin fricción, el sistema puede tener períodos de máximo intercambio.

Si sobre la constricción tenemos corrientes periódicas barotrópicas, como la marea, mayores que las velocidades estuarinas en cada capa desaparecerá el control hidráulico durante ciertos períodos (Stigebrandt, 1977). Para corrientes de marea barotrópicas menores que las corrientes de cada capa, la capacidad de transporte de la constricción es la misma que si no existieran corrientes de marea.

El resultado obtenido para el tiempo de residencia de 12 meses considerando una velocidad media de salida por la capa superficial de 16 cm^{-1} , es aproximadamente igual que el obtenido utilizando los parámetros de la onda de marea semidiurna M^2 . Se obtiene un tiempo de residencia menor, 7 meses, considerando la fracción de salinidad sobre la constricción. Los dos últimos métodos de cálculo son muy dependientes de la calidad de la medición que se obtenga de la descarga de agua fresca para toda el área encerrada por la constricción de Meninea. El valor utilizado aquí debe ser mejorado con las mediciones adecuadas de la descarga de los distintos afluentes de la cuenca al sur de la constricción de Meninea.

El tiempo de residencia de las aguas profundas está determinada por procesos físicos, como la capacidad de transporte de la constricción y la disminución de la densidad en el agua profunda. El ancho óptimo de la constricción coincide en gran medida con el flujo de energía máxima para ondas internas. Para condiciones de la constricción con un número de Froude sobre crítico ($F > 1$) no se generan ondas internas, lo que aumenta el tiempo de residencia. Es así como investigadores escandinavos estudiaron en detalle el fiordo de Oslo concluyendo que tiene una constricción que produce el mejor transporte y mezcla (Stigebrandt, 1979), mediante la generación de ondas internas radiada desde el umbral.

La constricción de Meninea tiene un número de Froude densimétrico $F > 1$, producido por la corriente de marea. Esto significaría que no se generarían ondas internas. En vez de ello se desarrollaría, corriente abajo de la constricción, frentes y desde éstos, ondas internas de alta frecuencia mayor que la del forzante de marea.

Otros procesos que afectan el intercambio de agua entre el fiordo y las aguas adyacentes son

el efecto del viento al forzar la capa superficial y producir distintos tipos de mezcla y el chorro generado en el proceso de "choque de marea" puede causar mezcla intensa en algunos fiordos.

Los resultados de la distribución del campo de densidad y concentración de oxígeno para el fiordo de Aysén (Sievers & Prado, 1994; Silva *et al.*, 1998; Guzmán & Silva, 2002) muestran que las aguas al sur de la constricción de Meninea presentan una estratificación débil. Esto podría deberse a diversos procesos como la ventilación causada por agua hacia el norte de la constricción, sea de mayor densidad que las aguas, al mismo nivel, al sur de la constricción. Otro proceso puede ser el transporte continuo de agua hacia el fiordo a través de otras conexiones con el mar y a mecanismos que intensifiquen la mezcla de las aguas al sur de la constricción.

CONCLUSIONES

El estudio de las mediciones realizadas durante 61 días en la primavera de 1995 en la constricción de Meninea, permite señalar las siguientes conclusiones.

Las corrientes a lo largo del canal tienden a salir por la capa superficie, con velocidad promedio de $15,9 \text{ cm}^1$ y penetrar por la capa de fondo con velocidad promedio de 2 cm^1 .

La variabilidad de las corrientes está dominada por la variabilidad de la marea de tipo semidiurno M_2 . El tiempo de residencia de las aguas en la cuenca encerrada por la constricción de Meninea se calcula que está en el rango de 5-13 meses.

La constricción de Meninea alcanza un máximo de capacidad de transporte al aplicar un modelo de flujo hidráulico de dos capas, no viscoso y sin mezcla entre las capas en la región de control sobre la constricción de Meninea. Esto debido a sus características topográficas y el tipo de flujo dominado por la circulación estuarina y la corriente de marea semidiurna.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Comité Oceanográfico Nacional (CONA) por el financiamiento parcial del presente estudio, a los Sres. Mario Cáceres y Alejandro Cabezas por su dedicación al programa CIMAR-Fiordo. Al proyecto FONDEF 2-41 (CERIO), por el aporte del instrumental utilizado. (Proyecto Cona-C1F 95-19).

REFERENCIAS

- Aure, J. & A. Stigebrandt. 1990. Quantitative estimates of the eutrophication effects of fish farming on fjords. *Aquaculture*, 90, 135-156.
- Dyer, K. 1973. *Estuaries: A physical introduction*, Ed. J. Wiley and Sons Inc. New York.
- Farmer, D. M. & Osborn T. R. 1976. The influence of wind on the surface layer of a stratified inlet. *J. Phys. Oceanogr.* 6, 931-940.
- Foreman, M. G. G. 1993. *Manual for Tidal Current Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B. C. Canada. 66 pp.
- Gade, H. G., 1973. Deep water exchange in a sill fjord: A stochastic process. *J. Phys. Oceanogr.* 3, 213-219.
- Guzmán, D. & N. Silva. 2002. Caracterización física y química y masas de agua en los canales australes de Chile entre boca del Guafo y golfo Elefantes (Crucero Cimar 4 Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar*, 25 (2): 45-76.
- Largier, J. L. 1992. Tidal intrusion fronts. *Estuaries* Vol. 15, 1, 26-29.
- Long, R. R. 1980. The Fluid Mechanical Problem of fjord circulations. In: *Fjord Oceanography*. H. J. Freeland, D.M. Farmer & C.D., Levings, eds. Nato Conference Series IV: Marine Sciences p. 67-116. Plenum Press, New York & London.
- McClimans, T. A. 1980. Energetics of Mixing Processes in Fjords. *Oceanography*. H. J. Freeland, D. M. Farmer & C. D. Levings, eds. Nato Conference Series IV: Marine Sciences p. 67-116. Plenum Press, New York & London.
- Pickard, G. 1971. Some physical oceanographic features of inlets of Chile. *J. Fish Bd. Canadá*, 28: 1077-1106.
- Pinochet, P. & S. Salinas. 1996. Estructura térmica y salina de fiordos y canales adyacentes a Campos de Hielo Sur, Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 19: 93-122.
- Rattray, M., Jr. & D. V. Hansen. 1965. Gravitational circulation in straits and estuaries. *J. Mar. Res.*, 23 (2), 104-122.
- Sievers, H. & R. Prado, 1994. Contraste de las características oceanográficas del seno

- Aysén, Chile, entre invierno y verano (Lat. 45° 20' S). *Rev. Biol. Mar. Valparaíso* 29(2): 167-209.
- Silva, N., H. Sievers & R. Prado. 1995. Descripción oceanográfica de los canales australes de Chile, Zona Puerto-Laguna San Rafael (41° 20' S, 46° 40' S). *Rev. Biol. Mar.*, 30(2): 207-254.
- Silva, N., C. Calvete & H. Sievers. 1997. Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero Cimar 1 Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar*, 20: 23-106.
- Silva, N., C. Calvete & H. Sievers. 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre Puerto Montt y Laguna San Rafael, Chile (Crucero Cimar 1 Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21: 17-48.
- Stigebrandt, A. 1976. Vertical diffusion driven by internal waves in a sill fjord. *J. Phys. Oceanogr.*, 6: 486-495.
- Stigebrandt, A. 1977. On the effect of barotropic current fluctuations on the two-layer transport capacity of a constriction. *J. Phys. Oceanogr.*, 7: 118-122.
- Stigebrandt, A. 1978. Fjord problems in physical Oceanography - in particular internal waves, mixing and processes at geometrical constrictions. Ph.D thesis, University of Gothenburg, Sweden. 64 pp.
- Stigebrandt, A. 1979. Observational evidence for vertical diffusion driven by internal waves of tidal origin in the Oslofjord. *J. Phys. Oceanogr.*, 9: 435-441.
- Stigebrandt, A. 1980. Barotropic and baroclinic response of a semi-enclosed basin to barotropic forcing from the sea. In *Fjord Oceanography*, ed. By H.J. freeland, D. M. Farmer & C. D. Levings), Plenum.
- Stigebrandt, A. 1990. On the response of the horizontal mean vertical density distribution in a fjord to low-frequency density fluctuations in the coastal water. *Tellus*, 42^a. 605-614.
- Stommel H. & Farmer HG. 1953. Control of Salinity in a estuary by a transition. *J. Mar. Res.* 12, 13-20.
- Rattray, M., Jr. & D. V. Hansen. 1965. Gravitational circulation in straits & estuaries. *J. Mar. Res.*, 23, 2, 104-122.
- Valle-Levinson, A. M. Cáceres, H. Sepúlveda & K. Holderied. 2002. Patrones de flujo en los canales asociados a la boca del seno Aysén. *Cienc. Tecnol. Mar*, 25 (2): 5-16.