

BIFURCACIÓN DE LA PLUMA ESTUARINA DEL FIORDO AYSÉN EN SU TRAYECTORIA SOBRE EL CANAL MORALEDA*

ESTUARINE PLUME BIFURCATION OF FIORDO AYSÉN
OVER CANAL MORALEDA

MARÍA JOSÉ GONZÁLEZ¹
MARIO A. CÁCERES²

¹Facultad de Ciencias,
Universidad Católica de la Santísima Concepción,
Campus San Andrés, Concepción,
Alonso de Ribera 2850.

²Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Naturales
Universidad de Valparaíso,
Av. Borgoño 16344, Viña del Mar
E-mail: mario.caceres@uv.cl

Recepción: marzo de 2007 – Versión corregida aceptada: noviembre de 2008

RESUMEN

Se realizaron mediciones en transectos transversales y longitudinales con ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) en cuatro áreas de la región austral de Chile: paso del Medio, constricción de Meninea, isla Tuap y confluencia de los canales Darwin y Errázuriz, durante un ciclo semidiurno de marea, para estimar la dirección de la pluma estuarina que sale del fiordo Aysén (45° 20' S) sobre el canal Moraleda. Mediante estimaciones de los flujos de sal superficial en los transectos de las cuatro regiones de estudio y observación de la evolución en el tiempo de la velocidad y salinidad superficial *in situ*, se propone un esquema de ramificación de la pluma estuarina que sale del fiordo Aysén, desde la región del paso del Medio hacia el oeste, la cual se bifurca con una rama hacia el norte y otra hacia el sur. La rama sur lleva aguas de más baja salinidad que la norte, asociada a mayores velocidades en la dirección suroeste. En su trayectoria hacia el sur se bifurca nuevamente con la mayor parte de ésta ingresando al canal Errázuriz por el lado oeste y la menor parte por el lado sur del canal Darwin. La rama norte alcanza sus mayores velocidades sobre la constricción de Meninea y no alcanzaría la latitud de la isla Tuap, sugiriéndose dispersión de ésta en los canales laterales. Estimaciones del transporte de sal en las ramas norte y sur no muestran resultados concluyentes, observándose similitudes en sus valores que podrían estar sobreestimados o subestimados por la variabilidad estacional de caudal del río y eventos de viento desde el norte. Un patrón dominante en la mayoría de las secciones transversales fue la tendencia del flujo superficial a desviarse hacia la izquierda de su dirección de avance, en respuesta al forzamiento por el Efecto de Coriolis en la hidrodinámica transversal.

Palabras claves: Oceanografía física, pluma estuarina, flujos de sal, fiordo Aysén, Chile, ADCP.

* Proyecto CONA-C8F 02-04.

ABSTRACT

Measurements of Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) were made over transverse and longitudinal transects in four areas of southern Chile (Paso del Medio, Isla Meninea, Isla Tuap, and confluence of Canal Darwin and Canal Errázuriz), during a semidiurnal tidal cycle, to estimate the direction of propagation of the estuarine plume westward of the mouth of Fiordo Aysén (45° 20' S) over Canal Moraleda. Using estimations of surface salt flux in transects of the four regions, and observations of the evolution in time of surface water velocities and surface salinity, a scheme of propagation of the estuarine plume path exiting Fiordo Aysén, westward of Paso del Medio, is proposed. It splits out in two branches, one to the north and one to the south. The southern branch has lower salinity and larger velocity than the northern one. Its highest speeds are toward the southwest direction. On its southward path it branches out again with the larger portion entering Canal Errázuriz on its west side and the smaller part going into the southern side of Canal Darwin. The northern branch has the highest velocities at Meninea constriction and would not reach the latitude of Isla Tuap, suggesting plume dispersion through lateral channels. Estimates of salt transport in the northern and southern branches did not show conclusive results. There are similarities in transport magnitudes that might be over or underestimated by differences in river discharge and wind field seasonal variability during the sampling periods. A dominant feature in most of the transverse sections was flow tendency to turn to the left, in response to the Coriolis Effect over the transverse dynamics.

Key words: Physical oceanography, estuarine plume, salt flux, Fiordo Aysén, Chile, ADCP.

INTRODUCCIÓN

La región austral de Chile posee un vasto sistema de aguas interiores sujeta en gran medida a régimen estuarino, que se extiende desde los 42° 30' S a los 55° 30' S y está constituido por numerosas islas, canales, fiordos y golfos. Debido a la ubicación austral de esta región la ganancia de agua dulce excede la pérdida por efectos de evaporación, lo cual provoca que las salinidades superficiales sean menores en el área interior de los fiordos con respecto a las observadas en el agua marina adyacente, dando origen a una circulación de dos capas del tipo estuarina (Pickard, 1971; Dyer, 1973; Silva *et al.*, 1995 y Silva *et al.*, 1997), dominada por una salida superficial de agua de baja salinidad que da origen a la formación de plumas de agua dulce o flujos de boyantez (Chapman & Lentz, 1994; Hill, 1998).

La extensión, estructura y forma de estas plumas es fuertemente influenciada por su densidad con respecto a las aguas que la reciben (Garvine, 1974), como así también, por efectos de forzantes externos como mareas, viento, rotación terrestre, variación de descargas de agua dulce, la forma de la línea de costa

y la topografía de fondo. Un ejemplo de esto se da en la zona de fiordos entre Puerto Montt y laguna San Rafael, donde la presencia del canal Moraleda y el estero Elefantes, orientados en la dirección norte-sur, constituyen los primeros cuerpos de agua receptores de las plumas de agua dulce derivadas del drenaje terrestre. Así, estas fuentes de agua dulce no descargan directamente hacia la plataforma continental, como en la mayoría de los casos de estudios de zonas estuarinas, sino que lo hacen en el mar interior de Chiloé o en alguno de estos dos canales, para luego seguir su curso hacia la zona oceánica adyacente. Esta característica topográfica hace que esta zona sea considerada como un sistema de plumas de mar interior (Calvete, 2006).

Una de las principales fuentes de descarga de agua dulce al canal Moraleda lo constituye el fiordo Aysén (45° 20' S) (Fig. 1), alimentado en su cabeza por el río Aysén, con un caudal medio anual de 620 m³·seg⁻¹ (Niemeyer & Cereceda, 1984). Al oeste de la isla Elena, rasgo que señala la posición de la boca de este fiordo, se encuentra una constricción de baja profundidad (50-60 m) frente a la isla Meninea (45° 16' S y 73° 38' W), ubicada en el ex-

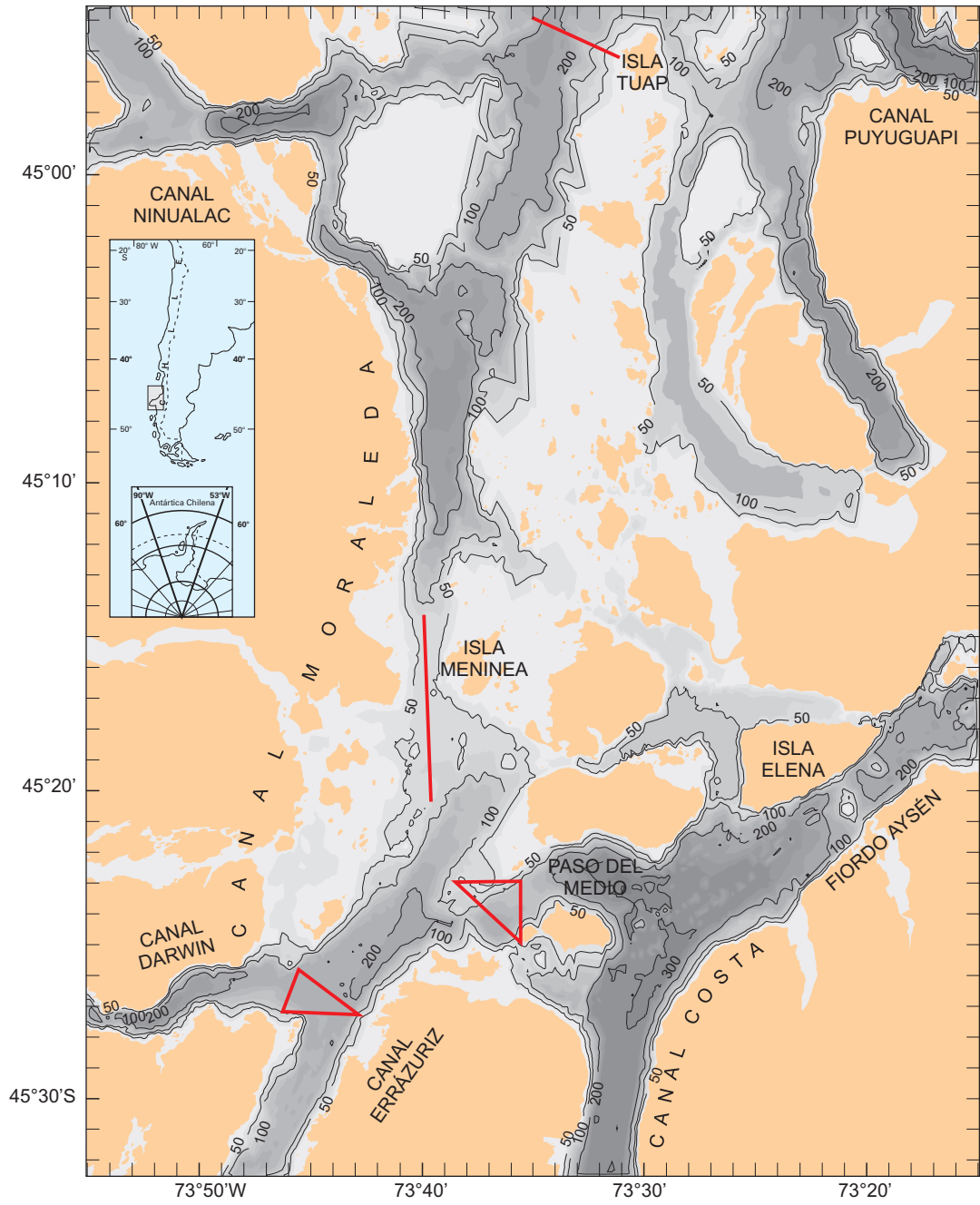


Fig. 1: Área de estudio y posición de transectos de mediciones de salinidad y corrientes (en rojo).

Fig. 1: Study area and location of transects for current and salinity measurements (red lines).

tremo sur del canal Moraleda. Este estrechamiento, que Silva *et al.* (1995) denominaron "constricción de Meninea", separa al canal Moraleda de los cuerpos de agua que continúan hacia el sur, tales como el canal Costa y estero Elefantes, formando así dos microcuencas, una al norte y otra al sur de ella. La microcuenca norte está conectada al mar por la boca del Guafo y tiene una profundidad media del orden de 250 m. La microcuenca sur, con una profundidad media del orden de 150 m, se conecta al océano a través del canal Darwin y a través de otros canales que conectan al canal Errázuriz. Esta constricción puede estar jugando un rol de importancia en la circulación, tiempo de residencia y características físicas y químicas de estas microcuencas (Guzmán & Silva, 2002), observándose que el flujo neto sobre este umbral responde a un típico intercambio de dos capas entre cuencas adyacentes, donde una capa superficial del flujo va hacia el norte y una segunda capa profunda va hacia el sur (Valle-Levinson & Blanco, 2004).

Los rasgos de la pluma estuarina observada en la región de la boca, por otra parte, sugieren la presencia de una región frontal (Cáceres, 2004, Cáceres *et al.*, 2002, Calvete, 2006) y hay evidencias de desviaciones en su dirección hacia el sur por el canal Costa (Cáceres, 2004). Estos rasgos, sin embargo, se derivan de observaciones aisladas de imágenes de satélite o de datos *in situ* de estaciones oceanográficas con insuficiente resolución espacial y temporal. La comprensión de los mecanismos físicos que determinan la dirección de las plumas y la presencia de zonas frontales requiere de estudios con diseños de muestreo de mayor resolución espacial y temporal. Ya que la marea es reconocida como uno de los principales forzantes de la hidrodinámica en estos sistemas estuarinos (Dyer, 1973), las escalas temporales de estos estudios debieran considerar al menos la variabilidad intramareal del flujo y la densidad. Desde el punto de vista espacial, la detección de frentes a lo largo del canal en estudio se logra con éxito al realizar observaciones en la dimensión transversal de los canales, una orientación que ha tomado mayor importancia en los últimos años (Wong, 1994; Cáceres *et al.*, 2002). Así, la resolución de la variabilidad en la escala temporal de un ciclo

semidiurno de marea en secciones transversales a los canales de interés aportará una parte importante del conocimiento de la variabilidad de la pluma en estos sistemas.

El estudio de las velocidades intramareales permitirá, además, estimar los flujos netos en el sistema, los cuales son importantes por el rol que juegan en un amplio rango de fenómenos estuarinos que incluyen, entre otros, balances de sal, generación de zonas de máxima turbidez, dispersión de fitoplancton y contaminantes, transporte de sedimento en suspensión e identificación de zonas de retención de partículas (Kjerfve *et al.*, 1981, Kay *et al.*, 1996). En particular, los flujos de sal pueden ser aproximados por la multiplicación de las velocidades (u) por la salinidad (s) de acuerdo a Kay *et al.* (1996) y Jay *et al.* (1997), lo que permite tener una primera estimación de los intercambios de sal entre dos cuencas.

Por otra parte, las mediciones de velocidades de corrientes en estuarios haciendo uso de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) desde embarcaciones móviles han tomado un fuerte impulso en los últimos 20 años, constituyendo una herramienta de resolución espacial y temporal sin precedentes para el estudio de los componentes mareales y residuales del campo de velocidades. Algunos ejemplos de su aplicación se dan en Valle-Levinson & Lwiza, 1995; Kay *et al.*, 1996; Valle-Levinson & Atkinson, 1999 y Cáceres *et al.*, 2002.

Haciendo uso de métodos de mediciones de velocidades con ADCP remolcado, el propósito del presente trabajo es describir los principales rasgos de la pluma estuarina que sale del fiordo Aysén sobre el canal Moraleda, y hacer estimaciones de los flujos de sal observados en las secciones transversales en los cuatro sitios de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se efectuaron mediciones de corrientes con un Perfilador Acústico de Corrientes Doppler (ADCP) de temperatura y salinidad superficial (SBE-37) para estudiar las características de la pluma estuarina del fiordo

do Aysén. Se seleccionaron cuatro sitios de mediciones en la zona del canal Moraleda: paso del Medio, isla Tuap, isla Meninea y confluencia de canales Darwin y Errázuriz (Figs. 1 a 5, Tabla I).

Los datos de paso del Medio y de isla Tuap fueron obtenidos durante una campaña de mediciones de corrientes del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) en abril del año 2004. Los datos en el sector de la isla Meninea fueron obtenidos en la campaña de mediciones CIMAR 8 Fiordos y los de la confluencia Darwin-Errázuriz en CIMAR 9 Fiordos. Las cuatro campañas de

mediciones de ADCP fueron realizadas con un instrumento RD Instruments Workhorse de 307.2 kHz instalado mirando hacia abajo en un catamarán de 3 m de largo, remolcado a una velocidad máxima de 5 nudos tanto por el AGOR "Vidal Gormaz" (paso del Medio, isla Tuap e isla Meninea) como por la L/M "Petrel" (Canales Darwin - Errázuriz).

Se efectuaron repeticiones de los circuitos mostrados en las figuras 2 a 5 siguiendo la secuencia de las letras indicadas en las esquinas. El número de repeticiones, tiempo total de las mediciones, tamaño de celda vertical y profundidad del dato superficial de velocidad se indi-

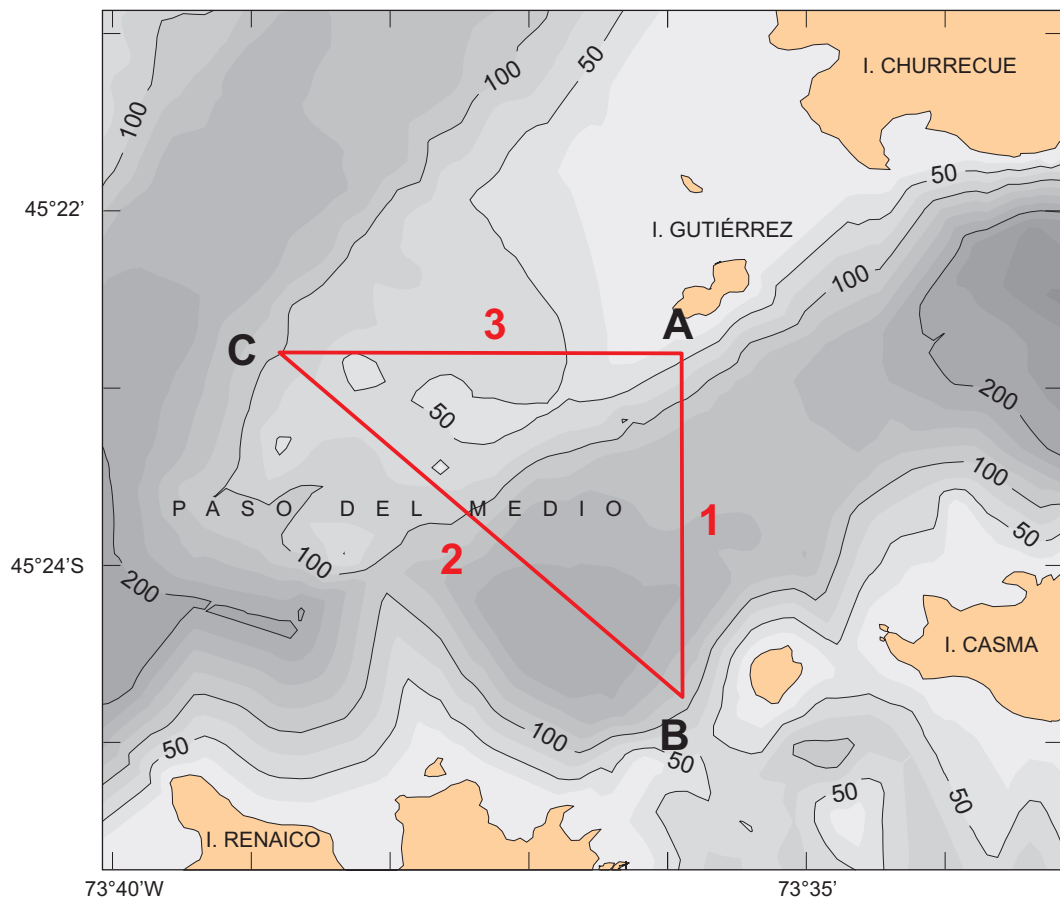


Fig. 2: Posición de transectos con mediciones de ADCP en paso del Medio. Numeración de transectos en rojo y letras de estaciones en negro.

Fig. 2: Transect positions of ADCP measurements in Paso del Medio. Transect numbers in red and stations letters in black.

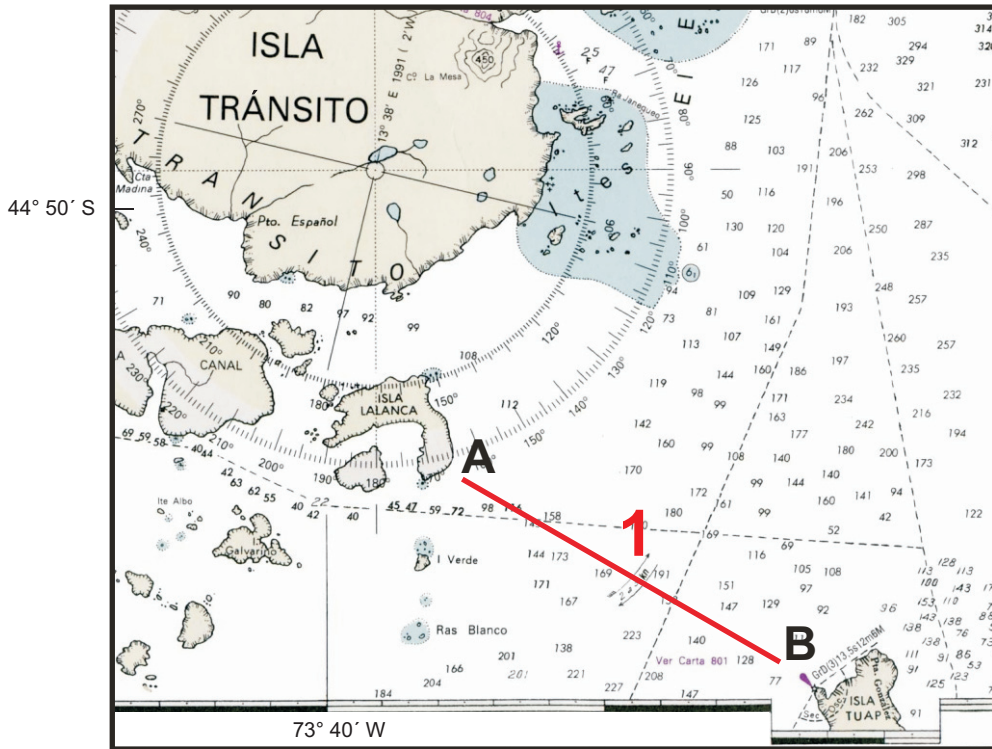


Fig. 3: Posición de transectos con mediciones de ADCP en isla Tuap. Numeración de transecto en rojo y letras de estaciones en negro.

Fig. 3: Transect positions of ADCP measurements in Isla Tuap. Transect numbers in red and stations letters in black.

can en la Tabla I. El alcance máximo del instrumento permitió la obtención de datos confiables hasta los 100-120 m de profundidad, pero para los propósitos de este estudio se utilizaron sólo los datos superficiales, correspondientes a la primera celda del perfil de datos de ADCP (Tabla I). Los datos de temperatura y salinidad superficial fueron obtenidos con un registrador autocontenido SBE-37 adosado a uno de los flotadores del catamarán, el cual registraba datos cada 15 segundos a una profundidad menor de 1 m. En la campaña de la isla Meninea, no se tomaron datos de temperatura y salinidad superficial con SBE-37 (CT), sino que se utilizaron los datos superficiales de salinidad obtenidos con un instrumento CTD SBE-19 desde perfiles verticales en los extremos A y B del transecto (Fig. 4) obtenidos en cada repetición de las mediciones de ADCP. Los datos superficiales de salinidad en

ambos extremos fueron luego promediados para obtener una media para la posición A y otra para la B.

Los datos de navegación fueron obtenidos con un GPS Leica. Los datos de compás del ADCP fueron corregidos siguiendo el método de Joyce (1989) y los datos erróneos de velocidades fueron removidos siguiendo el procedimiento explicado por Valle-Levinson & Atkinson (1999). Se adoptó un sistema de coordenadas en el cual los componentes de velocidad de la corriente a lo largo y a lo ancho de los canales eran u y v , respectivamente.

Los datos de velocidad y salinidad fueron interpolados a una grilla regular con tamaños de celda cada 200 m en distancia y cada 30 minutos en tiempo. Ambas variables fueron graficadas en forma combinada para tener una

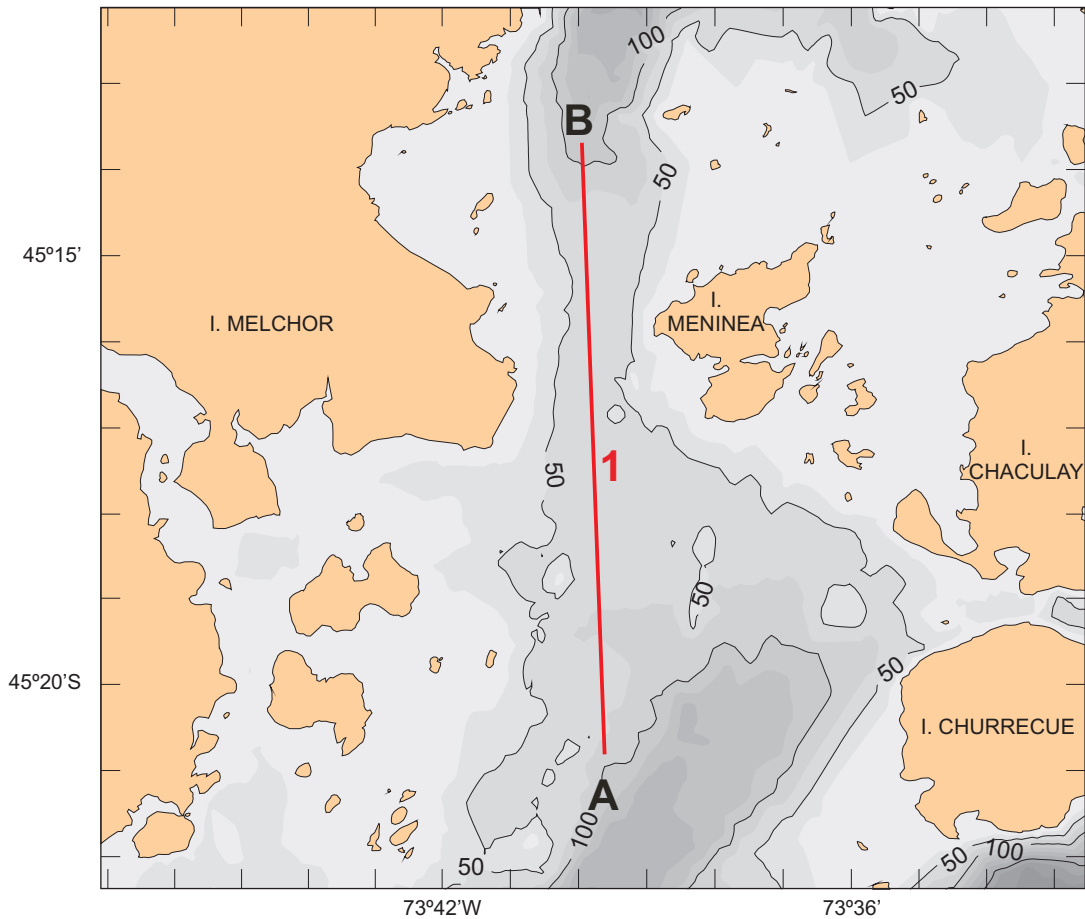


Fig. 4: Posición de transectos con mediciones de ADCP en isla Meninea. Numeración de transectos en rojo y letras de estaciones en negro.

Fig. 4: Transect positions of ADCP measurements in Isla Meninea. Transect numbers in red and stations letters in black.

visión de su evolución en el tiempo sobre cada transecto. Se hicieron estimaciones de los flujos de sal (F) superficiales en cada sección transversal utilizando los datos de velocidades (u) y de salinidad (s) obtenidos del ADCP y CT, respectivamente, en cada transecto. Los datos de flujos de sal se expresaron en unidades de sal x cm/s, considerando a la salinidad sin unidades.

Se utilizaron las expresiones:

$$\langle F \rangle = \langle u \rangle \cdot \langle s \rangle \quad (1.0)$$

$$\langle F \rangle = \langle U \rangle \cdot \langle s \rangle \quad (2.0)$$

donde los paréntesis $\langle \rangle$ corresponden al promedio de las variables correspondientes en el ciclo de mareas en cada celda del transecto. Se estimaron valores de promedio de F en dos modalidades, la primera utilizando la componente de velocidad u longitudinal, perpendicular a la orientación del transecto (Ec. 1.0); y la segunda utilizando las magnitudes totales de la velocidad $U = (u^2 + v^2)^{1/2}$ (Ec. 2.0). En el primer caso se obtuvieron estimaciones de la dirección del flujo longitudinal u en el transecto (positivos hacia el interior del canal y negativos hacia el exterior) y en el segundo se estimó la magnitud total del flujo en el transecto.

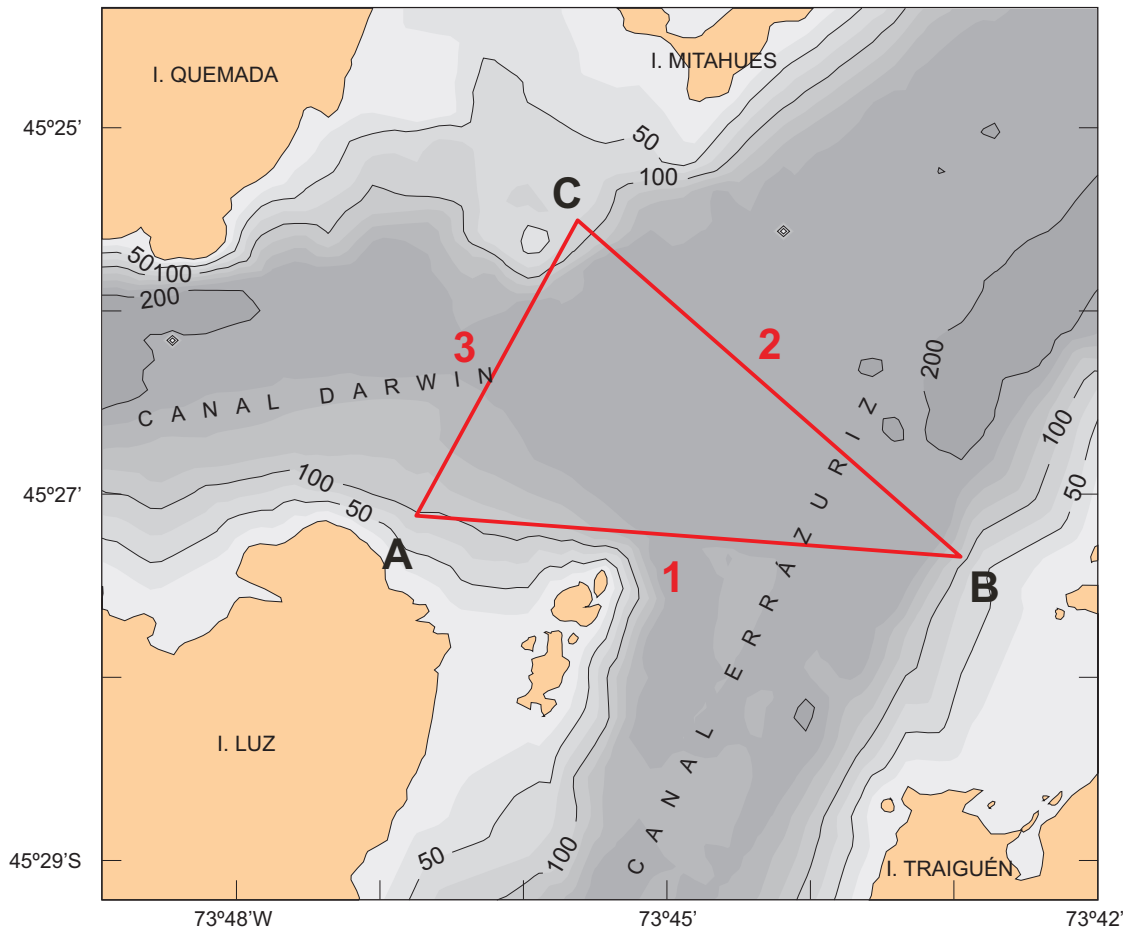


Fig. 5: Posición de transecto con mediciones de ADCP en confluencia Darwin-Errázuriz. Numeración de transectos en rojo y letras de estaciones en negro.

Fig. 5: Transect positions of ADCP measurements in Darwin-Errázuriz confluence. Transect numbers in red and stations letters in black.

Datos de viento fueron obtenidos a bordo del AGOR "Vidal Gormaz" durante la realización de las repeticiones en las estaciones indicadas en la Tabla I. Sólo en el área de estudio de Darwin-Errázuriz el muestreo tuvo que suspenderse antes de completar las 24 horas programadas, debido a la observación de vientos de hasta 20 nudos que impidieron la obtención de datos de calidad y representaron un peligro para la seguridad a la navegación.

Los datos de caudales diarios del río Aysén entregados por la Dirección General de Aguas se muestran en la Tabla II (Pág. 22). Para las mediciones en abril de 2004 se uti-

lizó la media histórica para el mes, ya que no se disponía de datos para esa fecha.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los flujos de sal superficial en los transectos de las cuatro regiones de estudio y la evolución en el tiempo de la velocidad y salinidad superficial.

Área paso del Medio

Esta área (Fig. 2) se ubica en la región que recibe el principal efecto de la pluma

Tabla I. Detalle de las mediciones en las áreas de estudio.

Table I. Measurement details in the study areas.

Área de estudio	Fecha	Tiempo total (h)	Repeticiones	Tamaño celda vertical (m)	Profundidad primera celda (m)
Paso del Medio	8 abril 2004	12,1	8	4	6
Isla Tuap (en canal Moraleda)	7 abril 2004	12,8	12	4	6
Isla Meninea (en canal Moraleda)	21 noviembre 2002	13,5	7	4	5
Canal Errázuriz con canal Darwin	15 agosto 2003	17,2	11	8	9

que sale del fiordo Aysén hacia el oeste. Los contornos de la evolución de salinidad superficial en el tiempo y los vectores de velocidad a 6 m de profundidad se muestran en la figura 6.

Las variaciones de salinidad intramareal muestran que el transecto 1 (Fig. 6(a)), el más cercano a la fuente de agua dulce, presenta en general bajas salinidades que oscilan entre 26,5-25,5 aproximadamente, situándose las menores salinidades en la zona sur del transecto (letra B), donde también se observa que dominan los vectores de velocidad hacia el oeste. El transecto 2 (Fig. 6(b)), sin embargo, muestra más variabilidad, observándose mayores salinidades con flujo entrante en la zona norte del transecto 2, con 27,6 puntos de salinidad aproximadamente, asociadas a la región somera de la sección. Al igual que lo observado en el transecto 1, las menores salinidades se sitúan en la zona sur (letra B), evidenciando que la pluma de agua dulce tiende a situarse en ese sector. El transecto 3 (Fig. 6(c)) muestra un patrón en el que el agua salada de hasta 28,0 puntos de salinidad domina a todo lo largo del transecto durante la llenante (velocidades de C hacia A), y que las bajas salinidades dominan con la vaciante (velocidades de A hacia C). Estas distribuciones sugieren que el flujo de agua más salada superficial proveniente desde el norte se aproxima hacia la boca del fiordo Aysén desde el sector norte del paso del Medio.

De la figura 6 emerge el patrón de altas salinidades sobre el lado norte y somero del trián-

gulo, y bajas en el sur, estas últimas asociadas a altas velocidades (77 cm/s) orientadas hacia el suroeste en el transecto 2. Esto es también sugerido en los valores de flujo de sal para este sector en la figura 7. Aquí las líneas punteadas representan el flujo perpendicular a la orientación del transecto (ec. 1.0), siendo en los tres transectos negativos (hacia el oeste-suroeste), y donde los mayores flujos negativos se observan en la región norte del triángulo (letras A y C). Esto es también evidente en las líneas continuas, que representan la magnitud total del flujo (ec. 2.0), donde los valores más altos se observan en torno a A y C. Así, los valores más altos de flujo este-oeste se observan en la región norte del triángulo y los más bajos en el sur.

Área isla Tuap

El área de la isla Tuap (Fig. 3), se encuentra alejada hacia el norte en el canal Moraleda. La evolución en el tiempo de la salinidad y velocidad superficial a lo ancho del transecto (Fig. 8) muestra el predominio de los flujos en la dirección general hacia el sur (hacia la derecha en la figura). Las máximas salinidades de 30,0 son al menos 1,5 puntos más altas que las observadas en las otras áreas de mediciones de este trabajo, sugiriendo que corresponden a las aguas más saladas provenientes desde el norte del canal Moraleda. Estos máximos valores se observan, sin embargo, preferentemente al inicio de las mediciones en el lado oeste (lado A en la figura), sugiriendo su asociación con la marea llenante, mientras que las bajas salinidades se

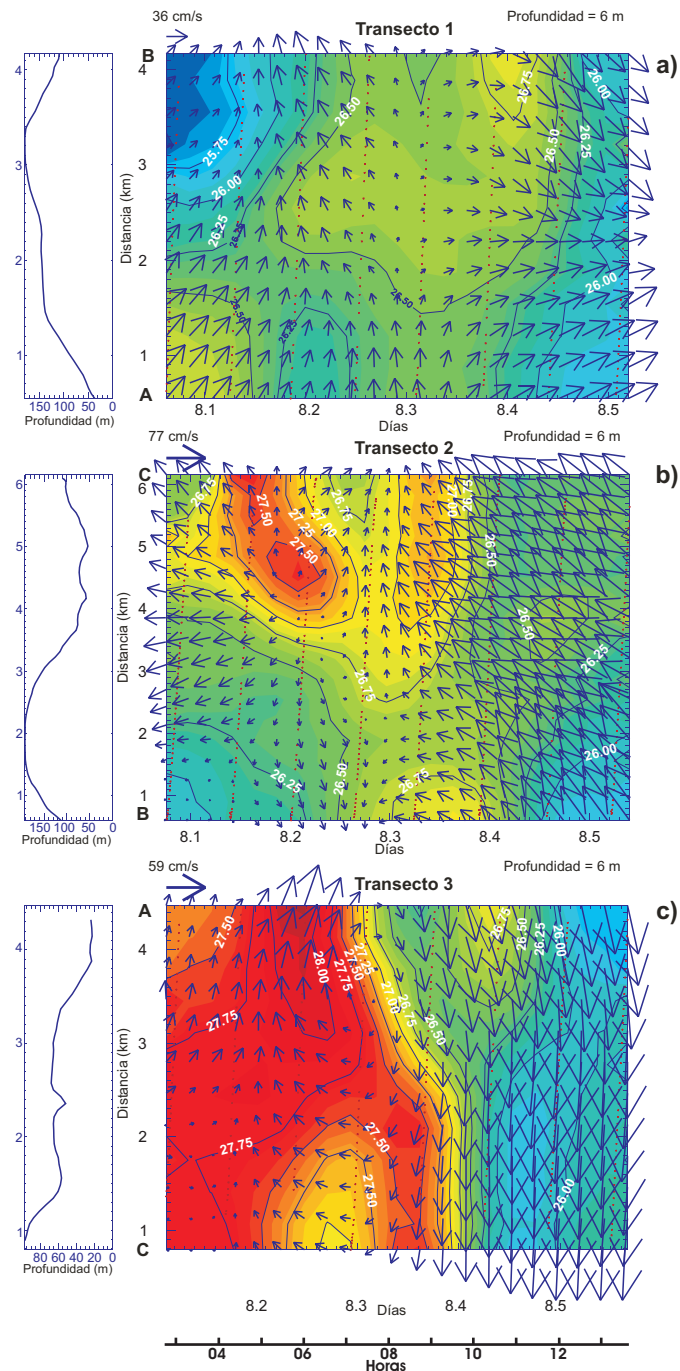


Fig. 6: Contornos de salinidad superficial a 1 m y vectores de velocidad a 6 m de profundidad durante un período semidiurno de marea (aprox. 12 horas) en paso del Medio. (a) Transecto 1, (b) Transecto 2 y (c) Transecto 3. En el costado izquierdo está el perfil del fondo en este transecto. Letras A, B y C son los extremos del transecto. Ver figura 2 para numeración de transectos y de letras en esquinas del circuito.

Fig. 6: Surface salinity contours at 1 m depth and velocity vectors at 6 m depth during one semidiurnal tidal cycle (aprox. 12 hours) in Paso del Medio. a) Transect 1, b) Transect 2 and c) Transect 3. Bottom profile along the transect is on the left side. Letters A, B and C are the ends of the transect. See figure 2 for identification of transect numbers and letters at the corners of the circuit.

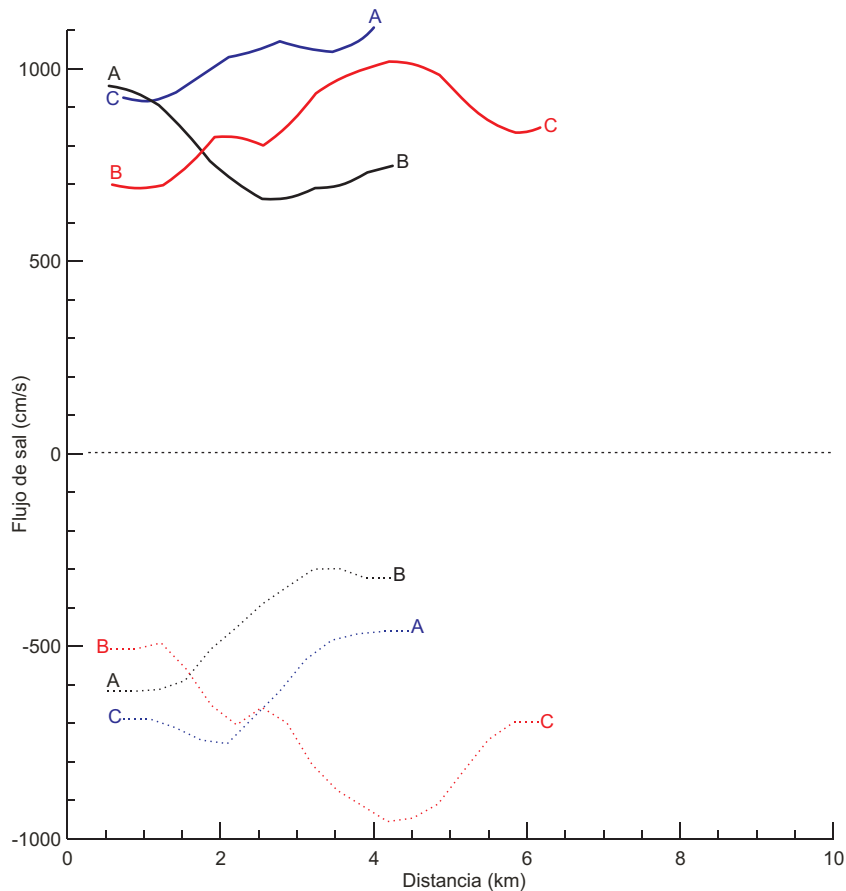


Fig. 7: Valores de flujo de sal en los tres transectos de paso del Medio. Letras corresponden a extremos del transecto, línea punteada es el flujo perpendicular a la orientación del transecto (ec. 1.0), línea continua es la magnitud total del flujo (ec. 2.0). Los colores representan a cada transecto: negro transecto 1, rojo transecto 2 y azul transecto 3.

Fig. 7: Salt fluxes in transects at Paso del Medio. Letters are the ends of the transects, dotted lines are the perpendicular fluxes to the transect orientation (eq. 1.0), solid line is the total magnitude of the fluxes (eq. 2.0). Each color represents transect number: black is transect 1, red is transect 2 and blue is transect 3.

observan con mayor frecuencia en el lado este, sin una clara asociación con la vaciante.

La distribución de las isohalinas superficiales en esta misma figura sugiere, por otra parte, un fuerte gradiente longitudinal de salinidad en las primeras 7 horas de observación que podría constituir un frente estuarino intramareal.

Los flujos de sal en este transecto (Fig. 9) muestra en la línea continua la magnitud (ec. 2.0) de los flujos máximos a lo ancho del transecto,

los que son levemente mayores en los lados del canal que en el centro. La línea punteada (ec. 1.0) muestra valores negativos en todo el ancho del transecto, sugiriendo que la dirección general del flujo de sal superficial es hacia el sur.

Área isla Meninea

En el caso de la sección sobre la constricción de Meninea (Fig. 4), se presentan los vectores de velocidades en el tiempo, sobre los contornos de la componente v del flujo (flujo en la dirección

norte-sur) (Fig. 10). Hay una dominancia de los valores positivos de velocidad (hacia el norte), siendo el promedio de la magnitud de la velocidad $\langle U \rangle$ en el punto B del transecto (norte) igual a $26,2 \text{ cm s}^{-1}$ y en el punto A (sur) igual a $10,6 \text{ cm s}^{-1}$. Para $\langle u \rangle$ se obtiene un valor de $8,5 \text{ cm s}^{-1}$ en B (flujo hacia el norte) y de $-2,75 \text{ cm s}^{-1}$ en A (hacia el sur). Como se indicó, sobre esta sección no se tomaron datos de salinidad superficial con SBE-37, sino que sólo se contaba con valores superficiales de salinidad en los extremos del transecto, con los cuales se obtuvo $\langle s \rangle$ en B=27,77 y en A=26,53. Los flujos de sal totales dan valores de $\langle U \rangle \langle s \rangle = 727,6 \text{ sal cm s}^{-1}$ en B y de $\langle U \rangle \langle s \rangle = 281,4 \text{ sal cm s}^{-1}$; mientras

que los flujos longitudinales son $\langle u \rangle \langle s \rangle = 234,9 \text{ sal cm s}^{-1}$ en B y $\langle u \rangle \langle s \rangle = -73,0 \text{ sal cm s}^{-1}$ en A. Estos valores se grafican con asteriscos y signos de suma en la figura 12, sobrepuestos con los valores de flujo en la confluencia Darwin-Errázuriz.

Área Darwin-Errázuriz

Esta área se muestra en la figura 5. La evolución en el tiempo de la salinidad superficial y de la velocidad a 9 m se muestra en la figura 11. En el transecto 1, de orientación este-oeste, los valores de baja salinidad se ubican preferentemente en lado este (de la letra B) en coincidencia con los flujos de

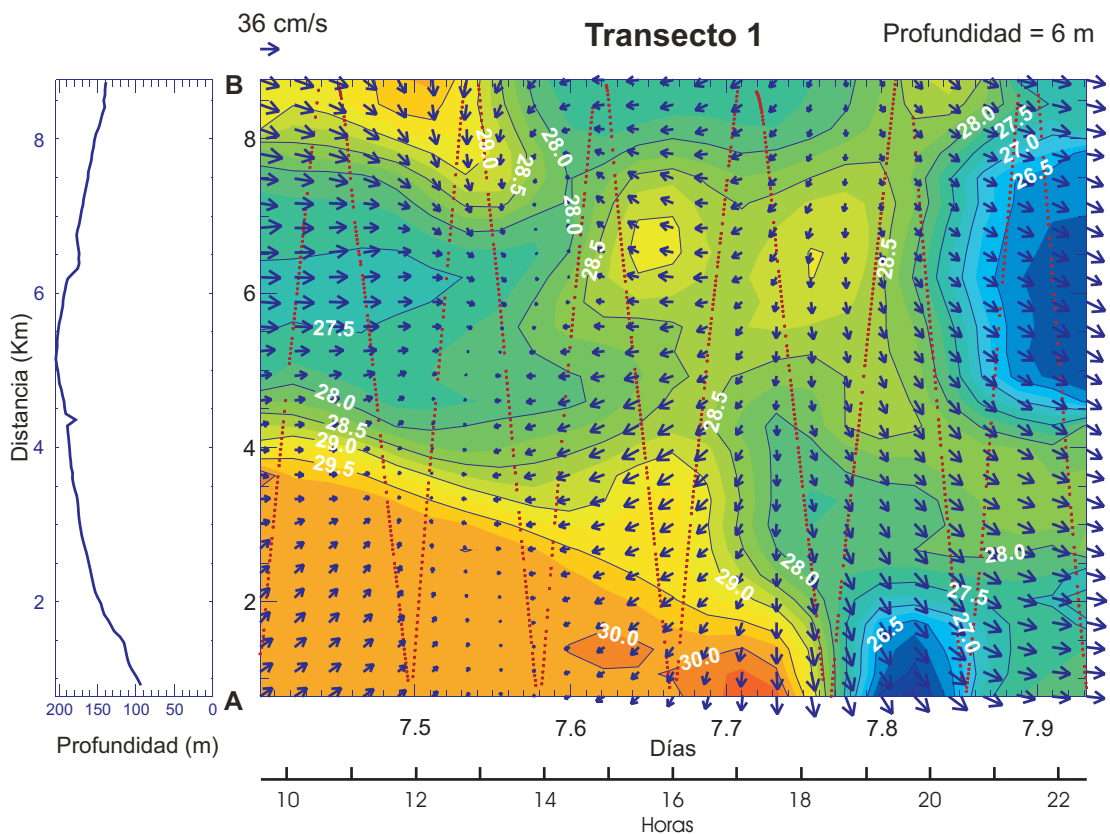


Fig. 8: Contornos de salinidad superficial a 1 m y vectores de velocidad a 6 m de profundidad durante un período semidiurno de marea (aprox. 12 horas) en el transecto 1 del sector isla Tuap. En el costado izquierdo está el perfil del fondo en este transecto. Letras A y B son los extremos del transecto. Ver figura 5 para numeración y letras en extremos del transecto.

Fig. 8: Surface salinity contours at 1 m depth and velocity vectors at 6 m depth during a semidiurnal tidal cycle (aprox. 12 hours) in transect 1 of Isla Tuap region. Bottom profile along the transect is on the left side. Letters A and B are the ends of the transect. See figure 5 for identification of transect numbers and letters at the ends of the transect.

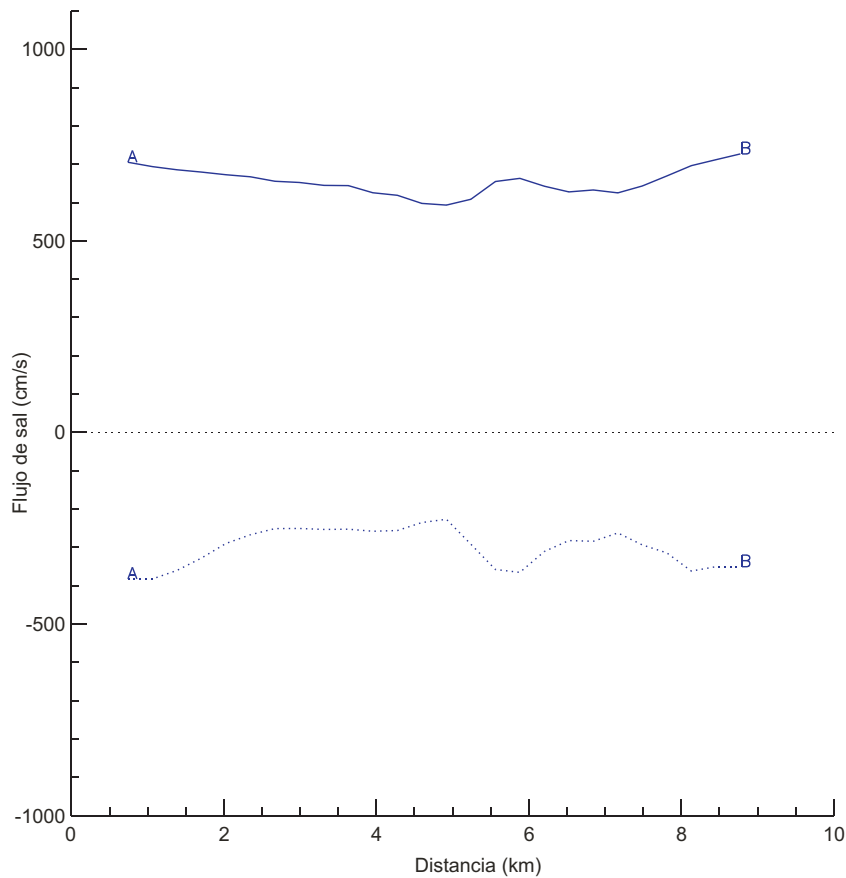


Fig. 9: Valores de flujo de sal en el transecto 1 de isla Tuap. Letras son los extremos del transecto, línea punteada (ec. 1.0) es el flujo perpendicular a la orientación del transecto, línea continua (ec. 2.0) es la magnitud total del flujo.

Fig. 9: Salt fluxes in transect 1 of Isla Tuap region. Letters are the ends of the transect, dotted line is the perpendicular flux to the transect orientation (eq. 1.0), solid line is the total magnitude of the flux (eq. 2.0).

orientación general hacia el sur (canal Errázuriz) durante la vaciante. En el lado oeste (letra A) no hay evidencia de salida de agua más dulces hacia el sur. La falta de dominancia de los flujos hacia el norte en esta sección sugiere que la mayor parte del flujo de agua de la pluma es exportada hacia el sur por el lado oeste. Sobre el lado este hay evidencia de salida del flujo con bajas salinidades hacia el canal Darwin sobre el sector del punto A.

En el transecto 2, en las primeras 4 horas se observan altas salinidades, remanentes del término de la vaciante, las que comienzan a ser reem-

plazadas por aguas más dulces que se orientan hacia el sur y luego hacia el oeste (estación B). En el transecto 3, sólo en el sector de la estación A, se observa salida de aguas de baja salinidad hacia el oeste, que ingresan al canal Darwin durante cuatro horas dentro del ciclo de marea.

En cuanto a los flujos que salen en ese transecto (Fig. 12), las magnitudes de los flujos máximos a lo ancho del transecto (líneas continuas), los transectos 1 y 2 muestran valores similares con magnitudes levemente mayores en la zona central, mientras que en el transecto 3

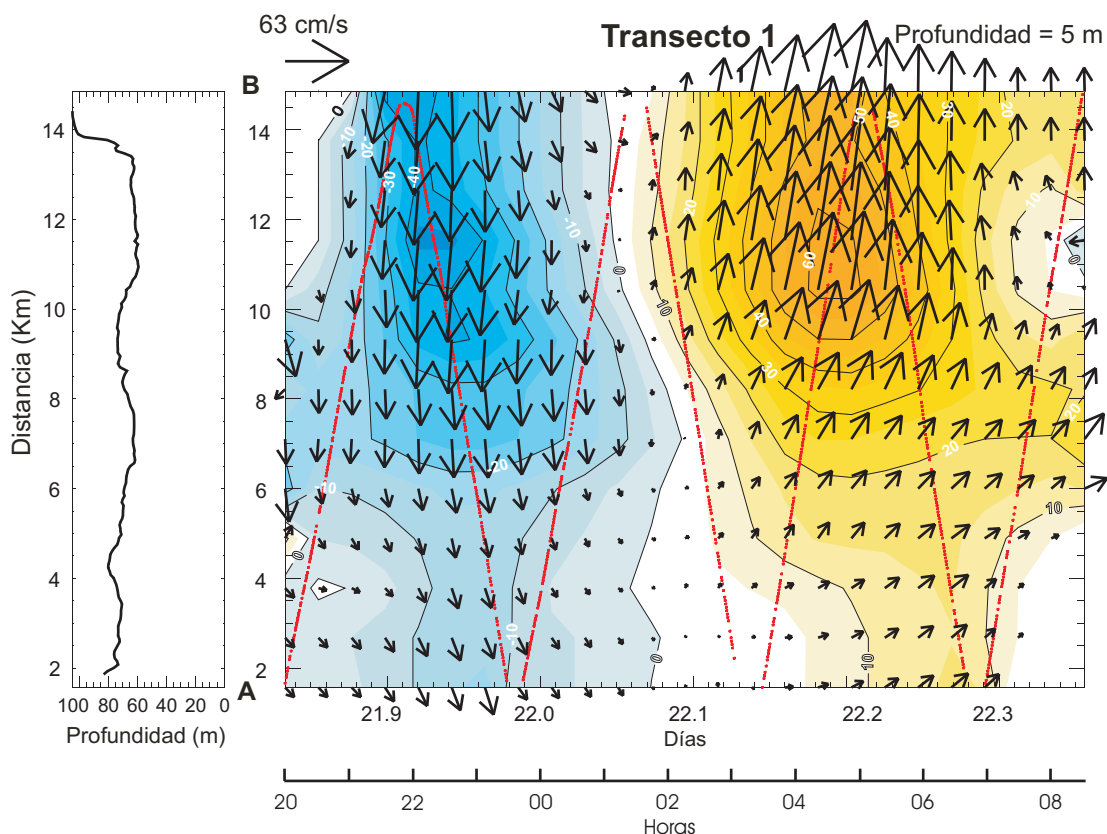


Fig. 10: Contornos y vectores de velocidad superficial a 5 m de profundidad durante un período semidiurno de marea (aprox. 12 horas) en el transecto 1 del sector isla Meninea. Azules son velocidades negativas (hacia el sur) y amarillos positivas (hacia el norte). En el costado izquierdo está el perfil del fondo en este transecto. Letras A y B son los extremos del transecto. Ver figura 4 para numeración y letras en extremos del transecto.

Fig. 10: Contours and velocity vectors at 5 m depth during a semidiurnal tidal cycle (aprox. 12 hours) in transect 1 of Isla Meninea region. Negative velocities in blue (southward) and positive velocities in yellow (northward). Bottom profile along the transect is on the left side. Letters A and B are the ends of the transect. See figure 4 for identification of transect numbers and letters at the ends of the transect.

no se observan variaciones considerables a lo largo del transecto. Las líneas punteadas muestran valores positivos sólo en el caso del transecto 2 en la zona de la estación C, sugiriendo entrada hacia el norte del flujo que proviene del canal Darwin por ese costado. El transecto 1 muestra en general valores negativos (flujo hacia el sur), donde sus mayores valores absolutos se observan en la esquina B del triángulo, mientras que el transecto 3 muestra sus mayores valores negativos absolutos (hacia el oeste) en la esquina A.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos aportan antecedentes para obtener las primeras estimaciones de la dirección de la pluma estuarina del fiordo Aysén y las magnitudes de los flujos de sal en los cuatro sitios de muestreo. Como se indicó, el presente estudio no considera aquella porción de la pluma estuarina cercana a la boca, que sale del fiordo y se desvía hacia el sur ingresando al canal Costa, cuya evidencia ha sido sugerida por Cáceres (2004), sino que

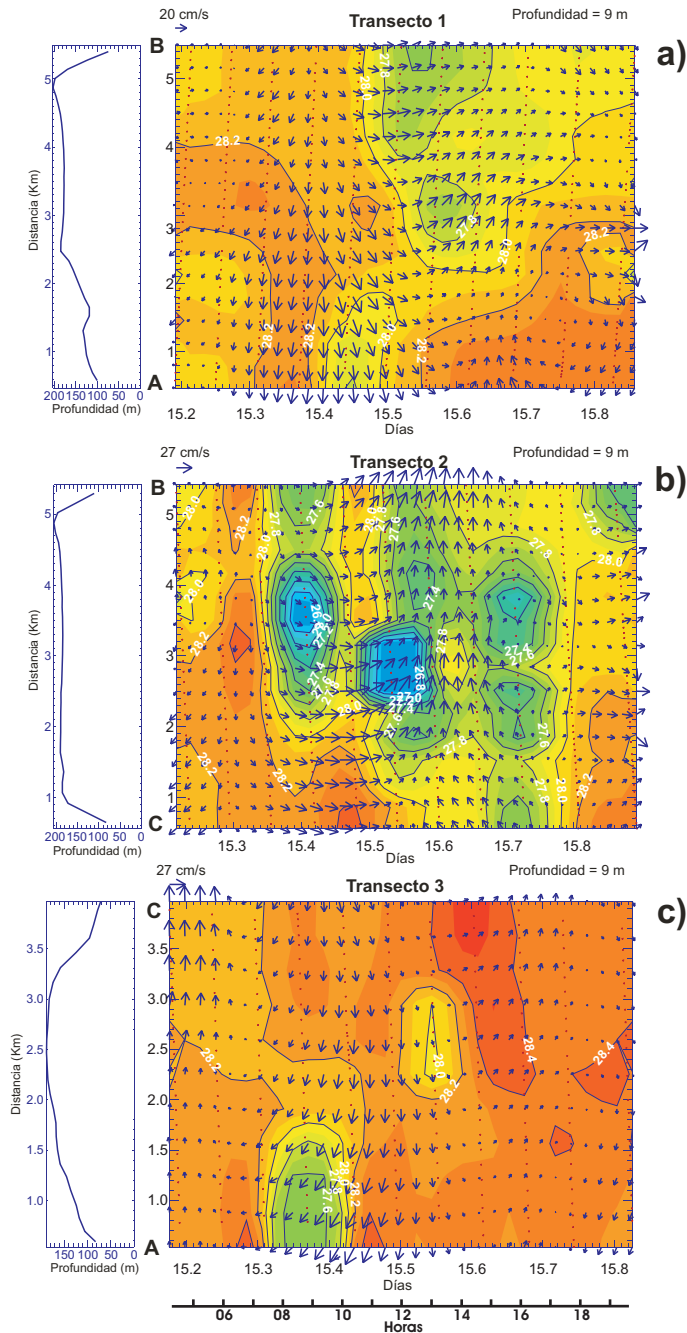


Fig. 11: Contornos de salinidad superficial a 1 m y vectores de velocidad a 9 m de profundidad durante un periodo de 18 horas en la confluencia de los canales Darwin-Errázuriz. (a) Transecto 1, (b) Transecto 2 y (c) Transecto 3. En el costado izquierdo está el perfil del fondo en este transecto. Letras A, B y C son los extremos del transecto. Ver figura 3 para numeración de transectos y de letras en esquinas del circuito.

Fig. 11: Surface salinity contours at 1 m depth and velocity vectors at 9 m depth during a 18 hours period in the confluence of Darwin and Errazuriz channels. a) Transect 1, b) Transect 2 and c) Transect 3. Bottom profile along the transect is on the left side. Letters A, B and C are the ends of the transect. See figure 3 for identification of transect numbers and letters at the corners of the circuit.

abarca sólo la ramificación de ésta a partir del paso del Medio hacia el oeste.

A partir de los resultados mostrados en las figuras 6 a 12, se propone un esquema de circulación de la pluma estuarina como el que se muestra en la figura 13. Este esquema considera que a partir de la región del paso del Medio, la pluma se ramifica en dos direcciones, una hacia el norte y otra hacia el sur. La que se desvía hacia el sur transportaría aguas de baja salinidad, lo que se infiere a partir de los datos de menor salinidad en el lado sur de paso del Medio, asociado a las mayores velocidades en la dirección suroeste. Sobre el sector norte de este paso, hay recurrencia de aguas de mayor salinidad que ingresan hacia el este, las que se presume ingresarían desde el norte del canal Moraleda a través de la constricción de Meninea. Siguiendo la rama sur, las aguas de menor salinidad se ramificarían nuevamente, ingresando por el costado este del canal Errázuriz hacia el sur y hacia el oeste por el lado sur del canal Darwin. Las aguas de mayor salinidad superficial provenientes desde el oeste por el lado norte del canal Darwin se moverían hacia el noreste. La rama norte, por otra parte, evacuaría principalmente a través de la constricción de Meninea, pero sin alcanzar la latitud de la isla Tuap, donde los flujos medios son hacia el sur, por lo que se sugiere que la pluma se dispersaría a través de los canales laterales, como el canal Ninualac, hacia el oeste, antes de alcanzar la latitud de esta isla.

La preferencia de la pluma a desviarse hacia la izquierda de su dirección es un fenómeno ya observado por Cáceres *et al.* (2002) y Cáceres (2004) en la boca del fiordo Aysén, y corresponde a una respuesta de la hidrodinámica transversal del flujo a seguir el Efecto de Coriolis. Este patrón es observado no sólo en la región del paso del Medio, sino también en el acceso hacia el sur por el canal Errázuriz y hacia el oeste por el canal Darwin.

Si bien las direcciones observadas de ambas ramas sustentan una preferencia de dirección del flujo de agua más dulce hacia el sur, las magnitudes de los flujos de sal ofrecen un panorama menos consistente. Una comparación de las magnitudes de los flujos de sal to-

tales de las ramas norte y sur, estimados a partir de la ecuación 2.0, muestra que los valores hacia el sur (Fig. 12) están en el orden de $400 \text{ sal cm s}^{-1}$, un valor menor al alcanzado por la rama norte en Meninea de $727,5 \text{ sal cm s}^{-1}$, lo que favorecería la tesis de que la cuenca sur de Meninea exporta mayor cantidad de sal hacia el norte que hacia el sur. Estos valores, sin embargo, no consideran las dimensiones de las secciones transversales que cruzan estos flujos. Una aproximación al transporte total de sal, usando la ecuación 2.0 multiplicada por la sección transversal representativa de ambas ramas, permite una mejor aproximación de las magnitudes que se desplazan en ambas ramas. En la constricción de Meninea (ancho = 3,1 km) y en la sección C-B de la confluencia Darwin-Errázuriz (ancho = 4,5 km), para una capa superficial homogénea de 10 m de profundidad en ambos sitios, se obtienen estimaciones del orden de $2,2 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en Meninea y de $2,0 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en Darwin-Errázuriz. Esta aparente similitud, sin embargo, no considera las diferentes fechas en que se realizaron las mediciones. Los caudales de río (Tabla II), en el caso de Meninea (rama norte) fueron al menos un 60% más altos que los observados en la rama sur, lo que presumiblemente hizo aumentar las velocidades de las corrientes hacia el norte sobre la constricción, incrementando los transportes de sal estimados. Si esta diferencia en los caudales de río entre los meses de abril y agosto tuviera efectos sustanciales en los valores de transporte, la rama sur podría estar exportando más sal que la norte. Asimismo, la mayor frecuencia de vientos desde el norte, observados en los meses de primavera y verano en la región (Cáceres *et al.*, 2002), favorecerían el mayor transporte hacia el sur. Otro aspecto de tipo metodológico, que dificulta la comparación, es la falta de datos de salinidad superficial sobre el transecto en Meninea, lo que hace que el contraste con los otros transectos tenga limitaciones y en algunos casos sea sólo referencial. La tesis de que la rama sur exportaría más sal que la norte en similares condiciones de caudales de río resulta entonces plausible, pero su sustentación con los datos disponibles es baja y cae en el ámbito de lo teórico. Futuras investigaciones para estimar los transportes hacia el

norte y hacia el sur en estas ramas debieran considerar mediciones transversales comparables en la misma época.

En lo que se refiere a las direcciones, sin embargo, la orientación hacia el suroeste asumida por la pluma luego de pasar por el paso del Medio, también sugerida en imágenes satelitales de color del océano por Cáceres (2004) y por datos de estaciones oceanográficas del área en estudio por Calvete (2006), respaldan este resultado. El predominio de las direcciones de

velocidad hacia el sur y suroeste tanto en paso del Medio como en el extremo sur del transecto en Meninea, es un patrón consistente que permite sostener que la rama sur es mayoritariamente observada en la cuenca sur de Meninea.

Sólo el transecto ubicado en la zona norte del canal Moraleda (cercano a isla Tuap) mostró la presencia de un frente intramareal débil con un gradiente horizontal de 1,5 de salinidad por km durante la llenante. No se observaron evidencias de este fenómeno en las otras áreas

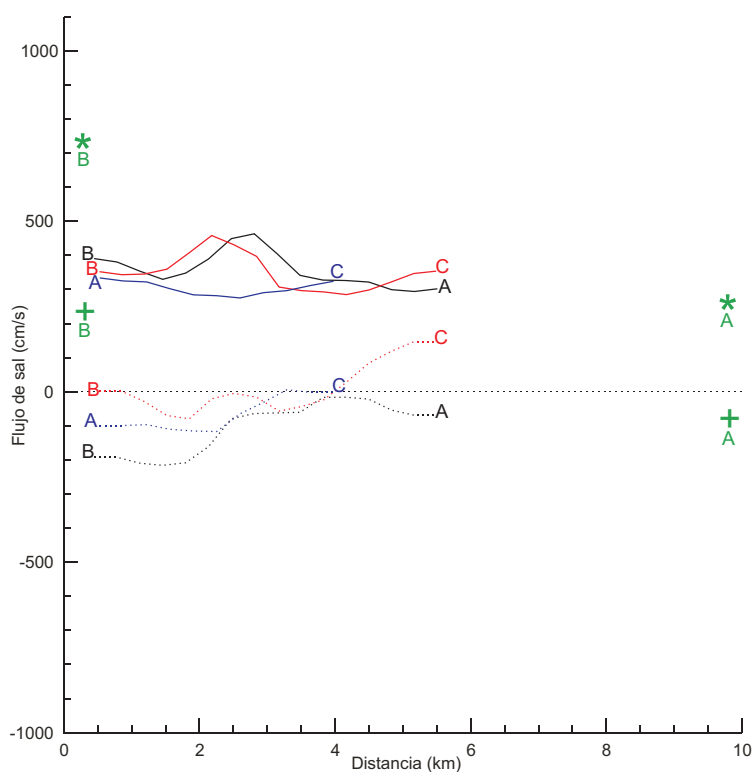


Fig. 12: Valores de flujo de sal en los tres transectos de la confluencia Darwin-Errázuriz. Letras corresponden a extremos del transecto, línea punteada (ec. 1.0) es el flujo perpendicular a la orientación del transecto, línea continua (ec. 2.0) es la magnitud total del flujo. Los asteriscos son los valores de flujo de sal (ec. 2.0) en los extremos del transecto en Meninea y los signos de suma son sus valores de flujo longitudinal (ec. 1.0). Cada color representa a cada transecto: negro transecto 1, rojo transecto 2, azul transecto 3 y verde transecto en Meninea.

Fig. 12: Salt fluxes in transects at the confluence of Canal Darwin and Canal Errázuriz. Letters are the ends of the transect, dotted lines are the perpendicular fluxes to the transect orientation (eq. 1.0), solid line is the total magnitude of the fluxes (eq.2.0). Asterisks are the total magnitudes (ec. 2.0) at the ends of the transect in Meninea and plus signs are the longitudinal fluxes (ec. 1.0). Each color represents transect number: black is transect 1, red is transect 2, blue is transect 3 and green is transect in Meninea.

Tabla II. Caudales del río Aysén.

Table II. River flows of Río Aysén.

Área de estudio	Fecha	Caudal río Aysén (m ³ s ⁻¹)
Paso del Medio	8 abril 2004	383,8*
Isla Tuap (en canal Moraleda)	7 abril 2004	383,8*
Isla Meninea (en canal Moraleda)	21 noviembre 2002	893,1
Canal Errázuriz con canal Darwin	15 agosto 2003	537,7

(*) Media histórica del mes

de estudio, lo que sugiere dominancia de fenómenos de mezcla en las áreas estudiadas. Las mediciones efectuadas preferentemente en la dimensión transversal en las áreas de estudio, favoreció el hallazgo (o evidencia de ausencia) de estos fenómenos.

Un análisis de las variaciones de salinidad entre los tres transectos del circuito Darwin-Errázuriz muestra indicios de mezcla superficial. Las variaciones de salinidad intramareal en los transectos 1 y 3 no superaron un punto de salinidad, contrario a lo observado en el transecto 2, donde la variación oscila entre los 26,2-28,2 aproximadamente. Las menores salinidades (26,2) se observan en el transecto 2, más cercano al paso del Medio y a la fuente de agua estuarina proveniente del fiordo Aysén. El aumento de la salinidad observado entre los transectos 1 y 3 (valores hasta 28) sugieren procesos de mezcla superficial que está actuando para generar este cambio. Como información, durante estas mediciones en Darwin-Errázuriz, se experimentaron fuertes vientos al final del ciclo de 18 horas que obligaron a suspender el muestreo. En lo que se refiere al intercambio a través del canal Darwin, se observa que sólo en la zona de la región sur del transecto 3 se exporta agua de menor salinidad durante la vaciante. Esto sugiere que la mayor parte del flujo en este transecto trae aguas más saladas desde la zona oceánica a través del canal Darwin en la capa superficial. En el transecto 2, en cambio, las menores salinidades se observaron en la región central del transecto, mientras que en el transecto 1 éstas fueron sobre su lado este.

Las observaciones combinadas en los tres transectos sugieren que la rama de agua superficial más dulce proveniente del paso del Medio se dirige hacia el sur llegando al sector del transecto 2, desde donde se ramifica hacia el oeste a través del sector sur del canal Darwin (transecto 3) y hacia el sur al canal Errázuriz en el sector este (transecto 1), como lo sugiere el diagrama esquemático de ramificación (Fig. 13).

CONCLUSIONES

Se propone un esquema de circulación de la pluma estuarina que sale del fiordo Aysén a partir de la región del paso del Medio, la cual se ramifica en dos direcciones, una hacia el norte y otra hacia el sur. La rama sur lleva aguas de más baja salinidad que la norte, asociada a mayores velocidades en la dirección suroeste. En su trayectoria hacia el sur se bifurca nuevamente con la mayor parte de ésta ingresando al canal Errázuriz por el lado oeste y la menor parte por el lado sur del canal Darwin. La rama norte no alcanzaría la latitud de la isla Tuap, sugiriéndose dispersión de ésta en los canales laterales. Estimaciones del transporte de sal en las ramas norte y sur no muestran resultados concluyentes, observándose similitudes en sus valores que podrían estar alterados por la señal de caudal de río estacional y por los eventos de viento desde el norte.

Hay una preferencia de la pluma a desviarse hacia la izquierda de su dirección en respuesta a la hidrodinámica transversal del

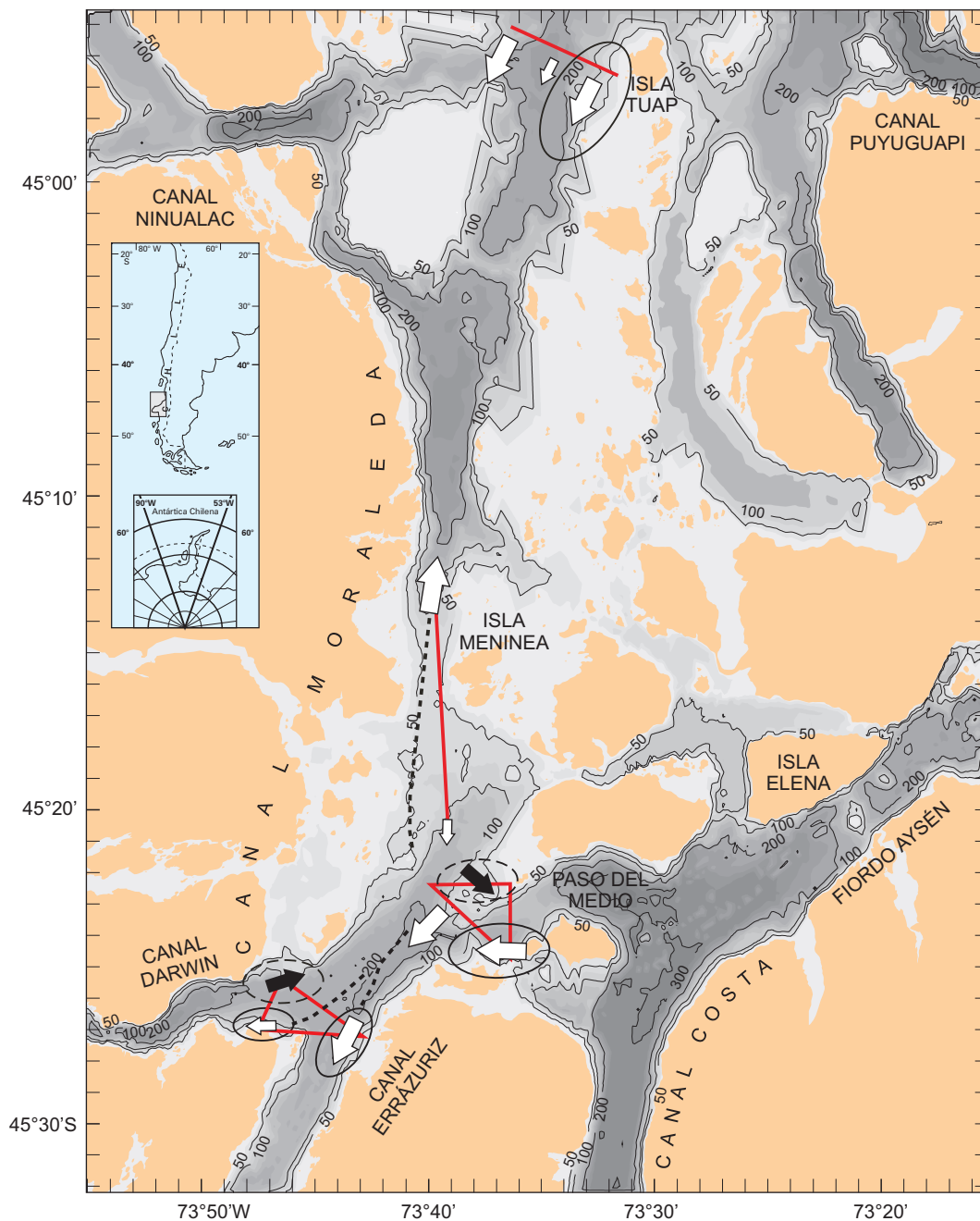


Fig. 13: Diagrama esquemático de la dirección de propagación de la pluma estuarina del fiordo Aysén sobre el canal Moraleda (flechas blancas) y del flujo de entrada superficial atribuido a la marea (flechas negras), en parte inferior. Elipses en línea continua corresponden a bajas salinidades y elipses en línea segmentada son altas salinidades. Línea de puntos es la línea sugerida para las dos ramas de la pluma estuarina. Parte superior muestra distribuciones en sector de isla Tuap.

Fig. 13: Schematic diagram of propagation of the Fierro Aysén estuarine plume over Canal Moraleda (white arrows) and of the surface inflow attributed to the tidal effect (solid black arrows), in lower part. Solid line ellipses are low salinities and dashed lines ellipses are high salinities. Dotted lines are suggested branches of the estuarine plume. Upper part shows arrows in Isla Tuap.

flujo a seguir el Efecto de Coriolis, patrón que se observa en paso del Medio y en Darwin-Errázuriz.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Comité Oceanográfico Nacional, por facilitar los datos de los cruceros CIMAR 8 y 9 Fiordos, y al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile por facilitar gentilmente los datos de la Campaña de Corrientes 2004. Agradecemos a Mónica Bello y Jenny Guerrero por la toma de datos de corrientes y CTD durante CIMAR 8 Fiordos. A Juan P. Belmar, Brian Sánchez, Rodolfo Muñoz, Alejandro Núñez y a la tripulación de la L/M "Petrel", por la colaboración en el muestreo de datos de ADCP en terreno durante CIMAR 9 Fiordos. A Manuel Castillo y Mónica Bello por su colaboración en terreno en la Campaña de Corrientes 2004 y a los oficiales y tripulación del AGOR "Vidal Gormaz" por su apoyo en esta última campaña y durante CIMAR 8 Fiordos. Agradecemos también a la Dirección General de Aguas por la disposición de datos de caudales del río Aysén. Al proyecto MECESUP USC 0303 de Biología Marina de la Universidad de Valparaíso, por financiar y hacer posible la realización de la tesis de grado de María José González en dependencias de la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad de Valparaíso.

REFERENCIAS

- CÁCERES, M. (2004). Surface feature of the circulation in fjords of southern Chile observed in ERS and LANDSAT images. *Gayana* 68(2): 71-76.
- CÁCERES, M., A. VALLE-LEVINSON, H. SEPÚLVEDA & K. HOLDERIED. (2002). Transverse variability of flow and density in a Chilean fjord. *Continental Shelf Research* 22: 1.683-1.698.
- CALVETE, C. (2006). Caracterización de zonas ROFI y frentes asociados en los fiordos del sur de Chile ubicados entre la boca del Guafo y laguna San Rafael. Tesis de Magister en Ciencias con mención en Oceanografía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 80 pp.
- CHAPMAN, D. & S. LENTZ. (1994). Trapping of coastal density front by the bottom boundary layer. *Journal of Physical Oceanography* 24: 1.464-1.479.
- DYER, K. (1973). *Estuaries: A physical Introduction*. Second Edition. Wiley, New York. 140 pp.
- GARVINE, R. (1974). Physical features of the Connecticut river outflow during high discharge. *Journal of Geophysical Research* 79(6): 831-846.
- GUZMÁN, D. & N. SILVA. (2002). Caracterización física y química y masas de agua en los canales australes de Chile entre la boca del Guafo y golfo Elefantes (Crucero CIMAR 4 Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar*, 25 (2): 45-76.
- HILL, A. (1998). Buoyancy effect in coastal and shelf seas. In, *The Sea*, vol 10, Wiley & Sons, New York. 21-62 pp.
- JAY, D. A., W GEYER, R. J. UNCLES, J. VALLINO, J. LARGIER & W. BOYTON. (1997). A review of recent developments in estuarine scalar flux estimation. *Estuaries*, 20 (2): 262-280.
- JOYCE, T. (1989). On *in situ* calibration of shipboard ADCPs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 6: 169-172.
- KAY, D. J., D. A. JAY & J. MUSIAK. (1996). Salt transport from Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) and Conductivity-Temperature-Depth (CTD) data: A methodological study. In: *Buoyancy Effects on Coastal and Estuarine Dynamics*, Coastal and Estuarine Studies, volume 53 AGU, 195-212 pp.
- KJERFVE, B., L. H. STEVENSON, J. PROEHL; T. H. CHRZANOWSKI & W. KITCHENS (1981). Estimation of material fluxes in an estuarine cross section: A critical analysis of spatial measurement density and errors. *Limnology and Oceanography* 26 (2): 325-335.

- NIEMEYER, H. & P. CERECEDA (1984). Hidrografía. In: Geografía de Chile. Vol. 8. Instituto Geográfico Militar 320 pp.
- PICKARD, G. (1971). Some physical oceanographic features of inlets of Chile. *Journal Fish. Bd. Canadá* 28: 1.077-1.106.
- 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). *Revista de Biología Marina* 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 I Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar*, 20: 23-106.
- VALLE-LEVINSON, A. & J. BLANCO (2004). Observations of wind influence on exchange flows in a strait of the Chilean Inland Sea. *Journal of Marine Research* 62: 721-741.
- VALLE-LEVINSON, A. & K. M. LWIZA (1995). The effects of channels and shoals on exchange between the Chesapeake Bay and the adjacent ocean. *Journal of Geophysical Research* 100 (C9): 18.551-18.563.
- VALLE-LEVINSON A. & L. P. ATKINSON. (1999). Spatial gradients in the flow over an estuarine channel. *Estuaries* 22 (2A): 179-193.
- WONG, K. C. (1994). On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary. *Journal of Geophysical Research* 99: 14.209-14.222.