

4.1 Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes

Hellmuth A. Sievers¹ & Nelson Silva²

¹Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales. Universidad de Valparaíso
E-mail: hellmuth.sievers@uv.cl

²Escuela de Ciencias del Mar. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
E-mail: nsilva@ucv.cl

La región de los canales y fiordos australes de Chile, que se extiende aproximadamente entre los 41,5° y 55,0° S, ha estado recibiendo cada vez más atención por parte de la comunidad científica chilena, que se refleja en el aumento de cruceros de investigación y en el número de publicaciones. Previo al inicio del Programa CIMAR en 1995, los trabajos oceanográficos fueron escasos, esporádicos y limitados en sus observaciones. Las primeras investigaciones sistemáticas correspondieron a la expedición sueca Lund University-Chile (1948-1949) realizada entre Puerto Montt y el canal Moraleda (Brattström & Dahl 1951), y a la expedición canadiense Hudson-Chile 70 (marzo de 1970), que abarcó desde Puerto Montt hasta el seno Almirantazgo. Si bien Pickard (1971, 1973) analizó la información obtenida en este crucero, lo hizo principalmente para comparar las características oceanográficas entre las aguas interiores de Canadá y Chile. Posteriormente, Silva *et al.* (1995) utilizaron los datos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto de la expedición Hudson-Chile 70 y efectuaron el análisis oceanográfico de los canales, esteros, senos, estuarios y golfos ubicados entre Puerto Montt y la laguna San Rafael. Un estudio similar fue realizado por Guerrero (2000) para la zona comprendida entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes.

Otros trabajos realizados en la zona austral, fueron los cruceros estacionales en el fiordo Aysén entre 1991 y 1992 (Sievers & Prado, 1994) y en la zona magallánica, en los canales de tráfico internacional (Celio, 1991; Panella *et al.*, 1991; Antezana, 1999). En relación a la zona exterior del océano Pacífico adyacente, se contaba con los datos de algunas estaciones oceanográficas de las expediciones Hudson-

Chile 70 y Piquero (1969), analizados por Silva (1978) y Silva & Neshyba (1977, 1979/1980).

Los resultados obtenidos durante los cruceros CIMAR-Fiordos en la Zona Puerto Montt a laguna San Rafael (Zona Norte; 100 estaciones), golfo de Penas a estrecho de Magallanes (Zona Central; 90 estaciones) y, estrecho de Magallanes a cabo de Hornos (Zona Sur; 51 estaciones), han permitido conocer las características físicas y químicas, masas de agua y circulación de esta extensa región (Silva *et al.*, 1997, 1998; Silva & Calvete, 2002; Sievers *et al.*, 2002; Valdenegro & Silva, 2003).

Con esta información se ha logrado identificar las masas de agua presentes en la zona oceánica adyacente y en aguas interiores, y proponer sobre la base de la distribución de las características físicas y químicas del agua, modelos esquemáticos de circulación general. Así, mediante diagramas T-S, se identificaron las masas de agua presentes en la zona oceánica adyacente a la región de canales australes (Silva & Neshyba, 1979/1980; Sievers & Nowlin, 1984; Silva *et al.*, 1995, 1997; Sievers *et al.*, 2002; Valdenegro & Silva, 2003). En el área adyacente a la Zona Norte, entre la superficie y 800 m de profundidad, se identificó el Agua Subantártica (ASAA) que se extiende hasta 150 m de profundidad, remanentes del agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) entre 150 y 300 m y el Agua Intermedia Antártica (AIAA) bajo 300 m. En la Zona Central, también hasta 800 m de profundidad, se identificó frente al golfo de Penas el ASAA hasta 150 m, el AESS con su núcleo entre 200 y 300 m, y el AIAA con su núcleo alrededor de 600 m de profundidad. Hacia el sur, en el sector del golfo Trinidad no aparece el AESS (Sievers *et al.*,

2002), pero se detecta un máximo de salinidad, no asociado al mínimo de oxígeno característico del AESS, que fue atribuido por Silva & Neshyba (1979/1980) al Agua Subsuperficial del Pacífico Occidental (ASSPO), proveniente del oeste. En la Zona Sur, Sievers & Nowlin (1984) identificaron el ASAA hasta 150 m de profundidad y bajo ésta, el Agua Modal Subantártica (AMSAA), descrita por Mc Cartney (1977), con un espesor que puede variar entre 300 y 700 m. Bajo el AMSAA, a profundidades que pueden sobrepasar los 1.000 m se encuentra el AIAA, seguida a mayor profundidad por el Agua Circumpolar Profunda (ACP).

De este conjunto de masas de agua, las dos primeras penetran a la zona de aguas interiores, el ASAA por la capa superficial y el AESS por la profunda, las que se desplazan hasta donde la batimetría de los golfos y canales lo permite. El ASAA se va mezclando con agua dulce (AD) en distintas proporciones, conforme al aporte de ríos, ventisqueros, escurrimiento costero, pluviosidad y cercanía o lejanía de las fuentes de AD. Silva *et al.* (1998) determinaron la mezcla de ASAA con AD en canales y fiordos, mediante el método del triángulo de mezcla y estimaron el grado de penetración del AESS en aguas interiores. Cuando esta última no está presente, ocurre un proceso de mezcla lineal entre ASAA y AD. El agua con salinidades entre 31 y 33 psu resultante de esa mezcla, se denominó Agua Subantártica Modificada (ASAAM) y aquella con salinidades menores, como Agua Estuarina (AE). A su vez, para esta última propusieron una clasificación en tres categorías de acuerdo al rango de participación de cada una de ellas en la mezcla estuarina, siendo el agua estuarina-salada: más de 66% de agua de mar (21 a 31 psu), estuarina-salobre: entre 33 y 66% de agua de mar (11 a 21 psu) y estuarina-dulce: menos de 33% de agua de mar (2 a 11 psu).

La distribución vertical de las características oceanográficas indican que, en general, en la región de aguas interiores se detecta una estructura de dos capas. La capa superior, en las Zonas Norte y Central, alcanzó profundidades entre 20 y 30 m (Sievers & Prado 1994; Silva *et al.*, 1995, 1997; Sievers *et al.*, 2002) y en la Zona Sur entre 50 y 75 m (Valdenegro & Silva, 2003).

La capa superior, donde las características son más variables, generalmente está separada por fuertes gradientes verticales (picnoclina, oxiclina, nutriclina) de la capa más profunda, donde la distribución vertical tiende a ser más uniforme.

Al utilizar la distribución de las características físicas y químicas del agua y considerando que ellas actúan como integradores que permiten inferir la dirección del flujo neto, Silva *et al.* (1995, 1998), Sievers *et al.* (2002) y Valdenegro & Silva (2003) propusieron modelos esquemáticos de circulación vertical para algunos fiordos y canales (Figs. 1a a 1d).

Los primeros modelos de circulación general fueron propuestos para la Zona Norte de acuerdo al análisis de los datos del crucero Hudson-Chile 70 (Fig. 1a; Silva *et al.*, 1995), incluyen el flujo de aguas estuarinas hacia el océano y la penetración de aguas oceánicas hacia el interior de los canales, tanto para la circulación vertical como horizontal. El desarrollo del crucero CIMAR 1 Fiordos, permitió validar esta proposición original y ampliar los modelos propuestos.

De acuerdo con la distribución de las características observadas, Silva *et al.* (1998) separaron la circulación general horizontal en tres niveles que representan de manera simple la circulación neta o residual (Figs. 2a-2c). El primero corresponde a la capa superficial entre 0 y 20-30 m de profundidad, el segundo o intermedio entre 30 y 150 m y el tercero desde 150 m hasta el fondo. El nivel superficial constituido por AE, que a medida que se aleja de las fuentes de agua dulce hacia el océano, va aumentando su salinidad, fluye hacia fuera de los canales y golfos (Fig. 2a). El nivel intermedio compuesto por ASAA que ingresa al golfo Corcovado por la boca del Guafo, donde es modificada a ASAAM por su mezcla con aguas superficiales menos salinas, se bifurca en dos ramas fluyendo una hacia el norte hasta el seno Reloncaví, y la otra hacia el sur, hasta el estero Elefantes (Fig. 2b). En el tercer nivel, ingresa AESS también por la boca del Guafo, cuyo desplazamiento hacia la región interior está limitado por la topografía submarina. Esta agua llena sólo las zonas profundas (> 150 m) del extremo sur del golfo Cor-

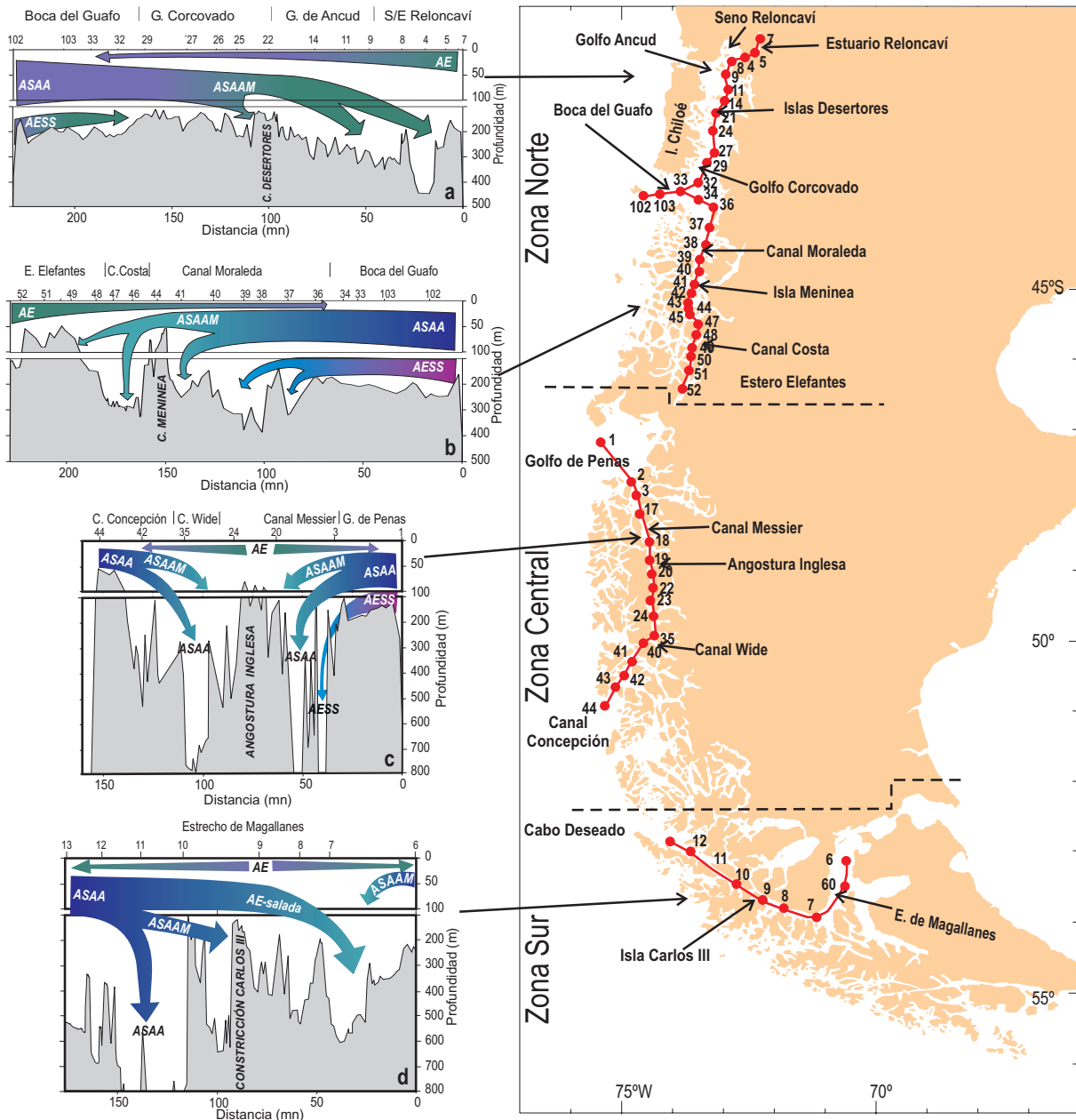


Figura 1: Modelo esquemático de la circulación vertical en las secciones: a) boca del Guafo a estuario Reloncaví; b) boca del Guafo a estero Elefantes; c) golfo de Penas a canal Concepción; d) estrecho de Magallanes (adaptado de: Silva *et al.*, 1998; Sievers *et al.*, 2002; Silva & Valdenegro, 2003).

covado y de los canales Jacaf, Puyuguapi y Moraleda, hasta la constricción-umbral de Meninea (Fig. 2c).

Los canales oceánicos al sur de Chiloé poseen bajas profundidades en sus extremos occidentales producto de un umbral somero a lo largo de la plataforma continental, por lo tanto,

el AESS no puede penetrar en ellos (Fig. 2c). Además, estos canales son angostos, relativamente profundos y con gran cantidad de islas en su interior, lo que dificulta el libre intercambio entre las aguas oceánicas y las del canal central constituido por el Moraleda, Errázuriz y Elefantes y, por lo tanto, con los canales continentales adyacentes (Figs. 2a y 2b).

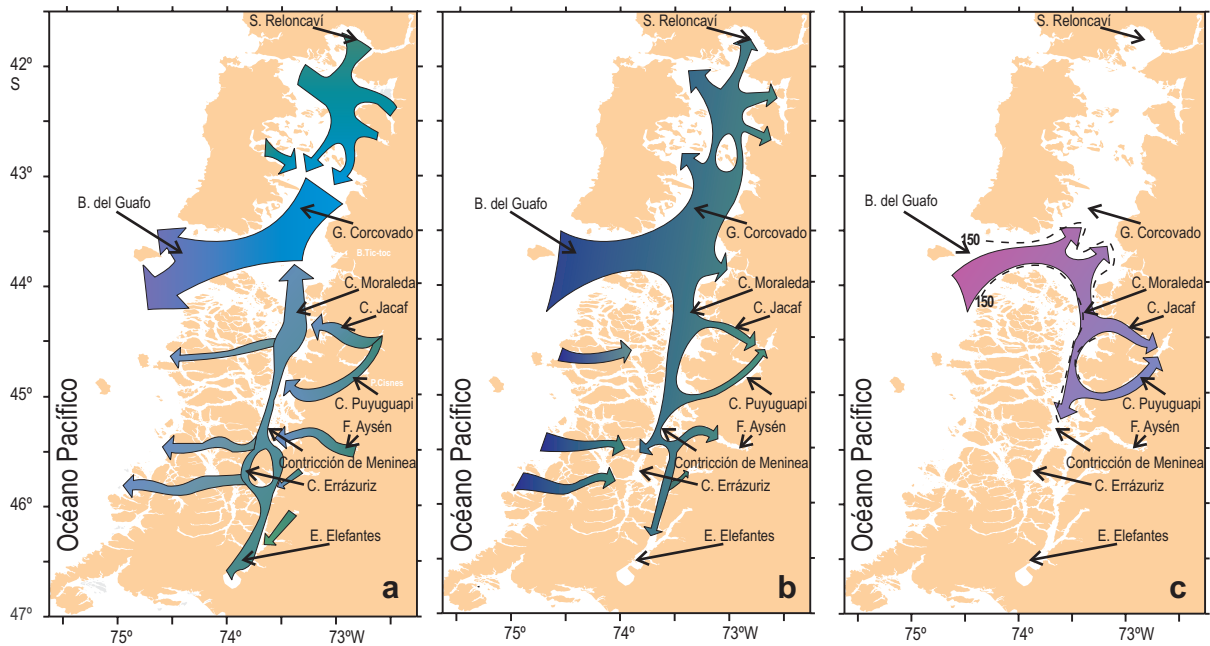


Figura 2: Modelo esquemático de la circulación horizontal: a) nivel superficial (0- ~30 m); b) nivel intermedio (~30- ~150 m), c) nivel profundo (~150 m al fondo) (tomado de Silva *et al.*, 1998).

En cuanto a circulación vertical, en la Zona Norte existen dos constricciones-umbrales de importancia que actúan como barreras al flujo de agua, que son el paso Desiertos-Apiaco (< 100 m), entre los golfos de Ancud y Corcovado, y la constricción de Meninea (< 50 m) en el canal Moraleda. Aunque no son los únicos obstáculos que interfieren con el libre desplazamiento de las aguas, constituyen los umbrales menos profundos, comparados con aquellos que separan el golfo Ancud del seno Reloncaví o el cordón submarino de 120 m de profundidad ubicado al norte de Meninea. Tal vez la mayor importancia de estos accidentes topográficos radica en que al restringir o impedir el paso de AESS, con su bajo contenido de oxígeno disuelto hacia las microcuencas de más al norte o sur, permite que el ASAAM mezclada con el AE, fluya sobre estos cordones submarinos y se hunda al lado opuesto llenando esas microcuencas con aguas ricas en oxígeno disuelto (Figs. 1a y 1b). Esta circulación facilita la ventilación de la microcuencas y evita la disminución del contenido de oxígeno disuelto a niveles cuasi-anóxicos o anóxicos en los canales y fiordos.

En la Zona Central también se produce una situación interesante en el canal Messier, donde la angostura Inglesa, una constricción-umbral de

sólo 80 m de profundidad, divide este canal en dos sectores que separan profundas microcuencas, donde la del norte supera los 1.300 m y la del sur los 750 m (Fig. 1c). Las características del agua que llena estas microcuencas indican que, si bien corresponde al ASAA, ésta tiene distinto origen y debido al “efecto de represa” de la angostura Inglesa, no logran mezclarse entre sí. La del norte es ASAA proveniente de los 50-150 m, que penetra al canal Messier a través del golfo de Penas y la del sur es ASAA que ingresa por los canales Trinidad y Concepción, pasando sobre el umbral adyacente a la plataforma continental de 75 a 100 m de profundidad (Sievers *et al.*, 2002). El origen geográfico distinto de esta agua se aprecia por las diferencias en sus características, teniendo la del sur valores mayores de temperatura y oxígeno disuelto, y menores de salinidad y densidad.

El esquema de circulación vertical propuesto para este canal (Sievers *et al.*, 2002), indica que en el nivel superficial (0-50 m) se producen flujos netos de AE hacia el océano, al norte de la constricción de la angostura Inglesa a través del golfo de Penas y también al sur de ésta, a través de los canales Wide y Concepción. A su vez, a la microcuena norte del

canal Messier penetra agua del golfo de Penas y en aquéllas, al sur de angostura Inglesa, lo hace a través de los canales Trinidad y Concepción, llenando los canales Wide y Messier con ASAAM en la capa intermedia (50 a 75-100 m) y bajo ésta con ASAA hasta el fondo de las microcuencas del primero. Por otro lado, a la microcuenca del Messier también penetra AESS, cuyo ingreso, dada la relativamente baja profundidad del golfo de Penas, se estima ocasional bajo condiciones oceanográficas y meteorológicas favorables (Fig. 1c) (Sievers *et al.*, 2002; Palma & Silva, 2004).

En la Zona Sur se destaca el estrecho de Magallanes subdividido en tres microcuencas, la oriental entre la entrada del océano Atlántico y la Segunda Angostura, la central, entre dicha angostura e isla Carlos III, y la occidental desde dicha isla hasta la boca occidental del estrecho (Fig. 1d). En general, las masas de agua en el sistema de fiordos y canales magallánicos corresponden a Agua Subantártica del Pacífico, Subantártica del Atlántico (ASAA) y AD, que al mezclarse forman AE y ASAAM (Valdenegro & Silva, 2003).

El esquema de circulación vertical propuesto por Valdenegro & Silva (2003) considera, en el estrecho de Magallanes, un flujo superficial neto de AE desde la zona central del estrecho tanto hacia el Pacífico como hacia el Atlántico. A su vez, en la capa subsuperficial se produce un flujo neto de ASAA desde el Pacífico, que ingresa al estrecho sobrepasando el umbral costero de la boca occidental y se hunde hacia el interior bajo la capa superficial. Esta agua se va mezclando con AD para formar AE y ASAAM en los primeros 150 m. La microcuenca occidental se llena, bajo los 150 m con ASAA. La constricción-umbral de unos 100 m de profundidad existente frente a la isla Carlos III, actúa como barrera física que impide que el ASAAM y ASAA provenientes del Pacífico fluyan hacia la microcuenca central. Sin embargo, el Agua Estuarina-salada (AE-salada), ubicada entre 75 y 100 m de profundidad, sobrepasa la constricción-umbral y se hunde en la microcuenca central debido a su mayor densidad y llena la zona profunda con AE-salada (Fig. 1d). Esto causa una diferencia entre las masas o cuerpos de agua que llenan ambas microcuencas, quedando la occidental con AE en la capa superior (< 75 m), ASAAM

en la intermedia (75-150 m) y ASAA en la profunda (> 150 m), y la central con AE-salada en toda la columna vertical (Valdenegro & Silva, 2003). El ingreso de agua desde el océano Atlántico, no parece tener mayor influencia en la microcuenca central del estrecho de Magallanes, afectando principalmente la microcuenca oriental, donde el flujo de ingreso y salida es modulado por las mareas (Valdenegro & Silva, 2003).

Referencias

- Antezana, T. 1999. Hydrographic features of Magellan and Fuegian Inland passages and adjacent subantarctic waters. *Sci. Mar.*, 63(supl. 1): 23-34.
- Brattström, H. & E. Dahl. 1951. Reports of the Lund University-Chile expedition 1948-1949. I. General account, list of stations, hydrography. *Lunds Universitets Arsskr. N.f. Avd. 2 Bd.*, 46(8): 86 pp.
- Celio, M. 1991. Preliminary report on thermohaline features of canales Beagle, Ballenero, Brecknock, Cockburn and Magdalena (Southern Hemisphere), Autumm 1991. *Boll. Oceanol. Teor. Appl.*, 9(2-3): 281-286.
- Guerrero, Y. 2000. Distribución de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en las aguas interiores de la zona de canales australes, entre el golfo de Penas y seno Almirantazgo. Tesis de Oceanografía. Escuela de Ciencias del Mar. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 99 pp.
- Mc Cartney, M. 1977. Subantarctic mode water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41: 1.001-1.006.
- Palma, S. & N. Silva. 2004. Distribution of siphonophores, chaetognaths and euphausiids and oceanographic conditions in the fjords and channels of southern Chile. *Deep-Sea Res. II*, 51: 513-535.
- Panella, S., A. Michellato, R. Perdicaro, G. Magazzu, F. Decembrini & P. Scarazzato. 1991. A Preliminary contribution to understanding the hydrological characteristics of the Strait of Magellan: Austral Spring 1989. *Boll. Oceanol. Teor. Appl.*, 9(2-3): 107-126.

- Pickard, G. L. 1971. Some physical oceanographic features of inlets of Chile. *J. Fish. Bd. Canada*, 28: 1.077-1.106.
- Pickard, G. L. 1973. Water structures in Chilean Fjords. En: R. Fraser. (Comp.). *Oceanography of the Pacific 1972*. New Zealand National Commission for UNESCO, Wellington, pp. 95-104.
- Sievers, H. A. & W. D. Nowlin. 1984. The stratification and water masses in Drake Passage. *J. Geophys. Res.*, 89(c6): 10.489-10.514.
- Sievers, H. A. & 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.
- Sievers, H. A., C. Calvete & N. Silva. 2002. Distribución de características físicas, masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR Fiordo 2), Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 25(2): 17-43.
- Silva, N. 1978. Water mass structure and circulation off Southern Chile. MSc. Thesis Department of Oceanography. Oregon State University, Corvallis, 83 pp.
- Silva, N. & C. Calvete. 2002. Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR Fiordo 2). *Cienc. Tecnol. Mar*, 22(1): 23-88.
- Silva, N. & S. Neshyba. 1977. Corrientes superficiales frente a la costa austral de Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 3: 37-42.
- Silva, N. & S. Neshyba. 1979-1980. Masas de agua y circulación geostrófica frente a la costa de Chile austral. *Inst. Antárt. Chil., Ser. Cient.*, 25/26: 5-32.
- Silva, N., C. Calvete & H. A. Sievers. 1997. Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero CIMAR-Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 20: 23-106.
- Silva, N., C. Calvete & H. A. Sievers. 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero CIMAR-Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21: 17-48.
- Silva, N., H.A. Sievers & R. Prado. 1995. Características oceanográficas y una proposición de circulación, para algunos canales australes de Chile entre 41° 20' S, 46° 40' S. *Rev. Biol. Mar., Valparaíso*, 30(2): 207-254.
- Valdenegro, A. & N. Silva. 2003. Caracterización oceanográfica física y química de la zona de canales y fiordos australes de Chile entre el estrecho de Magallanes y cabo de Hornos (CIMAR 3 Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar*, 26(2): 19-60.