

**CONTRASTE DE LAS CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DEL SENO AYSÉN, CHILE, ENTRE INVIERNO Y VERANO (LAT. 45° 20'S).\*****HELLMUTH A. SIEVERS C.<sup>1</sup> & ROBERTO PRADO-FIEDLER<sup>1</sup>**

**ABSTRACT:** Sievers H. & R. Prado-Fiedler 1994. Contrast in oceanographic characteristics between winter and summer at Seno Aysén, Chile, (Lat. 45° 20' S). *Revista de Biología Marina, Valparaíso* 29(2): 167-209.

In view of the scarcity of oceanographic information for Chilean fjords -mostly the sparse data gathered during the Chile 70 cruise of the Canadian ship Hudson- detailed oceanographic observations of the entire Seno Aysén were carried out in a winter cruise (24 September-3 October 1991) and a summer cruise (14-21 January 1992). 28 oceanographic stations were occupied on each cruise. Water samples were collected to a maximum depth of 270 m to measure temperature, salinity, density, dissolved oxygen content and micronutrient concentrations (silicate, phosphate, nitrate, nitrite and ammonium).

The main differences between seasons were in the surface temperatures. In winter these were low at the fjord's head and increased towards its mouth. A horizontal front was present in the vicinity of Elena Island. In summer the pattern was reversed with the highest temperature at the head. The surface salinity was very low at the head of the fjord in both seasons because of the Aysén River's out-flow and coastal runoff. Only minor differences were detected: during summer the water was somewhat fresher, and the front at Elena Island, the transition zone to more oceanic water, was weaker. During winter, the surface dissolved oxygen content was very high in the inner half of the fjord. The content was more homogeneous and lower in summer. Surface silicate concentration was very high in the inner half of the fjord during winter (probably augmented by ashes ejected from the Hudson Volcano), decreasing considerably towards its mouth. By summer the concentration had diminished to about one half its winter concentration. Cuervo River is an important source of phosphate in both seasons. Phosphate decreased with distance from the river's mouth. The lowest values were detected at the head of the fjord. In winter, the concentration was higher at the fjord's mouth. A horizontal front was present in the vicinity of Elena's Island. The highest concentration of nitrate was detected during summer in the fjord's central region while the lowest values were found at its head and mouth. Concentrations in nitrate and ammonium were relatively low.

Generally an increase in temperature with depth occurred in both seasons, except near the mouth of the fjord. In winter the temperature increased continuously from surface to bottom. In summer a subsurface minimum was present along most of the length of the fjord. Deep water temperatures were very similar in both seasons. The vertical salinity distribution was characterized by a strong halocline (and strong pycnocline) to a depth of 20-25 m. At the bottom of this upper layer the salinity was approximately 29 PSU coinciding in general with the isopycnal of 22. Farther down the salinity increased gradually.

Seno Aysén is basically a two layer estuary between its head and Elena Island. From there to its mouth, it acquires the characteristics of a moderately stratified estuary.

The high surface dissolved oxygen content decreased with depth, particularly in summer. It reached its lowest content in the deep waters of the inner third of the fjord, indicating low ventilation. A strong vertical gradient was present in the distribution of silicate for winter. This gradient was considerably weaker in summer. A minimum lay below this gradient. During summer the minimum was found only in the fjord's outer half. The phosphate distribution was divided in wintertime into two sectors with higher concentrations towards the mouth. In summer the distribution of phosphate was more homogeneous and its concentration relatively high. Nitrate exhibited a maximum in the deep waters, which extended along most of the length of the fjord in summer. In winter its

\* Proyecto FONDECYT 91-0410.

<sup>1</sup> Instituto de Oceanología, Universidad de Valparaíso, Casilla 13-D, Viña del Mar, Chile.

distribution was divided into two regions by a thin layer with higher concentrations. Nitrite and ammonium concentrations were quite variable and low.

Deep water renewal occurs at low rates driven by kinetic forces in these almost uniform density waters. The renewal can be seen in the horizontal direction as a progressive penetration of water from the Moraleda's Channel characterized by higher salinity, density, dissolved oxygen content and phosphate concentration, and low silicate. This relationship is not as clear for nitrate, whose maximum at intermediate depth showed discontinuities.

The limiting nutrient for primary production in Seno Aysén is nitrogen since its ratio to phosphate approaches the Redfield ratio only in winter. There was a severe reduction of the N:P ratio in summer, specially in the surface layer. Silicate remains high during summer.

**Key words:** Fjord oceanography, estuary, water characteristics, nutrients, seasonal variability, Seno Aysén, Chile.

**RESUMEN:** Sievers H. & R. Prado-Fiedler. 1994. Contraste de las características oceanográficas del seno Aysén, Chile, entre invierno y verano (LAT. 45° 20'S). Revista de Biología Marina, Valparaíso 29(2): 167-209.

Se efectúa una comparación de las características oceanográficas de invierno y de verano del seno Aysén hasta una profundidad de 270 m. Para este efecto se registraron y analizaron, en un total de 28 estaciones muestreadas en ambas épocas del año, la temperatura, salinidad, densidad, contenido de oxígeno disuelto y concentraciones de silicato, fosfato, nitrato, nitrito y amonio.

En invierno las temperaturas superficiales son más bajas en la cabeza del fiordo, aumentando hacia la boca, situación que se invierte en verano. En la vecindad de isla Elena se observó la formación de un frente térmico horizontal. Se destaca además el aumento de la temperatura con la profundidad en ambas estaciones del año, que ocurre en todo el fiordo con excepción de su boca. Este aumento se da en forma continua desde la superficie en invierno y a partir de un mínimo relativo subsuperficial en verano. Las aguas más profundas mantienen una temperatura muy similar entre ambos períodos.

La salinidad superficial presenta pocas variaciones entre invierno y verano, siendo muy bajas en el fondo de saco del fiordo por desembocar allí el río Aysén. En invierno se observó la presencia de un frente indicativo de una transición a aguas de características más oceánicas, ubicado cerca de isla Elena, el cual se debilitó en verano. La distribución vertical se caracteriza en ambas épocas por una fuerte haloclina hasta unos 20 a 25 m de profundidad, bajo la cual se encuentra un aumento más gradual. El límite inferior de la capa superficial se pudo identificar con la isohalina de 29 PSU, la cual a su vez corresponde a la isopícnica de 22. El seno Aysén presenta una estructura de estuario de dos capas tipo fiordo, que se extiende desde su cabeza hasta isla Elena. Desde dicha isla hacia la boca adquiere características de estuario moderadamente estratificado.

El contenido de oxígeno disuelto a nivel superficial de invierno es alto, en especial en la mitad superior del fiordo, tornándose algo más bajo y homogéneo en verano. En profundidad el oxígeno disuelto disminuye rápidamente, especialmente en verano y de modo más acentuado en la parte superior del fiordo. Esto indica una ventilación profunda relativamente baja en esta zona.

En invierno la concentración del silicato en el agua superficial de la mitad superior del fiordo es muy alta (aumentada probablemente por la ceniza proveniente de la erupción del volcán Hudson), disminuyendo considerablemente hacia la boca. En verano los valores se reducen a menos de la mitad. Su distribución vertical presenta un fuerte gradiente en invierno, que se debilita considerablemente en verano. A su vez, el fosfato muestra en invierno una distribución en profundidad con dos zonas, ubicándose las concentraciones más altas hacia la boca del fiordo. Esta distribución es más homogénea en verano, con concentraciones que son relativamente altas para la estación. A nivel superficial y durante ambas épocas del año, se aprecia un importante suministro de fosfato por el río Cuervo. Por su parte el nitrato se destaca por la presencia de un máximo en la capa profunda, que en

verano se extiende a lo largo de la mayor parte del fiordo. A nivel superficial la concentración de nitrato disminuye apreciablemente en el verano, con sus menores valores ubicados tanto en la boca como en la cabeza del fiordo y separados por una zona de concentraciones algo mayores que ocupa la zona central del fiordo. El nitrato y el amonio presentan concentraciones variables y relativamente bajas durante los dos períodos. De los nutrientes analizados el limitante para la producción primaria en el fiordo es el nitrógeno. Su proporción se aproxima a la razón de Redfield sólo en invierno en todo el cuerpo de agua.

La renovación del agua más profunda parece ser baja y probablemente ocurra por acción de fuerzas cinéticas dada una distribución uniforme de densidad en profundidad. Estas aguas provienen del canal Moraleda y se caracterizan por su mayor salinidad, densidad, contenido de oxígeno y concentración de fosfato, además de una baja concentración de silicato. Por su parte la información del nitrato no es conclusiva al respecto, por presentar este micronutriente discontinuidad de su máximo a profundidades intermedias.

Palabras claves: Fiordo, seno Aysén, estuario, oceanografía de fiordo, nutrientes, variabilidad estacional, renovación de aguas profundas, Chile.

## INTRODUCCION

Los sistemas de fiordos han sido desde antaño motivo de interés científico por sus características peculiares, por presentar gradientes tanto verticales como horizontales de una multitud de factores ambientales y por constituir ecosistemas susceptibles de ser manejados. La hidrodinámica de estos sistemas es compleja, estando caracterizada por circulación estuarina en el nivel superior (Stommel 1951), por diversos grados de mezcla determinados por la geometría del fiordo, por las condiciones oceanográficas al exterior del fiordo, por las condiciones meteorológicas, por la cantidad y ubicación de flujos de agua dulce y su variación relacionada con la precipitación anual (Pedersen 1978) y por ondas internas generadas por la marea (Stigebrandt 1979). Las diferencias batimétricas y la presencia de barreras determinan efectos topográficos importantes sobre la circulación, limitando el flujo horizontal del agua profunda en los sistemas de fiordos (Huppert 1980, Smith & Farmer 1980).

La circulación vertical se encuentra determinada por la estabilidad de la columna de agua. La presencia de una pycnoclina en sistemas de latitudes templadas, consecuencia de una fuerte haloclina, puede verse reforzada o disminuida en sus efectos por la distribución vertical de temperatura (Dietrich *et al.*, 1975). En el caso de que exista una barra y la pycnoclina se ubique a profundidades similares o mayores que el umbral de esta barra cabe esperar la existencia de condiciones anóxicas en los niveles profundos del fiordo, como consecuencia de la limitación impuesta a la circulación vertical.

Las investigaciones oceanográficas (físicas, químicas y biológicas) se han concentrado principalmente en los fiordos del hemisferio norte (Canadá, Noruega). En el hemisferio sur se han llevado a cabo casi exclusivamente en Nueva Zelanda. Existe muy poca información oceanográfica sobre los fiordos chilenos siendo los trabajos más importantes los de Pickard (1971, 1973) y Pickard & Stanton (1980), basados en las

observaciones efectuadas por el buque canadiense C.S.S. "Hudson" en marzo de 1970.

Las aguas interiores chilenas constituyen una extensa área marítima llena de canales y senos que presentan un enorme interés científico, como también un potencial económico de gran envergadura. El aumento progresivo de las actividades que conllevan una utilización del mar en sistemas semicerrados, como el de los fiordos, se traduce en una alteración en mayor o menor proporción de las condiciones naturales. Es importante por lo tanto realizar oportunamente investigación oceanográfica comenzando especialmente con aquellos senos y canales que a corto plazo pueden verse sometidos a fuertes presiones, ya sea por el crecimiento de centros urbanos e industriales en sus cercanías, como por concentraciones de actividades diversas como pesca, acuicultura, tráfico marítimo, minería y otras.

Entre los canales y senos se destaca como uno de los más importantes, en razón a su ubicación, forma y utilización por diversas actividades, el seno Aysén. La información oceanográfica previa disponible proviene del crucero Hudson 70 (Chile 70 cruise, 1971) y del estudio para introducción del salmón del Pacífico (Koyama 1983; Cárdenas 1984). Esta información se reduce a sólo seis estaciones oceanográficas que fueron utilizadas exclusivamente para fines de comparación general entre sistemas de fiordos canadienses y chilenos, en un caso (Pickard 1971) y para estimar el período de liberación de alevines sobre la base de datos de temperatura y salinidad de la capa superficial, en el otro (Koyama 1983; Cárdenas 1984).

El presente trabajo constituye, por lo tanto, la primera descripción detallada de todo el cuerpo de agua de un fiordo chileno, que incluye información de nutrientes y tiene por objetivos caracterizar las distribuciones horizontales y verticales de las características oceanográficas así como su variabilidad entre las dos estaciones extremas del año, determinando de paso el tipo de estuario que se constituye en el fiordo Aysén.

## MATERIALES Y METODOS

Se efectuaron dos cruceros oceanográficos en el seno Aysén, uno a fines de invierno (entre el 24 de septiembre y el 3 de octubre de 1991) y otro en verano (desde el 14 al 21 de enero de 1992). En cada uno de estos cruceros se muestrearon 28 estaciones oceanográficas (Fig. 1). En cada estación se midió la temperatura del agua de mar con termómetros de inversión y se recolectaron muestras de agua con botellas Nansen e Hidro-Bios a profundidades preseleccionadas, entre la superficie y un máximo de 270 m. Para la selección de las profundidades observadas en la capa de agua hasta 50 m se utilizó la información obtenida *in situ* con un perfilador T/S (WTW Gerätebau modelo LF 191 con sensor LT1/T) y un electrodo específico de oxígeno YSI modelo 57.

Las muestras de agua fueron analizadas para determinar su salinidad, contenido de oxígeno disuelto y concentraciones de silicato, fosfato, nitrato, nitrito y amonio. Los métodos utilizados para las respectivas determinaciones fueron: salinidad por conductimetría mediante salinómetro de inducción Autolab; oxígeno disuelto por el método de Carrit



y Carpenter (1966), utilizando como ecuaciones de cálculo las de Culberson *et al.* (1991) recomendadas por WOCE; silicato por el método de Strickland y Parsons (1968); fosfato por el método de Korolef (1983a); nitrato y nitrito por los métodos de Grasshoff (1983 a y b) y amonio por el método de Korolef (1983 b). Los análisis del oxígeno disuelto fueron efectuados en terreno en ambos cruceros, en tanto que aquellos de micronutrientes se realizaron en terreno sólo para el cruce de invierno. En verano las muestras de los micronutrientes fueron congeladas a  $-20^{\circ}\text{C}$  inmediatamente de tomadas y preservadas con hielo seco para ser enviadas por vía aérea hasta Viña del Mar, donde se efectuó su análisis. El procesamiento de los datos se realizó utilizando computadores IBM PS con software desarrollados en el Instituto de Oceanología. De modo similar se efectuó el cálculo de las densidades, a los niveles observados, mediante el empleo de la ecuación internacional de estado de agua de mar (IES/80 UNESCO 1981).

La información así obtenida fue procesada manualmente para llevarla a gráficos de distribución superficial y secciones verticales para cada una de las características del agua de mar observadas. Adicionalmente se prepararon perfiles verticales por estación utilizando el software Harvard Graphics.

Considerando el ensanchamiento del seno Aysén hacia su boca se trazaron dos secciones verticales independientes, cuyas posiciones se indican en la figura 1. La sección 2, que corre paralela a la sección 1 próxima a la ribera sur del fiordo, aproximadamente desde el grupo de islas Cinco Hermanos hasta el canal Costa,

fue trazada para poder visualizar mejor posibles diferencias entre el sector norte, conectado a los canales Pilcomayo y Moraleda, y el sector sur con sus dos ensenadas y su boca abierta al canal Costa. En la época de invierno se mantuvo como estación común la número 28. La batimetría del fiordo se entrega en la figura 2.

Para una mejor comprensión de la distribución vertical de las características del agua, se ha estimado conveniente partir con la descripción de la sección 1, que abarca el seno en toda su longitud hasta el canal Moraleda (Fig. 1).

## RESULTADOS

### TEMPERATURA

El seno Aysén se caracteriza, a fines de invierno (septiembre) por una baja temperatura superficial en el fondo de su saco o cabeza ( $6,5^{\circ}\text{C}$ ), la que va aumentando hacia su boca, donde alcanza valores mayores de  $9^{\circ}\text{C}$ . Pero este aumento no es gradual distinguiéndose, en el tercio superior del fiordo, valores de temperatura menores hacia el sector norte (Fig. 3). A su vez, a la altura de isla Elena, se forma un gradiente horizontal de temperatura.

En verano (enero) la distribución superficial de la temperatura cambia radicalmente, alcanzando sus valores más altos en la cabeza ( $14^{\circ}\text{C}$  a  $16^{\circ}\text{C}$ ), con su máximo en bahía Chacabuco, en tanto que los más bajos se encuentran en la boca ( $<12,5^{\circ}\text{C}$ ), como se puede observar en la figura 4. También en esta época del año se manifiesta una disminución de la temperatura hacia el sector norte, en el

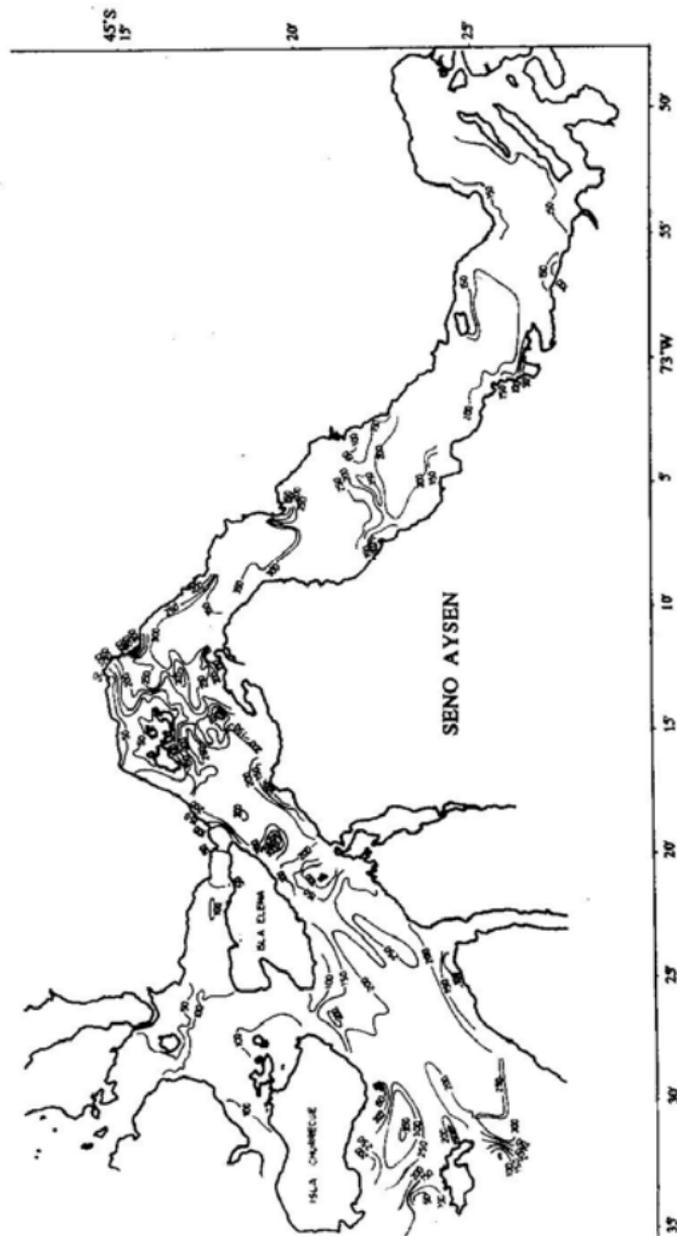


Fig. 2. Batimetría del seno Aysén.

tercio superior del fiordo, con mínimos frente a la desembocadura del río Cuervo y en ensenada Acantilada (Fig. 4).

En época de invierno lo que más resalta es el aumento de la temperatura con la profundidad hasta alcanzar valores algo mayores de  $10,5^{\circ}\text{C}$ , con un máximo registrado de  $10,72^{\circ}\text{C}$  a 260 m en la estación 15 (Fig. 5). Esta agua de mayor temperatura se encuentra en la mitad superior del seno. A partir de la zona donde cambia la orientación del fiordo (Est. 16) y coincidiendo con menores profundidades y un relieve submarino más accidentado, se produce una mayor homogeneidad en la distribución vertical de la temperatura. Esta alcanza su mayor uniformidad en la cercanía de la boca donde la variación, en toda la columna de agua, es de  $0,4^{\circ}\text{C}$  (Est. 28 a 30). La mayor variabilidad vertical de temperatura ( $\sim 3^{\circ}\text{C}$ ) se produce en los primeros 20 m, al fondo del saco.

Durante el invierno se observa que el aumento de temperatura de las aguas más profundas, hacia el fondo del fiordo, forma un gradiente vertical relativamente apreciable en el tercio superior del seno (entre la desembocadura del río Aysén hasta isla Mentirosa). Esta situación cambia radicalmente en el verano como puede apreciarse en la figura 6. En dicha época se forma una marcada termoclina a lo largo de todo el fiordo, que alcanza su gradiente máximo de  $5,5^{\circ}\text{C}/10\text{ m}$  frente a isla Mentirosa (Est. 11). Bajo esta termoclina se forma, entre los 30 y 40 m de profundidad, un mínimo estacional ( $< 10^{\circ}\text{C}$ ) que es continuo a lo largo de toda la mitad superior del fiordo y que también aparece en algunas estaciones hacia el occidente (Est. 22 y 30). La

temperatura de las aguas más profundas se mantiene con valores similares, si bien algo menores, a las de la época invernal. A su vez las temperaturas uniformemente bajas del invierno en la región de la boca, junto con aumentar considerablemente, dan paso a una mayor variabilidad vertical. El aumento de la temperatura alcanza hasta las mayores profundidades, presentando una diferencia que supera los  $1,5^{\circ}\text{C}$ .

En la sección 2 en invierno, con excepción de una menor temperatura superficial frente a la ensenada que se abre hacia el sur próxima a la estación 21, se observa que la distribución de la temperatura es muy similar a aquellas de la sección 1 (Fig. 5 y 7). En cambio en época de verano, con excepción de la capa superficial, se aprecian grandes diferencias en la distribución vertical de esta característica (Fig. 8). Mientras en la sección 1 se observan mínimos relativos a 30 y 50 m de profundidad (Fig. 6), en la sección 2 se destaca un máximo relativo ( $>11^{\circ}\text{C}$ ) centrado alrededor de los 50 m de profundidad (Fig. 8). A mayores profundidades, la distribución de la temperatura en la sección 2 es más uniforme y de valores más bajos que en el sector norte.

## SALINIDAD

La salinidad superficial aumenta en invierno de un agua prácticamente dulce, en el fondo de saco del seno ( $< 2\text{ PSU}$ ), a valores mayores de 27 PSU en las proximidades de su boca (Fig. 9). Este aumento no es gradual ya que en parte de la extensión del seno adopta una distribución más paralela a sus costas. Recién a la altura de isla Elena se torna más progresivo en dirección a la boca. Es

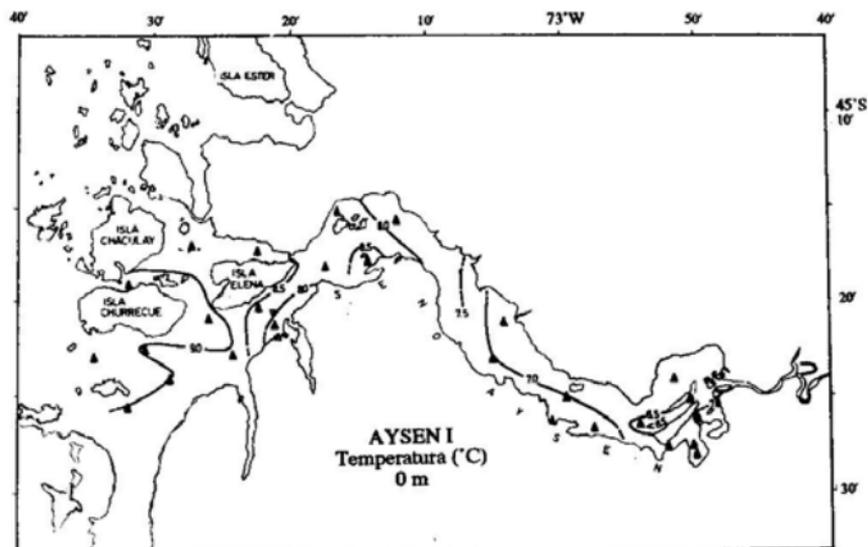


Fig. 3. Distribución de la temperatura superficial de invierno en °C (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

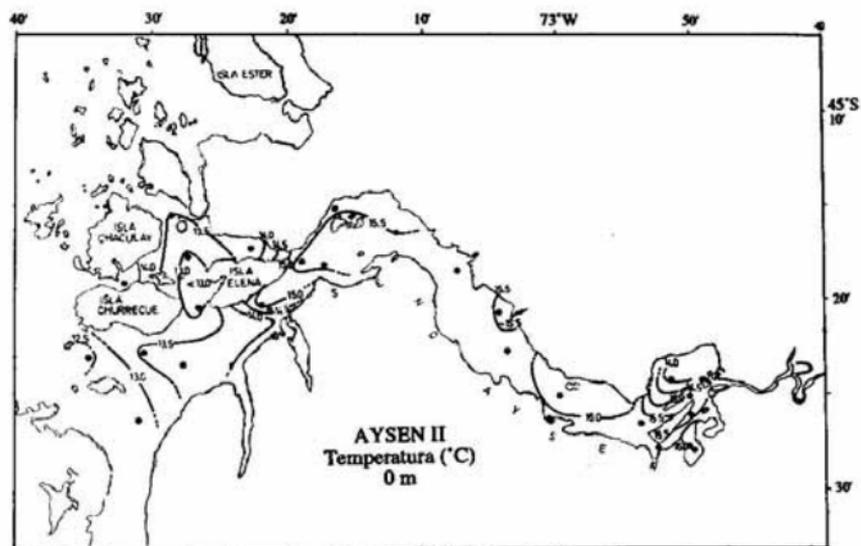


Fig. 4. Distribución de la temperatura superficial de verano en °C (14 al 21 de enero, 1992).

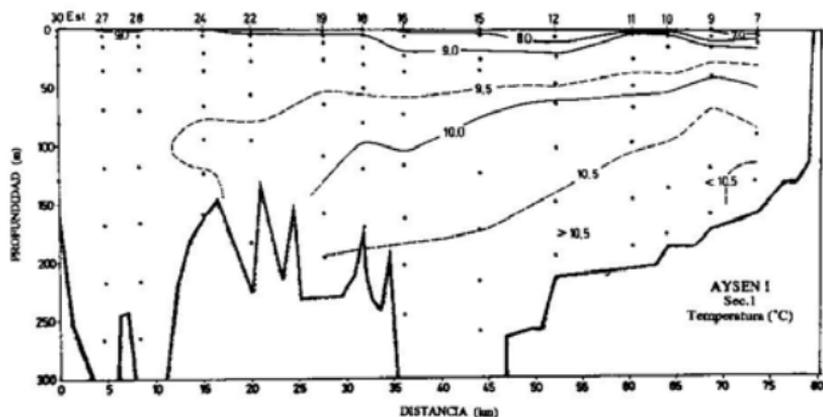


Fig. 5. Distribución vertical de la temperatura de invierno en °C en la sección 1 (24 de septiembre al 3 de octubre, 1991).

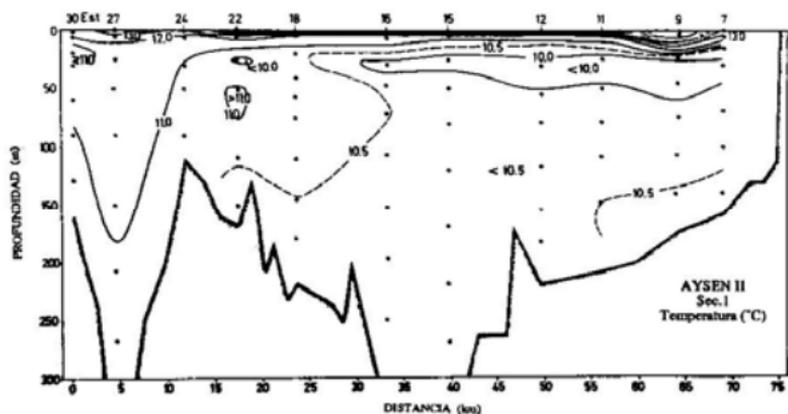


Fig. 6. Distribución vertical de la temperatura de verano en °C en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

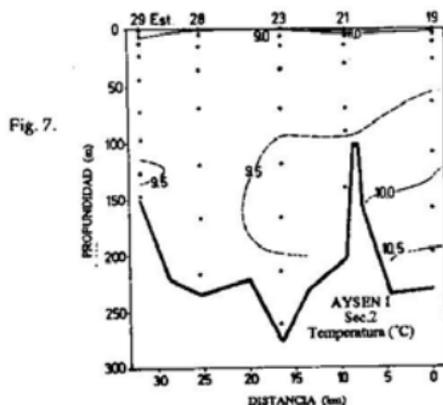


Fig. 7.

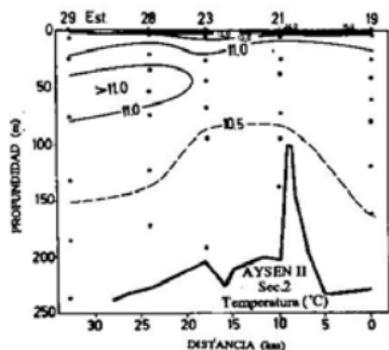


Fig. 8.

Fig. 7. Distribución vertical de la temperatura de invierno en °C en la sección 2 (24 de septiembre al 3 de octubre, 1991).

Fig. 8. Distribución vertical de la temperatura de verano en °C en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

también a la altura de esta isla donde se forma un gradiente horizontal de salinidad muy intenso, constituyendo un frente que marca una transición a aguas superficiales más oceánicas (Fig. 9). En la boca sur del seno, aquella que se abre hacia el canal Costa, se produce una considerable disminución en la salinidad superficial hasta valores menores de 20 PSU.

Durante el verano, el agua superficial en la cabeza del fiordo sigue siendo prácticamente dulce ( $< 2$  PSU), con un aumento gradual hacia el oeste (Fig. 10). El valor más alto se encuentra en la boca norte, abierta al canal Moraleda, con una salinidad de 26,8 PSU (Est. 30). En esta época se aprecia asimismo un gradiente horizontal en la región de isla Elena, pero de menor intensidad que en invierno.

La distribución vertical de la salinidad en la sección 1 indica que en invierno se forma un gradiente vertical muy marcado en la capa superficial, cuyo límite inferior queda bien representado por la isohalina de 29 PSU (Fig. 11). Esta isohalina, que se extiende a todo lo largo del seno Aysén, lo hace en profundidades que oscilan alrededor de los 20 m, excepto al este de la estación 10 donde la capa de agua de baja salinidad se profundiza alcanzando los 40 m de profundidad.

Las isohalinas mayores de 31 PSU, propias de las aguas más profundas, se han trazado a intervalos de 0,1 PSU para apreciar mejor el aumento más gradual de la salinidad hacia el fondo.

Si bien en el verano la isohalina de 29 PSU también se mantiene aproximadamente a 20 m de profundidad a lo

largo de todo el fiordo, se forma en la capa superior de agua una haloclina aún más marcada que en el invierno la que, en gran parte de su extensión, se concentra en los cuatro primeros metros de profundidad (Fig. 12). Esta capa se profundiza hacia la cabeza del fiordo, pero no sobrepasa los 25 m de profundidad. En la región de la boca la haloclina se debilita, debido a un aumento de las salinidades superficiales.

En las capas más profundas, bajo la isolinia de 29 PSU, se aprecia un gradiente vertical algo mayor que en invierno, consecuencia de un ascenso de algunas isohalinas en la columna de agua, en especial las de 30 y 31 PSU. Asimismo las salinidades profundas son algo menores que en el invierno, excepto en la zona más externa del fiordo, donde se produce un considerable aumento de la salinidad.

La sección 2, próxima a la ribera sur del seno Aysén, no presenta mayores diferencias respecto a la sección 1 tanto en invierno como en verano (Fig. 13 y 14), estando su descripción suficientemente caracterizada con lo ya señalado para las respectivas secciones. Diferencias menores en profundidad de las isohalinas más próximas al fondo obedecen a efectos topográficos.

## DENSIDAD

Las figuras 15 y 16 corresponden a las distribuciones superficiales de densidad expresadas en  $\sigma_t$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Esta sigue principalmente el patrón de distribución de la salinidad, con valores de densidad muy bajos en la cabeza del fiordo, que en verano disminuyen aún más, aproxi-

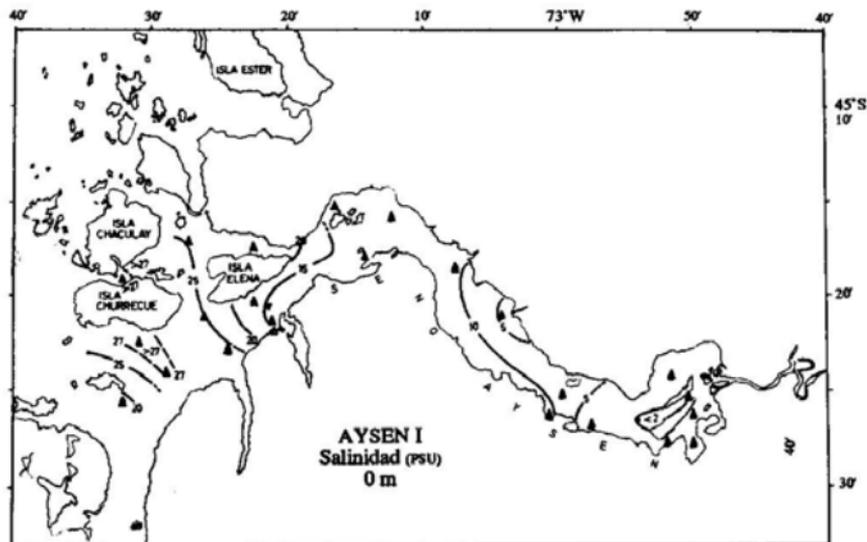


Fig. 9. Distribución de la salinidad superficial de invierno en unidades prácticas de salinidad, PSU (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

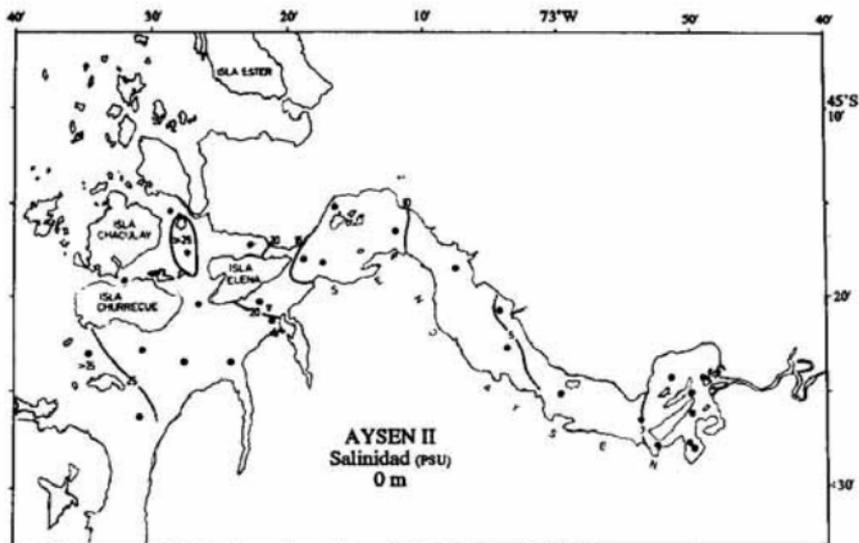


Fig. 10 Distribución de la salinidad superficial de verano en unidades prácticas de salinidad, PSU (14 al 21 de enero, 1991).

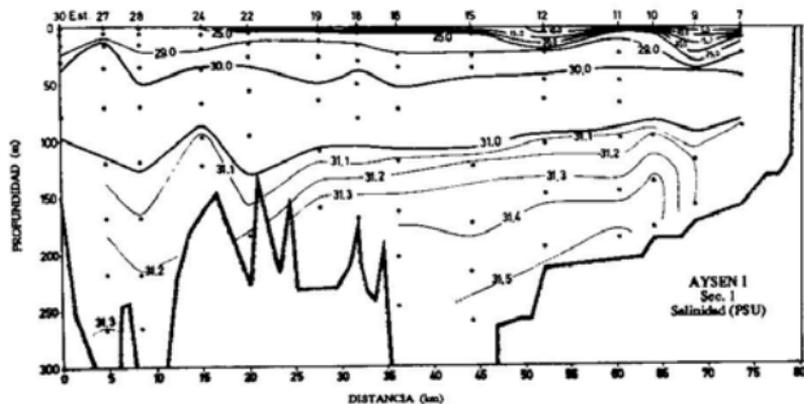


Fig. 11 Distribución vertical de la salinidad de invierno en unidades prácticas de salinidad, PSU, en la sección 1 (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

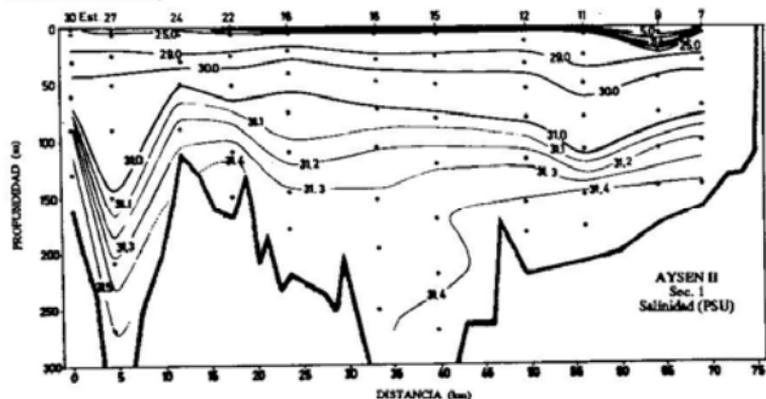


Fig. 12 Distribución vertical de la salinidad de verano en unidades prácticas de salinidad, PSU, en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

Fig. 13

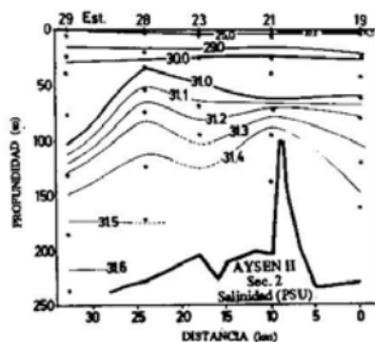
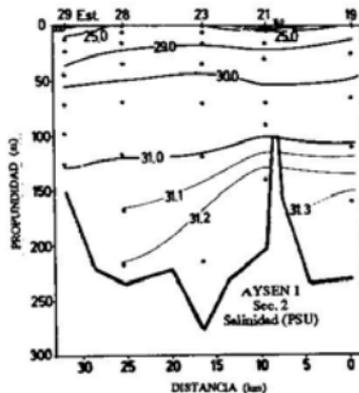


Fig. 14

Fig. 13 Distribución vertical de la salinidad de invierno en unidades prácticas de salinidad, PSU, en la sección 2 (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

Fig. 14 Distribución vertical de la salinidad de verano en unidades prácticas de salinidad, PSU, en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

mándose a la del agua dulce. La densidad aumenta hacia la boca del seno haciéndolo en forma gradual, especialmente en verano. En invierno ajustándose a las distribuciones tanto de la salinidad como de la temperatura adopta una orientación más paralela al eje del canal en algunos sectores del seno. Diferencias entre ambas épocas, aun cuando no son notables, se producen en la región de la boca del fiordo, como se aprecia de la ubicación de la isopicna de 20.

En cuanto a la distribución vertical de la densidad en la sección 1 (Figs. 17 y 18) ésta, si bien es muy similar en ambas épocas, presenta algunas diferencias, fundamentalmente en la capa superficial de aproximadamente unos 20 m, capa en la cual se forma una fuerte pycnoclina. El límite inferior de la pycnoclina y por lo tanto de ésta capa superficial podría considerarse representado por la isopicna de 22.

En esta capa superficial de fuerte gradiente vertical es posible reconocer en invierno tres grandes sectores aproximadamente iguales en extensión. En el tercio superior se observa que la pycnoclina presenta variaciones tanto en intensidad como en profundidad, debilitándose hacia la cabeza del seno (Fig. 17). Su mayor intensidad se produce en la estación 11, frente a isla Mentirrosa, con un gradiente de aproximadamente 3,5 unidades de  $\sigma_t$  por metro. En el tercio central, estaciones 12 a 18 (Fig. 1) la pycnoclina, siempre considerando 22 como su límite inferior, mantiene una profundidad más regular si bien con diferencias de intensidad en las estaciones extremas del sector (Fig. 17). Desde la estación 19 hacia el oeste la

pycnoclina se hace menos intensa a la vez que más superficial, manteniendo su límite inferior alrededor de los 10 m de profundidad, excepto en la cercanía de la boca (Est. 27). A mayor profundidad (bajo 20 m) el aumento en densidad se torna gradual, alcanzando sus valores más altos ( $> 24,15$ ) en las cuencas más profundas del seno.

En el verano la isopicna de 22 permanece alrededor de los 20 m de profundidad prácticamente a lo largo de toda la extensión del fiordo (Fig. 18). Se mantiene también una fuerte pycnoclina la cual se intensifica desde la estación 18 hacia el interior, alcanzando un gradiente máximo de 3,9 unidades de  $\sigma_t$  por metro en la estación 11. Más al interior, en el fondo de saco del fiordo, las bajas densidades alcanzan mayor profundidad, correspondiendo los valores superficiales prácticamente a los del agua dulce. La única diferencia notable en la distribución de la densidad en las aguas profundas, en relación a lo observado en invierno, es un marcado hundimiento de la isopicna de 24 y en menor medida de la de 23, en las cercanías de la boca (Est. 27).

Si bien las distribuciones verticales de densidad en la sección 2 guardan bastante similitud entre el invierno y el verano, se aprecian diferencias en las profundidades que alcanzan las isopícnas en la zona profunda, las que en verano ascienden como resultado de la presencia de aguas de mayor densidad bajo ellas (Figs. 19 y 20). En las cercanías de la boca del fiordo, las aguas del margen sur exhiben una mayor densidad bajo los 150 m que aquellas del margen norte, a igual profundidad, en verano (Figs. 18 y 20).

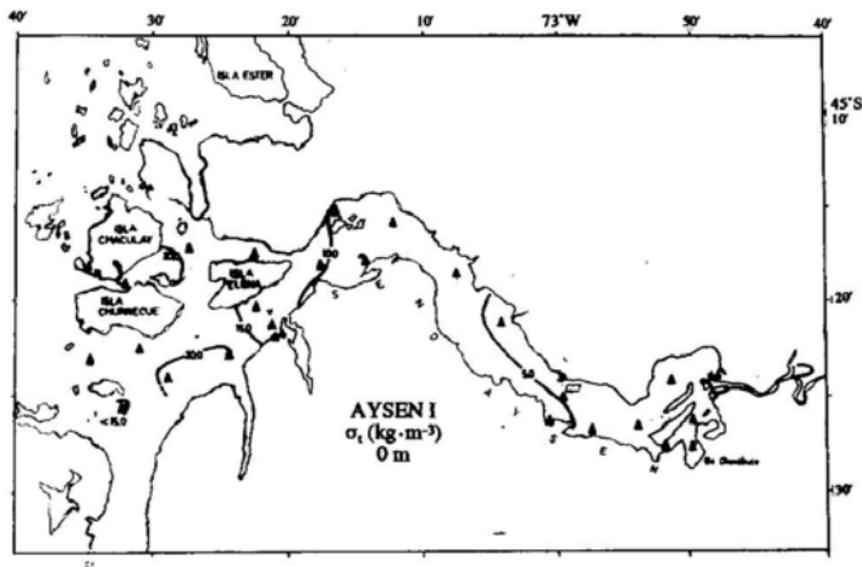


Fig. 15 Distribución superficial del parámetro de densidad  $\sigma_t$  de invierno en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

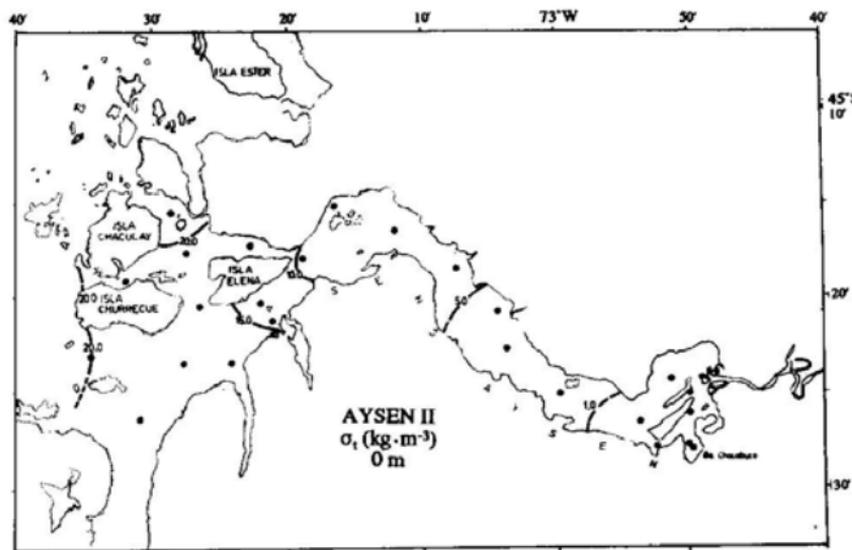


Fig. 16 Distribución superficial del parámetro de densidad  $\sigma_t$  de verano en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (14 al 21 de enero, 1992).

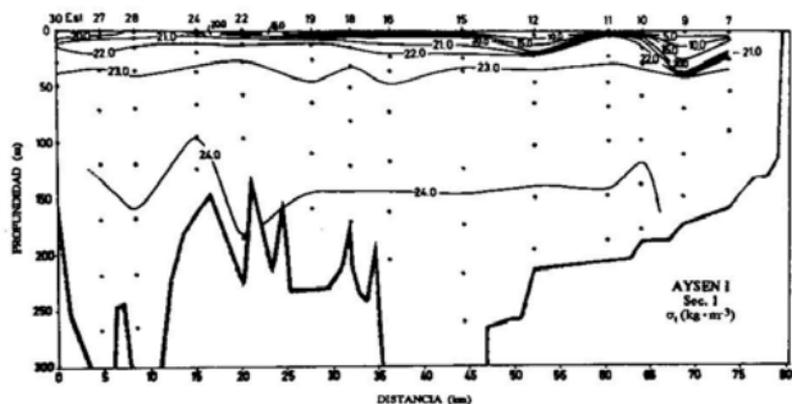


Fig. 17 Distribución vertical del parámetro de densidad  $\sigma_t$  de invierno en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  en la sección 1 (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

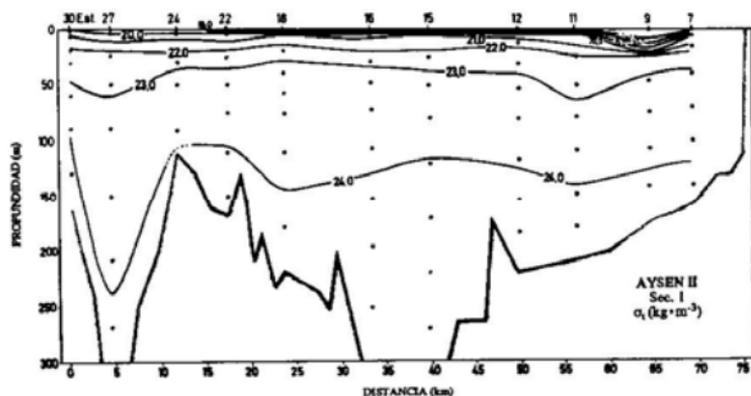


Fig. 18 Distribución vertical del parámetro de densidad  $\sigma_t$  de verano en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

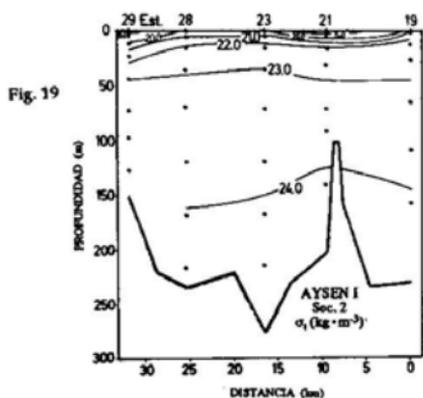


Fig. 19

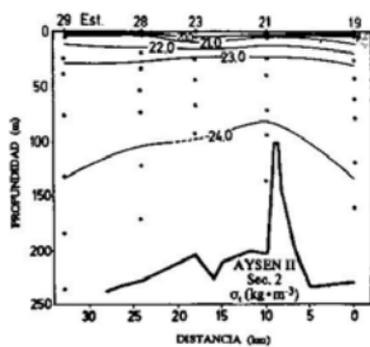


Fig. 20

Fig. 19 Distribución vertical del parámetro de densidad  $\sigma_t$  de invierno en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  en la sección 2 (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

Fig. 20 Distribución vertical del parámetro de densidad  $\sigma_t$  de verano en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

## OXIGENO DISUELTO

El oxígeno disuelto en superficie se caracteriza, en época de invierno, por valores muy altos, que alcanzan su máximo ( $> 10 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ ) hacia la ribera norte, en las proximidades de la desembocadura del río Cuervo (Fig. 21). También en esta zona se produce un gradiente horizontal hacia el sur, que abarca prácticamente la mitad superior del seno, descendiendo a valores menores que  $8,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ . El fondo de saco del fiordo se distingue por concentraciones de oxígeno más uniformes en torno a  $9,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ . En la mitad inferior del seno se produce, junto a un cambio de orientación de las isolíneas, una disminución gradual hacia la boca. Los valores mínimos se registran en las proximidades de la isla Churrecuc ( $< 7,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

En verano (Fig. 22), se observa que las concentraciones más altas se ubican en la cabeza del fiordo ( $> 8 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Con excepción de esta zona, se aprecia que la concentración del oxígeno disuelto superficial es muy homogénea, fluctuando en torno a  $7,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ , a lo largo del fiordo.

La distribución vertical del oxígeno disuelto en la sección 1 (Fig. 23) muestra la existencia de una oxiclina superficial, más marcada en el tercio superior del fiordo, la que en invierno alcanza un máximo de  $0,7 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  por metro, frente a la isla Misteriosa (Est. 11). La capa superficial se caracteriza, a todo lo largo del seno Aysén, por contenidos mayores que  $7 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ . En profundidad el descenso pasa a ser gradual, pudiendo apreciarse la existencia de dos

sectores de comportamiento diferente en cuanto a la distribución vertical del oxígeno disuelto. La mitad superior del seno se caracteriza por una disminución del contenido de oxígeno la que, en la región próxima a la cabeza, alcanza valores bastante bajos ( $< 3 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ ). En cambio en las proximidades de la boca los valores son altos y uniformes, especialmente bajo los 100m de profundidad ( $> 6 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Entre ambas regiones y coincidiendo con el cambio de orientación del fiordo, se forma en esta época del año un frente horizontal que se extiende verticalmente hasta el fondo (Fig. 23).

En el verano, si bien la concentración superficial ha disminuido, se mantiene la existencia de una oxiclina la que se intensifica entre las estaciones 11 y 12 por la formación de un máximo subsuperficial, con concentraciones mayores que  $9 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  (Fig. 24). A mayor profundidad se aprecia bastante similitud con la distribución de invierno, presentando valores bajos en el tercio superior del seno ( $< 3 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ ). En cambio, en la zona cercana a la boca, el contenido disminuye a concentraciones menores de  $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  y no se forma un frente horizontal como el que separa ambos sectores en invierno.

La sección 2 muestra, en invierno, una distribución del oxígeno disuelto muy similar a la encontrada en la sección 1 (Figs. 23 y 25). La única diferencia se manifiesta en la zona de la boca sur en que, bajo los 130 m de profundidad, se acentúa el pequeño máximo relativo encontrado en la sección 1 (Fig. 25).

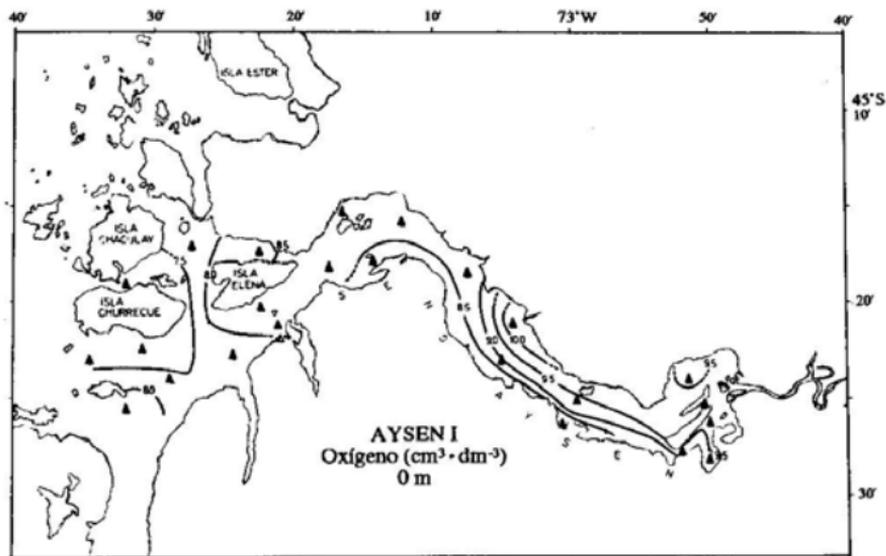


Fig. 21 Distribución superficial del contenido de oxígeno disuelto de invierno en  $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

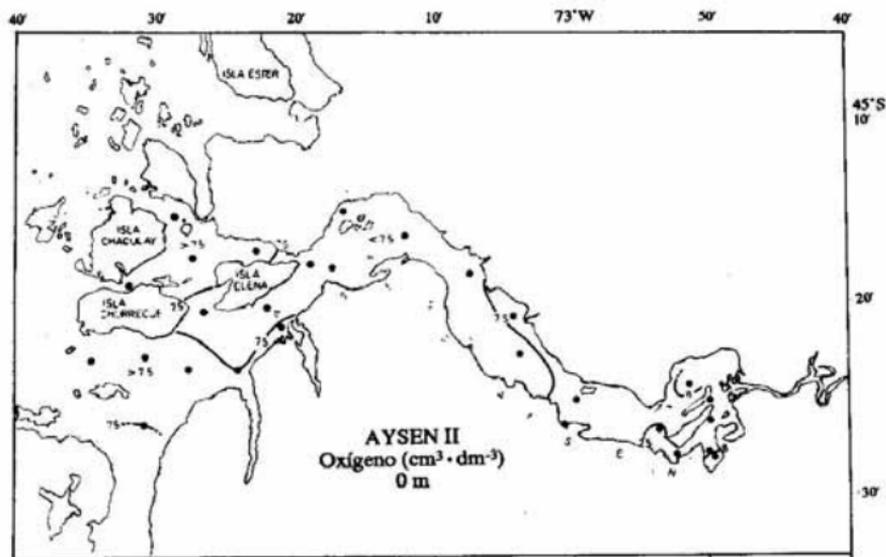


Fig. 22 Distribución superficial del contenido de oxígeno disuelto de verano en  $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  (14 al 21 de enero, 1992).

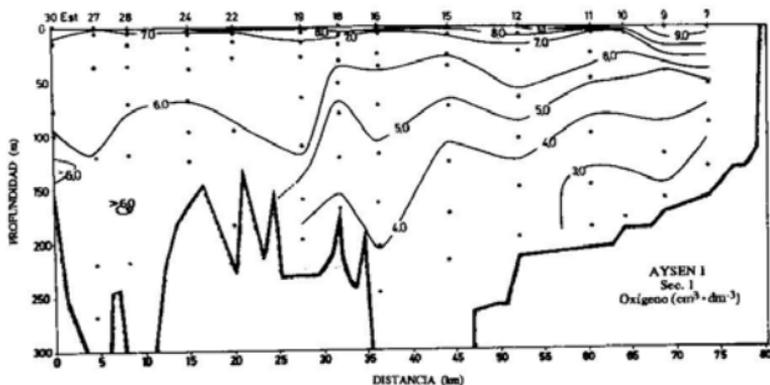


Fig. 23 Distribución vertical del contenido de oxígeno disuelto de invierno en  $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

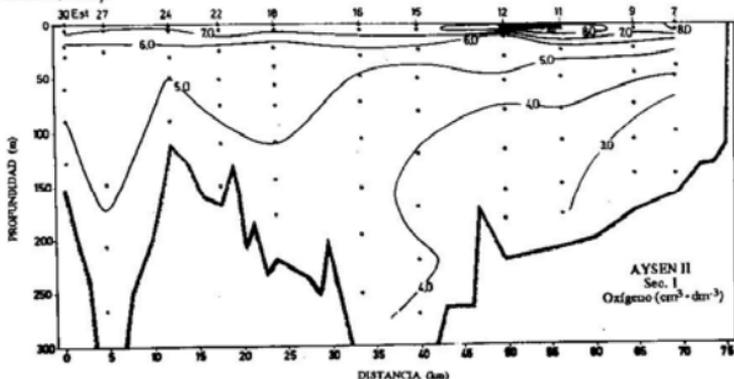


Fig. 24 Distribución vertical del contenido de oxígeno disuelto de verano en  $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

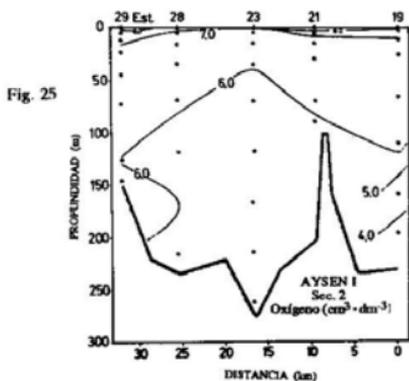


Fig. 25

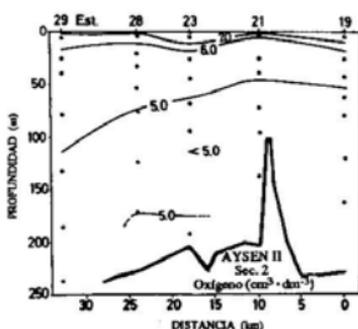


Fig. 26

Fig. 25 Distribución vertical del contenido de oxígeno disuelto de invierno en  $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (24 septiembre al 3 de octubre, 1991).

Fig. 26 Distribución vertical del contenido de oxígeno disuelto de verano en  $\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

En verano la capa superficial presente, en esta sección 2, un patrón similar al de la sección 1 ya descrita (Fig. 24 y 26). La mayor diferencia se produce bajo los 170 m de profundidad, que en la sección 2 se caracteriza por la presencia de un máximo relativo con valores mayores que  $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  (Fig. 26).

## SILICATO

El silicato se caracteriza en superficie por concentraciones extremadamente altas en invierno, mayores de  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en toda la zona comprendida entre el grupo de islas Cinco Hermanos y la desembocadura del río Aysén (Fig. 27). Los valores más altos se encuentran en ensenada Acantilada ( $166,2 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). A su vez, información obtenida en un punto cercano a la boca del fiordo (Est. 30) indica, para esa zona, concentraciones más bajas con valores que no sobrepasan los  $65 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

La concentración superficial disminuye drásticamente en verano a lo largo de todo el seno Aysén, reduciéndose a menos de la mitad de la observada en invierno (Fig. 28). Pese a este notable descenso, el silicato presente en la superficie sigue siendo, en términos absolutos, alto. El menor contenido relativo en la boca, respecto de aquel del interior del fiordo, es un patrón de distribución que también se mantiene en esta época del año. La máxima concentración superficial, en este período de verano, se encuentra en la entrada que comunica al fiordo con el canal Pilcomayo ( $61,3 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ), configurándose un marcado gradiente horizontal tanto hacia la boca como hacia el interior del seno

Aysén. Zonas de mínimo se encuentran en bahía Chacabuco, junto a punta Camello y especialmente al oriente del grupo Cinco Hermanos ( $20 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

La distribución vertical se caracteriza en invierno por la formación de un gradiente muy intenso en los primeros 20 m de profundidad (Fig. 29). Este alcanzó su máximo en la estación 12 siendo del orden de  $23 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  por metro. Bajo esta delgada capa se extiende un grueso estrato, de aproximadamente 100 m de espesor, con concentraciones menores de  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Este estrato configura un mínimo cuyo espesor aumenta hasta el grupo Cinco Hermanos (Est. 16) donde alcanza los 215 m de profundidad. Si bien la información recolectada para invierno no se extiende más al oeste, se cuenta con datos obtenidos para este mismo período en la estación 30 (no incluidos en el gráfico). Estos datos que alcanzan hasta 100 m de profundidad indican que, aun cuando la concentración ha disminuido en toda la columna respecto a lo ya descrito para el interior del fiordo, se mantiene el mismo patrón, registrándose el mínimo ( $< 25 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) entre 18 y 95 m de profundidad. Bajo el estrato de mínimo el silicato vuelve a aumentar hasta alcanzar una concentración superior a  $35 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  próximo al fondo, en el tercio superior del fiordo.

En verano se aprecia una disminución considerable de la concentración de silicato en el estrato superficial, disminuyendo el gradiente en la estación 12 a  $11,2 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  por metro, lo que representa la mitad de aquel de invierno (Fig. 30). Junto al debilitamiento descrito se produce también un adelgazamiento de la capa superficial, que sólo se extiende

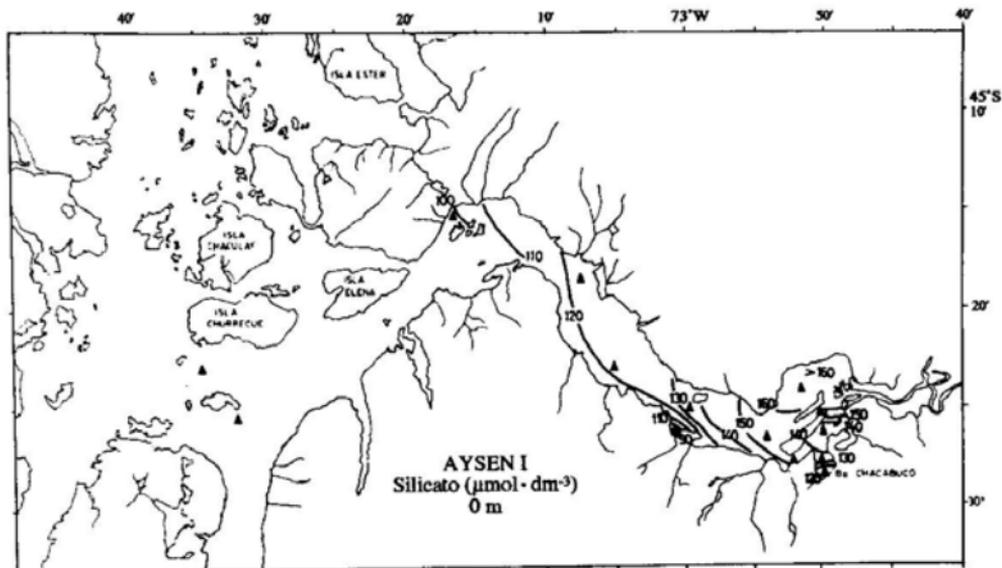


Fig. 27 Distribución superficial de la concentración de silicato de invierno en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (24 de septiembre al 3 de octubre de 1991).

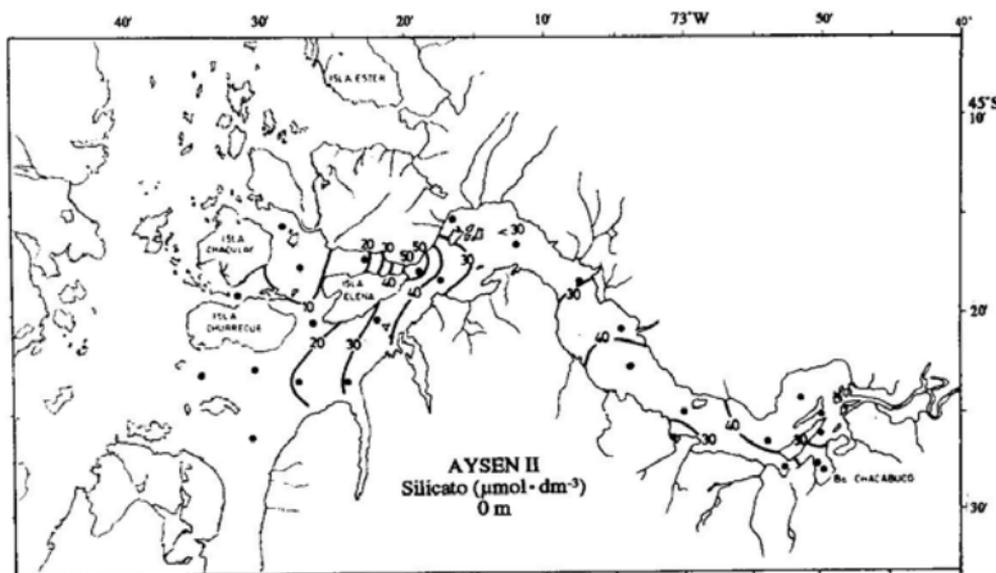


Fig. 28 Distribución superficial de la concentración de silicato de verano en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (14 al 21 de enero, 1992).

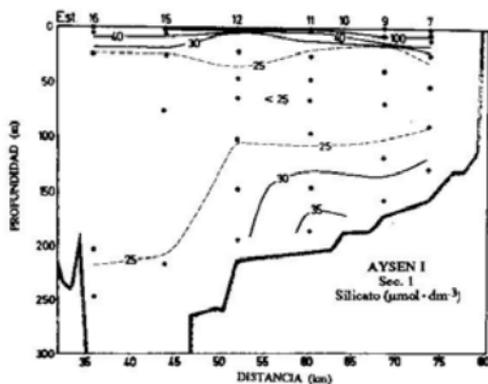


Fig. 29 Distribución vertical de la concentración de silicato de invierno en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (24 de septiembre al 3 de octubre de 1991).

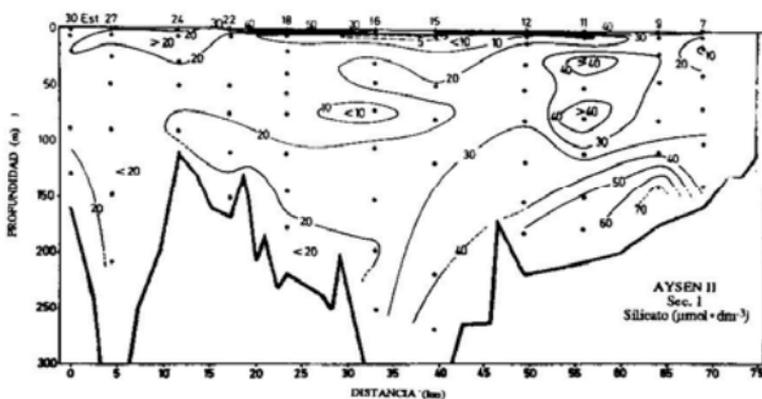


Fig. 30 Distribución vertical de la concentración de silicato de verano en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

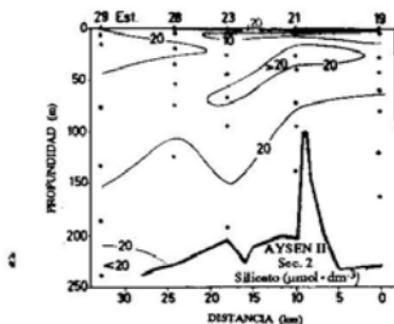


Fig. 31 Distribución vertical de la concentración de silicato de verano en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

hasta unos 4 m de profundidad. En este período aparece una delgada capa de bajas concentraciones, con valores incluso inferiores a  $5 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , la que se extiende entre las islas Elena y Mentirosa, alcanzando una profundidad máxima de 20 m en la estación 15 (Fig. 30). El grueso estrato intermedio de mínimo que se observara en invierno, desaparece en el tercio superior del fiordo pero se le encuentra entre la boca del seno y la región de punta Tortuga (Est. 15), centrado entre 60 y 70 m de profundidad, con valores incluso inferiores a  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

La concentración de silicato en el tercio superior presenta máximos ( $> 40 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) a profundidades intermedias y próximo al fondo ( $> 70 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Al oeste de isla Elena y hacia la boca del fiordo la concentración de silicato muestra mayor homogeneidad vertical, presentando sus valores más altos a nivel subsuperficial ( $> 20 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

Para la sección 2 no se dispone de información correspondiente a invierno. En verano (Fig. 31) esta sección presenta condiciones similares a las observadas en la sección 1 para la misma época, esto es, una muy delgada capa de altas concentraciones superficiales ( $> 30 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ), bajo la cual se encuentra el estrato de bajas concentraciones subsuperficiales. A mayores profundidades la distribución del silicato mantiene el mismo patrón ya descrito para la sección 1.

## POSFATO

La distribución del fosfato en superficie indica que la principal fuente en el seno Aysén, tanto en invierno como en

verano, la constituye el río Cuervo, cerca de cuya desembocadura se detectan concentraciones mayores de  $1,5 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Estas concentraciones disminuyen en forma concéntrica a medida que se alejan del lugar (Fig. 32 y 33). El aporte del río Aysén, al menos en la fase disuelta, es bajo y no sobrepasa los  $0,8 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en invierno, siendo incluso menor en el verano. Asimismo su área de influencia no se extiende más allá de las islas Carmen y Partida. En el resto del fiordo las concentraciones superficiales son bajas, del orden de  $0,4 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en verano y  $0,6 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en invierno. Hacia la boca, frente a isla Elena, se produce en invierno un fuerte gradiente horizontal en que la concentración se duplica sobre una distancia de 5 km (Fig. 32). En verano disminuye la intensidad de este gradiente, junto con desplazarse hacia el oeste, quedando ubicado frente a isla Churrecué (Fig. 33).

La distribución vertical del fosfato en la sección 1 (Fig. 34) muestra en invierno la existencia, a lo largo del fiordo, de dos zonas diferentes entre sí. El tercio superior del fiordo se caracteriza por concentraciones relativamente bajas y en general bastante homogéneas en profundidad. En la mitad inferior del fiordo, a partir de la estación 15, la concentración superficial de fosfato también es baja, con valores menores que  $0,6 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , los que se extienden hasta la estación 22 inclusive (isla Elena). En este sector de bajas concentraciones superficiales se forma un gradiente vertical, que alcanza su máximo frente a la isla Elena (Est. 22), con una variación de  $0,28 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  por metro. Este gradiente disminuye considerablemente a partir de la estación 24, haciéndose imperceptible en la región de la

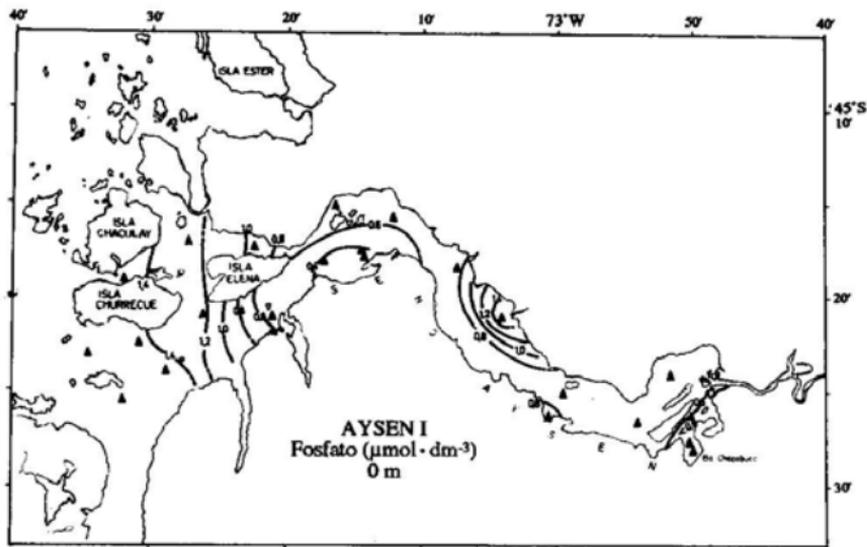


Fig. 32 Distribución superficial de la concentración de fوسفato de invierno en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (24 de septiembre al 3 de octubre de 1991).

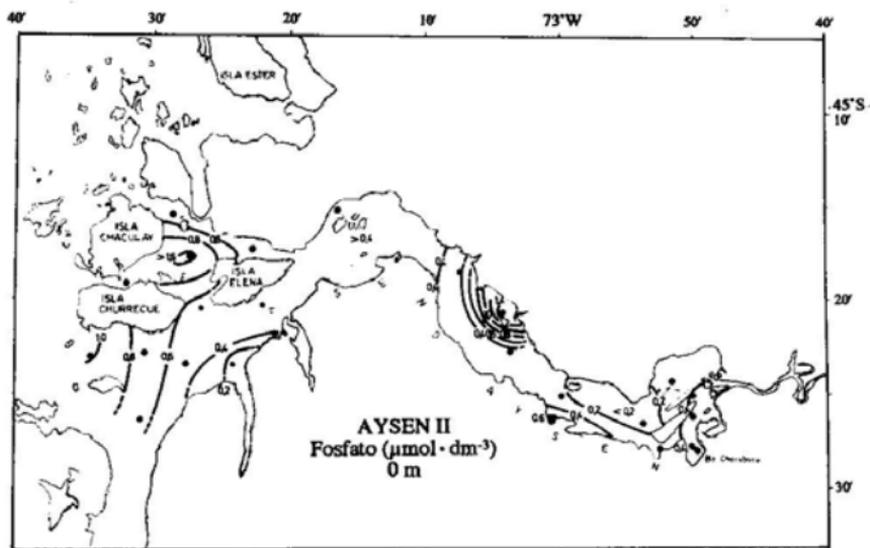


Fig. 33 Distribución superficial de la concentración de fوسفato de verano en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (14 al 21 de enero, 1992).

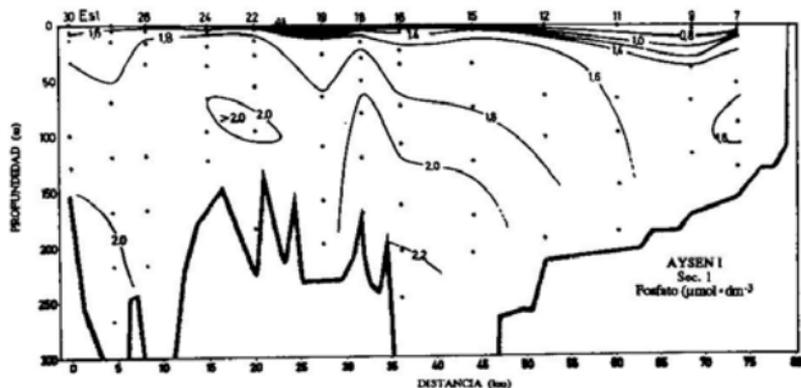


Fig. 34 Distribución vertical de la concentración de fosfato de invierno en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (24 de septiembre al 3 de octubre de 1991).

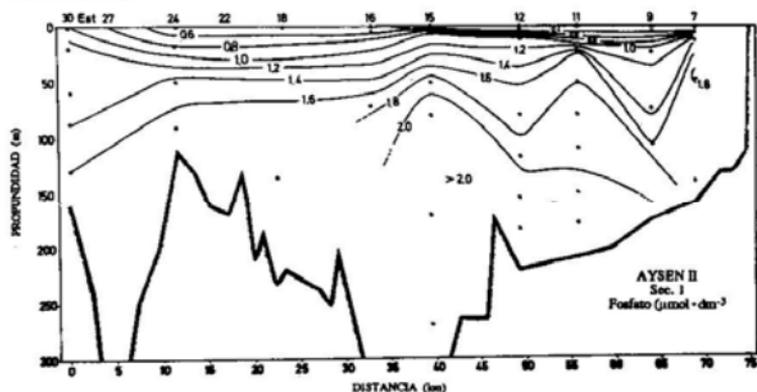


Fig. 35 Distribución vertical de la concentración de fosfato de verano en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

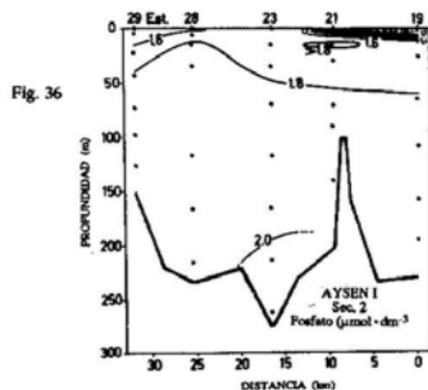


Fig. 36

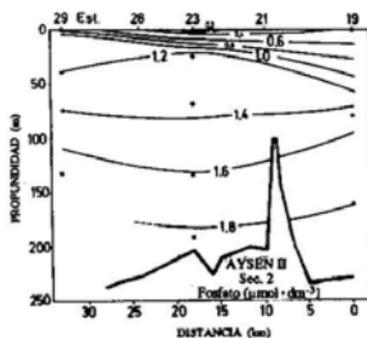


Fig. 37

Fig. 36 Distribución vertical de la concentración de fosfato de invierno en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (24 de septiembre al 3 de octubre de 1991).

Fig. 37 Distribución vertical de la concentración de fosfato de verano en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

boca, donde la concentración superficial ha aumentado a más de  $1,4 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . En la mitad inferior del fiordo el aumento de la concentración con la profundidad es gradual bajo los 20 m, especialmente en las cercanías de la boca.

En el verano el fosfato superficial disminuye a lo largo de prácticamente todo el seno Aysén, excepto en la zona de la boca, únicos lugares en que se observa una concentración cercana a  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (Fig. 35). La zona comprendida entre las estaciones 7 y 15 se caracteriza, en este período, por concentraciones menores que  $0,4 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  hasta los 5 m de profundidad. Se observa asimismo un gradiente vertical cuya mayor intensidad se encuentra en el sector comprendido entre las estaciones 11 y 12 (isla Mentirosa y río Cuervo), zona donde la concentración de fosfato aumenta de 0,4 a  $1,6 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en los primeros 25 m. Cambios respecto al invierno se producen en las aguas más profundas del interior del fiordo, las que presentan menos homogeneidad en el verano, pero un considerable aumento de concentración que sobrepasa los  $2 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (Fig. 34). Por su parte, en la mitad inferior del seno se observa en profundidad una ligera disminución en relación a los valores de invierno.

La sección 2 (Fig. 36) exhibe en invierno las mismas características en cuanto a la distribución vertical del fosfato que aquellas señaladas para igual zona de la sección 1, es decir, altas concentraciones en superficie en el sector de la boca (Est. 28 y 29), las que disminuyen abruptamente frente a isla Elena (Est. 18 a 21). En este último sector ocurre un rápido aumento del fosfato con la profundidad, que alcanza hasta el límite inferior

de la capa superficial. Bajo este límite, el contenido de fosfato aumenta de modo más gradual a lo largo de toda la sección. En verano el patrón de distribución en la sección 2 (Fig. 37) es idéntico al descrito para la sección 1 para igual época del año, estando por lo tanto su descripción suficientemente caracterizada por lo ya señalado para aquella.

#### NITRATO

Los datos disponibles para el invierno sólo permiten caracterizar la distribución vertical de este anión para la sección 1 a lo largo del tercio superior del fiordo. Las concentraciones en superficie son en esta zona algo mayores que  $5 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  aumentando rápidamente en los primeros 20 m de profundidad a más de  $15 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (Fig. 38). A mayor profundidad, este aumento se torna más gradual hasta alcanzar un máximo con concentraciones mayores que  $20 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , cuyo núcleo se ubica entre los 80 y 100 m, para desde allí disminuir lentamente a valores menores que  $20 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

Datos obtenidos en dos estaciones de la boca norte (Est. 27 y 30) y una estación de la boca sur (Est. 29) permiten complementar lo anterior señalando que en esta zona la concentración aumenta sólo de modo muy gradual en profundidad, alcanzando los  $20 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  a los 60 m en la boca norte y a los 100 m en la boca sur.

En verano los datos obtenidos se extienden a lo largo de todo el fiordo (Figs. 39 y 40) y permiten observar dos zonas de muy bajas concentraciones en la capa superficial ( $< 1 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Estas se

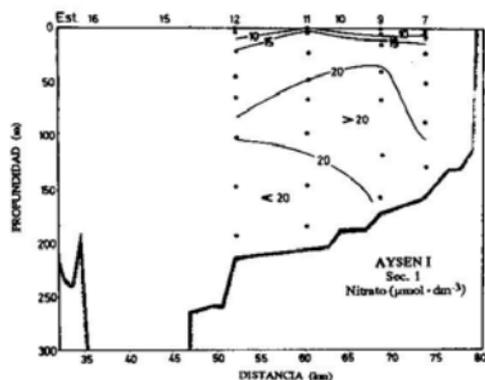


Fig. 38 Distribución vertical de la concentración de nitrato de invierno en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (24 de septiembre al 3 de octubre de 1991).

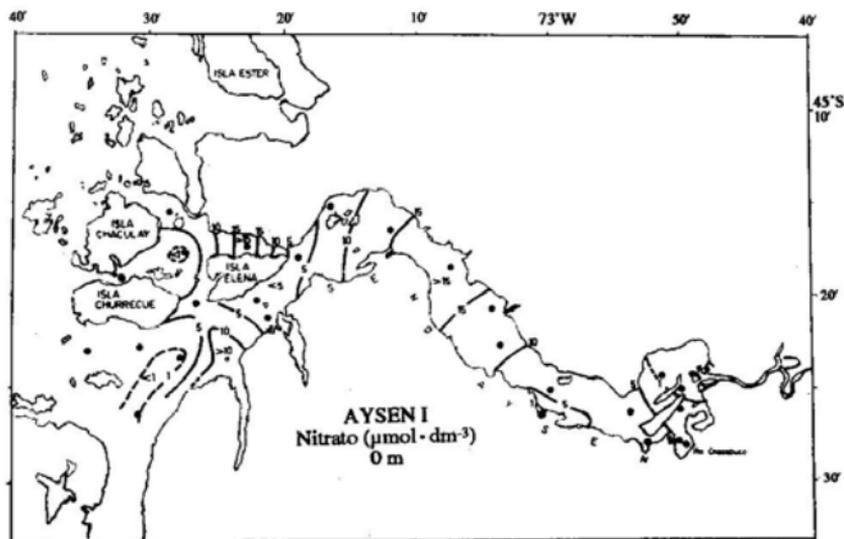


Fig. 39 Distribución superficial de la concentración de nitrato de verano en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (14 al 21 de enero, 1992).

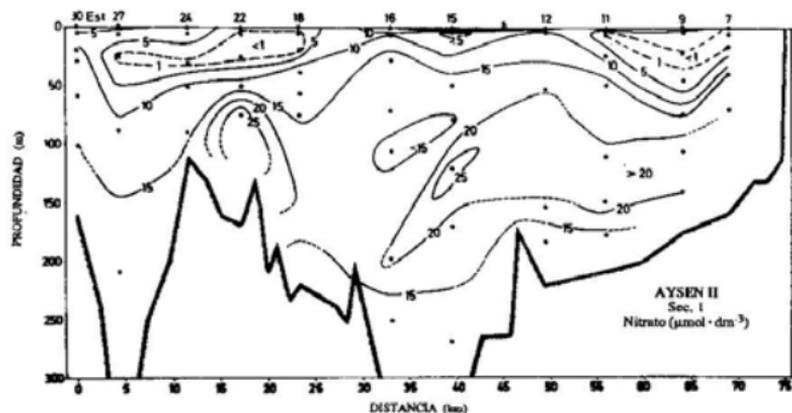


Fig. 40 Distribución vertical de la concentración de nitrato de verano en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

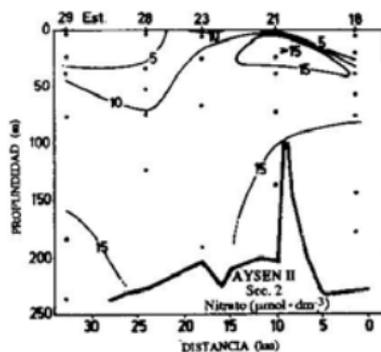


Fig. 41 Distribución vertical de la concentración de nitrato de verano en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

ubicar en los tercios superior e inferior del seno Aysén, alcanzando profundidades cercanas a 30 m, separadas por una zona con un estrato delgado de concentraciones superficiales mayores que  $20 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , que se ubica entre las estaciones 12 y 16 (Fig 40). De las dos zonas de baja concentración, aquella ubicada frente a isla Elena (Est. 22) presenta incluso un virtual agotamiento del nitrato entre los 5 y 20 m, cayendo las concentraciones a valores menores que  $0,1 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . El contenido de nitrato en estas zonas aumenta rápidamente con la profundidad, configurando un marcado gradiente vertical que se extiende aproximadamente hasta los 75 m, desde donde el aumento continúa de modo más gradual. Por su parte, en la zona ubicada entre el río Cuervo y las islas Cinco Hermanos (Est. 12 a 16), el gradiente se extiende entre los 10 y los 30 a 40 m de profundidad, nivel donde alcanza  $15 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (Fig. 40).

Una característica destacada de la distribución del nitrato en la capa profunda en ésta época es la presencia de un máximo, con concentraciones mayores que  $20 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , que se extiende a lo largo de la mayor parte del fiordo, centrado aproximadamente a 130 m de profundidad, de modo similar a lo observado en invierno. En la zona ubicada cerca de punta Tortuga (Est. 15), el referido máximo es más intenso, con un núcleo de concentraciones mayores que  $25 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , situación que también se observa frente a isla Elena (Est. 22). En el resto del fiordo, bajo los 150 m, la concentración vuelve a descender llegando incluso a menos de  $15 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Este descenso del contenido de nitrato a altas profundidades no se observa en el tramo

ubicado al oeste de isla Elena, donde la concentración aumenta gradualmente en profundidad a lo largo de toda la columna de agua.

La distribución del nitrato a lo largo de la sección 2 en verano es muy parecida a la descrita para la sección 1 (Fig. 40). En este caso la capa de máximo es más delgada y se encuentra a menor profundidad con una concentración algo mayor de  $15 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (Fig. 41). Bajo los 50 m en la zona de la boca sur, el contenido de nitrato aumenta gradualmente hasta sobrepasar los  $15 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  a altas profundidades.

#### NITRITO

La distribución del nitrito se caracteriza en invierno por concentraciones relativamente bajas. A profundidades intermedias se encuentra una gruesa capa de mínimo que se extiende, centrada a unos 80 m, desde el fondo de saco del fiordo hasta la altura de isla Elena (Fig. 42). Más hacia el oeste se aprecia la presencia de un máximo, con concentraciones mayores de  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  aproximadamente a 100 m de profundidad, en plena boca del fiordo. Las concentraciones en superficie son bajas, excepto en las proximidades del grupo de islas Cinco Hermanos (Est. 16), donde sobrepasa  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . En la capa de agua subsuperficial se destaca la presencia de máximos que alcanzan su mayor intensidad a 20 m de profundidad. De estos el más importante se ubica en la estación 11 con valores mayores de  $1,4 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . En verano la distribución del nitrito se torna homogénea con concentraciones muy bajas en todo el cuerpo de agua situado al oriente de isla Elena (Fig. 43). En

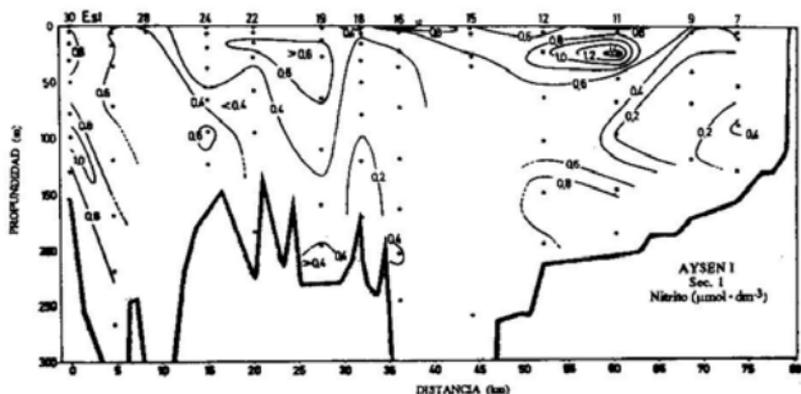


Fig. 42 Distribución vertical de la concentración de nitrato de invierno en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (24 de septiembre al 3 de octubre de 1991).

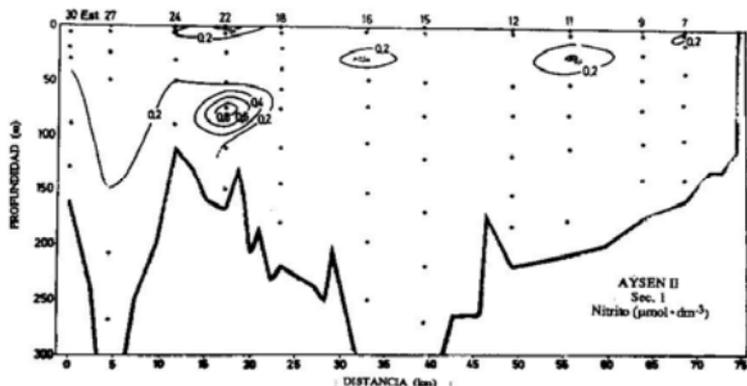


Fig. 43 Distribución vertical de la concentración de nitrato de verano en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

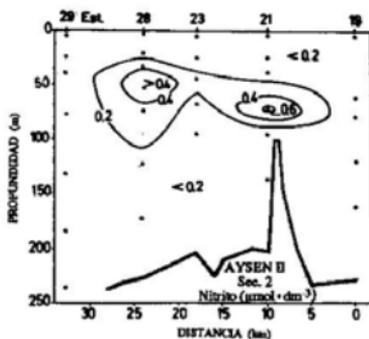


Fig. 44 Distribución vertical de la concentración de nitrato de verano en  $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

esta época también aparece el máximo subsuperficial en la estación 11, si bien su concentración apenas sobrepasa los  $0,4 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . En la región de la boca la concentración de nitrato también se hace muy baja y homogénea. Sólo en la zona de isla Elena es posible apreciar la presencia de un máximo a nivel intermedio cuya concentración es mayor que  $0,8 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Este máximo también se observa en la sección 2, en esta misma época de verano, aun cuando menos intenso ( $> 0,6 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) y con una mayor extensión hacia la boca (Fig. 44). El resto de la columna de agua en esta sección, al igual que aquella de la sección 1, presenta concentraciones muy bajas y homogéneas.

#### AMONIO

En general se aprecia que las concentraciones de amonio son bajas en términos absolutos. La sección 1 en invierno permite reconocer la existencia de dos zonas, en cuanto a la distribución de este micronutriente (Fig. 45). La primera de ellas se extiende desde la boca del fiordo hasta la estación 18 y se caracteriza por concentraciones muy bajas ( $< 0,5 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) y bastante uniformes. En esta zona destaca la presencia de un máximo subsuperficial ubicado cerca de la boca a unos 30 m de profundidad en la estación 28. A su vez, en la boca propiamente tal (Est. 30), se observa un núcleo de agua con concentraciones algo mayores que  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Entre ambas estaciones es posible reconocer otro núcleo de máximo relativo a mayor profundidad cuyas concentraciones se aproximan a  $1,5 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

La otra zona presenta una mayor variabilidad junto con concentraciones

más altas. En ésta destacan dos máximos con concentraciones superiores a  $3 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . El de mayor extensión ocupa un estrato intermedio, con su núcleo centrado en la estación 12, donde alcanza su concentración más alta ( $3,9 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  a 110 m). El segundo máximo se ubica en la capa superficial de la estación 9. Este cuadro cambia radicalmente en verano en que las concentraciones al interior del fiordo disminuyen a la mitad y se tornan mucho más homogéneas (Fig. 46). Aparece un solo máximo subsuperficial cercano a la desembocadura del río Aysén (Est. 7). Para el resto del fiordo sólo se dispone de información en la estación 30 (boca del seno). Las concentraciones en dicha estación son más altas que las observadas en el mismo lugar en invierno, además de ser mayores que aquellas de verano en el interior del fiordo. Sus valores en la columna de agua fluctúan entre 1,6 y  $2,1 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

La sección 2 correspondiente al invierno (Fig. 47), muestra que en esta parte del fiordo la situación es similar a la ya descrita para la zona vecina a la boca de la sección 1. En esta sección, próxima a la costa sur, se observa una intensificación del máximo subsuperficial sobrepasando los  $3 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en la estación 23. En verano la sección 2 (Fig. 48) permite tener una idea de la distribución del amonio en la mitad inferior del fiordo, zona para la cual no se contó con las correspondientes observaciones en la sección 1. De esta figura se puede apreciar una situación similar a la distribución del amonio para la mitad superior del fiordo, esto es concentraciones relativamente homogéneas y un estrato intermedio de mínimo ( $< 1,5 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

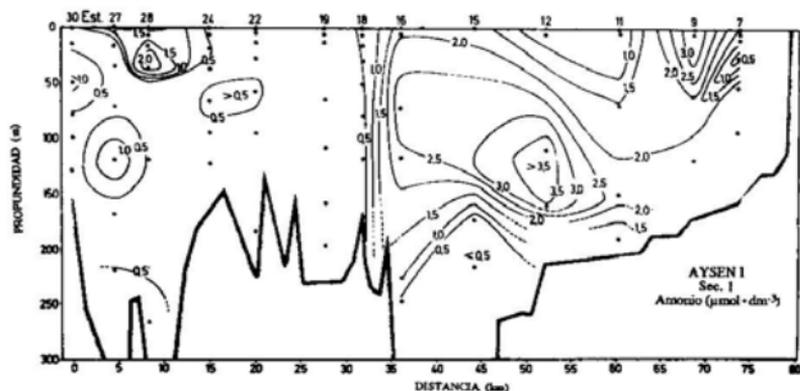


Fig. 45 Distribución vertical de la concentración de amonio de invierno en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (24 de septiembre a 3 de octubre de 1991).

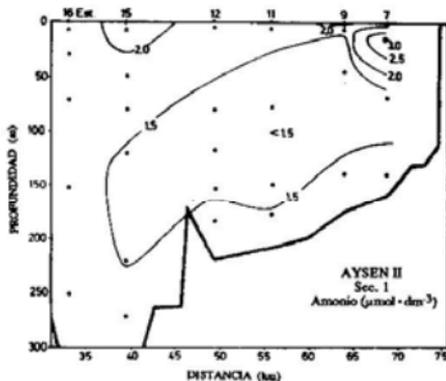


Fig. 46 Distribución vertical de la concentración de amonio de verano en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 1 (14 al 21 de enero, 1992).

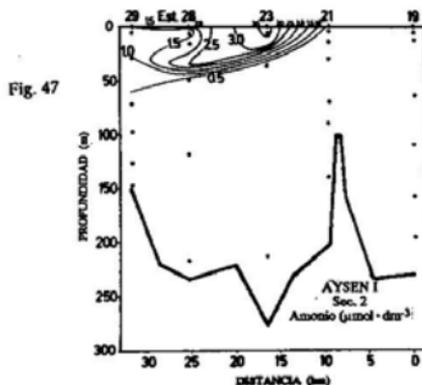


Fig. 47

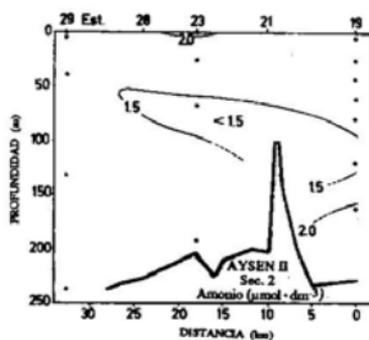


Fig. 48

Fig. 47 Distribución vertical de la concentración de amonio de invierno en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (24 de septiembre a 3 de octubre de 1991).

Fig. 48 Distribución vertical de la concentración de amonio de verano en  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  en la sección 2 (14 al 21 de enero, 1992).

## DISCUSION

Desde el punto de vista de la distribución vertical de la temperatura, Pickard (1971) clasifica al seno Aysén (con datos observados en marzo) dentro de lo que el llama tipo A.1 y que corresponde a un perfil carente de capa de mezcla. A su vez, en lo que respecta a la salinidad el seno Aysén presenta una haloclina que arranca desde la misma superficie, siendo clasificado por dicho autor dentro de su tipo 2 de fiordos.

Los resultados del presente estudio muestran que la característica más notable en la distribución de la temperatura en el seno Aysén es su aumento con la profundidad durante las dos estaciones extremas del año. En efecto, en invierno los máximos valores se encuentran cercanos al fondo (Fig. 5), los que en términos absolutos se mantienen muy similares a dichas profundidades en el verano (Fig. 6). Estas mayores temperaturas no son atribuibles a transferencias de calor desde fuentes geotermiales, puesto que no están acompañadas de anomalías en las otras características del agua, es decir en salinidad, oxígeno disuelto y nitrato, como sucede normalmente en las proximidades de "hot vents". Por lo tanto esta situación debe ser consecuencia de una renovación de las aguas profundas por aguas más cálidas y salinas, provenientes de la zona de los canales por penetración a nivel intermedio, durante alguna época del año.

Para que esta hipótesis sea plausible, deben concurrir factores como aguas superficiales de baja densidad, que dificulten la convección vertical y un calentamiento estival corto, para que no pueda

salvar esta barrera permitiendo que el calor se transmita a altas profundidades. Los resultados aquí presentados muestran la existencia de una marcada pycnoclina que produce una fuerte discontinuidad vertical la que, en prácticamente todo el fiordo, separa una delgada capa superficial del resto del cuerpo de agua (Figs. 17 y 18), situación que avala la hipótesis.

Pickard (1973) señala, en base a la información del crucero Chile 70, que el calentamiento de verano del seno Aysén es sólo superficial, sin profundizar mayormente la discusión de este aspecto. En el presente trabajo se observa que el calentamiento del verano, limitado en su extensión vertical por la fuerte pycnoclina, no penetra más allá de 25 m de profundidad (Fig. 5). Esto, dado el corto período de la estación cálida, impide que esta acción alcance profundidades mayores. El calentamiento de la capa superficial y las altas temperaturas más profundas ( $>10^{\circ}\text{C}$ ) confluyen a un determinado nivel, construyendo aguas que previamente tenían temperaturas algo más bajas. Esta capa de mínimo ( $<10^{\circ}\text{C}$ ) refuerza un aislamiento de la zona más profunda conservándose la estabilidad vertical por el efecto de la salinidad (Figs. 6 y 12). En la práctica esta capa constituye una verdadera barrera que disminuye la eficiencia de la transferencia de calor desde y hacia la superficie. Como se observa en la figura 5, en el invierno el enfriamiento tampoco alcanza a afectar las capas de agua más profundas debido a que la estructura de densidad se encuentra fuertemente dominada por la salinidad, lo que determina que su temperatura permanezca estable en torno a los  $10,5^{\circ}\text{C}$  en ambas estaciones del año.

Las altas temperaturas relativas de las aguas profundas han de tener su origen en el ingreso de aguas más cálidas y salinas desde el canal Moraleda en alguna época del año, posiblemente en otoño. Lo señalado se refuerza si se observa que en la boca del fiordo no existe un aumento de temperatura con la profundidad y que en general esta es más homogénea, hasta la zona de isla Elena (Est. 24, Figs. 5 y 11). Esta última situación se refleja en superficie mediante gradientes horizontales de temperatura y salinidad, principalmente en invierno, frente a la mencionada isla (Figs. 3 y 9). La circulación del agua profunda de un fiordo puede presentar una alternancia de fases activa y estagnada, la que ocurre en una variedad de escalas de tiempo: ciclos de marea, periodicidad anual o intermitencia de varios años. Raramente se encuentra una renovación por advección en equilibrio dinámico en la naturaleza (Gade & Edwards 1980).

Los mecanismos que influyen en la renovación son diversos, como el efecto del viento (Ozretich 1975; Svendsen & Thompson 1978), la acción de la marea y el escurrimiento de agua dulce (Tully 1949). Existen situaciones, como se ha demostrado en el fiordo Oslo, en que puede ocurrir una renovación completa del agua profunda sin que se observe un aumento paralelo de la densidad. Ello es posible dada la existencia de una distribución uniforme de densidad en profundidad, en cuyo caso las fuerzas cinéticas son capaces de llevar el agua nueva directamente hasta el fondo (Svendsen 1976). La renovación del agua profunda del seno Aysén, de acuerdo a las características observadas, probablemente ocurre en forma análoga al último meca-

nismo descrito, facilitada además por un umbral con profundidades mayores que 50 m en su boca, ubicada entre las islas Churrecué y Traiguén (Fig. 2). Con todo, esta renovación es lenta lo que se deduce de la estabilidad de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en la parte más interior del fiordo. La información disponible no permite descartar variaciones temporales diferentes a las estacionales, por lo que no es posible afirmar que todas las diferencias detectadas sean producidas por el cambio de estación.

El contraste entre las temperaturas superficiales, con una cabeza con aguas más frías y boca con agua más cálida en invierno y viceversa en verano, es atribuible además de los efectos climáticos propios de cada estación, a la combinación de la influencia del río Aysén y escurrimientos costeros con los efectos, en invierno, de las sombras y vientos catabáticos originados por las altas cumbres nevadas que se extienden a lo largo de gran parte de la ribera norte del seno. El referido efecto es más notorio en el tercio superior del fiordo, donde las isoterms se orientan casi paralelas al eje del canal. En verano habiéndose fundido la nieve y cambiado la altura y posición del sol, se produce un mayor calentamiento de las aguas superficiales en el fondo de saco del fiordo. En la región de la boca, a su vez más abierta y expuesta a los vientos predominantes, se produce un aumento más gradual y menos intenso de la temperatura superficial.

Los valores extremadamente bajos de salinidad superficial en la zona de la cabeza del seno, son consecuencia directa del aporte de agua dulce que descarga el río Aysén. En invierno esto es conse-

cuencia de la alta pluviosidad que caracteriza la región, en tanto que en verano el gasto del río es mantenido principalmente por los deshielos. Esta baja salinidad superficial en la cabeza del seno durante el verano es una condición que ha sido observada con anterioridad (Koyama 1983; Zama *et al.* 1984). Una situación similar se da en las proximidades de la desembocadura del río Cuervo, pero con una dilución menos intensa, especialmente en verano (Figs. 9 y 10). A su vez la mayor dilución que se observa en la zona de la boca del fiordo en la misma época, es atribuible al señalado efecto de los deshielos, que contribuye allí con un mayor escurrimiento de aguas dulces. Se puede establecer que la capa de agua superficial no presenta características isohalinas por comenzar la mezcla entre el agua dulce y el agua de mar ya en la desembocadura del río Aysén, lo cual es evidenciado por los perfiles verticales de salinidad (Fig. 49)

La distribución vertical de salinidad se caracteriza por una fuerte haloclina que se extiende hasta unos 20 a 25 m de profundidad, bajo la cual el aumento se torna más gradual. Ello permite identificar como límite inferior de la capa de agua superficial la isohalina de 29 PSU (Figs. 11 a 14). En el seno Aysén no se producen inversiones de salinidad. El campo de las densidades (Figs. 17 a 20), se asemeja al de la distribución de salinidades, lo que permite establecer que es principalmente regida por esta última. Por lo tanto, el nivel límite que separa el agua profunda de la capa superficial viene dado por la isopicna de 22.

Las mayores diferencias entre las distribuciones de salinidad y densidad

entre invierno y verano se encuentran en profundidad, siendo de estas la más notoria el hundimiento de las isopicnas en la zona de la boca norte del seno en verano (Fig. 18). Este hundimiento, que también se observa en la temperatura (Fig. 6), es atribuible al ingreso de aguas ligeramente más salinas y cálidas y menos oxigenadas desde el canal Moraleda, en esta última época. Lo más probable es que este proceso continúe con mayor intensidad durante el otoño, permitiendo explicar así que aguas de alta salinidad configuren un frente profundo a la altura de la estación 10 en invierno (Fig. 11). Esta situación también se manifiesta en la inflexión de la isopicna de 24 (Fig. 17) y el límite de la zona de bajo oxígeno disuelto, menor de  $3 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  (Fig. 23).

De las distribuciones de salinidad es posible inferir que el seno Aysén presenta básicamente una estructura de estuario de dos capas, con aguas de baja salinidad en su estrato superior. La progresión de mezcla entre el agua dulce de la capa superficial, proveniente del escurrimiento costero y especialmente del río Aysén, con el agua más salada de la capa profunda es lenta, determinando la presencia de una haloclina aproximadamente en los primeros 20 m de profundidad. Esta haloclina se extiende hasta isla Elena, donde se constituye el frente observado en superficie (Fig. 10). Desde la zona del frente hacia la boca el seno Aysén adquiere características que se aproximan al de un estuario moderadamente estratificado, de acuerdo a la clasificación de Cameron y Pritchard (1963), lo que cabría atribuir a una mayor influencia de la marea en esa zona. En este tipo de estuario se observa un incremento de la salinidad en dirección al

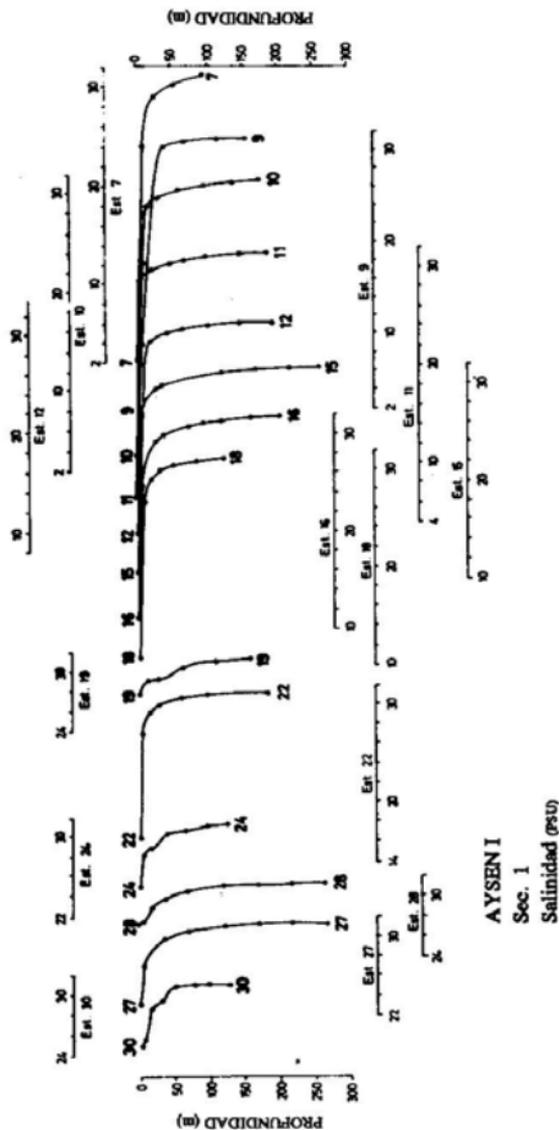


Fig. 49 Progresión de los perfiles verticales de salinidad por estación a lo largo del fiordo Aysen.

mar, tanto en las capas profundas como en las superficiales, situación que se cumple en este caso. Por su parte la situación descrita para el interior del seno Aysén se ajusta a la propia de un estuario tipo fiordo, de acuerdo a la clasificación ya indicada.

El contenido de oxígeno disuelto en la capa de agua superficial (Figs. 21 y 22) es alto en ambas épocas del año, con valores de saturación en torno a 110%. Este mayor contenido es algo más notorio hacia el fondo de saco del seno y alrededor de la desembocadura del río Cuervo con valores mayores que 110% y 125% respectivamente en invierno. Esto es una consecuencia del suministro de las aguas dulces por los ríos. En verano persiste una sobresaturación en superficie de alrededor de 110% en prácticamente todo el seno Aysén. Saturaciones mayores sólo se observan en el área de la boca y en el interior de la bahía Chacabuco con aproximadamente 120% en ambas zonas. Este alto contenido de oxígeno disuelto disminuye con la profundidad especialmente en verano y de modo más acentuado en la parte superior del fiordo. En esta última zona la ventilación profunda del fiordo es notablemente más baja que en el resto de su extensión, lo que se manifiesta en valores menores de  $3 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$ , que quedan explicados, al menos en parte, con lo ya señalado respecto a las distribuciones de salinidad y densidad. Adicionalmente es posible esperar que la disminución de la concentración de oxígeno disuelto, a nivel profundo en la cabeza del seno, obedezca en buena medida a la descomposición y consecuente demanda de oxígeno disuelto por material particulado (restos de madera y hojas) suministrados en cantidad apreciable por el río Aysén o arrastrados al desplomarse

de las abruptas paredes de ensenada Acatilada. Durante la bajamar es posible constatar la existencia de numerosos restos de vegetales depositados sobre el fondo, en ocasiones con espesores de varios centímetros.

A la baja ventilación de la zona superior del fiordo contribuye también la fuerte discontinuidad de densidad que dificulta el transporte vertical de este gas disuelto desde la capa superficial hacia la capa profunda. Estas condiciones naturales hacen de esta parte del fiordo un ecosistema frágil y con poca capacidad autorreguladora frente a eventuales cargas que incrementen la demanda de oxígeno.

Por otra parte la pequeña extensión del máximo subsuperficial de oxígeno disuelto de la sección 2 (Figs. 25 y 26), limitado a las inmediaciones del canal Costa, es un indicio de la baja incidencia de las aguas provenientes de éste en la ventilación del seno Aysén.

El aporte efectuado por los ríos locales, sobretudo por el Aysén, se torna especialmente significativo en el caso del silicato. Este aporte explica la presencia del estrato superficial de alta concentración y su mayor espesor en la época de invierno en que, por la alta pluviosidad, aumenta considerablemente el caudal (Fig. 29). No se descarta que parte de esta alta concentración todavía provenga del arrastre de material particulado proyectado por la erupción del volcán Hudson ocurrida el 12 de agosto de 1991, es decir, 43 días antes de la iniciación del presente muestreo. En esa oportunidad los vientos predominantes durante un período de buen tiempo, transportaron ceniza hacia la región de Puerto Chacabuco, donde

cayeron hasta 7 mm en pocas horas (EOS 1991). La ubicación del máximo gradiente vertical en la estación 12 es atribuible al efecto combinado de las descargas efectuadas por el cercano río Cuervo y el Aysén. Una parte importante del aporte de silicato efectuado por este último ha de estar conformado por material particulado fino, lo que queda en evidencia en época de verano por la sucesión de máximos que aparecen en el tercio superior del fiordo. Lo anterior se ve reforzado por el aumento de la alta concentración de silicato detectada próxima al fondo en esta época (Fig. 30).

La formación de un mínimo subsuperficial ( $< 10 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) con concentraciones bajas en verano es atribuible al consumo de este micronutriente por diatomeas. Por otra parte el mínimo de silicato, a nivel intermedio, revela la presencia de aguas exteriores al fiordo caracterizadas por una baja concentración, lo que reafirma lo ya discutido en relación a otras características que señalan que dichas aguas provienen del canal Moraleda.

Las peculiaridades de la distribución del fosfato son, por una parte, un marcado gradiente vertical en la capa superficial, condición extensiva en ambas épocas (Figs. 34 y 35), si bien más marcada en verano. Estos gradientes verticales son consecuencia de la barrera a la difusión determinada por la fuerte pycnoclina ya analizada. Esta característica pierde fuerza en el tercio superior del fiordo durante el invierno como probable resultado del consumo de este micronutriente por fitoplanctones durante toda la época previa.

Como se viera el fosfato aportado

por el río Aysén, a nivel superficial es limitado y en profundidad éste no se extiende más allá de ensenada Acantilada, característica que puede asociarse a que este aporte ocurra fundamentalmente ligado a partículas. Sin embargo la principal fuente de fosfato en todo el fiordo no es el río Aysén sino que el río Cuervo cuya descarga afecta la distribución de este micronutriente en la capa superficial (Fig. 32). La penetración ya mencionada de agua desde el canal Moraleda se visualiza como un alto contenido de fosfato, que alcanza valores incluso mayores de  $2,0 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  y se extiende hasta la estación 15 en invierno. En verano el aumento de concentración de este micronutriente a nivel profundo, en la mitad superior del seno, se asocia a la penetración de una cuña de agua de alta concentración, mayor que  $2 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , que llega prácticamente hasta la cabeza del fiordo (Fig. 35).

La asociación de una alta concentración a nivel profundo con el ingreso de aguas provenientes del canal Moraleda no se da de modo tan claro para el nitrato. Lo que se observa en época de verano para este micronutriente es una falta de continuidad del máximo a profundidades intermedias (Fig. 40). Inclusive las menores concentraciones relativas en la región de la boca y su gradual aumento en profundidad dificultan adscribir la existencia del máximo a causas externas al fiordo, por lo menos en esta época del año. La insuficiente información disponible en invierno no permite visualizar si esta situación cambia en dicha estación. Por otra parte, las bajísimas concentraciones de nitrato a nivel subsuperficial son indicativas de una alta producción primaria en ambos extremos

del fiordo (Fig. 40). La presencia simultánea de bajas concentraciones de silicato en el tercio inferior del fiordo, permite adscribir una parte importante de la producción primaria a diatomeas, en esta área. Los resultados de esta producción han de traducirse en una apreciable cantidad de material planctónico a remineralizar en su descenso hacia el fondo. La presencia del máximo de nitrato es atribuible, por lo tanto, fundamentalmente al proceso remineralizador como también se desprende de la disminución del oxígeno disuelto a esos mismos niveles de profundidad. Este proceso probablemente se extiende con eficiencia en la capa de agua intermedia, completándose la mayor parte de la descomposición de la materia orgánica y redisolución del nitrógeno inorgánico a profundidades menores de 200 m.

Las concentraciones determinadas para el nitrito son en general normales (Figs. 42 y 43). La presencia de los máximos encontrados no es atribuible a procesos de desnitrificación dado que estos tienen lugar en medios casi anaeróbicos (Hattori 1983). La presencia de máximos de nitrito en un medio con suficiente oxígeno no es inusual y ha sido mencionado en asociación a episodios de excreción por sobreoferta de alimento ("luxury feeding") o a procesos de nitrificación (Grasshoff 1975). En el caso del seno Aysén, cabe adjudicar estos máximos al proceso de nitrificación del nitrógeno proveniente de restos orgánicos, cuya abundancia ya fuera mencionada.

El amonio cuya abundancia se relaciona con la descomposición de materia orgánica y la excreción por zooplancton (Vacaro 1965) muestra, en el caso del

seno Aysén, una dominancia del primero de los dos procesos. La observación de una gran cantidad de materia orgánica de procedencia terrígena en el área, especialmente en el tercio superior del seno Aysén, y su ulterior descomposición que se manifiesta en la disminución de la concentración de oxígeno disuelto a niveles profundos, podría explicar en parte la presencia de concentraciones relativamente más altas de amonio en dicha región. El aporte del río Aysén se percibe con el máximo superficial observado en ambas épocas del año. La disminución de la concentración y mayor homogeneidad del verano es a su vez consecuencia del consumo originado por el crecimiento de la biomasa fitoplanctónica.

La proporción entre el nitrógeno y el fósforo para las aguas del fiordo se aproximan sólo en invierno a la razón de Redfield (16:1), período en que se establece un cociente de 14,3 como promedio ponderado para toda la columna de agua estudiada (260 m), estimados por regresión por estación oceanográfica. Esta relación no es uniforme en sentido vertical, permitiendo distinguir un estrato superior que se extiende entre la superficie y los 30 m, donde el cociente alcanza un valor bajo, 11,9 en promedio. A profundidades mayores la razón N:P aumenta a 14,7:1, indicando un incremento de la cantidad relativa de nitrógeno presente en el resto de la columna de agua. Estos valores concuerdan con los observados en general para el océano Pacífico (Sagi 1978).

En el caso del seno Aysén estos bajos valores de la razón N:P son indicativos, ya sea de un mayor aporte relativo del fósforo por vía fluvial o de un con-

sumo más alto de nitrógeno que de fósforo en la capa superficial. La evidencia disponible apunta a esta última hipótesis como la más plausible, dado que en verano existe una severa reducción de la proporción de nitrógeno a fósforo. Esta reducción, que afecta a toda la columna de agua es más intensa en las capas superficiales, donde la razón N:P cae incluso a 5,6. La disminución para el estrato ubicado bajo los 30 m también es dramática y determina que el promedio ponderado para la columna de 260 m sea de sólo 7,3 para el verano. Valores bajos para la razón N:P son usuales en aguas costeras y superficiales, especialmente tras haberse producido la máxima abundancia de fitoplancton (Spencer 1975), como es el caso del presente estudio (Muñoz, Com.per.). La fuerte disminución del nitrato de la capa superficial del fiordo combinada con la presencia de un mayor nivel de fosfato encuentra su explicación en la demanda requerida por la intensa productividad primaria del período estival. A su vez, la presencia de una baja proporción de nitrógeno a niveles profundos del seno Aysén es resultado de una disminución previa del contenido de nitrato durante la permanencia de estas aguas en niveles superficiales antes de su ingreso al fiordo, donde se hunden bajo las aguas superficiales de menor densidad que allí encuentran.

## CONCLUSIONES

El seno Aysén presenta una estructura de estuario de dos capas de tipo fiordo, que se extiende desde su cabeza hasta la isla Elena. Desde dicha isla hacia la boca, el seno adquiere las características de un estuario moderadamente es-

tratificado. Este cambio puede ser atribuido a la disminución de la profundidad que allí se produce.

El límite inferior de la capa de agua superficial está dado por la isopícnica de 22 y se sitúa entre 20 y 25 m de profundidad, coincidente con la isohalina de 29 PSU.

La estructura de densidad se encuentra dominada por la salinidad, determinando que la temperatura de la capa profunda permanezca estable, con un valor en torno a los 10,5°C.

El calentamiento de verano tiene una limitación en su penetración vertical, no alcanzando profundidades mayores de 25 m.

La renovación del agua profunda en el tercio superior del seno Aysén es baja y ocurre probablemente por acción de las fuerzas cinéticas debido a la existencia de una distribución uniforme de densidad en profundidad. Estas aguas provienen del canal Moraleda y se caracterizan por su mayor salinidad, densidad, contenido de oxígeno y concentración de fosfato, además de una menor concentración de silicato.

La ventilación profunda del tercio superior del seno Aysén es relativamente baja, ya que se presentan concentraciones menores que  $3 \text{ cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$  durante todo el año, determinando con ello una baja capacidad de resistir un incremento de carga orgánica.

El fiordo se caracteriza durante el año por altas concentraciones de silicato y de fosfato y concentraciones de nitrato,

nitrito y amonio variables. Estos últimos micronutrientes, en especial el nitrato, sólo presentan altas concentraciones en la capa fótica durante el invierno.

Parte de la alta concentración de silicato detectada en el estrato superficial en septiembre de 1991, debe ser consecuencia de la ceniza proveniente de la erupción del volcán Hudson, ocurrida pocas semanas antes de la toma de

muestras de agua.

La baja proporción relativa del nitrógeno respecto al fósforo en toda la columna de agua y la fuerte disminución de nitrato, que ocurre en combinación con la permanencia de un mayor nivel de fosfato en las capas superficiales en verano, permiten concluir que el nutriente limitante para la producción primaria en el seno Aysén es el nitrógeno.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación, financiada por FONDECYT a través del proyecto N° 91-0410, fue posible gracias a la colaboración de la Armada de Chile, que puso a disposición de los autores la LEP "Hallef" para su ejecución. Se agradece muy especialmente a sus Capitanes, Capitán de Corbeta Sr. Manuel González A. (cruceiro Aysén I) y Teniente 1° Sr. Luis Burgos V. (cruceiro Aysén II), como asimismo al Teniente 2° Sr. Eric Solar O. y a su tripulación, por la amplia colaboración al desarrollo de los muestreos. Se agradece también muy sinceramente al Vicealmirante Sr. Jorge Sepúlveda O., a los Gobernadores Marítimos de Aysén, Capitán de Fragata Sr. Orlando Figuerola L. y Capitán de Corbeta Sr. Carlos Canales, al Administrador de Puerto, Puerto Chacabuco Sr. Walter Gómez B. y a la Empresa Pesca Chile por el apoyo logístico brindado. Al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada por el uso de salinómetro y suministro de carta batimétrica del seno Aysén. Asimismo nuestro reconocimiento al personal técnico de apoyo del Instituto de Oceanología Montemar Antonieta Jojot y Viviana Ríos (análisis químico), Sergio Zepeda (muestreo), René Astudillo y Patricio Rivera (dibujo y computación) y Carmen Gloria Arancibia (dactilografía). También se agradece al Prof. Nelson Silva S. por la prolija revisión del manuscrito y sus comentarios que contribuyeron a mejorar la versión final del presente trabajo.

## LITERATURA CITADA

- Cameron, W.M. & D.W. Pritchard. 1963. Estuaries. In: The Sea. M.N. Hill, ed. Interscience Publishers, Vol. 2: 306-324.
- Cárdenas, E. 1984. Informe preliminar de investigación del medio ambiente en fiordo Aysén y canal Moraleda. 1982. Servicio Nacional de Pesca - JICA. Informational Brief 5, Introduction into Aysen Chile of Pacific Salmon. 28 p.
- Carrit, D.E. & J.H. Carpenter. 1966. Comparison and evaluation of currently employed modifications of the Winkler method for determining dissolved oxygen in seawater; a NASCO Report. Journal of Marine Research, 24: 286-318.
- Chile 70 Cruise. 1971. Data Report 31. Institute of Oceanography, University of British Columbia. 45 p.
- Culberson, C.H.; Knapp, G.; Williams, R.T. & F. Zemlyak. 1991. A Comparison of methods for the determination of dissolved oxygen in seawater. WHPO Publication 91-2, WOCE Report 73/91. 77 p.

- Dietrich, G.; Kalle, K.; Krauss, W. & G. Siedler. 1975. *Allgemeine Meereskunde*, 3. ed. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart. 593 p.
- EOS, 1991. *Transactions, American Geophysical Union*, 72(37): 393-394
- Gade, H.G. & A. Edwards. 1980. Deep-water renewal in fiords. In: *Fjord Oceanography*. H.J. Freeland, D.M. Farmer & C.D. Levings, eds. p. 453-489. Plenum Press, New York and London.
- Grasshoff, K. 1975. The hydrochemistry of landlocked basins and fiords. In: *Chemical Oceanography*, 2nd Ed. J.P. Riley & G. Skirrow, eds. Academic Press, London. Vol. 2: 455-597.
- Grasshoff, K. 1983a. Determination of nitrite. In: *Methods of Seawater Analysis*, 2nd Ed., K. Grasshoff, M. Ehrhardt & K. Kremling, eds. p. 139-142. Verlag Chemie, Weinheim, Federal Republic of Germany.
- Grasshoff, K. 1983b. Determination of nitrate. In: *Methods of Seawater Analysis*, 2nd Ed., K. Grasshoff, M. Ehrhardt & K. Kremling, eds. p. 143-150. Verlag Chemie, Weinheim, Federal Republic of Germany.
- Hattori, A. 1983. Denitrification and dissimilatory nitrate reduction. In: *Nitrogen in the Marine Environment*. E.J. Carpenter & D.G. Capone, eds. p. 191-232. Academic Press, New York.
- Huppert, H. 1980. Topographic effects in stratified fluids. In: H.J. Freeland, D.M. Farmer & C.D. Levings, eds. *Nato Conference Series IV: Marine Sciences*. p. 117-140. Plenum Press, New York & London.
- Koroleff, F. 1983a. Determination of phosphorus. In: *Methods of Seawater Analysis*, 2nd Ed.; K. Grasshoff, M. Ehrhardt & K. Kremling, eds. p.125-139. Verlag Chemie, Weinheim, Federal Republic of Germany.
- Koroleff, F. 1983b. Determination of ammonia. In: *Methods of Seawater Analysis*, 2nd Ed.; K. Grasshoff, M. Ehrhardt & K. Kremling, eds. p. 150-157. Verlag Chemie, Weinheim, Federal Republic of Germany.
- Koyama, A. 1983. Observaciones oceanográficas en el fiordo Aysén y canal Moraleda entre marzo de 1980, 1981, 1982, 1983. Servicio Nacional de Pesca - JICA. Informational Brief 1, Introduction into Aysen Chile of Pacific Salmon. p. 42-66.
- Ozretich, R.J. 1975. Mechanisms for deep water renewal in Lake Nitinat, a permanently anoxic fjord. *Estuarine Coastal Mar. Sci.* 3: 189-200.
- Pedersen, B. 1978. A brief review of present theories of fjord dynamics. In: *Hydrodynamics of estuaries and fjords*, J.J. Nihoul, ed. Elsevier Oceanography Series. 23: 407-422.
- Pickard, G.L. 1971. Some physical oceanographic features of inlets of Chile. *J. Fisheries Research Board, Canada*. 28: 1077-1106.
- Pickard, G.L. 1973. Water structure in Chilean fjords. *Oceanography of the South Pacific 1972*, comp. R. Fraser, New Zealand Nat. Comm. for UNESCO. p. 95-104.

- Pickard, G.L. & B.R. Stanton. 1980. Pacific fjords - A review of their water characteristics. In: Fjord Oceanography. H.J. Freeland, D.M. Farmer & C.D. Levings, eds. Nato Conference Series IV: Marine Sciences. p. 1-51. Plenum Press, New York & London.
- Sagi, T. 1978. The ratio of nitrate to phosphate in seawater of the Pacific. The Oceanographical Magazine. 29: 23-24.
- Smith, J.B. & D.M. Farmer. 1980. Mixing induced by internal hydraulic disturbances in the vicinity of sills. In: Fjord Oceanography. H.J. Freeland, D.M. Farmer & C.D. Levings, eds. Nato Conference Series IV: Marine Sciences. p. 251-257. Plenum Press, New York & London.
- Spencer, C.P. 1975. The micronutrient elements. In: Chemical Oceanography, 2nd Ed. J.P. Riley & G. Skirrow, eds. Academic Press, London. Vol. 2: 245-300.
- Stigebrandt, A. 1979. Observational evidence for vertical diffusion driven by internal waves of tidal origin in the Oslofjord. J. Physical Oceanography, 9: 435-441.
- Stommel, H. 1951. Recent development in the study of tidal estuaries. WHOI Tech. Rep. Ref. N° 51-33, Woods Hole Oceanographic Inst., Woods Hole, Mass., USA.
- Strickland, J.D.H. & T.R. Parsons. 1968. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Bulletin Fisheries Research Board, Canada, 167: 1-311.
- Svendsen, H. 1976. Some hydrographic observations of the Sorfjord during 1972. In: Freshwater on the Sea. S. Skreslet, R. Leinebo, J.B.L. Matthews & E. Sakshaug, eds. The Association of Norwegian Oceanographers, Oslo. p. 89-99.
- Svendsen, H. & R.O.R.Y. Thompson. 1978. Wind-driven circulation in a fjord. Journal of Physical Oceanography. 8: 703-712.
- Tully, J.P. 1949. Oceanography and prediction of pulp mill pollution in Alberni Inlet. Bulletin Fisheries Research Board, Canada, 83: 169 p.
- UNESCO 1981. Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards, Sidney, B.C., Canada. Unesco Technical Papers in Marine Science, N° 36. p.24.
- Vaccaro, R.F. 1965. Inorganic Nitrogen in Sea Water. In: Chemical Oceanography, 2nd Ed. J.P. Riley & G. Skirrow, eds. Academic Press, London. Vol. 2: 365-408.
- Zama, A.; Rueda L., T. & E. Cárdenas G. 1984. Unusual arrival of Chub Mackerel *Scomber Japonicus* at Puerto Chacabuco, Southern Chile. Revista de Biología Marina, Valparaiso, 20 (1): 61-76.