

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

Caracterización física y química de los canales australes y  
estimación del tiempo de residencia y balance de sal, agua y  
nutrientes en el seno Aysén.

Tesis para optar al título de Oceanógrafo  
por  
Dafne Carola Guzmán Zúñiga

Valparaíso  
2000

Comisión de Tesis:

Profesor Guía: Nelson Silva Sandoval. \_\_\_\_\_

Profesor: Sergio Salinas Marchant. \_\_\_\_\_

Profesor: Roberto Prado. \_\_\_\_\_

### Autorización de uso

Al presentar esta Tesis como último requisito para la obtención del título de Oceanógrafo, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además reproducciones parciales o totales de esta Tesis sólo con fines académicos.

---

Dafne Guzmán Zúñiga

*A mis grandes amores, ... Mis  
Padres y Gio que sin ellos no  
hubiera podido salir adelante...  
Gracias por el apoyo y amor  
brindado...  
Para ustedes mi tesis...  
Para ustedes mi vida...*

## AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía el Sr. Nelson Silva S, por tanto cariño y entrega en esta tesis, gracias por su tiempo, .....paciencia.... y su respaldo incondicional y sobre todo gracias por su amistad.

Papá gracias por tus esfuerzos y sobre todo gracias ... por ser mi padre. Mamá gracias ... por ser mi amiga. Son mi vida.

A mi querida familia, Papá, Mamá, Pily, Vivi y Marce..... ¡les he cumplido!. Sin su apoyo no hubiese podido terminar, gracias.... los quiero mucho.

A Gio... gracias por tu amor y apoyo, pero sobre todo, gracias por tu compañía y comprensión.

A mis amigos del Laboratorio de Oceanografía Química: María Angélica V., Alexander V., Francisco G., Don Reinaldo B. y Reinaldo R., que siempre me dieron una palabra de apoyo.

A mis amigas, Stefanía, Lucía, Norita, Ely y Negrita, gracias por comprenderme y escucharme en mis momentos difíciles, ¡gracias por su apoyo!.

A mis amigos de la carrera de Oceanografía, nunca los podré olvidar, siempre los llevaré en mi corazón.

A los profesores Palma, Salinas, Silva, Sépulveda, Ramírez y Morales, gracias por enseñarme alguno de los secretos de nuestro inmenso mar.

Por último y no menos importante...quisiera dar las gracias a todas aquellas personas que me ayudaron en forma anónima y desinteresadamente a lo largo de la preparación de la tesis.

# ÍNDICE

## AGRADECIMIENTOS

## RESUMEN

<b>I.- INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>II.- MATERIALES Y MÉTODOS</b>	3
<b>III.- RESULTADOS</b>	
3.1.- Crucero Cimar Fiordo 4 etapa 1	
3.1.1.- Sección boca del Guafo, canal Moraleda, canal Costa y seno Aysén	5
3.2.1.- Sección sur de la constricción de Meninea, canal Costa, estero Elefantes y golfo Elefantes	8
3.2.- Crucero Cimar Fiordo 4 etapa 1	
3.2.1.- Sección boca del Guafo, canal Moraleda, canal Costa y seno Aysén	10
3.2.1.- Sección sur de la constricción de Meninea, canal Costa, estero Elefantes y golfo Elefantes	13
<b>IV.- DISCUSION</b>	
4.1.- Temperatura	16
4.2.- Salinidad	17
4.3.- Oxígeno disuelto y pH	18
4.4.- Compuestos micronutrientes	20

4.5.- Masas de agua	21
4.6.- Balance biogeoquímico en el seno Aysén	27
4.6.1 Balance de sal y agua	29
4.6.2 Balance de nutrientes	35
<b>V.- CONCLUSIONES</b>	41
<b>VI.- BIBLIOGRAFÍA</b>	43
<b>FIGURAS</b>	46

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Distribución de las estaciones oceanográficas realizadas durante el crucero Cimar Fiordo 4.
- Figura 2. Distribución vertical de (a) temperatura y (b) salinidad, en la sección 1, durante la primera etapa del crucero.
- Figura 3. Distribución vertical de (a) oxígeno disuelto y (b) pH, en la sección 1, durante la primera etapa del crucero.
- Figura 4. Distribución vertical de (a) fosfato y (b) nitrato, en la sección 1, durante la primera etapa del crucero.
- Figura 5. Distribución vertical de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) oxígeno disuelto en la sección 2, durante la primera etapa del crucero.
- Figura 6. Distribución vertical de (a) fosfato y (b) nitrato, en la sección 2, durante la primera etapa del crucero.
- Figura 7. Distribución vertical de (a) temperatura y (b) salinidad, en la sección 1, durante la segunda etapa del crucero.
- Figura 8. Distribución vertical de (a) oxígeno disuelto y (b) pH, en la sección 1, durante la segunda etapa del crucero.
- Figura 9. Distribución vertical de (a) fosfato y (b) nitrato, en la sección 1, durante la segunda etapa del crucero.
- Figura 10. Distribución vertical de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) oxígeno disuelto en la sección 2, durante la segunda etapa del crucero.
- Figura 11. Distribución vertical de (a) fosfato y (b) nitrato, en la sección 2, durante la segunda etapa del crucero.
- Figura 12. Diagrama T-S de los cruceros Hudson, Cimar Fiordo 1 y Cimar Fiordo 4 1y 2 (Est. 149, 68, 1 y 1) en la boca del Guafo.
- Figura 13. Secuencia de diagrama T-S y sus respectivos triángulos de mezcla a medida para estaciones seleccionadas de la boca del Guafo - canal Moraleda – canal Costa - seno Aysén, durante la primera etapa de Cimar Fiordo 4.

- Figura 14. Secuencia de diagrama T-S y sus respectivos triángulos de mezcla a medida para estaciones seleccionadas de la boca del Guafo - canal Moraleda – canal Costa - seno Aysén, durante la segunda etapa de Cimar Fiordo 4.
- Figura 15. Secuencia de diagrama T-S y sus respectivos triángulos de mezcla a medida para estaciones seleccionadas del canal Moraleda - canal Costa - estero Elefantes – golfo Elefantes, durante el crucero Cimar Fiordo 4, (a) etapa 1 y (b) etapa 2.
- Figura 16. Diagrama de salinidad v/s distancia entre la boca del Guafo- seno Aysén.
- Figura 17. Esquema del modelo a aplicar en el seno Aysén constituido por un sistema de dos cajas y dos capas.
- Figura 18. Modelo teórico para el balance de agua del seno Aysén.
- Figura 19. Modelo físico y químico para el balance de (a) agua y (b) sal en el seno Aysén.
- Figura 20. Balance de sal y agua en un sistema estacionario de dos cajas y dos capas para el seno Aysén (a) octubre, 1998 y (b) marzo, 1999.
- Figura 21. Modelo biogeoquímico para el balance de nutrientes en el seno Aysén.
- Figura 22. Balance de nitrógeno en un sistema estacionario de dos cajas y dos capas para el seno Aysén (a) octubre, 1998 y (b) marzo, 1999.
- Figura 23. Balance de fósforo en un sistema estacionario de dos cajas y dos capas para el seno Aysén (a) octubre, 1998 y (b) marzo, 1999.

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Resumen de las variables medidas y estimadas en los sistemas.

Tabla 2: Resumen de los valores promedios de salinidad utilizados en los respectivos modelos para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4.

Tabla 3: Resumen de los flujos medios estimados para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4.

Tabla 4: Resumen de los valores promedios de nutrientes utilizados en los respectivos modelos para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4.

Tabla 5: Resumen de los flujos medios estimados para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4.

Tabla 6: Fijación de nitrógeno v/s denitrificación para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4

## RESUMEN

El crucero oceanográfico Cimar Fiordo 4, abarcó desde la boca del Guafo ( $43^{\circ} 30'S$ ) a la laguna San Rafael ( $46^{\circ} 40'S$ ), siendo realizado en dos etapas: la primera etapa se realizó entre el 28 de septiembre al 9 de octubre de 1998 y la segunda etapa entre el 26 de febrero al 5 de marzo de 1999. En cada una de ambas etapas se registró la temperatura y la salinidad, y se tomaron muestras de agua en 27 estaciones oceanográficas para el análisis de oxígeno disuelto, pH y nutrientes (fosfato y nitrato). Las estaciones se distribuyeron a lo largo de la boca del Guafo, canal Moraleda, canal Costa, estero Elefantes y golfo Elefantes, incluyendo el seno Aysén. Con la información así obtenida se prepararon secciones verticales para cada una de las características antes mencionadas, realizándose un análisis del efecto estacional. Además de lo anterior, se aplicó un modelo de cajas para establecer el balance de sal y agua a fin de estimar el tiempo de renovación de las aguas y el balance del nitrógeno y fósforo disueltos en el seno Aysén.

Producto de las características topográficas tales como canales bien definidos y presencia de una constricción o umbral e hidrográficas como gradientes verticales y horizontales de las variables físicas y químicas, la zona compuesta por la boca del Guafo, canal Moraleda y seno Aysén, puede ser tratada como un sistema de dos cajas (sub-sistema 1 y sub-sistema 2) y dos capas para aplicarle un modelo de balance de agua, sal y nutrientes.

La distribución vertical confirma la permanencia y extensión de la estructura de dos capas durante las estaciones extremas del año de algunas características oceanográficas analizadas. La capa superficial se caracteriza por presentar inestabilidad (máximos o mínimos) mientras que la capa profunda, se caracteriza por ser más estable, incluso, en algunos casos cuasi homogéneo.

La estructura vertical de las variables oceanográficas presentaron diferencias en ambas épocas del año, producto de la acción de procesos asociados a las diferentes estructuras verticales (fluctuación anual de la radiación solar; aporte de aguas dulce provenientes de la lluvia, de los ríos, de deshielos y ventisqueros; efectos difusivos; efectos advectivos; efectos bioquímicos como fotosíntesis, respiración, mineralización, etc.).

El análisis de la distribución vertical de las variables físicas y químicas del agua en las estaciones oceanográficas, y los diagramas T-S, permitieron determinar la presencia de tres masas de agua en la zona de oceánica, ubicada entre los 0 y 400 m de profundidad, correspondiendo al agua superficial Subantártica (ASAA) centrada alrededor de los 125 m de profundidad, remanentes del agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) centrado aproximadamente a los 200 m de profundidad y el agua Intermedia Antártica (AIAA) a profundidades mayores de 300 m. En la zona de los canales existe una mezcla de las aguas Subantárticas (ASAA) oceánicas con agua dulce (AD) proveniente de los ríos, lluvia y deshielo de glaciares y ventisqueros que generan agua Subantártica Modificada (ASAAM).

En la medida que las aguas oceánicas se introducen por la boca del Guafo hacia los canales Moraleda, Costa, seno Aysén, estero Elefantes y golfo Elefantes, se produce una mezcla con proporciones crecientes de agua dulce, disminuyendo paulatinamente su salinidad para generar progresivamente cantidades variables de ASAAM y de agua estuarina.

El sub-sistema 1, que abarca desde la zona central del seno Aysén a la cabeza de este, presenta una tasa de renovación promedio del agua de dos años, explicando, en parte, la presencia de bajos valores de oxígeno disuelto en la zona profunda hacia la cabeza del Aysén.

Las aguas de la cuenca del sub-sistema 2, ubicado inmediatamente al sur de la constricción de Meninea, y que abarca la boca del seno Aysén, tienen una renovación de sus características oceanográficas cada seis meses, corroborando la proposición hecha anteriormente por Silva *et al* (1998), efectuada en base a la distribución inter estacional de las variables.

La capa superficial de los 2 sub-sistemas, presentaron una condición de fijación de nitrógeno. Es decir, que el sistema estaría ingresando nitrógeno en base a una producción nueva producto de la utilización de nitrógeno disuelto asimilado por organismos especializados (*i.e.* bacterias, microalgas, etc.).

En la capa profunda de ambos subsistemas se presentó una condición de denitrificación, indicando un consumo de nitrato. En este caso se tiene una degradación de la materia orgánica, utilizando como aceptor de electrones al nitrato.

El estado neto del total de cada sub-sistema no se presentó igual, debido a que los procesos de fijación y/o consumo de nitrógeno pueden haber sido más o menos intensos. Es así como, en la primera etapa del cruce el estado neto del sub-sistema 1 fue de fijación de nitrógeno, aún cuando en los otros tres casos se dio un balance favorable a la denitrificación.

## I.- INTRODUCCION

En el extremo sur de Chile se encuentra una de las zonas de fiordos y canales más extensas del planeta. Esta zona junto con las costas de Noruega, Columbia Británica, Alaska, Islandia, Groenlandia, entre otras, conforman las mayores zonas estuarinas del mundo (Cameron y Pritchard, 1963).

Debido a que la gran mayoría de estas zonas estuarinas son altamente fértiles, con un fácil acceso a la navegación, ellas han sido utilizadas por el hombre para la instalación de importantes centros de desarrollo urbano. Esto ha provocado que estas zonas estén siendo fuertemente intervenidas por las diferentes actividades antropogénicas que se efectúan en ellas o en sus alrededores, ya sea por explotación de sus recursos naturales (acuicultura, pesquería y silvicultura entre otros), por el turismo, o por el crecimiento de centros urbanos y centros industriales. Estas actividades en el tiempo pueden producir alteraciones de las condiciones naturales del sistema, siendo capaces de causar daños irreversibles al ecosistema estuarino. Este desarrollo es todavía incipiente en la zona de fiordos chilenos y por lo anterior es importante realizar una oportuna investigación oceanográfica, a fin de establecer las líneas bases ambientales de modo de estar en condiciones de cuantificar los cambios y en lo posible poder predecirlos mediante modelos.

La investigación oceanográfica en canales y fiordos, ha sido escasa en relación a la potencialidad de desarrollo económico y social del área. En el caso del área comprendida entre el golfo de Corcovado y laguna San Rafael, a la fecha es posible aseverar que existe poca información oceanográfica de la columna de agua, la cual se remite básicamente a los trabajos de Brattström y Dahl (1951), Pickard (1971; 1973), Pickard y Stanton (1980), Sievers y Prado (1994), Silva *et al.*(1995; 1997; 1998) y Calvete (1997). En ellos se describe el comportamiento de algunas variables oceanográficas físicas y químicas, la distribución de masas de agua y la circulación general de algunos canales y fiordos.

El único intento de obtener alguna aproximación al conocimiento del área mediante la aplicación de modelos, corresponde a un cálculo del tiempo de residencia de las aguas contenidas en una cuenca semi aislada, que se ubica al sur de la isla Meninea en el canal Moraleda y que incluye al seno Aysén, canal Costa, esteros Elefantes, Cupquelán y Quitralco (Salinas y Hormazábal, 1997). Para realizar este cálculo, estos autores aplicaron un modelo simple de balance de agua y sal.

La aplicación de modelos para simular el comportamiento de una zona, permite por una parte distinguir los procesos que en ella ocurren y por otra parte, dependiendo de su grado de ajuste con la realidad, pronosticar cambios que puedan ser inducidos natural o artificialmente en el sistema modelado. Existen, en general dos formas de enfrentar los modelos, uno analítico que requiere de extensas y múltiples mediciones para generar complejos algoritmos que simulen el comportamiento de las variables físicas y/o químicas de un lugar. Estos modelos requieren del conocimiento de los procesos existentes en la zona y por lo tanto permiten evaluar sus cambios en la zona de modelación. Por otra parte

existe otro enfoque más simple, conocido como modelo de cajas, que corresponde a un balance de volumen y masa, en el cual básicamente describe el ingreso de materia al sistema, la salida de materia del sistema, y la tasa de cambio total de materia dentro del sistema. La ventaja de estos modelos de caja es que requieren de información más simple y generan resultados más rápidamente que los modelos analíticos, pero no entregan mucha información respecto a los procesos que ocurren en sus interiores.

Basado en lo anterior, el programa internacional Land Ocean in the Interaction Coastal Zone (LOICZ), estableció un plan y una metodología para generar en un corto plazo una gran cantidad de modelos de balance para carbono, nitrógeno y fósforo (CNP), de modo de tener en un período de tiempo relativamente corto una comprensión general de cómo puede cambiar la dinámica del CNP en la zonas costeras, bajo diferentes condiciones ambientales. Una vez establecidos estos modelos, se pretende integrarlos en una escala global, a fin de tener, a corto plazo, modelos simples que puedan predecir, en términos generales, alteraciones que puedan ser inducidas en el balance biogeoquímico del CNP (Gordon *et al.*, 1996).

En el caso de los canales australes chilenos, el seno Aysén, por su características geográficas, fuertes gradientes salinos verticales e importantes gradientes horizontales de las variables no conservativas (oxígeno disuelto, nitrato y fosfato), es uno de los fiordos que mejor se presta para efectuar una aplicación de los modelos de balance de agua, sal y nutrientes.

El presente trabajo, basado en la información oceanográfica recolectada por el crucero Cimar Fiordo 4, tiene como objetivo general efectuar un nuevo análisis oceanográfico en dos secciones entre la Boca del Guafo y el estero Elefantes, incluyendo por las particularidades señaladas previamente del seno Aysén y tiene como objetivos específicos: a) ampliar el conocimiento de la variabilidad estacional e interanual de las condiciones oceanográficas del área; b) preparar modelos de caja a fin de establecer los balances de sal, agua y nutrientes en el seno Aysén y c) estimar el tiempo de renovación de las aguas de la cuenca del seno Aysén.

## II.- MATERIALES Y METODOS:

Deleted: ¶

La zona de estudio se encuentra ubicada entre la boca del Guafo (43°30'S) y el golfo Elefantes (46° 40'S), los 72° W y los 74°W. El muestreo de la zona se dividió en dos etapas con el fin de obtener datos de condiciones invernales y condiciones estivales. La primera etapa fue efectuada entre el 28 de Septiembre y el 9 de Octubre de 1998 y la segunda etapa se efectuó desde el 26 de febrero al 5 de marzo de 1999, a bordo del AGOR-60 "Vidal Gormaz" perteneciente a la Armada de Chile, realizándose un total de 48 y 37 estaciones oceanográficas respectivamente (Fig. 1).

En cada una de las etapas del crucero oceanográfico se tomaron entre otras muestras de agua de mar para el posterior análisis de oxígeno disuelto, acidez (pH), nutrientes disueltos (fosfato y nitrato), las que fueron obtenidas mediante botellas Niskin adosadas a una Roseta. Además se procedió a la toma de muestras de agua de río para los análisis de nutrientes, las que fueron tomadas a mano en los ríos Mañiguales, Simpson, Aysén, Cuervo y Cóndor, los cuales desaguan directa o indirectamente en el seno Aysén.

La temperatura, salinidad y oxígeno disuelto fueron registrados durante el crucero con un CTD Sea-Bird modelo 19 entre la superficie y el fondo, siendo procesadas mediante el programa SEASOFT 4.22. Con el propósito de calibrar los sensores de salinidad y oxígeno disuelto, se tomaron muestras de agua, las que fueron analizadas con un salinómetro Portasal y con el método de Winkler para oxígeno disuelto modificado por Carpenter (1965). Los valores de saturación de oxígeno se calcularon basándose en el algoritmo de Weiss (1970). Las muestras de pH fueron tomadas con jeringas plásticas de 60 ml, las que fueron guardadas inmediatamente en oscuridad a 4°C hasta el momento de su análisis, que en general, no superó una hora desde el momento en que fue tomada la muestra. La medición fue realizada mediante un pHmetro Accumet 20 de precisión de 0,001, utilizándose una celda cerrada y termostatazada a 25 °C. Para calibrar el pHmetro fue necesario utilizar tampones AMP de pH 6,787 y TRIS de pH 8,089 preparados en agua de mar sintética de acuerdo a DOE (1994).

Las muestras para los análisis de nutrientes (50 ml) fueron tomadas en botellas asépticas de polietileno de alta densidad, las que fueron fijadas con 0,2 ml de cloruro mercúrico diluido, que posteriormente se congelaron a -25° C. Los análisis de nutrientes se realizaron en forma posterior en la Escuela de Ciencias del Mar de la Universidad Católica de Valparaíso, los nutrientes disueltos se analizaron mediante una autoanalizador de nutrientes y según las técnicas indicadas por Atlas *et al.*, (1971).

Con los resultados de los registros del CTD y de los análisis químicos, se prepararon para cada etapa del crucero 2 secciones verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH, fosfato y nitrato. La sección 1, abarcó desde la Boca del Guafo hasta el seno Aysén, la sección 2 comprendió desde la porción sur del canal Moraleda hasta el golfo Elefantes.

Por otra parte, con el fin de detallar las características de la capa superior, donde ocurren los cambios más intensos al igual que Silva *et al.*, (1995 y 1997), se decidió usar dos escalas diferentes de profundidad. La primera de 0 a 100 m y la otra de 100 m hasta el fondo. La batimetría del fondo de las secciones es aproximada y está basada en las cartas náuticas números 716, 801, 809, 8290, 827, 812 y 838 elaboradas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

La determinación de las masas de agua y el seguimiento de sus desplazamientos hacia el interior de los canales, se realizó mediante la utilización de diagramas T-S y el triángulo de mezcla correspondiente.

Los balances de agua, sal y nutrientes en el seno Aysén se realizaron mediante el uso de un modelo de dos caja separados en dos capas de acuerdo a la metodología propuesta por Gordon *et al.* (1996). Para esto se utilizó la información generada en el crucero Cimar Fiordo 4 en sus dos etapas. En el caso de la información de caudales de los ríos y la tasa de precipitación en la cuenca (Puerto Aysén, Est. 21) del Aysén, ésta fue aportada directamente por personal de la Dirección Meteorológica de Chile, en base a sus registros históricos de 1983 a 1996. Los datos de evapotranspiración de obtuvieron de cartas generadas por la Dirección General de Aguas del Ministerios de Obras Públicas (1987).

### III.- RESULTADOS

#### 3.1 Crucero Cimar fiordo 4 etapa 1

##### 3.1.1- Sección boca del Guafo, canal Moraleda, canal Costa y seno Aysén.

La distribución superficial de temperatura durante el crucero de invierno se presentó bastante homogénea, con valores entre 10,3 y 10,8°C, con los menores valores en la zona central del Moraleda. Los mayores valores se ubicaron en la boca del Guafo y en la cabeza del seno Aysén (Fig. 2a).

Bajo la superficie y en los primeros 75 m (Fig. 2a), en la zona de la boca del Guafo la columna de agua se presentó con una capa superficial relativamente homogénea, con temperaturas del orden de 10,5°C y con un gradiente vertical muy débil ( $< 0,08^{\circ}\text{C}/10\text{ m}$ ). A lo largo de todo el canal Moraleda y hasta la boca del seno Aysén, el agua bajo la superficie se mantuvo cuasi homotermal. Bajo los 75 m de profundidad desde la boca del Guafo hasta la entrada del Moraleda, se apreció una capa profunda más fría ( $< 10,5^{\circ}\text{C}$ ) y con un mayor gradiente vertical térmico, que la capa superficial ( $\approx 0,2^{\circ}\text{C}/10\text{ m}$ ) sin que se alcanzara aún a generar una termoclina (Fig. 2a). Esta estratificación vertical que va disminuyendo hacia el interior del Moraleda, para prácticamente desaparecer en las estaciones cercanas a la constricción de Meninea (Est. 11 a 15), donde se observó una capa prácticamente homotermal de superficie a fondo ( $\Delta T^{\circ}/\Delta z < 0,05^{\circ}\text{C}/10\text{ m}$ ). La zona profunda de la boca del Guafo y el canal Moraleda ( $> 150\text{ m}$ ), fue relativamente homogénea, sin grandes variaciones térmicas verticales en cada estación, pero con un leve gradiente en el sentido horizontal ( $0,1^{\circ}\text{C}/10\text{ m.n.}$ ), donde en un mismo nivel de profundidad, la temperatura fue mayor en la extremo sur que en el extremo norte ( $10,5^{\circ}\text{C}$  versus  $8,8^{\circ}\text{C}$ ).

En las estaciones del interior del seno Aysén la temperatura bajo la superficie presentó un leve aumento térmico con la profundidad generando un máximo ( $> 11^{\circ}\text{C}$ ) centrado entorno a los 50 m, sin que se alcanzara a formar una termoclina invertida ( $\Delta T^{\circ}/\Delta z < -0,16^{\circ}\text{C}/10\text{ m}$ ). La zona profunda ( $> 100\text{ m}$ ), fue relativamente homogénea, sin grandes variaciones térmicas verticales en cada estación, pero con un leve gradiente en el sentido horizontal del orden de  $0,1^{\circ}\text{C}/10$  millas náuticas (m.n.), donde el agua de mayor temperatura ( $> 11,0^{\circ}\text{C}$ ) se encuentra en la cabeza del seno y la de menor temperatura en la boca ( $< 10,5^{\circ}\text{C}$ ) (Fig. 2a).

La distribución superficial de salinidad durante el crucero de invierno fluctuó entre valores de 15,0 a 32,9 psu (Fig. 2b), en donde los menores valores correspondieron a las estaciones de la cabeza del seno Aysén y los mayores valores a la boca del Guafo. En la boca del canal Moraleda, entre las estaciones 5 y 8 se observó la presencia de un leve frente

salino superficial del orden de 0,01 psu/10 m.n., mientras que en el seno Aysén se presentó otro mucho más marcado de 0,3 psu/10m.n..

Bajo la superficie de la boca del Guafo y del canal Moraleda, la salinidad aumentó levemente en los primeros 10 m, para luego hacerlo más rápidamente hasta los 75 m alcanzando valores de alrededor de 33,7 psu en la boca del Guafo y de 33,0 psu en las cercanías de Meninea (Est. 12a). Este rápido cambio en profundidad dio origen a una haloclina de mediana intensidad con gradientes verticales que fluctuaron entre de 0,12 psu/10 m en la boca del Guafo y 0,5 psu/10 m al norte de Meninea (Est. 12). Bajo la haloclina, la salinidad continuó aumentando aunque en forma menos intensa, para alcanzar valores mayores de 34 psu bajo los 150 m de profundidad desde la boca del Guafo hasta la estación 10 en el canal Moraleda. En el extremo sur del canal Moraleda, bajo los 150 m, las estaciones 11 a 12 (al norte de la constricción de Meninea), presentaron salinidades mayores de 33,5 psu, mientras que las estaciones 14 y 15 al sur de la constricción de Meninea presentaron salinidades mayores de 31 psu (Fig. 2b). La salinidad de la zona profunda (> 150 m) del Moraleda y boca del Guafo, fue relativamente homogénea, sin grandes variaciones verticales en cada estación, pero con un leve gradiente en el sentido horizontal (0,1 psu/10 m.n), donde en un mismo nivel de profundidad, la salinidad fue menor en la cabeza que en la boca (33,5 versus 34,1 psu).

En el seno Aysén, la haloclina bajo la superficie fue mucho más intensa que en el resto de la sección, abarcando hasta los 25 m de profundidad con un gradiente vertical máximo de 6 psu/10 m en su cabeza. Bajo esta haloclina, cuyo límite inferior fue la isohalina de 30 psu, la salinidad continuó aumentando, pero mucho más levemente generándose una capa profunda cuasi homohalina con valores entre 31,0 y 31,4 psu (Fig. 2b).

La distribución superficial de oxígeno disuelto durante el crucero de invierno presentó valores entre 5,5 y 8,4 ml/L (87% y 122% de saturación respectivamente), en donde los menores valores se encontraron en la estación 2 y los mayores en las cercanías del seno Aysén (Fig. 3a).

Bajo la superficie el oxígeno disuelto disminuyó en profundidad manteniendo una capa bien oxigenada (> 5 ml/L) de unos 50 m de espesor en la zona de la boca del Guafo. En el resto de la sección esta capa bien oxigenada tuvo unos 25 m de espesor con la excepción de la zona inmediatamente al sur de Meninea donde la alta oxigenación alcanzó hasta casi los 200 m (Est. 14 a 16) (Fig. 3a). Bajo esta capa bien oxigenada, en la porción que abarca desde la boca del Guafo hasta la constricción de Meninea, la concentración de oxígeno disuelto siguió disminuyendo para alcanzar concentraciones menores de 4 ml/L bajo los 75 m en la zona central del canal Moraleda y bajo los 150 m en la zona de la boca del Guafo. Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto de la zona profunda del Moraleda formaron un mínimo de 2,5 ml/L (40% de saturación de oxígeno disuelto) alrededor de los 150 m entre las estaciones 9-10 (Fig. 3a).

En el caso del seno Aysén, se produjo una marcada oxiclina bajo la superficie con un gradiente vertical de 1 ml/L/10m, producto de la presencia de los altos valores superficiales de oxígeno disuelto ( $> 8$  ml/L) y de un mínimo de oxígeno disuelto ( $< 3$  ml/L; 40 % saturación), centrado a unos 100 m de profundidad hacia la cabeza del seno. En la zona profunda del Aysén ( $> 150$  m), se presentó un fuerte gradiente horizontal de oxígeno disuelto ( $\approx 0,5$  ml/L/10 m.n.), entre las bajas concentraciones de la cabeza ( $< 3$  ml/L) y las altas concentraciones de la boca ( $> 5$  ml/L) (Fig. 3a)

La distribución superficial de pH durante el crucero de invierno presentó valores entre 7,9 y 8,3 ubicándose los menores valores en la parte central del canal Moraleda y los mayores valores en las cercanías de la cabeza del seno Aysén (Fig. 3b).

Bajo la superficie, desde el extremo norte del canal Moraleda hasta el sur de la constricción de Meninea (Est. 15), el pH disminuyó rápidamente hasta los 50 m en la zona de la boca del Guafo y canal Moraleda hasta alcanzar valores del orden de 7,7 en el Moraleda y de 7,8 en la boca del Guafo, generando una pHclina débil del orden de 0,06 pH/10m. Bajo esta profundidad el pH siguió disminuyendo más lentamente hasta alrededor de los 100 m, desde donde continuó una capa cuasi homogénea con valores del orden de 7,6 (Fig. 3b).

El seno Aysén, presentó bajo la superficie una fuerte pHclina en los primeros 20 m con un máximo gradiente vertical localizado en su cabeza de 0,32 pH/10m, la que dejó paso a un mínimo en pH ( $< 7,4$ ) centrado a 100 de profundidad. En la zona profunda del seno ( $> 150$  m), se presentó un fuerte gradiente horizontal de pH ( $\approx 0,06$  pH/10m.n.), entre los menores valores de la cabeza ( $< 7,4$ ) y los mayores valores de la boca ( $> 7,7$ ) (Fig. 3b).

La distribución superficial de nutrientes (fosfato y nitrato) en el crucero de invierno presentó concentraciones que fluctuaron entre 0,3 y 1,0  $\mu\text{M}$  para el fosfato (Fig. 4a) y 0,2 y 6,5  $\mu\text{M}$  para el nitrato (Fig. 4b), ubicándose los menores valores en las cercanías de la cabeza del seno Aysén (Est. 18-20) y los mayores en las cercanías de la boca del Guafo (Est. 3).

Bajo la superficie, los nutrientes aumentaron rápidamente hasta alrededor de los 25 m donde alcanzaron concentraciones de fosfato del orden de 1  $\mu\text{M}$  en la boca del Guafo a 1,6  $\mu\text{M}$  en el Moraleda y concentraciones de nitrato de 8  $\mu\text{M}$  en la boca del Guafo a 14  $\mu\text{M}$  en el Moraleda (Fig. 4a y 4b). Esto dio origen a la formación de nutriclinas del orden de 0,2  $\mu\text{M}/10$  m para fosfato y de 0,3  $\mu\text{M}/10$  m para nitrato en la boca del Guafo y del orden de 0,3  $\mu\text{M}/10$  m para fosfato y de 5,0  $\mu\text{M}/10$  m para nitrato en el canal Moraleda. Bajo las nutriclinas estos nutrientes siguieron aumentando más lentamente hasta los 150 m donde continuó una capa cuasi homogénea con concentraciones del orden de 2  $\mu\text{M}$  para fosfato y de 24  $\mu\text{M}$  para nitrato (Fig. 4a y 4b). En las estaciones al sur de la constricción (Est. 14 – 16), bajo los 25 m y hasta el fondo, se presentó una capa relativamente homogénea con concentraciones entre 1,4 y 1,6  $\mu\text{M}$  de fosfato y entre 15,0 y 17,0  $\mu\text{M}$  de nitrato.

En el seno Aysén, los nutrientes aumentaron rápidamente en los primeros 25 m (Fig. 4a y 4b), generándose fuertes nutriclinas con gradientes de  $0,6 \mu\text{M}/10 \text{ m}$  en fosfato y de  $7,0 \mu\text{M}/10 \text{ m}$  en nitrato. Bajo la nutriclina, estos nutrientes continuaron aumentando pero mucho más lentamente para formar un máximo de  $2,1 \mu\text{M}$  centrado alrededor de los 50 m de profundidad para el fosfato y de  $21 \mu\text{M}$  centrado a los 50 m para el nitrato. Los nutrientes de la zona profunda ( $> 150 \text{ m}$ ) del Aysén, fueron relativamente homogéneos, sin grandes variaciones verticales en cada estación, pero con un leve gradiente en el sentido horizontal ( $0,07 \mu\text{M PO}_4 /10 \text{ m.n}$  y  $1,6 \mu\text{M NO}_3 /10 \text{ m.n}$ ), donde en un mismo nivel de profundidad, los nutrientes fueron mayores en la cabeza que en la boca ( $2,1 \mu\text{M}$  versus  $1,4 \mu\text{M}$  de fosfato y  $21 \mu\text{M}$  versus  $14 \mu\text{M}$  de nitrato).

### **3.1.2.- Sección sur de la constricción de Meninea, canal Costa, estero Elefantes y golfo Elefantes.**

La sección Canal costa – Golfo Elefantes corresponde a la cuenca sur del sistema canal Moraleda, Costa y Elefantes, que desde el punto de vista geomorfológico constituye una sola unidad, siendo relativamente angostos y carente de islas. El canal costa presenta profundidades mayores a 200 m en toda su extensión, mientras que el estero y golfo Elefantes son más someros y con profundidades menores a los 100 m. El estero Elefantes se encuentra separado del golfo Elefantes por medio de un umbral de unos 25 m de profundidad.

La distribución superficial de temperatura durante el crucero de invierno se presentó bastante homogénea con valores entre  $8,7^\circ$  y  $10,8^\circ\text{C}$  con los menores valores en la cabeza del golfo Elefantes y los mayores valores se ubicaron en el extremo norte de la sección (Fig. 5a).

Bajo la superficie (Fig. 5a), en la zona del sur del canal Moraleda al canal Costa la columna de agua se presentó bastante homogénea, con temperaturas del orden de  $10,5^\circ$  a  $10,8^\circ\text{C}$  dando origen a una capa prácticamente homotermal en las estaciones 11 a 22. En el tramo comprendido por el estero Elefantes y golfo Elefantes (Est. 23 a 27) se presentó un gradiente vertical de  $0,08^\circ\text{C}/10\text{m}$ . La zona profunda ( $> 100 \text{ m}$ ), fue prácticamente homogénea, sin grandes variaciones térmicas verticales en cada estación, donde en un mismo nivel de profundidad, la temperatura fue mayor en las estaciones del canal Moraleda que en la cabeza del golfo Elefantes ( $10,7^\circ\text{C}$  versus  $9,1^\circ\text{C}$ ). En las estaciones del interior golfo Elefantes la temperatura bajo la superficie presentó un leve aumento térmico ( $> 9,0^\circ\text{C}$ ) alrededor de los 100 m de profundidad, sin que se alcanzara a formar una termoclina invertida.

La distribución superficial de salinidad durante el crucero de invierno presentó valores entre 21,3 a 30,0 psu (Fig. 5b), en donde los menores valores correspondieron a las estaciones de la cabeza del golfo Elefantes y los mayores valores en el extremo norte de la

sección (Est. 12-13). Entre el estero Elefantes y el golfo Elefantes, se observó la presencia de un fuerte frente salino superficial con un gradiente horizontal del orden de 3 psu/10 m.n.

Bajo la superficie del canal Moraleda (Est 11 a 12), la salinidad aumentó levemente en los primeros 10 m, para luego hacerlo más rápidamente hasta los 75 m alcanzando valores de alrededor de 32,9 psu en el tramo norte de la sección y de 31,1 psu al sur de Meninea (Fig. 5b). Este rápido cambio en profundidad dio origen a una haloclina de mediana intensidad la que disminuyó hacia el golfo Elefantes, con gradientes verticales que fluctuaron entre 0,5 psu/10 m inmediatamente al norte de Meninea a 0,25 psu/10 m en la cabeza del golfo Elefantes. Bajo la haloclina, la salinidad continuó aumentando aunque en forma menos intensa, para alcanzar bajo los 100 m valores mayores de 33,5 psu en las estaciones 11 a 12 (al norte de la constricción de Meninea), mientras que las estaciones al sur de la constricción de Meninea (14, 15, 22 y 23) presentaron salinidades mayores 31,3 psu. En el caso del golfo Elefantes las salinidades fueron menores, del orden de 23,3 psu (Fig. 5b).

En el estero y golfo Elefantes la salinidad bajo la superficie aumentó rápidamente dando origen a una haloclina, en los 25 m, la cual tuvo un gradiente máximo de  $\approx 1,4$  psu/10m, en el umbral que separa el estero Elefantes del golfo Elefantes. A Mayor profundidad, se apreció un leve aumento de salinidad, presentando mayores valores en las estaciones ubicadas al norte del umbral (Estaciones 23 a 26) que al sur de este ( $\approx 31$  psu versus 23 psu).

La distribución superficial de oxígeno disuelto durante el crucero de invierno presentó valores entre 6,4 y 7,5 ml/L (98% y 117% de saturación respectivamente), en donde los menores valores se encontraron en cercanías del estero Elefantes (Est. 24) y los mayores en la parte norte de la sección (Est. 11).

Bajo la superficie el oxígeno disuelto disminuyó en profundidad manteniendo una capa bien oxigenada ( $> 5$  ml/L) de unos 50 m de espesor en toda la sección (Fig. 5c). Debido de esta capa bien oxigenada, la concentración de oxígeno disuelto siguió disminuyendo para alcanzar concentraciones menores a 4 ml/L a profundidades mayores de 100 m al norte de la constricción de Meninea (Est. 11 a 12). Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto de la zona profunda del Moraleda formaron un mínimo de 3,2 ml/L (50% de saturación) alrededor de los 150 m entre las estaciones 11 a 12 (Fig. 5c).

En el caso del tramo comprendido desde el canal Costa al golfo Elefantes, la concentración de oxígeno disuelto disminuyó gradualmente en profundidad, hasta valores del orden de 5 ml/L a los 200 m de profundidad.

La distribución superficial de nutrientes (fosfato y nitrato) en el crucero de invierno presentó concentraciones que fluctuaron entre 0,6 y 1,3  $\mu\text{M}$  para el fosfato (Fig. 6a) y 0,3 y 11,0  $\mu\text{M}$  para el nitrato (Fig. 6b), ubicándose los menores valores en el extremo norte de la sección (Est. 15) y los mayores en las cercanías del estero Elefantes (Est. 24).

Bajo la superficie, en el canal Costa los nutrientes aumentaron rápidamente hasta alrededor de  $1,6 \mu\text{M}$  en fosfato y  $16 \mu\text{M}$  en nitrato. En el estero Elefantes y golfo Elefantes los nutrientes presentaron una capa más homogénea y de mayor concentración en los primeros 25 m (Fig. 6a y 6b). Esto, en el canal Costa, dio origen a la formación de nutriclinas del orden de  $0,3 \mu\text{M} / 10 \text{ m}$  para fosfato y de  $4,5 \mu\text{M} / 10 \text{ m}$  para nitrato. Debido a los bajos valores registrados en el canal Costa (Est. 15), se formó un mínimo bajo la superficie de nutrientes. Bajo la capa superficial estos nutrientes siguieron aumentando más lentamente hasta los 100 m alcanzando concentraciones del orden de  $1,9 \mu\text{M}$  para fosfato y de  $20,0 \mu\text{M}$  para nitrato al norte de la constricción de Meninea, ya que al sur de esta los valores correspondientes son del orden de  $1,6 \mu\text{M}$  para fosfato y de  $16 \mu\text{M}$  para nitrato (Fig. 6a y 6b). En las estaciones al sur de la constricción (Est. 14, 15, 22 y 23), bajo los 50 m y hasta el fondo, se presentó una capa relativamente homogénea con concentraciones entre  $1,5$  y  $1,7 \mu\text{M}$  de fosfato y entre  $14,0$  y  $16,0 \mu\text{M}$  de nitrato.

### **3.2 Crucero Cimar fiordo 4 etapa 2**

#### **3.2.1- Sección boca del Guafo, canal Moraleda, canal Costa y seno Aysén.**

La distribución superficial de temperatura durante el crucero de verano fluctuó entre  $11,5$  y  $14,2^\circ\text{C}$ , donde los menores valores se ubicaron en la parte central del canal Moraleda (Est. 8) y los mayores valores se ubicaron en la boca del Guafo y en la cabeza del seno Aysén (Fig. 7a).

Entre la superficie y unos 10 m de profundidad se presentó una capa cuasi homotermal que se extendieron, desde la boca del Guafo hasta al sur de la constricción de Meninea (Est. 14). Bajo esta capa cuasi homotermal, desde la boca del Guafo hasta en norte de la constricción de Meninea (Est. 12), la temperatura disminuyó rápidamente en profundidad hasta alrededor de 150 m donde alcanzó temperaturas del orden de  $9^\circ\text{C}$  en la boca del Guafo y de  $10^\circ\text{C}$  en las cercanías de Meninea, generándose gradientes térmicos del orden de  $0,6^\circ\text{C} / 10 \text{ m}$ , lo que corresponde a una termoclina estacional débil (Fig. 7a). La zona profunda ( $> 150 \text{ m}$ ), la temperatura fue relativamente homogénea, sin grandes variaciones térmicas verticales en cada estación, pero con un leve gradiente en el sentido horizontal ( $0,1^\circ\text{C} / 10 \text{ m.n.}$ ), donde el agua de mayor temperatura ( $> 9,5^\circ\text{C}$ ) se encuentra en el extremo sur del Moraleda y la menor temperatura en la boca del Guafo ( $< 8,5^\circ\text{C}$ ) (Fig. 7a). En el canal Costa, al sur de la constricción de Meninea (Est. 14) se apreció una columna prácticamente homotermal entre los 75 y los 150 m ( $0,01^\circ\text{C} / 10 \text{ m}$ ).

En el seno Aysén, la situación fue diferente ya que en los primeros 25 m se presentó una termoclina superficial fuerte, con un gradiente térmico máximo de  $1,1^\circ\text{C} / 10 \text{ m}$  en la cabeza. Bajo la termoclina y hacia la cabeza del seno Aysén, se observó un leve mínimo

térmico subsuperficial ( $< 11^{\circ}\text{C}$ ), centrado entre los 50 y 100 m de profundidad (Fig. 7a). La zona profunda ( $> 150$  m), fue prácticamente homotermal, sin grandes variaciones térmicas verticales ni horizontales (Fig. 7a).

La distribución superficial de salinidad durante el crucero de verano fluctuó entre 9,6 y 33,0 psu, en donde los menores valores correspondieron a las estaciones de la cabeza del seno Aysén y los mayores valores a la boca del Guafo (Fig. 7b). En las cercanías de la boca del canal Moraleda, entre las estaciones 8 y 9, se pudo observar la presencia de un débil frente salino superficial del orden de 1,4 psu/10m.n., mientras que en el seno Aysén se presentó otro mucho más marcado de 4,6 psu/10m.n..

Bajo la superficie, la salinidad en la zona de la boca del Guafo, aumentó lentamente hasta los 100 m de profundidad donde alcanzó valores del orden de 33,5 psu, con un gradiente vertical débil ( $\approx 0,08$  psu/10 m), no apreciándose la formación de una haloclina (Fig. 7b). En las estaciones de la boca del canal Moraleda, la salinidad también aumentó lentamente en profundidad hasta los 150 m, pero con una tasa de cambio mayor ( $\approx 0,1$  psu/10m), mientras que hacia la zona central de éste el aumento produjo una haloclina débil con un gradiente vertical de ( $\approx 0,4$  psu/10m). Bajo la haloclina, la salinidad continuó aumentando aunque en forma menos intensa, para alcanzar valores mayores de 34 psu bajo los 150 m de profundidad desde la boca del Guafo hasta la estación 10 en el canal Moraleda. Bajo los 150 m, en las estaciones 11 a 12 al norte de la constricción de Meninea, en el canal Moraleda, se presentaron salinidades mayores de 33,5 psu, mientras que las estaciones 14 y 15 al sur de la constricción de Meninea presentaron salinidades menores 32,5 psu (Fig. 7b). La salinidad de la zona profunda ( $> 150$  m) del Moraleda y Boca del Guafo, fue relativamente homogénea, sin grandes variaciones verticales en cada estación, pero con un leve gradiente en el sentido horizontal (0,04 psu/10 m.n), donde en un mismo nivel de profundidad, la salinidad fue menor en la cabeza que en la boca (33,5 versus 34,2 psu).

En el caso del seno Aysén, la salinidad bajo la superficie aumentó rápidamente dando origen a una marcada haloclina en los 25 m superiores, la que tuvo un gradiente máximo de ( $\approx 10$  psu/10m), en la cabeza del seno. A mayor profundidad, se apreció un leve aumento de salinidad, generándose una capa profunda relativamente homogénea con valores entre 31,1 a 32,3 psu (Fig. 7b)

La distribución superficial de oxígeno disuelto durante el crucero de verano presentó valores entre 5,5 y 7,1 ml/L (87% y 104% de saturación respectivamente), con los menores valores en el centro de la sección y los mayores en ambos extremos de la sección (Fig. 8a).

Bajo la superficie el oxígeno disuelto disminuyó en profundidad, manteniéndose una capa bien oxigenada ( $> 5$  ml/L) de unos 25 m de espesor en toda la sección, con la excepción del seno Aysén donde alcanzó a unos 30 m de profundidad y el extremo sur del canal Moraleda (Est. 14) donde alcanzó a 75 m de profundidad (Fig. 8a). Bajo esta capa

bien oxigenada el oxígeno disuelto continuó disminuyendo más lentamente hasta concentraciones menores de 4 ml/l bajo los 75 m en la zona central del canal Moraleda y bajo los 100 m en la zona de la boca del Guafo, formando un mínimo de 2,7 ml/L (40% de saturación) alrededor de los 150 m entre las estaciones 9-10 (Fig. 8a).

En el seno Aysén, se produjo una oxiclina marcada, con un gradiente vertical de 2,8 ml/L/10m, producto de la presencia del alto contenido de oxígeno disuelto superficial (> 6,5 ml/L) y de un mínimo de 2,0 ml/L (32% de saturación de oxígeno disuelto) centrado alrededor de los 50 m de profundidad en el sector de la cabeza del fiordo. En la zona profunda de este seno (> 100 m), entre la cabeza y la boca, la distribución de oxígeno disuelto fue relativamente homogénea y de alrededor de 4 ml/L (Fig. 8a)

La distribución superficial de pH durante el crucero de verano presentó valores entre 7,7 y 7,9 con los menores valores en la estación 18 y los mayores valores en la cabeza del Aysén y la boca del Guafo (Fig. 8b).

Bajo la superficie, desde el extremo norte del canal Moraleda hasta el norte de la constricción de Meninea (Est. 10), el pH disminuyó rápidamente hasta los 50 m donde alcanzó valores del orden de 7,7 dando origen a una pHclina débil de 0,04 pH/10m. Luego siguió disminuyendo más lentamente hasta los 150 m de profundidad para luego presentarse una capa profunda cuasi homogénea, con valores de pH de alrededor de 7,6 en canal Moraleda (Fig. 8b).

En el seno Aysén, bajo la superficie, se produjo una marcada pHclina en los primeros 25 m con un gradiente vertical máximo de 0,16 pH/10m, producto de la presencia de un mínimo de 7,36 pH, centrado alrededor de los 50 m de profundidad en la cabeza del seno Aysén. En la zona profunda de este seno (> 100 m), entre la cabeza y la boca, la distribución de pH fue cuasi homogénea y de alrededor de 7,6 (Fig. 8b).

La distribución superficial de nutrientes en el crucero de verano presentó concentraciones que fluctuaron entre 0,2 y 1,6  $\mu\text{M}$  para el fosfato (Fig. 9a) y 0,3 y 13,7  $\mu\text{M}$  para el nitrato (Fig. 9b), ubicándose los menores valores en las cercanías de la cabeza del seno Aysén (Est. 18-20) y los mayores en la parte central del canal Moraleda (Est. 10).

Bajo la superficie, se presentó una delgada capa de unos 10 m donde los nutrientes presentaron concentraciones relativamente homogéneas, para luego aumentar rápidamente hasta los 75 m donde alcanzaron concentraciones de fosfato del orden de 1,6  $\mu\text{M}$  en la boca del Guafo a 1,8  $\mu\text{M}$  en el Moraleda y concentraciones de nitrato de 20  $\mu\text{M}$  en la boca del Guafo a 22  $\mu\text{M}$  en el Moraleda (Fig. 9a y 9b). Lo anterior dio origen a nutriclinas que variaron de valores de 0,2  $\mu\text{M}$  /10 m para fosfato y de 0,6 $\mu\text{M}$ /10 m para nitrato en la boca del Guafo. Bajo las nutriclinas tanto el fosfato como el nitrato siguieron aumentando más lentamente con la profundidad continuando una capa cuasi homogénea con concentraciones del orden de 2,2  $\mu\text{M}$  para fosfato y de 27  $\mu\text{M}$  para nitrato a los 150 m aproximadamente (Fig. 9a y 9b). En las estaciones al sur de la constricción (Est. 14 a 16), se presentó una

capa cuasi homogénea con concentraciones del orden de 1,5  $\mu\text{M}$  en fosfato y 17  $\mu\text{M}$  en nitrato. En las estaciones al sur de la constricción (Est. 14 a 16), bajo los 50 m y hasta el fondo, se presentó una capa relativamente homogénea con concentraciones entre 1,4 y 1,7  $\mu\text{M}$  de fosfato y entre 14 y 17  $\mu\text{M}$  de nitrato).

En el seno Aysén, los nutrientes aumentaron rápidamente en los primeros 25 m (Fig. 9a y 9b), generándose fuertes nutriclinas con gradientes de 0,6  $\mu\text{M}/10$  m en fosfato y de 8,0  $\mu\text{M}/10$  m en nitrato. Bajo la nutriclina, estos nutrientes continuaron aumentando pero mucho más lentamente para formar un máximo de 2,0  $\mu\text{M}$  centrado alrededor de los 75 m de profundidad para el fosfato y de 23  $\mu\text{M}$  centrado a los 50 para el nitrato. Los nutrientes de la zona profunda del Aysén ( $> 100$  m), fueron cuasi homogéneos, con concentraciones del orden de 1,7  $\mu\text{M}$  en fosfato y 17  $\mu\text{M}$  en nitrato (Fig. 9a y 9b).

### **3.2.2.- Sección sur de la constricción de Meninea, canal Costa, estero Elefantes y golfo Elefantes.**

La distribución superficial de temperatura durante el crucero de verano fluctuó entre 10,5 y 13,0°C, donde los menores valores se ubicaron en la cabeza del golfo Elefantes y los mayores valores se ubicaron en el extremo norte de la sección (Est. 15) (Fig. 10a).

Bajo la superficie la temperatura disminuyó lentamente en profundidad, generándose un débil gradiente vertical ( $\approx 0,4^\circ\text{C}/10$  m), en la zona inmediatamente al norte de Meninea. Hacia el sur y hasta el estero Elefantes, la disminución en profundidad fue mucho más lenta lo que generó una capa cuasi homogénea (alcanzándose valores de 11,8 a 11,9°C) de unos 25 m de espesor.

En las estaciones del interior del golfo Elefantes la temperatura bajo la superficie presentó inversión térmica generando un máximo de 11,6°C bajo los 50 m, dando origen a un gradiente vertical de 0,1°C/10 m.

A mayor profundidad ( $> 25$  m), la temperatura fue relativamente homogénea, sin grandes variaciones térmicas verticales en cada estación, pero con un leve gradiente en el sentido horizontal (0,25°C/10 m.n), donde el agua de mayor temperatura ( $>11,2^\circ\text{C}$ ) se encuentra en el extremo norte de la sección y la menor temperatura en la boca del golfo Elefantes ( $< 10,0^\circ\text{C}$ ) (Fig. 10a). En la zona profunda la temperatura continua disminuyendo alcanzando temperaturas del orden de 10,0°C en el extremo norte de la sección y de 11,0°C en las cercanías de Meninea, generándose gradientes térmicos del orden de 0,1°C/10 m, sin llegar a generar la formación de una termoclina.

La distribución superficial de salinidad durante el crucero de verano fluctuó entre 19,3 y 31,3 psu, en donde los menores valores correspondieron a las estaciones de la cabeza del golfo Elefantes y los mayores valores al norte de la sección (Est. 13) (Fig. 10b) ). Desde el extremo sur del canal Moraleda, (a partir de la estación 13), se pudo observar la

presencia de un frente salino superficial del orden de 1,7 psu/10 m.n., que se fue incrementando hacia el golfo Elefantes hasta valores de 4,3 psu/10m.n..

En el estero y golfo Elefantes, la salinidad bajo la superficie aumentó rápidamente dando origen a una haloclina, en los 25 m, la cual tuvo un gradiente máximo de  $\approx 2,8$  psu/10m, en el umbral que separa el estero Elefantes del golfo Elefantes. A Mayor profundidad, la salinidad continuó aumentando más lentamente hacia el fondo. En profundidad (i.e. 50 m) se observó que las estaciones ubicadas al norte del umbral (Estaciones 23 a 26) presentaron salinidades mayores que las estaciones del sur de este ( $\approx 30,0$  psu versus 23,0 psu).

En la zona norte de la sección (Est. 11 a 12), bajo la superficie, la salinidad, aumentó paulatinamente hasta los 75 m de profundidad donde alcanzó valores del orden de 33,4 psu, con un gradiente vertical del orden de 0,3 psu/10 m, generando la formación de una haloclina débil. Bajo esta haloclina, la salinidad continuó aumentando aunque en forma menos intensa, para alcanzar valores mayores de 33,4 psu bajo los 100 m de profundidad desde el norte de la sección hasta la constricción de Meninea. Bajo los 100 m de profundidad, en las estaciones 11 a 12 al norte de la constricción de Meninea, en el canal Moraleda, se presentaron salinidades mayores de 33,5 psu, mientras que las estaciones 14, 15 y 22 al sur de la constricción de Meninea presentaron salinidades menores 32,2 psu (Fig. 10b).

La distribución superficial de oxígeno disuelto durante el crucero de verano presentó valores entre 5,2 y 6,7 ml/L (83 y 97% de saturación de oxígeno respectivamente), en donde los menores valores se encontraron en el centro de la sección (Est. 23) y los mayores en las cercanías del golfo Elefantes (Fig. 10c).

Bajo la superficie el oxígeno disuelto disminuyó en profundidad, manteniéndose una capa bien oxigenada ( $> 5$  ml/L) de unos 25 m de espesor en toda la sección (Fig. 10c). En la zona norte de la sección (Est. 11 y 12), bajo esta capa bien oxigenada, el oxígeno disuelto continuó disminuyendo más lentamente hasta formar un mínimo de 3,1 ml/L (49% de saturación) a los 200 m de profundidad (Fig. 10c). Por otra parte, al sur de la constricción de Meninea, las aguas se presentaron cuasi homogéneas y más oxigenada que en la parte norte de la sección, con valores de 4,1 ml/L (66% de saturación), en el canal Costa (estaciones 14 a la 23), y 4,4 y 5,7 ml/L (70 % de saturación) en el estero y golfo Elefantes (estaciones 24-27) (Fig. 10c),

La distribución superficial de nutrientes en el crucero de verano presentó concentraciones que fluctuaron entre 0,6 y 1,5  $\mu\text{M}$  para el fosfato (Fig. 11a) y 4,0 y 13,5  $\mu\text{M}$  para el nitrato (Fig. 11b), ubicándose los menores valores en el canal Costa (Est. 15) y los mayores en el estero Elefantes (Est. 23 y 24).

Bajo la superficie, se presentaron concentraciones altas y relativamente homogéneas en los primeros 25 m para luego aumentar lentamente hacia el fondo donde se alcanzaron

concentraciones de 2,1  $\mu\text{M}$  para fosfato y de 25  $\mu\text{M}$  para nitrato al norte de la constricción de Meninea (Fig. 11a y 11b). En las estaciones al sur de la constricción (Est. 14 – 23), se presentó una capa cuasi homogénea con concentraciones del orden de 2,1  $\mu\text{M}$  en fosfato y 25  $\mu\text{M}$  en nitrato (Fig. 11a y 11b)

## IV.- DISCUSION

La característica batimétrica más importante de la zona de estudio es el estrechamiento y la presencia de un umbral de baja profundidad (aproximadamente 50-60 m), frente a la isla Meninea (45° 16'S y 73° 38'W), el que se ubica en el extremo sur del canal Moraleda. Este estrechamiento, que Silva *et al.* (1995) denominaron como la “constricción de Meninea”, separa al canal Moraleda de los canales Aysén, Quitralco, Cupquelán, Costa y Elefantes en dos cuencas, una ubicada al norte y la otra al sur. La cuenca al norte de la constricción está conectada al mar por la boca del Guafo y tiene una profundidad media del orden de 250 m. La cuenca sur esta semi aislada de la influencia del océano, debido al efecto de “represa” que ejerce la constricción de Meninea, siendo menos profunda que la cuenca norte, ya que tiene una media del orden de 150 m.

### 4.1.- Temperatura

Producto de las variaciones anuales de la radiación solar, típica de zona ubicadas en latitudes intermedias, la distribución vertical de temperatura no presentó un patrón similar en ambas etapas del crucero Cimar Fiordo 4. En la etapa de invierno, la distribución vertical presentó una capa cuasi homogénea hasta los 75 m en las estaciones más oceánicas (Est. 1 a 4), la que se fue profundizando hacia el interior del canal Moraleda para llegar hasta el fondo (300 m) en su extremo sur (Est. 15). Bajo esta capa cuasi homogénea en las estaciones oceánicas, la temperatura disminuyó un poco más rápidamente hacia el fondo, pero sin alcanzar a formar una termoclina (Fig. 2a y 5a).

La situación del crucero de verano, fue muy diferente a la de invierno, ya que el calentamiento superficial típico de la estación estival provocó, en general, el desarrollo de una delgada capa cuasi homotermal en superficie ( $\approx 10 - 25$  m), que dio paso a una termoclina débil con gradientes máximos de  $0,6^{\circ}\text{C}/10\text{m}$  entre los 25 y 150 m de profundidad, para luego continuar una capa cuasi homogénea. (Fig. 7a y 10a). Esta situación se mantuvo hasta la constricción de Meninea desde donde la situación cambió notablemente hacia el sur (golfo Elefantes) y hacia el este (seno Aysén).

En forma similar al crucero de invierno, en las estaciones 14 y 15, al sur de Meninea, la columna de agua tendió a ser bastante homogénea hasta el fondo, sólo que con valores alrededor de  $1^{\circ}\text{C}$  más alto, denotando un cierto grado de estabilidad en los procesos involucrados en la distribución. Hacia el golfo Elefantes la temperatura mantuvo la homogeneidad vertical en ambos cruceros, con las respectivas diferencias estacionales de magnitud para luego presentar una inversión térmica en la estación 27, donde la temperatura superficial fue menor que la profunda. Esto se debe al aporte de agua fría proveniente desde la laguna San Rafael a través del río Ventisqueros. Hacia el seno Aysén, la situación fue completamente diferente a la del canal Costa, estero y golfo Elefantes, ya que en este caso se desarrolló una intensa termoclina superficial de unos 25 m de espesor con un gradiente

vertical máximo de 1,2 °C/10m, producto del efecto combinado del calentamiento estival y de un aporte fluvial más cálido.

Una de las características más notables en la distribución de la temperatura en el seno Aysén fue la presencia de una inversión térmica en el período de verano, que genera la formación de un mínimo en temperatura centrado alrededor de los 75 m en Cimar Fiordo 4 (< 11°C) (Fig. 7a). Esta inversión de temperatura parece ser una característica estable ya que ha también ha sido observada anteriormente en los cruceros Hudson (marzo de 1970; Silva *et al*, 1995), y Aysén 2 (enero de 1992; Sievers y Prado, 1994), sólo que a menor profundidad ( $\approx$  25 m). En Cimar Fiordo 1 (Octubre de 1995, Silva *et al*, 1998), también fue observada la inversión y el mínimo, por lo que al parecer es producto de una combinación entre calentamiento progresivo de la capa superficial y de un remanente más profundo del intenso enfriamiento invernal, según lo propone Silva *et al*, (1998).

Aún cuando la tendencia de la temperatura en casi toda la sección es de disminuir en profundidad, se observó que en las cercanías del seno Aysén, tanto el crucero de invierno como el de verano presentaron altos valores de temperatura en la capa profunda, llegando a tener cerca del fondo valores mayores a 11°C. Estas 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 (Sievers y Prado, 1994), pero que de acuerdo a lo observado en este crucero y en el Hudson y Cimar Fiordo 1, esto es una situación permanente, según se propone en el modelo esquemático de Silva *et al*, (1998).

Otra de las características notables, fue la diferencia térmica entre la cuenca al norte de Meninea y la cuenca sur, ya que mientras la cuenca sur fue cuasi homoterma con valores del orden de 11°C, la cuenca norte fue heterogénea con un gradiente térmico horizontal y vertical (8,5 a 10,5°C) (Figs. 2a, 5a, 7a y 10a). Esta característica es un rasgo permanente del área ya que ha sido observado en los cruceros Hudson (marzo, 1970) y Cimar Fiordo 1 (octubre, 1995), 4-1 (octubre, 1998) y 4-2 (marzo, 1999).

#### **4.2.- Salinidad.**

Producto de un diferente aporte de aguas dulces durante los períodos en que se desarrollaron los cruceros, la distribución vertical de salinidad no presentó un patrón similar en ambas etapas del crucero Cimar Fiordo 4. En crucero de invierno, el mayor aporte de agua dulce provocó, en general, el desarrollo de una delgada capa relativamente homogénea en superficie ( $\approx$ 25 m), para luego dar paso a una haloclina débil con gradientes máximos de 0,5 psu/10m entre los 15 y 150 m de profundidad, que continuó en forma de una capa relativamente homogénea a mayor profundidad (Figs. 2b y 5b). Esta situación se mantuvo hasta el norte de la constricción de Meninea desde donde la situación cambió notablemente hacia el sur (golfo Elefantes) y hacia el este (seno Aysén), ya que en éstos

casos se observó la formación de haloclina superficial fuerte con gradientes de densidad que fluctuaron entre 0,8 psu/10m en el canal Costa y 6 psu/10m en la cabeza del Aysén.

La distribución vertical de salinidad en la etapa de verano, fue muy diferente a la de invierno, presentando una capa superficial relativamente homogénea hasta los 75 m. En las estaciones oceánicas (Est. 1 a 7') no se apreció la formación de haloclina, mientras que en la zona central del Moraleda (Est 8 a 12) se produjo una haloclina débil ( $\approx 0,4$  psu/10m). Al sur de la constricción de Meninea la distribución vertical de salinidad, fue similar a la de la etapa 1, con gradientes de 0,6 psu/10m en el canal Costa. Hacia el este los gradientes fueron mayores, con 10 psu/10m en la cabeza del Aysén (Fig. 7b y 10b).

Este tipo de estructura de dos capas se presentó en la mayoría de las estaciones. La capa superior presentó un rango muy variable de salinidad en la sección de estudio, observándose los valores más bajos en la cabeza del seno Aysén siendo menores de 15 psu en la etapa 1 y menores de 10 psu en la etapa 2 del crucero Cimar Fiordo 4. Esto fue similar aunque algo mayor que los de otros cruceros realizados previamente en la zona. En el crucero Hudson el valor mínimo de salinidad fue de 4 psu (Silva *et al*, 1995), en el Aysén 1 y 2 menor de 2 psu (Sievers y Prado, 1994) y en Cimar Fiordo 1 menor de 0,6 psu (Silva *et al*, 1997).

Desde el punto de vista de la salinidad de la capa profunda, la zona de los canales considerados puede dividirse en dos zonas, una con salinidades superiores a 32,5 psu y otra con salinidades inferiores a este valor. Si se utiliza esta división los canales al norte de la constricción de Meninea se caracterizan por salinidades entre 32,5 y 34,3 psu en sus aguas profundas (bajo los 50 m), siendo mayores a las que se presentaron al sur de dicha constricción (Aysén, Costa y Elefantes), donde su salinidad fluctuó entre 24,0 y 32 psu a profundidades similares (Figs. 2b, 5b, 7b y 10b). Esta característica es un rasgo permanente del área ya que ha sido observado en los cruceros Hudson y Cimar Fiordo 1, 4-1 y 4-2 (Silva *et al*, 1995 y 1997).

#### **4.3.- Oxígeno y pH**

Tanto la distribución vertical de oxígeno disuelto (O-Z) como la distribución vertical de pH (pH-Z) presentan características similares en cuanto a su distribución en profundidad. Esto se debe a que ambas variables se encuentran afectadas por procesos biogeoquímicos, como lo es la fotosíntesis, que consume CO<sub>2</sub> y produce O<sub>2</sub> y la respiración y remineralización que produce CO<sub>2</sub> y consume O<sub>2</sub>. Ambos procesos producen cambios en la concentración de CO<sub>2</sub>, alterando el equilibrio del tampón carbonato – bicarbonato y por lo tanto el pH, de modo que cuando el oxígeno disuelto disminuye, también lo hace el pH y cuando el oxígeno disuelto aumenta, también lo hace el pH. Debido a esta estrecha relación que existe entre estas dos variables, se las analizará en forma conjunta, similarmente a lo realizado por Silva *et al.*, (1997).

La tendencia general tanto de la distribución vertical de oxígeno disuelto, como de la distribución vertical de pH, es a disminuir su valor con la profundidad. Lo anterior fue observado en gran parte de la zona de estudio, a excepción de las estaciones inmediatamente al sur de Meninea (Est. 14 y 15) en que los valores tendieron a mantenerse en profundidad (Figs. 3a, 3b, 5c, 8a, 8b y 10c).

Los altos valores de pH y de sobresaturación de oxígeno disuelto en la capa superior se deben principalmente al intercambio de oxígeno y anhídrido carbónico con la atmósfera, como también a la actividad fotosintética, que puede ser muy intensa, en una zona costera con una alta productividad fotosintética (Figs. 3a, 3b, 5c, 8a, 8b y 10c).

A pesar de lo anterior, se tiene que oxígeno superficial sigue siendo alto, respecto a la concentración de esta variable que presenta la capa profunda, por lo cual continúa siendo un máximo superficial importante, aun cuando su concentración sea un tanto menor que el valor de saturación.

Una característica notable en la distribución de oxígeno disuelto y pH, es la presencia de bajas concentraciones en la capa profunda en la cabeza del seno Aysén en las dos etapas del crucero Cimar Fiordo 4, donde se apreciaron valores menores a 3,1 ml/L y pH inferiores a 7,5 (Figs. 3a, 3b, 5c, 8a, 8b y 10c), situación que también fue observada en los cruceros Hudson, Cimar Fiordo 1 y Aysén I y II (Silva *et al.*, 1995; Calvete, 1997; Silva *et al.*, 1998); Sievers y Prado, 1994). El valor más bajo en la presente oportunidad alcanzó durante el crucero de verano (aproximadamente 2,0 ml/L y pH 7,35). Una explicación de las bajas concentraciones en las variables encontradas para la zona es el alto aporte de materia orgánica, la cual al hundirse y descomponerse consume oxígeno disuelto y libera CO<sub>2</sub>, generando los mínimos observados. Por otro lado se tiene que en la cabeza de este fiordo existe una baja ventilación, producto de la fuerte estratificación de densidad, que a su vez dificulta el transporte vertical del oxígeno disuelto desde la capa superficial hacia la capa profunda. Estas condiciones son gatillantes para que en esta zona el seno Aysén tenga una baja capacidad de autorregulación frente a un aumento en las descargas de materia orgánica, la cual incrementaría la demanda de oxígeno disuelto disponible (Sievers y Prado, 1994).

Otro punto importante en la distribución de oxígeno disuelto y el pH son los bajos valores de estas variables (< 3,5 ml/L y < 7,6) presente a profundidades mayores a 100 m en la capa profunda de la boca del Guafo y canal Moraleda. La presencia de estas bajas concentraciones se explican en base a la existencia de procesos de descomposición de materia orgánica proveniente de la capa superficial y al efecto del ingreso de aguas ácidas y poco oxigenadas desde la zona oceánica (Figs. 3a, 3b, 8a y 8b). Esta situación también fue observada en los cruceros Hudson (sólo oxígeno disuelto) y Cimar Fiordo 1 (Silva *et al.*, 1995 y 1997).

Al igual que lo observado para las restantes variables, otra de las características notables de la zona de estudio fueron las diferencias en oxígeno disuelto y pH entre la cuenca situada al norte de Meninea y la cuenca ubicada al sur. Mientras la zona

septentrional de la cuenca sur fue relativamente bien oxigenada (4,1 a 5,5 ml/L) y con pH medianos ( $\approx 7,7$ ), la cuenca norte fue pobre en oxígeno disuelto ( $< 3,5$  ml/L) y más ácida ( $< 7,6$ ) (Figs. 8a, 8b y 10c). Esta característica es un rasgo permanente del área ya que también ha sido observado en los cruceros Hudson (sólo oxígeno disuelto) y Cimar Fiordo 1 (Silva *et al.*, 1995 y 1997).

#### 4.4.- Compuestos micronutrientes

Los micronutrientes en la capa superficial suelen ser bajas por el consumo por parte del fitoplancton que vive en ella. En el caso de los estuarios chilenos se añade el efecto de la dilución con aguas oligotróficas de los ríos de la zona (del orden de  $0,04 \mu\text{M}$  para fosfato  $0,14 \mu\text{M}$  para nitrato). Producto de lo anterior, la distribución vertical de micronutrientes (nitrato y fosfato) se presentó, en general, una estructura de dos capas: una superior de baja concentración de nutrientes y de unos 25 a 100 m de espesor y otra más profunda, de mayor concentración de nutrientes, que llega hasta el fondo.

La capa superficial presentó concentraciones muy variables en toda la zona de estudio durante ambos cruceros, ya que en ella la concentración disminuyó rápidamente en profundidad constituyendo una nutriclina. Al comparar las concentraciones de la capa superior de estos dos cruceros, es posible observar que la etapa 1 presentó concentraciones más bajas que la etapa 2 (nitrato  $0,2$  a  $6,5 \mu\text{M}$  versus  $0,3$  a  $17,2 \mu\text{M}$  y fosfato  $0,2$  a  $1 \mu\text{M}$  versus  $0,2$  a  $1,6 \mu\text{M}$ ). La explicación de estas diferencias pareciera estar en la mayor proporción de agua dulce en la mezcla que se presentó en la primera etapa, lo que se infiere de los menores valores de salinidad de este crucero. Por el contrario, durante la etapa 2, se observaron mayores salinidades, lo que implica mayor proporción de agua oceánica y por lo tanto de nutrientes.

Si se comparan estos resultados con los de Cimar Fiordo 1 (Silva *et al.*, 1997), se observa que en ese crucero la distribución de salinidad y nutrientes fue similar a la fase 1 de Cimar Fiordo 4, lo que posiblemente se debe a que ambos fueron realizados en la misma época del año.

Bajo la superficie los micronutrientes fosfato y nitrato aumentaron rápidamente con la profundidad, siendo en algunos casos un orden de magnitud superior a los presentes en de la capa superficial, lo que dio origen a la nutriclina. La capa profunda bajo los 150 m de la zona boca del Guafo – canal Moraleda, hasta el norte de Meninea, se presentó cuasi homogénea y con los mayores valores del área (fosfato  $> 2,0 \mu\text{M}$  y nitrato  $> 24 \mu\text{M}$ ) (Figs. 4a, 4b, 9a y 9b). La presencia de estas altas concentraciones se explican en base a la existencia de procesos de descomposición de materia orgánica proveniente de la capa superficial y al efecto del ingreso de aguas ricas en nutrientes desde la zona oceánica. Esta situación también fue observada en el crucero Cimar Fiordo 1 (Silva *et al.*, 1997).

Al igual que en el oxígeno disuelto y pH, una característica notable en la distribución de los nutrientes es la presencia en ambas etapas del crucero Cimar Fiordo 4, de altas concentraciones en la capa profunda en la cabeza del seno Aysén, lo cual también fue observado en el crucero Cimar Fiordo 1, donde se apreciaron valores mayores de 1,8  $\mu\text{M}$  en fosfato y mayores de 20  $\mu\text{M}$  en nitrato. Una explicación de las altas concentraciones en estas variables, al igual que en el caso del oxígeno disuelto, es el alto aporte de materia orgánica, la cual al hundirse y descomponerse consumen oxígeno disuelto y liberada nutrientes, generando los máximos observados.

De manera similar que en la salinidad, oxígeno disuelto y pH, otra de las características notables de la zona de estudio, fueron las diferencias en las concentraciones de nutrientes entre la cuenca al norte de Meninea y la cuenca sur. Mientras la zona septentrional de la cuenca sur tuvo concentraciones de nutrientes relativamente homogéneas (fosfato  $\approx$  1,6  $\mu\text{M}$  y nitrato  $\approx$  16  $\mu\text{M}$ ), la cuenca norte fue mucho más heterogénea y rica en ellos (fosfato  $>$  1,8  $\mu\text{M}$  y nitrato  $>$  24  $\mu\text{M}$ ), (Figs. 6a, 6b, 9a y 9b). Esta característica es un rasgo permanente del área ya que también ha sido observado en el Cimar Fiordo 1, (Silva *et al.*, 1997).

#### 4.5.- Masas de agua

En la zona austral de Chile, frente a la isla de Chiloé y al archipiélagos de Chonos, se presentan tres masas de agua en los primeros 800 m de profundidad, las que de acuerdo a Silva y Neshyba (1979-1980), corresponden al agua superficial Subantártica (ASAA), remanentes del agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) y el agua Intermedia Antártica (AIAA) (Fig. 12). En el caso de la estación oceánica de ambas etapas del crucero Cimar fiordo 4 (Est. 1), que por su ubicación geográfica tuvo sólo 200 m de profundidad, el análisis del diagramas T-S permitió definir la presencia del ASAA en los primeros 150 m y remanentes del AESS entre los 150 y el fondo (Fig. 12).

El ASAA se ubica en la capa superficial en la zona sur, extendiéndose hasta alrededor de los 150 m y de acuerdo a los datos del Atlas Oceanográfico de Chile (Rojas y Silva, 1996), en la capa superficial frente a la zona de Chiloe se caracteriza por temperaturas moderadas (9°C a 14°C), salinidades relativamente bajas (33,0 a 34,4 psu), y alto contenido de oxígeno disuelto (6 a 7 ml/L). El AESS, que adquiere sus características frente al Perú, es transportada hacia el sur hasta la altura del golfo Penas ( $\approx$  48°S) por la corriente Subsuperficial Chile – Perú (Silva y Neshyba, 1979). Frente a Chiloé esta masa aún puede ser identificada, entre los 150 y 200 m, por remanentes de su máximo en la salinidad ( $\approx$  33,9 – 34,2 psu) y de su mínimo en el contenido de oxígeno disuelto ( $\approx$  2,5 a 4 ml/L) (Fedele, 1993; Silva y Neshyba 1979 - 1980; Silva *et al.* 1995). El AIAA, que es generada en la zona ubicada al norte del Frente Polar, localizada frente a Chiloé entre los 300 y 1000 m de profundidad, caracterizándose en esta zona sur por un mínimo relativo de salinidad (Silva y Neshyba, 1979 - 1980).

Desde el punto de vista de la circulación oceánica general, la zona de estudio corresponde a aquella, donde el extremo norte de la corriente Circumpolar Antártica (o West Wind Drift), alcanza las costas de América chocando contra el continente, y dividiéndose en dos ramas. Una de las ramas se desvía hacia el norte dando origen a la corriente de Humboldt y la otra se desvía hacia el sur generando la corriente del Cabo de Hornos (Silva y Neshyba, 1977). Debido a lo desmembrado de la costa, de la dirección general sudeste de la corriente circumpolar y de los vientos predominantes del noroeste, parte del ASAA, ubicada en la capa superficial y de los remanentes del AESS, ubicados en la capa subsuperficial, también penetran hacia los canales y mares interiores de la zona. En la medida que el ASAA se introduce por los canales, ella se va mezclando, en la capa superficial, con cantidades variables de agua dulce (AD), que a su vez ingresa a los canales producto de la abundante pluviosidad de la zona, del aporte fluvial y del derretimiento de los glaciares que existen en la zona, generándose un importante sistema estuarino (Silva *et al.*, 1998).

Para el análisis de la intrusión de las masas de agua hacia el interior de los canales y su grado de mezcla con AD, al igual que lo hizo Silva *et al.* (1995; 1998), se usó un método de seguimiento del “desplazamiento” de los respectivos T-S de cada estación de acuerdo a la posición del T-S de la estación oceánica en el triángulo de mezcla respectivo. Como el ASAA es una masa de agua de la capa superficial, su temperatura exhibe un ciclo anual producto de los cambios de radiación solar, por lo que fue necesario definir dos pares T-S tipo para ella, uno para la época de invierno tardío o primavera temprana y otro para la época estival. Basándose en los datos mensuales de temperatura y salinidad del Atlas Oceanográfico de Chile (Rojas y Silva, 1996), se escogió, para la zona frente a la boca del Guafo, el par T-S 10,0°C y 33,0 psu correspondiente a septiembre - octubre, y el par T-S 14,0°C y 33,0 psu para marzo, que corresponden a los meses en que se realizaron los cruceros. La zona frente a la boca del Guafo, corresponde a aquella donde se estima que se encuentra el ASAA original que penetra hacia el interior de los canales y por lo tanto el agua que participará en la mezcla. Respecto a los pares T-S tipos del AESS y AIAA, que corresponden a aguas más profundas que el ASAA no son afectados por los cambios anuales de la radiación solar, por ende se utilizaron los pares propuestos por Silva y Konow (1975) y que corresponden a: AESS = 12,5 °C y 34,9 psu; AIAA = 3 °C y 34,0 psu.

La selección de los valores T-S tipos de AD es más complicada ya que si bien el AD aportada por los ríos tiene una salinidad prácticamente igual a 0 psu (ó 0 g/kg), su temperatura depende principalmente de la ubicación geográfica, de la fuente de agua que genera el río (*i.e.* precipitación líquida o sólida, deshielo de glaciares, hielos de ventisqueros) y período del año (verano, invierno). De aquí que las diversas fuentes de AD no necesariamente deben tener la misma temperatura en una misma época y zona. Por ejemplo el seno Aysén tiene una hoya hidrográfica con tributarios asociados principalmente a aportes meteóricos (lluvia y nieve), mientras que el golfo Elefantes además de los aportes meteóricos, tiene aportes glaciares y ventisqueros asociados al Campo de Hielos Norte, de allí que es posible esperar un AD más fría en este último.

Es decir que en la medida que el ASAA ingresa a la zona de los canales, comienza a producirse una mezcla creciente con AD, en distintas proporciones, según la distancia que se encuentre de las fuentes de aguas tipo, siendo esta mezcla más intensa en la capa superior que en la profunda. En el caso del AEES, ésta se desplaza hacia el interior de los canales cerca del fondo, como “agua profunda” (> 150 m), hasta la constricción de Meninea, la cual debido a su baja profundidad (entre 50 – 60 m), actúa como una verdadera barrera impidiendo el paso de las aguas con características AEES.

Al analizar la secuencia de gráficos T-S y los respectivos triángulos de mezcla desde la zona oceánica hasta la cabeza de los canales interiores, en ambas etapas del crucero Cimar Fiordo 4 (Figs. 14, 15, 16 y 17), se puede indicar que para las estaciones de la boca del Guafo (Est. 1 a 4), la mayor parte del diagrama T-S se ubicó dentro del triángulo ASAA – AEES – AIAA, debido a que esta agua tuvo muy poca influencia del AD de los canales. En cuanto al AIAA esta no puede penetrar al interior de los canales por encontrarse por debajo del umbral de la profundidad máxima de la Boca del Guafo ( $\approx 180$  m). A medida que las estaciones se fueron ubicando hacia el interior del canal Moraleda (Est. 5 a la 12), se observó que el diagrama T-S fue “saliendo” progresivamente del triángulo de mezcla hasta que en la estación 13, a la altura de la constricción de Meninea, se ubicó totalmente fuera de él. Este “desplazamiento” del diagrama T-S se debe a un aumento progresivo de la mezcla con AD proveniente de canales interiores y desde la altura de la isla Meninea, hacia el sur dejan de participar en el triángulo de mezcla, distanciándose cada vez más de éste hasta alcanzar una separación máxima en la estación 27 en el estero Elefantes y 21 en seno Aysén (Figs. 14, 15, 16 y 17).

Para corroborar lo anterior se prepararon las gráficas de algunas estaciones de los cruceros Hudson, Cimar fiordo 1 y Aysén 1 y 2, concordantes a las estaciones de las dos etapas del crucero Cimar fiordo 4, en la zona oceánica, en la entrada del canal Moraleda y en la boca del seno Aysén, comprobándose que en estas zonas se siguió un patrón similar al anterior, en donde también se observó que el diagrama T-S fue “saliendo” progresivamente del triángulo de mezcla (Figs. 14, 15, 16 y 17).

El que los diagramas T-S de las estaciones al sur de Meninea no estén incluidos en el triángulo de mezcla es producto de que el agua con características ecuatoriales subsuperficiales (AEES), que es más profunda que el ASAA, es retenida por las bajas profundidades de la constricción ( $\approx 50$ -60 m). Producto de lo anterior, el agua que logra pasar a la cuenca al sur de Meninea, es sólo de características subantárticas, por lo que de allí en adelante el T-S es sólo el resultado de una mezcla lineal entre el ASAA y el AD (Figs. 14, 15, 16 y 17).

Producto del que el agua de los 150 m superiores en el interior de los canales es principalmente de origen subantártico mezclada con cantidades variables de AD, Silva *et al* (1998) propusieron utilizar el término agua Subantártica Modificada (ASAAM), para identificar este tipo de agua subantártica. Propusieron además, que las aguas de la capa superficial con salinidades mayores a 33,0 psu sean consideradas como ASAA y aguas

entre 33,0 y 32,0 psu como ASAAM, mientras que las aguas menores a 32,0 psu serían consideradas como estuarinas, las que a su vez separaron en tres rangos: Estuarina Salada (21 a 32 psu), Estuarina Salobre (11 a 21 psu) y Estuarina Dulce (1 a 11 psu). El AD serían las aguas menores de 1 psu.

La retención del agua del AESS, queda claramente indicado por el hecho que las salinidades relativamente altas de esta agua en la zona ( $> 33,9$  psu), no penetran hacia la cuenca sur, ni tampoco lo hacen las bajas concentraciones de oxígeno disuelto ( $< 3,5$  ml/L). Ambos valores si bien alejados de los valores originales del AESS (34,9 psu y  $< 0,25$  ml/L) aún permiten detectar remanentes de esta masa de agua en esta zona austral.

Si se analiza cuidadosamente los diagramas T-S de las estaciones al sur de Meninea, tanto hacia la cabeza del Aysén, como hacia el golfo Elefantes, se puede observar que éstos muestran una tendencia que permite intentar inferir la temperatura del AD que está involucrada en la mezcla. Si se proyectan los valores T-S superficiales de las estaciones al sur de Meninea, hasta interceptar en eje de la salinidades en 0 psu (AD), se obtendrían las temperaturas tipo correspondientes para AD de las respectivas secciones y las cuales serían: Cimar Fiordo 4-1 (invierno) para seno Aysén  $\approx 11^{\circ}\text{C}$ ; para estero Elefantes  $\approx 7^{\circ}\text{C}$ ; Cimar Fiordo 4-2 (verano) para seno Aysén  $\approx 15^{\circ}\text{C}$ ; para estero Elefantes  $\approx 8^{\circ}\text{C}$ . Silva *et al.*, (1998), calcularon con el mismo procedimiento, una temperatura de  $11^{\circ}\text{C}$  para el AD del Aysén. Esto demuestra las variadas posibilidades del valor de temperatura que tiene el T-S del AD según se discutió anteriormente.

Este esquema general en que ocurre la mezcla de las masas de agua fue también observada por Silva *et al.* (1995 y 1998) para estos mismos canales, en los cruceros Husdon 70 y Cimar Fiordo 1, por lo que se estima que esto puede ser considerado una característica permanente del área, ya que se ha repetido de manera similar en cuatro cruceros realizados en distintos años y estaciones climáticas.

Si se analiza la distribución superficial a lo largo de la sección boca del Guafo hasta la cabeza de seno Aysén o del golfo Elefantes, en base a un gráfico de salinidad superficial versus la distancia (Fig. 16), se observa que, en general, en ambos cruceros se presentó un “plateau” en el tramo inicial que incluye las estaciones más oceánicas (*i.e.* Est. 1 a 4), con valores del orden de 32,5 y 33,2 psu respectivamente. Esto implicaría que esta zona, sólo en verano estuvo cubierta por ASAA, mientras que en invierno, al igual que en Cimar Fiordo 1, estuvo cubierta por ASAAM. Continuando hacia el sur de la sección, se aprecia un primer cambio en la pendiente entre las estaciones 4 y 5, el que fue claro en el crucero de invierno, no ocurriendo lo mismo con el de crucero de verano, debido a una situación puntual de bajos valores de salinidad en la estación 6, lo que podría ser ocasional. Este cambio en la pendiente se puede interpretar como la presencia de un frente salino débil, el cual también fue observado en Cimar Fiordo 1, pero con mayor intensidad (Silva *et al.*, 1998). Este primer frente salino es producto de un aumento en la proporción de AD en el progresivo proceso de mezcla del ASAA con AD y dadas las salinidades menores de 32 psu

que están involucradas más al sur, se puede decir que corresponde al frente salino que separa ASAAM de las aguas estuarinas.

En la medida que se sigue hacia el sur el gradiente descendente se mantiene hasta la entrada del seno Aysén en el crucero de verano (Est. 15) o hasta el primer tercio del seno en el crucero de invierno (Est. 17), desde donde se aprecia un cambio muy fuerte generándose un frente salino intenso (1,02 psu/m.n. para Cimar Fiordo 4-1 y 0,71 psu/m.n. para Cimar Fiordo 4-2). La mayor o menor intensidad de este frente y su ubicación depende, en gran medida, de la intensidad del aporte de AD. Sin embargo, la fase de la marea puede ser otro elemento importante en su ubicación, ya que si el muestreo se realiza en baja marea, éste estará más hacia la boca que si el muestreo se realiza en marea alta.

Las aguas al sur del primer frente (extremo norte del canal Moraleda) y hasta el estación 18 (seno Aysén) en el crucero de invierno o la estación 15 en el de verano, corresponden a aguas estuarinas saladas, lo que en general coincide con la ubicación del segundo frente salino más intenso. Las aguas situadas desde estas estaciones hasta la cabeza del seno Aysén corresponden a aguas estuarinas salobres, observándose sólo en el crucero de verano aguas estuarinas dulces en la zona de la cabeza (Est. 21, con valores de 9 psu a 0 m). En el caso de Cimar Fiordo 1, en este mismo seno se observaron salinidades más bajas desde la mitad de su extensión hacia su cabeza, las que llegaron a ser incluso inferiores a 1 psu (AD) en las estaciones del fondo del saco (ver Silva *et al*, 1998).

Respecto a las características físicas y químicas de las masas de agua, el ASAA se ubicó en los primeros 125 m, profundidad similar a la observada durante los cruceros Hudson y Cimar Fiordo 1, caracterizándose por temperaturas relativamente altas ( $\approx 9$  a  $14^{\circ}\text{C}$ ), altos valores de oxígeno disuelto ( $\approx 4$  a  $8$  ml/l) y ligeramente básico ( $\approx 7,7$  a  $8,0$ ), y con bajos valores de salinidad ( $\approx 33,0$  a  $33,8$  psu) y con contenido variables en nutrientes ( $\text{PO}_4 \approx 0,5$  a  $1,9$   $\mu\text{M}$ ;  $\text{NO}_3 \approx 0,3$  a  $22$   $\mu\text{M}$ ). Las variaciones anteriores son consecuencia primordial de la ubicación superficial de esta masa de agua que determinan que la concentración de oxígeno disuelto, el pH del agua, y la concentración de nutrientes, se vean afectadas por procesos fotosintéticos, lo cual aumenta el oxígeno disuelto y pH y disminuye los nutrientes. Por la misma razón de ubicación los parámetros de tipo conservativo se encuentran afectados a variaciones anuales de la radiación solar, alterando la temperatura.

Bajo los 150 m y hasta aproximadamente 300 m de profundidad en las estaciones oceánicas (Est 1 de ambas etapas del crucero Cimar Fiordo 4), hasta la constricción de Meninea (parte norte del canal Moraleda), se observó la presencia del AESS, al igual que en los cruceros Hudson y Cimar Fiordo 1. La presencia de esta agua en el interior del Moraleda hace que la parte profunda de éste sea más salino ( $> 33,9$  psu), poco oxigenado ( $< 4$  ml/L), ácido ( $< 7,6$ ) y rico en nutrientes ( $\text{PO}_4 > 2$   $\mu\text{M}$  y  $\text{NO}_3 > 24$   $\mu\text{M}$ ). Esta masa de agua, al no estar en contacto con la superficie, no está afectada por cambios estacionales, por lo que durante su desplazamiento, sus parámetros conservativos sólo van siendo modificados por mezcla con las aguas más frías y menos salinas del ASAA que se encuentra sobre ella. En el caso de los parámetros no conservativos, estos también van

siendo modificados por mezcla con ASAA más oxigenadas y menos ricas en nutrientes y por disminución de su oxígeno disuelto y aumento de sus nutrientes producto de la descomposición de la materia orgánica que recibe desde la capa superficial.

Producto del análisis T-S y de las características químicas (oxígeno disuelto, pH y nutrientes) de las masas de agua observado en ambas etapas de Cimar Fiordo 4, y teniendo en cuenta que estas distribuciones actúan como trazadores de la circulación general, es posible indicar que en la zona, las aguas oceánicas (ASAA y AESS) penetran hacia el interior de los canales. En el caso del AD, que ingresa a los canales principalmente desde los ríos y del deshielo de glaciares y ventisqueros ubicados a la cabeza de los canales, sale hacia el exterior de ellos, mezclándose con ASAA y generando el agua estuarina.

Silva *et al.* (1995, 1998), mediante un análisis similar basado en los datos de los cruceros Hudson 70 y Cimar Fiordo 1, propusieron un modelo esquemático de circulación general para la zona. En éste, habría una delgada capa superficial (20-30m), de agua de características estuarinas con baja salinidad, pobre en fosfato y nitrato, pero rica en silicato, que fluye hacia el mar. Bajo la capa superficial habría una capa intermedia (30 – 150 m) en que el ASAA ingresa desde la zona oceánica hacia el interior del Moraleda por la boca del Guafo, mezclándose en su porción superior con AD, disminuyendo paulatinamente su salinidad para generar progresivamente cantidades variables de ASAAM y de agua estuarina. Cuando el agua estuarina-ASAAM-ASAA llega a la constricción de Meninea, la porción de la columna de agua con una profundidad mayor de 60 m queda retenida al norte de ella, mientras que la porción entre los 30- 60 m logra pasar al sur hundiéndose en la cuenca al sur de Meninea llenándola en su porción inferior con agua de característica estuarina salada ya que las salinidades fluctuaron entre 30 y 32 psu.

El modelo anterior también propone que entre los 150 m y el fondo, el AESS también penetra desde la zona oceánica hacia el interior del Moraleda, por la boca del Guafo. Al llegar a la constricción de Meninea esta agua no puede pasar a la cuenca sur, quedando detenida aquí por las características topográficas de la zona, de aquí que las altas salinidades y nutrientes y los bajos pH y oxígenos disueltos, no pasan más al sur de la estación 12 (Figs. 14 y 15).

Los resultados de Cimar Fiordo 4, son concordantes con el modelo de Silva *et al.* (1998), mostrando distribuciones de las variables físicas y químicas similares, con diferencias sólo en la intensidad con que ellas se distribuyeron en cada uno de los cuatro cruceros. Este modelo permite explicar algunas de las diferencias observadas entre las cuencas sur y norte de Meninea y sus fluctuaciones temporales. Basados en este modelo Silva *et al.* (1998), propusieron una explicación para diferencias notables de los valores de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto entre los cruceros de verano (Hudson 70, Aysén 2) y los cruceros de invierno (Aysén 1 y Cimar Fiordo 1), observadas en la zona inmediatamente al sur de la constricción de Meninea (i.e. est. 14 a 16). Ellos indicaron que la región septentrional de la cuenca sur, estaría sujeta a cambios de sus condiciones oceanográficas cada seis meses, producto del hundimiento del agua estuarina salada en distintos períodos del año (invierno versus verano). Esta proposición se ve, en cierta

medida, confirmado por los resultados de Cimar Fiordo 4-1 (invierno) y Cimar Fiordo 4-2 (verano).

#### **4.6.- Balance Biogeoquímico en el seno Aysén.**

La distribución espacial y variación temporal de los parámetros físicos y químicos indicados anteriormente implican una serie de procesos en el interior de los canales que son importantes de identificar, a fin de entender los cambios biogeoquímicos que ocurren en ellos. Una manera simple de hacerlo, es la utilización de modelos de balance de materia en los cuales el sistema es analizado en base a una aproximación de compartimentos o cajas, donde se evalúan de manera general los procesos de interés que allí ocurren y las tasas de intercambio entre los diferentes compartimentos.

Mediante los modelos de balances, se quiere responder rápidamente y en forma general a ciertas problemáticas claves que se requieren para entender el funcionamiento del sistema en cuestión como, por ejemplo:

- ¿Cuán rápido es el flujo de agua que se mueve a través del sistema de interés?,
- ¿Cuán rápido es el flujo de los elementos nutrientes carbón, nitrógeno, y fósforo respecto al flujo del agua?,
- ¿Qué se puede deducir sobre el funcionamiento del sistema en base a posibles discrepancias entre los balances del flujo de agua y del flujo de nutrientes?.

Estos modelos de caja son más apropiados para cuerpos costeros conectados al océano donde existan gradientes de sal que permitan estimar el flujo de ella. La tasa de intercambio del agua entre el sistema de interés y otros sistemas adyacentes puede ser estimado por varios procedimientos, siendo el más simple la construcción de los balances combinados de agua y de sal para esas zonas. En la mayoría de estas regiones el agua fluye desde la tierra hacia el sistema a través de los ríos, ganando agua mediante precipitación y perdiendo por evaporación. Si se asume que el volumen remanente del sistema es constante (en base a un promedio de mediano plazo, y no considerando variaciones periódicas de corto plazo como las mareas), el volumen neto que sale del sistema es balanceado por el volumen que entra. Además de este balance de volumen, es posible establecer también un balance de sal en base a los ingresos y salidas en conjunto con el agua.

El balance combinado de agua y de sal no proporciona una comprensión dinámica, ni cuantitativa de los procesos que controlan las características del intercambio de agua en un sistema determinado, sino que de una manera rápida y simple permite a menudo describir, en forma general, el intercambio entre dos o más sistemas o cuerpos de agua.

Los balances de agua y de sal pueden ser realizados solamente si existe una diferencia de salinidad entre el sistema de interés y de las aguas adyacentes ( $> 1,0$  psu) y si la geometría del intercambio de agua con los sistemas adyacentes es relativamente simple. En los sistemas en que las diferencias de la salinidad con respecto a las aguas adyacentes no

sean considerables o que son geoméricamente más complejos, se pueden utilizar otros métodos alternativos para estimar el intercambio de agua como son los modelos matemáticos analíticos de dos o tres dimensiones.

La ventaja de los modelos de balance de caja, consiste en que ellos requieren de una cantidad relativamente pequeña de información y pueden ser resueltos en un período de tiempo relativamente corto. Los modelos matemáticos más complejos normalmente requieren de una gran cantidad de información, y una gran cantidad de tiempo para ser desarrollados por equipos de trabajo más grandes. De aquí que, cuando se requiere tener una visión rápida de los cambios que puedan ocurrir en un sistema, la aproximación con balances de cajas puede entregar información de primera instancia para interpretar el efecto que pueden producir cambios inducidos en algunos flujos biogeoquímicos en la zona costera.

Los sistemas estuarinos, debido a sus intensos gradientes de salinidad, son muy apropiados para aplicar estos modelos de balances. Sin embargo, producto de la complejidad geográfica que ellos puedan tener, suele ser conveniente dividirlos en unidades más pequeñas o subsistemas, como por ejemplo considerar el seno Aysén separado del resto de los otros canales de la cuenca al sur de la constricción de Meninea. También puede ser conveniente que un sistema sea dividido en dos o más sub-sistemas con más de una capa en profundidad. Es importante tener en cuenta que, cuanto mayor sea el grado de complejidad que haya en el intercambio del agua, menos satisfactorio serán los resultados de los modelos de balance de agua y sal para describir este intercambio. En algunos casos, un alto grado de complejidad puede llevar a la conclusión de la imperiosa necesidad de utilizar aproximaciones más complejas y de mayor requerimiento de información, como los son, por ejemplo, los modelos numéricos.

En base a las peculiares características geomorfológicas e hidrográficas del seno Aysén, y el extremo sur del canal Moraleda (Est. 14 y 15) éstos fueron considerados como una unidad desde la cabeza del Aysén hasta la constricción de Meninea (sistema total). Por otra parte, debido a la presencia de una haloclina centrada alrededor de los 25 m de profundidad, se dividió el sistema en dos capas, una superficial (< 25 m) y otra profunda (de 25 m al fondo).

Posteriormente, basado en la presencia del gradiente horizontal de las variables no conservativas (oxígeno disuelto, nitrato y fosfato), el sistema total fue dividido en dos sub-sistemas o cajas. El sub-sistema 1 abarca desde la cabeza del Aysén hasta la altura de las islas Cinco Hermanos, donde la profundidad disminuye notablemente pero sin constituir un umbral (Est 17 a 21). El sub-sistema 2 abarca desde la zona inmediatamente el oeste de las Cinco Hermanos hasta la constricción de Meninea, lo que incluye el extremo sur del canal Moraleda (Est. 14 a 16).

La frontera del sub-sistema 2 con el océano está dado por la constricción de Meninea, la que debido a sus bajas profundidades actúa como una barrera física al paso del agua profunda hacia este sistema. Producto de ello, se consideró que la capa profunda de la

zona de intercambio con el “océano” (representado en este caso por la porción central y norte del canal Moraleda, más la boca del Guafo), sólo abarca el trozo de la columna entre los 25 y 75 m. El resto de la columna “oceánica”, entre los 75 m y el fondo, no fluye hacia el Aysén. Producto del análisis anterior, el modelo a aplicar en el seno Aysén quedó constituido por un sistema de dos cajas y dos capas, el cual se presenta esquematizado en la figura 18.

#### 4.6.1.- Balance de agua y sal.

En los modelos de balance se puede idealizar el sistema, inicialmente, como una caja que recibe e intercambia agua y sales con el entorno, utilizando para ello las ecuaciones generales del balance de masa y la aplicación de las mismas según lo indicado por Gordon *et al.* (1996):

$$\frac{dM}{dt} = \sum \text{ingresos} - \sum \text{salidas} + \sum [\text{fuentes} - \text{sumideros}] \quad (1)$$

Donde “ $dM/dt$ ” representa el cambio de masa de un material en particular (agua, sal o nutrientes) en el sistema, respecto al tiempo. Si asumimos un balance, establecemos un sistema estacionario y conservativo, por ende  $dM/dt = 0$ , que también se hace extensible al cambio de volumen respecto al tiempo  $dV/dt = 0$ .

Una simplificación de la ecuación (1) sería:

$$0 = \sum \text{ingresos} - \sum \text{salidas} \quad (2)$$

En el caso del sistema costero, se consideran como los mayores aportes de agua fresca al sistema estuarino el ingreso desde los ríos ( $V_Q$ ) y la precipitación directa ( $V_P$ ). En cuanto al ingreso de agua subterránea ( $V_G$ ) y de otras fuentes no fluviales ( $V_O$ ), suelen ser consideradas de menor importancia (pero deben ser incluidas sí son significativas en cuanto a la fracción de aguas frescas que ingresen al sistema estuarino). La evaporación ( $V_E$ ), se encuentra entre las salidas de aguas frescas desde el sistema estuarino y es un término que cobra importancia, siempre y cuando sea al menos del mismo orden de magnitud que la precipitación. Como resultado del balance de los flujos de ingreso y de salida se puede definir un término denominado flujo residual “ $V_R$ ” (donde  $V_R = - (V_Q + V_P + V_O - V_E)$ ), el cual representa el ingreso o salida neta de agua del sistema estuarino (Fig. 19).

Las consideraciones anteriores también es posible utilizarlas tanto en modelo de caja con una capa como en modelos de más cajas y dos capas, los que pasan a constituir sistemas en series o sistemas interconectados. En el caso de un modelo de dos capas, se consideran dos flujos que dependen en gran medida de los aportes y salidas de agua, estos corresponden a  $V_{in}$  o volumen de ingreso de aguas hacia el sistema de interés desde el océano o de un sistema aledaño,  $V_{out}$  o volumen de salida desde el sistema de interés, que

no es más que la suma de los ingresos de aguas frescas y el ingreso de  $V_{in}$  y un término de mezcla vertical ( $V_z$ ), el cual intercambia agua y sales desde la capa profunda a la capa superficial del sistema estuarino. Por convención se le asignó signo positivo a los flujos que ingresan al sistema y negativo a flujos que salen del sistema.

Teniendo ahora todos los términos definidos, es posible volver a escribir la ecuación (3), para describir el balance de agua en el sistema estuarino (Fig. 20a):

$$0 = \sum (V_Q + V_p + V_G + V_0 + V_{in}) - \sum (V_E + V_{out}) \quad (3)$$

Una manera más simple de ver la ecuación (3) sería:

$$V_R = V_{in} - V_{out} \quad (4)$$

Esta ecuación describe el balance de agua para el sistema de interés, a partir de esta ecuación es posible determinar una segunda ecuación que describa el balance de sal. Para el balance de sal se asigna un valor promedio de salinidad para cada uno de los ingresos y salidas (input y output).

$$0 = V_{in} * S_{oce} - V_{out} * S_{sist} \quad (5)$$

En el balance de sal (Fig. 20b) los flujos se amplían debido a que existen salinidades que están en estrecha relación con los diferentes volúmenes antes mencionados, en cuanto a las salidas y entradas desde el sistema estuarino al sistema oceánico.

$$V_{in} = \frac{V_R S_{Sis\_sup}}{(S_{Oce\_prof} - S_{Sis\_sup})} \quad (6a)$$

$$V_{out} = -(V_{in} + V_R) \quad (6b)$$

$$V_z = \frac{V_{in} (S_{Oce\_prof} - S_{Sis\_prof})}{(S_{Sis\_prof} - S_{Sis\_sup})} \quad (6c)$$

Por otro lado con los resultados obtenidos del flujo de intercambio ( $V_{out}$ ) y el volumen del sistema ( $V_{sist}$ ), es posible estimar el tiempo de renovación del agua o tiempo de residencia ( $\tau$ ).

$$\tau = \frac{V_{Sist}}{V_{out}} \quad (7)$$

Para una mayor comprensión se preparó un esquema de flujo para un modelo de dos cajas y dos capas describiendo de manera conceptual los flujos implicados en éste (Fig. 19). Posteriormente las ecuaciones anteriores fueron insertadas en el modelo, lo cual quedó nuevamente esquematizado en la figura 20a para el balance de agua y en la figura 20b para el balance de sal. Una vez establecido el modelo se procedió a insertar los valores promedios para cada una de las variables requeridas por el modelo, a fin de efectuar el cálculo del balance de agua y sal, para finalmente estimar el tiempo de renovación del agua interior de los distintos sub-sistemas.

Sin embargo a pesar de las facilidades que presentan estos balances para describir un área, no siempre se logra obtener toda la información necesaria para efectuar los cálculos que estos requieren. Es por ello que frente a una falta de disponibilidad de información, para aplicar esta metodología de modelación, es necesario realizar algunas suposiciones para utilizar la información disponible o para aceptar la no inclusión en el modelo de información inexistente para un determinado lugar. En el caso del seno Aysén, se efectuaron las siguientes:

- $V_G$ , (volumen de aguas subterráneas) no se consideraron, ya que no fue posible medirlo. Por otra parte las características del terreno con fuertes pendientes y suelo rocoso, permite considerar que las infiltraciones son escasas y muy posiblemente despreciables relativo a otros términos como los ríos.
- $V_0$ , (volumen de aguas frescas no fluviales) se les consideró despreciable, debido a ausencia de fuentes de ingresos de aguas frescas diferentes a la de los ríos y la precipitación en la zona de Aysén.
- $V_E$ , (volumen de evaporación) se estimó en base a las cartas de evapotranspiración anual preparadas para la zona (Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de aguas, 1987). Debido a que el balance se estimará por separado en dos estaciones (verano e invierno), el valor de evapotranspiración anual fue dividido en dos. Para el período frío invernal se consideró un 40% del valor anual y para el período cálido estival se consideró un 60%.
- $V_Q$  (volumen de agua desde los ríos) se obtuvo en base a los registros históricos mensuales desde 1983 a 1996 para los caudales de los ríos Mañihuales, Simpson, Claro, y Cuervo. Como además de los ríos anteriores, existen otros afluentes menores de los cuales no se tiene información, a los valores anteriores se les adicionó arbitrariamente un 30% más para corregir dicha carencia. La serie de datos mensuales se dividió en dos períodos estacionales (verano e invierno).
- $V_P$  (Volumen de precipitación) se estimó basándose en registros históricos de pluviosidad mensual desde 1983-1996 para la zona de Puerto Aysén y de Puerto Chacabuco. La serie de datos mensuales se dividió en dos períodos estacionales (verano e invierno).

Para el balance de sal, también fue necesario establecer algunas consideraciones y suposiciones en cuanto a las salinidades promedio que ingresan o salen del sistema:

- $S_{Oce}$  que corresponde a un promedio ponderado de la salinidad del influjo de agua adyacente al sistema estuarino y que se separa en  $S_{Oce-out}$  (salinidad de la capa superior del océano) y  $S_{Oce-in}$  (salinidad de la capa profunda del océano)
- $S_{sis}$  que equivale a un promedio ponderado de la salinidad del sistema estuarino que al igual que en caso oceánico, se divide en  $S_{Sis-out}$  (salinidad de la capa superior del sistema estuarino) y  $S_{Sis-in}$  (salinidad de la capa profunda del sistema estuarino).
- $S_Q$  (salinidad de las aguas de río), se utilizó un valor de 0,12 psu (ó 0,12 g/kg), dada por bibliografía (Gordon *et al*, 1996).
- $S_P$  (salinidad de la precipitación),  $S_E$  (salinidad de la evaporación), se asumieron iguales a cero, por que  $S_P$  tiene un ingreso de sales despreciable, si es que lo tuviera y  $S_E$  por que no arrastra sales.
- $S_G$  (salinidad de agua subterráneas), se asumieron iguales a cero ya que no se dispuso de muestras para medirla. Por otra parte las características del terreno con fuertes pendientes y suelo rocoso, permite considerar que las infiltraciones son escasas por lo que se estima que su contribución sería despreciables relativo a otros términos como  $S_{Oce}$ .
- $S_o$  (salinidad de aguas provenientes de fuentes no fluviales), se consideró igual a cero debido a la ausencia de fuentes de ingresos de aguas frescas diferentes a la de los ríos

En base a los datos de la carta náutica 8290 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, se obtuvo la información geográfica que requiere el modelo como es el área y el volumen de los sub-sistemas escogidos. Las tablas 1 y 2, resumen los datos y los promedios obtenidos en base a mediciones o estimaciones y que fueron utilizados en el calculo del balance de agua, sal y tiempo de renovación de agua.

Tabla 1: Resumen de las variables medidas y estimadas en los sistemas.

<b>VARIABLES MEDIDAS O ESTIMADAS PARA LOS SISTEMAS</b>	<b>VALOR</b>
Area del sistema total (*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	470
Area del sistema 1 (*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	329
Area del sistema 2 (*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	141
Profundidad promedio (m)	142
Volumen del sistema total (*10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	67
Volumen del sistema 1 (*10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	47
Volumen del sistema 2 (*10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	20
Precipitación promedio en invierno en sistema 1 (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	2,8
Precipitación promedio en invierno en sistema 2 (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	1,2
Precipitación promedio en verano en sistema 1 (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	2,1
Precipitación promedio en verano en sistema 2 (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	0,9
Evapotranspiración promedio en invierno en sistema 1 (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	0,21
Evapotranspiración promedio en invierno en sistema 2 (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	0,09
Evapotranspiración promedio en verano en sistema 1 (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	0,35
Evapotranspiración promedio en verano en sistema 2 (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	0,15
Caudal promedio de los ríos en invierno (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	10
Caudal promedio de los ríos en verano (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d)	9

Tabla 2: Resumen de los valores promedios de salinidad utilizados en los respectivos modelos para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4.

<b>Variable medida</b>	<b>CRUCEROS OCEANOGRÁFICOS</b>			
	<b>Cimar Fiordo 4-1 (invierno) Oct. 98</b>		<b>Cimar Fiordo 4-2 (verano) Mar. 99</b>	
	<b>S-sistema 1</b>	<b>S-sistema 2</b>	<b>S-sistema 1</b>	<b>S-sistema 2</b>
<b>Salinidad (psu)</b>				
S <sub>Oce sup</sub>	31,5	31,5	32,4	32,4
S <sub>Oce prof</sub>	33,2	33,2	33,3	33,3
S <sub>Sist sup</sub>	26,5	29,2	25,1	29,3
S <sub>Sist prof</sub>	31,2	31,3	31,6	31,7
S <sub>Q</sub>	0,1	---	0,1	---

Los promedios calculados para cada uno de los cruceros fueron ingresados en el modelo, obteniéndose los resultados que se esquematizan en las figuras (21a y 21b) y cuyos resultados más relevantes se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de los flujos medios estimados para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4.

Variables estimadas	CRUCEROS OCEANOGRÁFICOS			
	Cimar Fiordo 4-1 (invierno) Oct. 98		Cimar Fiordo 4-2 (verano) Mar 99	
Flujos ( $10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ )	S-sistema 1	S-sistema 2	S-sistema 1	S-sistema 2
$V_{\text{Ing}}$	72	102	42	88
$V_Z$	2	92	1	59
$V_{\text{Out}}$	85	116	53	100
$V_{\text{Up}}$	72	30	42	46
Tiempo de renovación				
$\tau$ (días)	550	173	881	200
$\tau$ (años)	1,5	0,5	2,4	0,5

Los resultados anteriores indican que la tasa de renovación de las aguas del sub-sistema 2 (cuenca de la boca del seno Aysén) ocurre en promedio en un período de aproximadamente 6 meses, siendo mucho más rápida que la tasa de renovación de las aguas del sub-sistema 1 (cuenca de la cabeza del seno Aysén), el cual tarda en promedio alrededor de 2 años en renovarse. Por otro parte, también existen diferencias en las tasas de renovación de las aguas en el sub-sistema 1, según la época del año en que se efectuaron los muestreos. Es así como en el muestreo de invierno, tasa de la renovación de las aguas es más rápida que la tasa de renovación de estas mismas en el muestreo de verano (1,5 versus 2,4 años). Esto puede ser interpretado como el resultado de un mayor aporte de agua fresca provenientes de las lluvias imperantes en la zona, las que a su vez inciden directamente en el aumento del caudal de los ríos que desaguan en el seno Aysén.

De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar con un cierto grado de confianza que las aguas de la cuenca del sub-sistema 2, ubicado inmediatamente al sur de la constricción de Meninea, tendría una renovación de sus características oceanográficas cada seis meses. Esta “rápida” tasa de renovación de las aguas estimada por el modelo aplicado vendría a corroborar una proposición anterior de Silva *et al* (1998) que indica que esta zona presenta cambios en sus condiciones oceanográficas cada seis meses, propuesta realizada sólo en base al análisis de los cambios inter estacionales observados en la distribución de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto de los cruceros Hudson, Cimar Fiordo 1, Aysén 1 y Aysén 2.

Por otra parte, el hundimiento hasta el fondo de las aguas del nivel de 30-50 m, al sur de la constricción de Meninea, junto con la rápida tasa de renovación observada, permiten explicar la buena ventilación que presentó en todos los cruceros realizados en esta zona.

En el caso del sub-sistema 1, con una tasa de renovación promedio de dos años, permite explicar, en parte, la presencia de bajos valores de oxígeno disuelto en la zona profunda hacia la cabeza del Aysén. Estos bajos valores podrían ser explicado por: a) la materia orgánica ya sea planctónica o edáfica y que en los sistemas estuarinos suele ser abundante, caería desde la superficie consumiendo gran parte del oxígeno disuelto de la columna de agua; b) la fuerte pycnoclina presente en el sub-sistema impediría una ventilación por difusión desde las capas superficiales bien oxigenadas; y c) un comparativamente bajo movimiento neto de las aguas de este nivel, producto de la baja tasa de renovación del agua, no ventilaría con la suficiente rapidez la zona para mantener mayores niveles de oxígeno, como ocurre con el sub-sistema 1.

Para calcular el tiempo de renovación del sistema total, se dividió el volumen total del sistema por el flujo de salida del sub-sistema 2 (que a su vez incluye el flujo de salida del sub-sistema 1). El resultado fue de 18 meses ( 1,5 años) para el crucero de invierno y de 22 meses (1,8 años) para el crucero de verano. Los resultados anteriores son mayores que el tiempo de residencia de 12 meses estimado por Salinas y Hormazábal (1997) para toda la cuenca sur, la que además del seno Aysén, incluye otros dos fiordos (Cupquelán y Quitralco), tres canales (Costa, Elefantes y Errázuriz). Sin embargo, corrobora el orden de magnitud del tiempo de residencia estimado por ellos.

#### **4.6.2.- Balance de material disuelto no conservativo**

La presencia de gradientes horizontales en las variables no conservativas observadas en el seno Aysén permiten inferir que ellas no son distribuidas sólo por procesos advectivos (hidrografía), sino que también deberían estar afectadas por procesos biogeoquímicos que las alteran. Estos procesos biogeoquímicos se superponen a los hidrográficos, generando las diferencias observadas, por lo que la aplicación de un modelo de balance de masa puede permitir inferir, en general, que tipo de procesos podría estar ocurriendo en el interior del seno.

El modelo de balance para nutrientes se maneja básicamente como aquel del balance de sal, pero tomando en consideración que en este caso se trata de una variable no conservativa, por lo que lo más probable es que el sistema este en desbalance respecto a lo meramente hidrográfico. Producto de lo anterior el posible desbalance de nitrógeno y fósforo y la aplicación de algunos conceptos estequiométricos permiten inferir el estado del sistema respecto a estos nutrientes.

Como este balance se realiza en forma independiente para nitrógeno y fósforo para mayor simplicidad en las formulas se definió  $Y = \text{DIN}$  para nitrógeno inorgánico disuelto y  $\text{DIP}$  para fósforo inorgánico disuelto. De igual modo se define el desbalance de DIN como  $\Delta\text{DIN}$  y de DIP como  $\Delta\text{DIP}$ , donde:

$$\Delta Y = \sum \text{ingresos de } Y - \sum \text{salidas de } Y$$

Al igual que en el caso del balance de sal y agua, en el balance de nutrientes se consideran positivos los ingresos hacia el sub-sistema y negativos las salidas del sub-sistema.

Estas nuevas definiciones y ecuaciones fueron reemplazadas o insertadas en el modelo de dos cajas y dos capas para el balance de nutrientes, lo cual quedó nuevamente esquematizado en la figura 22. Una vez establecido este marco se debía proceder a ingresar los valores promedios para cada una de las variables requeridas, a fin de efectuar el cálculo del balance de nitrógeno y fósforo, para luego estimar el estado del sistema respecto a la producción o consumo de estos nutrientes.

Al igual que en el balance de agua y sal, para efectuar el balance de los elementos no conservativos, también fue necesario establecer algunas consideraciones y suposiciones en cuanto a los nutrientes promedio que ingresan o salen del sistema:

- $Y_{Oce}$  que corresponde a un promedio ponderado de los nutrientes del ingreso de agua adyacente al sistema estuarino y que se separa en  $Y_{Oce-out}$  (nutrientes de la capa superior del océano) y  $Y_{Oce-in}$  (nutrientes de la capa profunda del océano)
- $Y_{sis}$  que equivale a un promedio ponderado de los nutrientes del sistema estuarino que al igual que en caso oceánico, se divide en  $Y_{sis-out}$  (nutrientes de la capa superior del sistema estuarino) y  $Y_{sis-in}$  (nutriente de la capa profunda del sistema estuarino).
- $Y_Q$  (nutrientes de las aguas de río), este valor fue medido *in situ* (también se utilizaron promedios ponderados), en dos oportunidades (invierno y verano) en los ríos Mañihuales, Aysén, Cóndor y Cuervo, que son los que aportan mayoritariamente agua dulce al sistema estuarino. Con los valores individuales se obtuvo un valor promedio de ellos.
- $Y_P$  (nutrientes de la precipitación), para nitrógeno se usó el valor de  $2,0 \mu\text{M}$  de  $\text{N-NH}_4^+$ , medido en agua de lluvia sólo en la etapa de invierno del crucero Cimar Fiordo 4.
- $Y_E$  (nutrientes de la evaporación),  $Y_G$  (nutrientes del agua de fondo) y  $Y_o$  (nutrientes de aguas provenientes de otras fuentes) se asumen iguales a cero, por las mismas consideraciones anteriores para la salinidad.
- Los valores de DIN utilizados sólo corresponden a nitrato + nitrito. No se consideró la inclusión del amonio por no disponerse de datos simultáneos de esas variables. Sin embargo de acuerdo a los valores de amonio observados en la columna de agua del Aysén por Prado (2000), estos son, en general, relativamente pequeños ( $< 1 \mu\text{M}$  de N-

$\text{NH}_4^+$ ), por lo que no tienen un gran efecto en el balance si se les compara con los de nitrato.

La tabla 4, resume los valores promedios obtenidos en base a las mediciones de nutrientes de Cimar Fiordo y que fueron utilizados para el calculo del balance de nitrógeno ( $\Delta\text{DIN}$ ) y fósforo ( $\Delta\text{DIP}$ ) en los sub-sistemas y en el sistema total. Con estos valores y sus desviaciones respecto a la estequiometría de Redfield para N:P, se puede estimar si el sistema está en balance, denitrificando o fijando nitrógeno (Gordon *et al*, 1996).

Tabla 4: Resumen de los valores promedios de nutrientes utilizados en los respectivos modelos para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4.

Variables medidas	CRUCEROS OCEANOGRÁFICOS			
	Cimar Fiordo 4-1 (invierno) Oct 98		Cimar Fiordo 4-2 (verano) Mar 99	
Nutrientes ( $\text{mmol m}^{-3}$ )	S-sistema 1	S-sistema 2	S-sistema 1	S-sistema 2
<b>Nitrógeno</b>				
$\text{DIN}_{\text{Oceet sup}}$	7,7	7,7	11,7	11,7
$\text{DIN}_{\text{Oce prof}}$	17,6	17,6	19,5	19,5
$\text{DIN}_{\text{Sist sup}}$	13,1	9,8	8,6	11,7
$\text{DIN}_{\text{Sist prof}}$	18,9	15,8	18,6	16,4
$\text{DIN}_p$	2,0	2,0	2,0	2,0
$\text{DIN}_Q$	0,2	---	0,1	---
<b>Fósforo</b>				
$\text{DIP}_{\text{Oceet sup}}$	1,0	1,0	1,3	1,3
$\text{DIP}_{\text{Oce prof}}$	1,7	1,7	1,7	1,7
$\text{DIP}_{\text{Sist sup}}$	1,2	1,1	1,0	1,2
$\text{DIP}_{\text{Sist prof}}$	1,8	1,6	1,8	1,6
$\text{DIP}_Q$	0,1	---	0	---

Los promedios calculados para cada uno de los cruceros fueron ingresados en el modelo, obteniéndose los resultados que se esquematizan en las figuras (23a, 23b, 24a y 24b) y cuyos valores más relevantes se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5: Resumen de los flujos medios estimados para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4.

Variables estimadas	CRUCEROS OCEANOGRÁFICOS			
	Cimar Fiordo 4-1 (invierno) Oct. 98		Cimar Fiordo 4-2 (verano) Mar 99	
Fluctuación ( $10^6 \text{ mmol d}^{-1}$ )	S-sistema 1	S-sistema 2	S-sistema 1	S-sistema 2
<b>Capa superficial</b>				
ΔDIN	-268	-1005	-340	-319
ΔDIP	-30	-68	-24	-31
<b>Capa profunda</b>				
ΔDIN	+235	+369	+102	4
ΔDIP	+16	+36	+10	+15
<b>Total S-sistema</b>				
ΔDIN	-32	-636	-238	-315
ΔDIP	-14	-32	-14	-16

Los valores negativos de  $\Delta\text{DIN}$  y  $\Delta\text{DIP}$  de la capa superficial de ambos sub-sistemas indican que en ella se estaría consumiendo estos nutrientes mientras que los valores positivos de la capa profunda, indicarían que estos nutrientes estarían siendo liberados al medio. El balance neto de nitrógeno y fósforo de la columna para los dos sub-sistemas, indica que el seno Aysén sería un consumidor neto de nutrientes, ya sea nitrógeno o fósforo.

Al comparar estos valores con otros sistemas estuarinos tipo fiordos, se tuvo acceso a información del mar Báltico, el cual fue modelado en base a un conjunto de cinco cajas de dos capas cada una (Gordon *et al.*, 1996; Smith *et al.*, 1999). Para este modelo, que está afectada por grandes cargas de DIN y DIP antropogénico en esta zona, se observaron valores de  $\Delta\text{DIN}$  y  $\Delta\text{DIP}$  mucho mayores que los observados en el seno Aysén. A modo de ejemplo  $\Delta\text{DIN}$  en la caja superficial fluctuó entre  $-9.953 \cdot 10^6$  y  $-190.520 \cdot 10^6 \text{ mmol N d}^{-1}$ , para el  $\Delta\text{DIP}$  este fluctuó entre  $-288 \cdot 10^6$  y  $-5.030 \cdot 10^6 \text{ mmol P d}^{-1}$ , mientras que el  $\Delta\text{DIN}$  en la caja profunda fluctuó entre  $-1.556 \cdot 10^6$  y  $+1.550 \cdot 10^6 \text{ mmol N d}^{-1}$ , para el  $\Delta\text{DIP}$  este fluctuó entre  $+2,74 \cdot 10^6$  y  $+147 \cdot 10^6 \text{ mmol P d}^{-1}$ . Lo anterior implica que los valores de desbalance y en este caso de consumo de nutrientes en la zona del Aysén, son comparativamente bajos.

Con los valores de  $\Delta\text{DIN}$  y  $\Delta\text{DIP}$  y comparando sus tasas de producción o consumo con las proporciones estequiométricas de Redfield para el plancton, es posible estimar si ellas se dieron de acuerdo a lo esperado para los procesos de fotosíntesis o respiración aeróbica. Si ello fuera así y basado en que el fosfato no es oxidado a otras especies en los procesos respiratorios, es posible estimar si el  $\Delta\text{DIN}$  observado se desvió o no respecto a un

$\Delta\text{DIN}$  esperado (o teórico) base a su estimación en función del  $\Delta\text{DIP}$  observado y la proporción N:P = 16:1 de Redfield para plancton. Por lo tanto:

$$\Delta\text{DIN}_{\text{esp}} = \Delta\text{DIN}_{\text{obs}} * (N : P)_{\text{part}}$$

Si este  $\Delta\text{DIN}_{\text{esp}}$  es igual al  $\Delta\text{DIN}_{\text{obs}}$  ello permite inferir que el sistema esta en equilibrio y que los nutrientes producidos o consumidos lo están haciendo en la proporción planctónica de Redfield. Por el contrario si  $\Delta\text{DIN}_{\text{esp}}$  es mayor que el  $\Delta\text{DIN}_{\text{obs}}$  ello implica que habría una acumulación de nitrógeno producto de la fijación de éste por organismos especializados (*i.e.* bacterias, microalgas, etc.) y si  $\Delta\text{DIN}_{\text{esp}}$  es menor que el  $\Delta\text{DIN}_{\text{obs}}$  ello implica que habría un consumo de nitrógeno por algún proceso de denitrificación.

Los resultados de la aplicación de la conceptualización anterior a los datos de Cimar Fiordo 4 se presentan en la Tabla 5

Tabla 6: Fijación de nitrógeno versus denitrificación para cada una de las etapas del crucero Cimar Fiordo 4

Fijación de nitrógeno versus denitrificación	CRUCEROS OCEANOGRÁFICOS			
	Cimar Fiordo 4-1 (invierno) Oct. 98		Cimar Fiordo 4-2 (verano) Mar 99	
	S-sistema 1	S-sistema 2	S-sistema 1	S-sistema 2
<b>Capa superficial</b>				
*10 <sup>3</sup> mol N d <sup>-1</sup>	+213	+83	+44	+177
mmol N m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	+0,65	+0,59	+0,13	+1,26
Estado neto	Fijación de N	Fijación de N	Fijación de N	Fijación de N
<b>Capa profunda</b>				
*10 <sup>3</sup> mol N d <sup>-1</sup>	-21	-207	-58	-236
mmol N m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	-0,06	-1,47	-0,18	-1,67
Estado neto	Denitrificación	Denitrificación	Denitrificación	Denitrificación
<b>Total S-sistema</b>				
*10 <sup>3</sup> mol N d <sup>-1</sup>	+192	-124	-14	-59
mmol N m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	+0,59	-0,88	-0,04	-0,42
Estado neto	Fijación de N	Denitrificación	Denitrificación	Denitrificación

Los datos anteriores, en general, muestran que en la capa superficial de ambos sub-sistemas en cuestión, se presentó una condición de fijación de nitrógeno. Lo anterior ocurrió en los dos periodos muestreados, sin embargo esta fijación de nitrógeno fue mayor durante la primera etapa del crucero (invierno) que en la segunda etapa (verano).

La situación anterior implica, que en base al desbalance observado en la proporcionalidad de  $\Delta\text{DIN}$  y  $\Delta\text{DIP}$  respecto a la relación de Redfield, el sistema estaría ingresando nitrógeno en base a una producción nueva producto de la utilización de nitrógeno disuelto asimilado organismos especializados. Este nitrógeno fijado sería posteriormente liberado al medio al mineralizarse la materia orgánica producida, previa autólisis de organismos especializados.

La fijación de nitrógeno está siendo motivo de permanente revisión ya que se estima que su rol es mucho más importante del que inicialmente se estimó. Esta evidencia se ha logrado principalmente en base a los desbalances determinados con la aplicación de modelos de presupuesto de ciclo de nitrógeno. La cianobacteria *Trichodesmium* es una de las que ha sido identificada con fijadora de nitrógeno en océano abierto. Existe evidencia que otras especies como *Richelia intracellularis* y la epífita *Calothrix rhizosoleniae* contribuyan de manera significativa a la fijación de nitrógeno en océano abierto (Raleigh *et al.*, 2000). Lo anterior, junto con el desbalance de nitrógeno observado en el Aysén, permite pensar que en la zona pueden existir fijadores de nitrógeno que se desconocen y que es importante de investigar. Estos desbalances también podrían haber sido generado por ingresos de nitrógeno no incorporado en el balance de caja, situación que también deberá ser investigada.

En cuanto a la capa profunda la situación fue diferente, ya que en este caso se presentó una situación de denitrificación, ya que el desbalance observado en la proporcionalidad de  $\Delta\text{DIN}$  y  $\Delta\text{DIP}$  respecto a la relación de Redfield indicaría un consumo de nitrato, en ambos sub-sistemas. En este caso se tiene una degradación de la materia orgánica, utilizando como aceptor de electrones al nitrato, proceso que se realiza principalmente mediante organismos especializados (*i.e.* bacterias, microalgas, etc.). Esta situación de denitrificación, fue observado en ambas etapas del crucero Cimar Fiordo 4, aún cuando este consumo de nitrato fue mayor durante la segunda etapa.

Sin embargo a pesar de que los resultados aparentemente son similares tanto en sub-sistema 1 como en el sub-sistema 2, en la capa superficial y en la capa profunda, el estado neto del total de cada sub-sistema no es el mismo, debido a que los procesos de fijación y/o consumo de nitrógeno pueden haber sido más o menos intensos. Es así como, en la primera etapa del crucero el estado neto del sub-sistema 1 fue de fijación de nitrógeno, aún cuando en los otros tres casos se dio un balance favorable a la denitrificación.

La presencia de los procesos de desnitrificación identificados en la cabeza del seno Aysén, no parecen ser atribuibles a los clásicos procesos de denitrificación de la columna de agua en océano abierto, dado que estos tienen lugar en medios cuasi anaeróbicos (Thomas, 1966; Hattori, 1983). Esto se debe a que en la cabeza del seno Aysén no alcanza disminuciones de oxígeno disuelto bajo los 0,20 ml/L, que son las concentraciones requeridas para la denitrificación. Sin embargo, esta denitrificación podría estar ocurriendo cerca de o en el sedimento desde donde se intercambiaría agua con una proporción N:P diferente a la de Redfield.

## CONCLUSIONES

Se confirma que la distribución vertical de algunas variables oceanográficas en la zona de estudio (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH, nitrato y fosfato) indican la existencia de una estructura de dos capas, separadas por gradientes verticales de intensidad variable de acuerdo al grado de influencia de los aportes oceánicos y fluviales. La capa superficial se caracteriza por presentar características variables sus características. Por otra parte, la capa profunda, se caracteriza por ser más estable, en algunos casos cuasi homogéneo.

La estructura vertical de temperatura, se presentó más homogénea en invierno que en verano, producto de las fluctuaciones anuales de la radiación solar principalmente.

Los ríos aportan a los estuarios aguas dulces y oligotróficas, las que provocan que las aguas superficiales de estos sean poco salinas y pobres en nutrientes. Por el contrario, el océano adyacente aporta aguas saladas ricas en nutrientes, sustentando, en gran medida la alta productividad del sistema.

Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto y altas concentraciones de nutrientes de aguas profundas próximas a la cabeza del seno Aysén se deben, en parte, a la descomposición de materia orgánica depositada allí por los ríos y a la baja tasa de ventilación de ella.

Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto y altas concentraciones de nutrientes de la capa profunda de la boca del Guafo y canal se deben a la intrusión de aguas oceánicas.

La zona profunda de la cuenca al sur de Meninea (> 100 m), presenta un mecanismo de renovación de sus aguas mediante el hundimiento hasta el fondo de las aguas del nivel de 30-50 m, provenientes desde el canal Moraleda. Este mecanismo favorece la ventilación de la zona profunda

Al aplicar un modelo de balance de agua, sal y nutrientes, fue posible tratar un sistema boca del Guafo, canal Moraleda y seno Aysén, como un sistema de dos cajas (o sub-sistemas) basados en las características topográficas e hidrográficas.

El sub-sistema 1, que abarca desde la zona central del seno Aysén a la cabeza de este, presenta una tasa de renovación promedio (o tiempo de residencia promedio) de dos años, explicando, en parte, la presencia de bajos valores de oxígeno disuelto en la zona profunda hacia la cabeza del Aysén.

Las aguas de la cuenca del sub-sistema 2, ubicado inmediatamente al sur de la constricción de Meninea, y que abarca la boca del seno Aysén, tiene una renovación de sus características oceanográficas cada seis meses, corroborando la proposición hecha

anteriormente por Silva *et al* (1998), efectuada en base a la distribución inter estacional de las variables.

El tiempo de renovación del agua del sistema total, fue de 18 meses (1,5 años) para el crucero de invierno y de 22 meses (1,8 años) para el crucero de verano, siendo superiores al tiempo de residencia de 12 meses estimado por Salinas y Hormazábal (1997) para toda la cuenca sur del Moraleda. Sin embargo, corrobora el orden de magnitud del tiempo de residencia estimado por ellos.

El desbalance de nitrógeno mostrado por la aplicación del modelo presupuestario de cajas permitió inferir que la capa superficial de los 2 sub-sistemas, presentaron una condición de fijación de nitrógeno.

El desbalance de nitrógeno de la capa profunda de ambos subsistemas permitió inferir una condición de denitrificación, indicando un consumo de nitrato. En este caso se tiene una degradación de la materia orgánica, utilizando como aceptor de electrones al nitrato.

El estado neto del total de cada sub-sistema no se presentó igual, debido a que los procesos de fijación y/o consumo de nitrógeno pueden haber sido más o menos intensos. Es así como, en la primera etapa del crucero el estado neto del sub-sistema 1 fue de fijación de nitrógeno, aún cuando en los otros tres casos se dio un balance favorable a la denitrificación.

## VI.- BIBLIOGRAFÍA

- Atlas, E., S. Hager, L. Gordon y P. Park. 1971. A practical manual for use of the technicon autoanalyzer in sea water nutrient analyses. O.S.U. Dept. of Oceanography. Technical Report, 215 pp.
- Brattström, H. y E. Dahl, 1951. Reports of the Lund University.Chile Expedition 1948-1949. I general account, list of stations, hydrography. Lunds Universities, 88 pp.
- Calvete, T.C. 1997. Descripción de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH y nutrientes inorgánicos, en la zona de canales australes de Chile, entre Puerto Montt y Laguna San Rafael en la primavera de 1995. Tesis para optar al Título de Oceanógrafo, Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, 136 pp.
- Cameron, W. y D. Pritchard, 1963. Estuaries. The Sea. 2: 306-324.
- Carpenter, J. 1965. The Chesapeake Bay Institute Technique for the Winkler dissolved oxigen method. Limnol. Oceanogr., 10:141-143.
- DOE. 1994. Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water; version 2, A.G. Dickson and C. Goyet. (eds) (unpublished manuscript).
- Ministerios de Obras Públicas - Dirección General de aguas. 1987. Balance hídrico de Chile. Dirección de Obras Públicas. 12 de Julio 1988, 24 pp.
- Dirección Meteorológica de Chile 1983 -1996. Anuarios meteorológicos. Santiago de Chile.
- Fedele, A. 1993. Razón  $N - NO_3^- : P - PO_4^{-3}$  anómala, un trazador químico para la masa de Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS). Tesis para optar al título de Oceanógrafo, Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, 134 pp.
- Gordon, Jr., D.C., P.R. Boudreau, K.H. Mann, J.E. Ong, W.L. Silvert, S.V. Smith, Wattayakorn, F. Wulff y T. Yanagi, 1996. LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Report & Studies, Texel, The Neatherlans, 96 pp.
- Hattori, A. 1983. Denitrificacion and dissimilatory nitrate reduction. E.J. Carpenter y D.G. Capone, (eds.). En: Nitrogen in the Marine Environment. Academic Press, New York & London. pp. 191-232.

- Hood, R., A. Michaels y D. Capone. 2000. Answers sought to the enigma of marine nitrogen fixation. EOS. Trans. Amer. Geophys. Union, 81(13): 133-139.
- Libes, S. 1992. An introduction to marine biogeochemistry. Ed. J. Wiley and Sons Inc. New York, 734 pp.
- Pickard, G. 1971. Some physical oceanographic features of inlets of Chile. J. Fish. Bd. Canada, 28: 1077-1106.
- Pickard, G. 1973. Water structure in Chilean fjords. Oceanography of the South Pacific 1972, comp. R. Fraser, New Zealand Nat. Comm. for UNESCO, pp. 95-104.
- Pickard, G. L. y B. R. Stanton. 1980. Pacific fjords- A review of their water characteristics, En: H. J. Freeland, D. M. Farmer y Levings (eds) Fjords Oceanography. Plenum Press, New York y London. Nato Conferences Series IV: Marine Sciences. pp 1-51.
- Prado, R. 2000. Distribución espacial del amonio en fiordos y canales comprendido entre Puerto Montt y laguna San Rafael, en período de primavera. Cienc. Tec. Mar (En revisión).
- Redfield, A., B. Ketchum y F. Richard. 1963. The influence of organism on the composition of sea water. The Sea. 2: 26-76.
- Rojas y Silva, 1996. Atlas oceanográfico de Chile (18°21' S a 50°00' S), Volumen 1. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 234 pp.
- Salinas, S. y S. Hormazábal. 1997. Circulación en la constricción de Meninea en el canal Moraleda 45° 15'S. Resultados crucero Cimar fiordo 1. Resúmenes ampliados, pp. 21-22.
- Sievers, H. y R. Prado. 1994. Contraste de las características oceanográficas del Seno Aysén, Chile, entre invierno y verano (Lat. 45° 20' S). Rev. Biol. Mar, 29(2): 167-209.
- Silva, N., H. Sievers y R. Prado. 1995. Descripción oceanográfica de los canales australes de Chile. Zona Puerto-Laguna San Rafael (41°20'S, 46°40'S). Rev. Biol. Mar, 30(2): 207-254.
- Silva, N., C. Calvete y H. Sievers. 1997. Características Oceanográficas Físicas y Químicas de Canales Australes Chilenos entre Puerto Montt y Laguna San Rafael (Crucero Cimar Fiordo I). Cienc. Tecnol. Mar, 20: 23-106.

- Silva, N., C. Calvete y H. Sievers. 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre Puerto Montt y Laguna San Rafael, Chile (Crucero Cimar Fiordo I). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 21: 17-48.
- Silva, N. y S. Neshyba. 1977. Corrientes superficiales frente a la costa austral de Chile. *Cienc. Tec. Mar, CONA*, 3: 37-42.
- Silva, N. y S. Neshyba. 1979-1980. Masas de agua y circulación geostrófica frente a la costa de Chile Austral. *Ser. Cient. Inst. Antárt. Chileno*, 25/26: 5-32.
- Silva, N. y D. Konow. 1975. Contribución al conocimiento de las masas de agua en el Pacífico Sud-Oriental. Expedición Krill. Crucero 3/4. Julio-Agosto 1974. *Rev. Com. Perm. Pacífico Sur*, 3: 63-75.
- Silva, N. y S. Neshyba. 1979. On the southernmost extention of the Perú-Chile undercurrent. *Deep-Sea Res.*, 26A: 1387-1393.
- Smith, S., J. M. Crossland y C. Crossland. 1999. Mexican and central Americans Coastal Lagoon System: carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies. LOICZ IPO, Texel, The Netherlands. 13: 1-115 pp.
- Thomas, W. 1966. On denitrification in the northeastern tropical Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, 13: 1109-1114.
- Weiss, R. 1970. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and sea water. *Deep-Sea Res.*, 17: 721-735.

Figura 1. Distribución de las estaciones oceanográficas realizadas durante el crucero Cimar Fiordo 4.

Figura 2. Distribución vertical de (a) temperatura y (b) salinidad, en la sección 1, durante la primera etapa del crucero.

Figura 3. Distribución vertical de (a) oxígeno disuelto y (b) pH, en la sección 1, durante la primera etapa del crucero.

Figura 4. Distribución vertical de (a) fosfato y (b) nitrato, en la sección 1, durante la primera etapa del crucero.

Figura 5. Distribución vertical de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) oxígeno disuelto en la sección 2, durante la primera etapa del crucero.

Figura 6. Distribución vertical de (a) fosfato y (b) nitrato, en la sección 2, durante la primera etapa del crucero.

Figura 7. Distribución vertical de (a) temperatura y (b) salinidad, en la sección 1, durante la segunda etapa del crucero.

Figura 8. Distribución vertical de (a) oxígeno disuelto y (b) pH, en la sección 1, durante la segunda etapa del crucero.

Figura 9. Distribución vertical de (a) fosfato y (b) nitrato, en la sección 1, durante la segunda etapa del crucero.

Figura 10. Distribución vertical de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) oxígeno disuelto en la sección 2, durante la segunda etapa del crucero.

Figura 11. Distribución vertical de (a) fosfato y (b) nitrato, en la sección 2, durante la segunda etapa del crucero.

Figura 12. Diagrama T-S de los cruceros Hudson, Cimar Fiordo 1 y Cimar Fiordo 4 1y 2 (Est. 149, 68, 1 y 1) en la boca del Guafo.

Figura 13. Secuencia de diagrama T-S y sus respectivos triángulos de mezcla a medida para estaciones seleccionadas de la boca del Guafo - canal Moraleda – canal Costa - seno Aysén, durante la primera etapa de Cimar Fiordo 4.

Figura 14. Secuencia de diagrama T-S y sus respectivos triángulos de mezcla a medida para estaciones seleccionadas de la boca del Guafo - canal Moraleda – canal Costa - seno Aysén, durante la segunda etapa de Cimar Fiordo 4.

Figura 15. Secuencia de diagrama T-S y sus respectivos triángulos de mezcla a medida para estaciones seleccionadas del canal Moraleda - canal Costa - estero Elefantes – golfo Elefantes, durante el crucero Cimar Fiordo 4, (a) etapa 1 y (b) etapa 2.

Figura 16. Diagrama de salinidad versus distancia entre la boca del Guafo- seno Aysén.

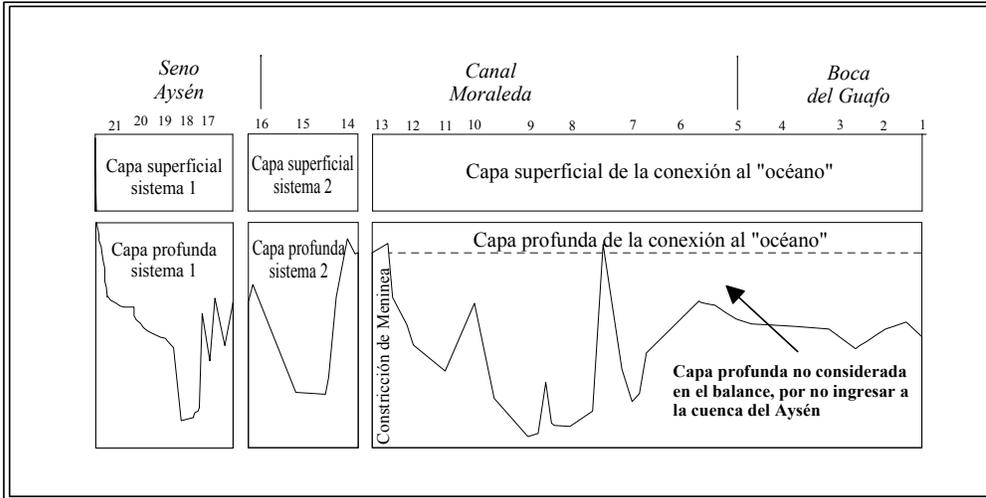


Figura 17. Esquema del modelo a aplicar en el seno Aysén constituido por un sistema de dos cajas y dos capas.

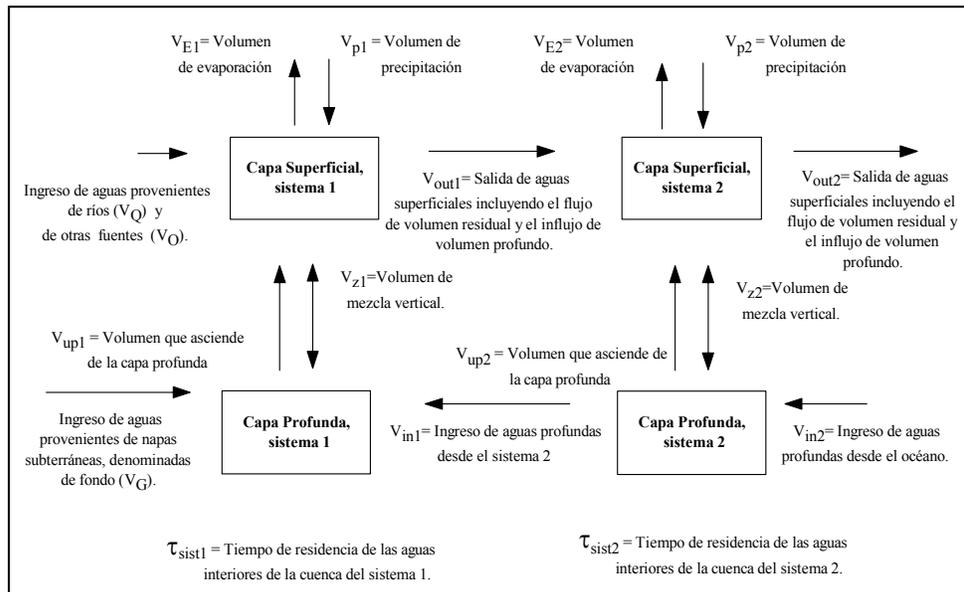


Figura 18. Modelo teórico para el balance de agua del seno Aysén.

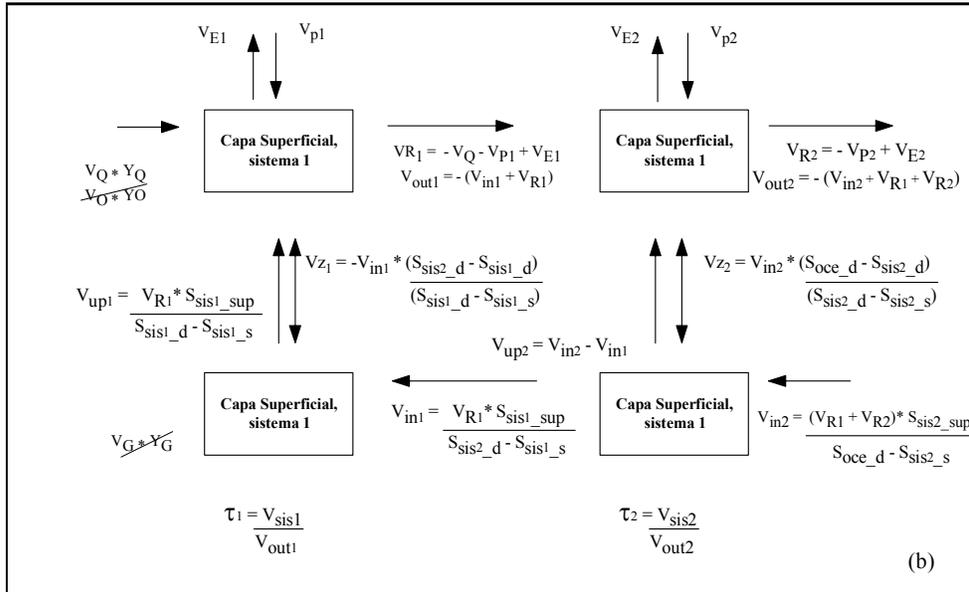
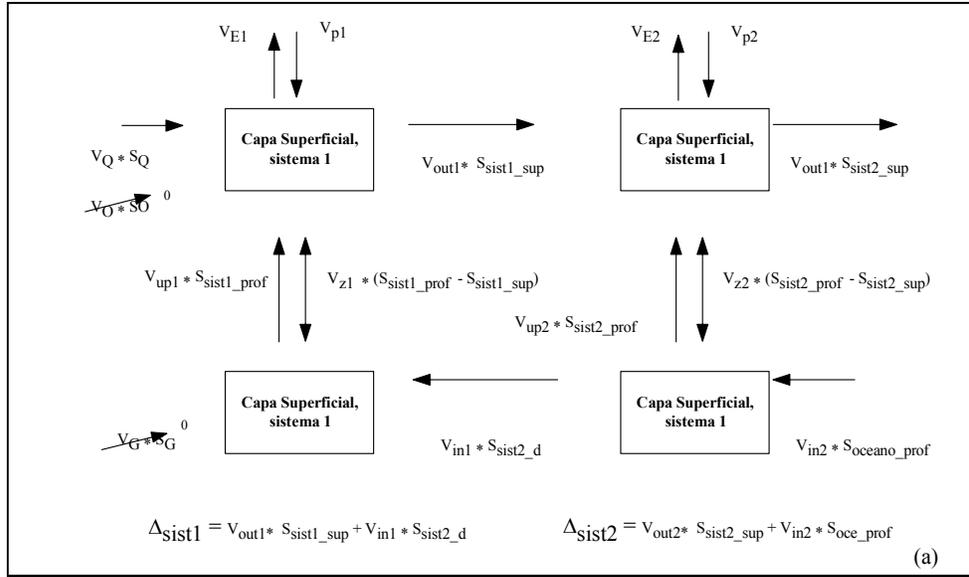


Figura 19. Modelo físico y químico para el balance de (a) agua y (b) sal en el seno Aysén.

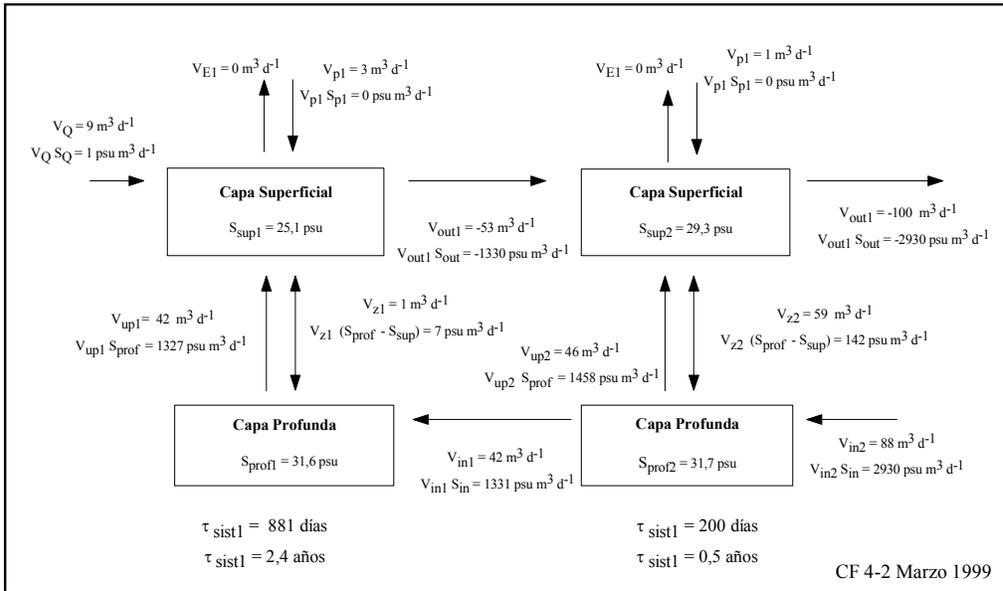
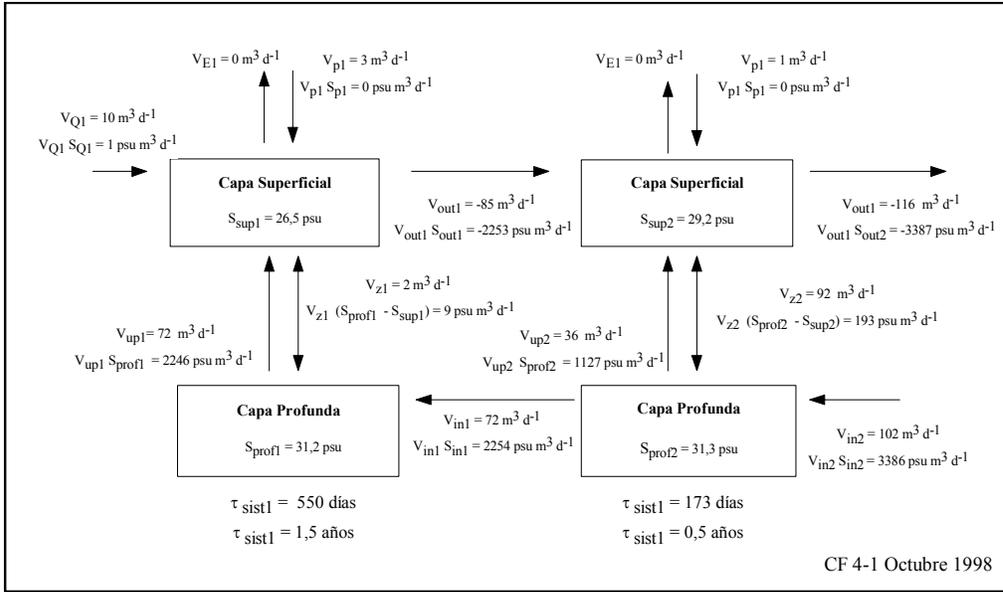


Figura 20. Balance de sal y agua en un sistema estacionario de dos cajas y dos capas para el seno Aysén (a) octubre, 1998 y (b) marzo, 1999.

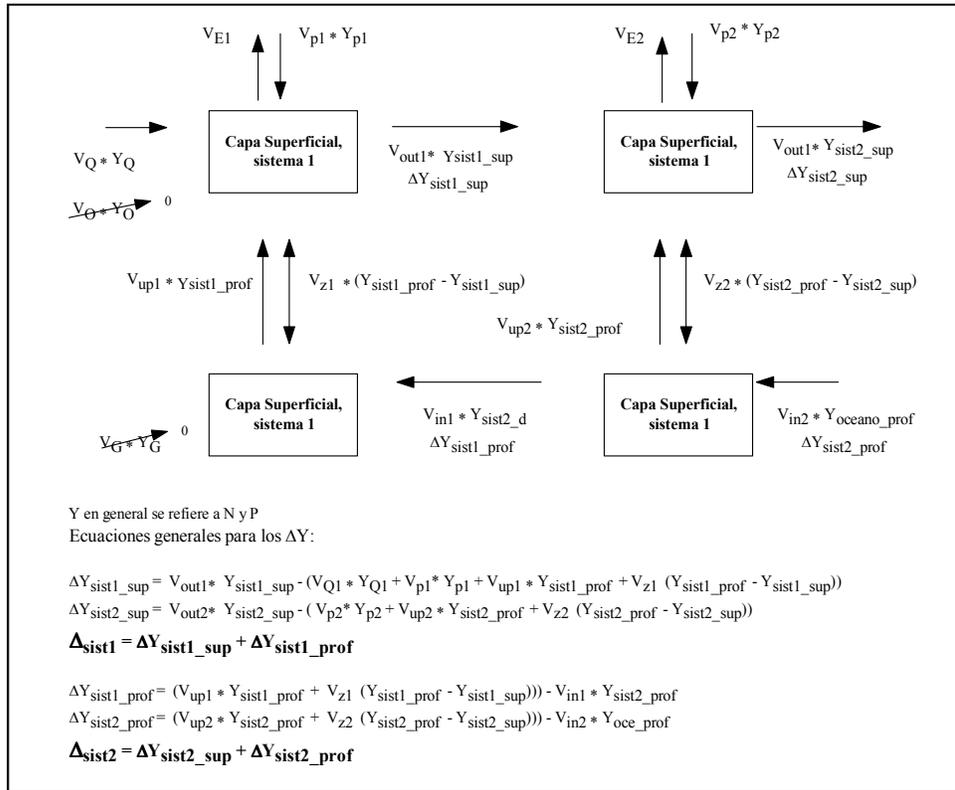


Figura 21. Modelo biogeoquímico para el balance de nutrientes en el seno Aysén.

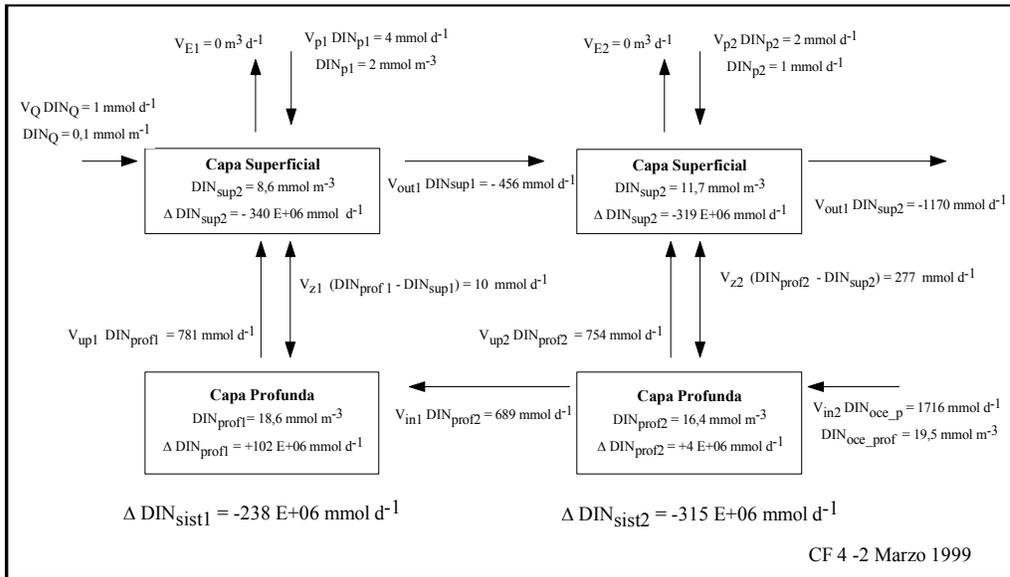
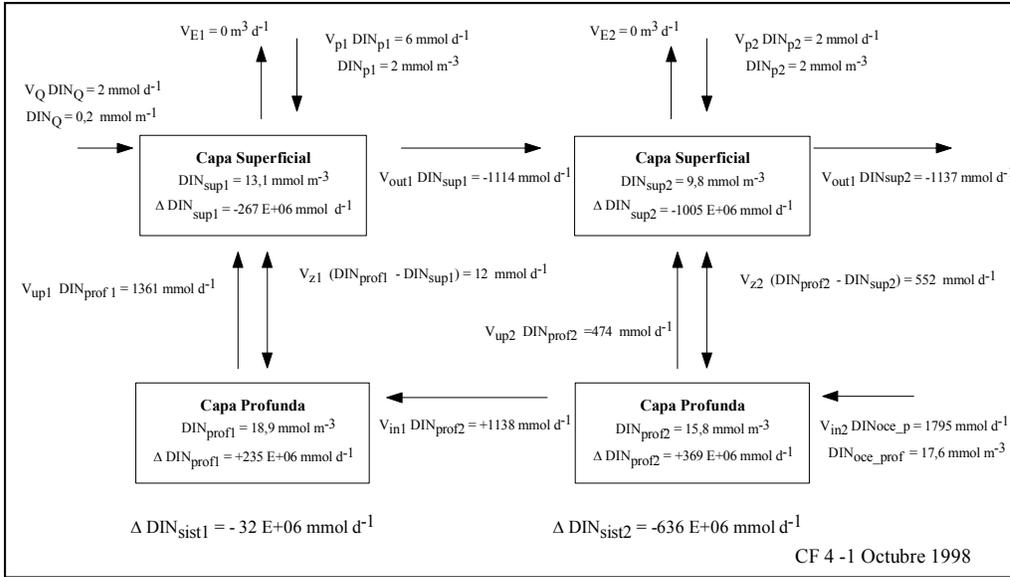


Figura 22. Balance de nitrógeno en un sistema estacionario de dos cajas y dos capas para el seno Aysén (a) octubre, 1998 y (b) marzo, 1999.

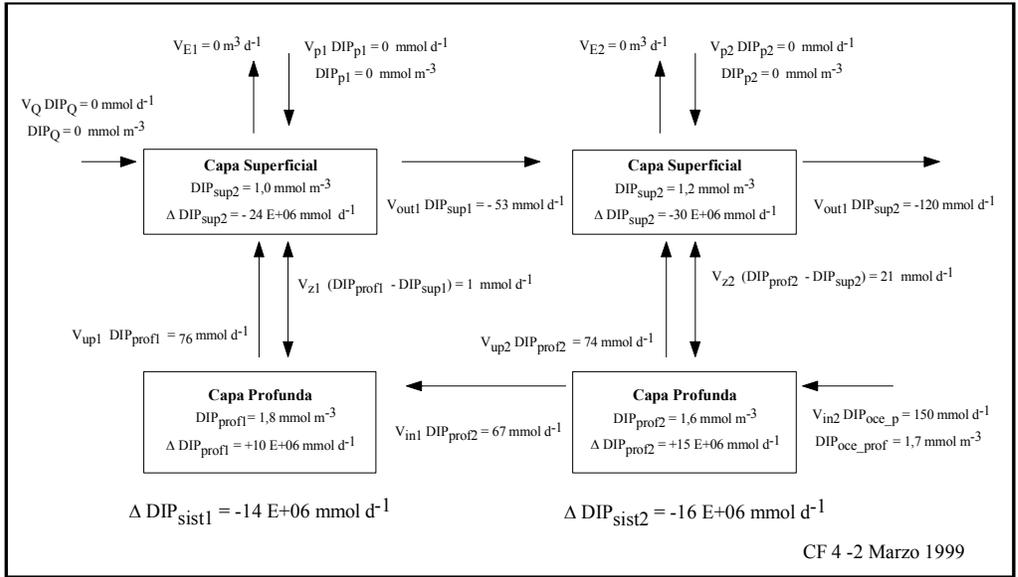
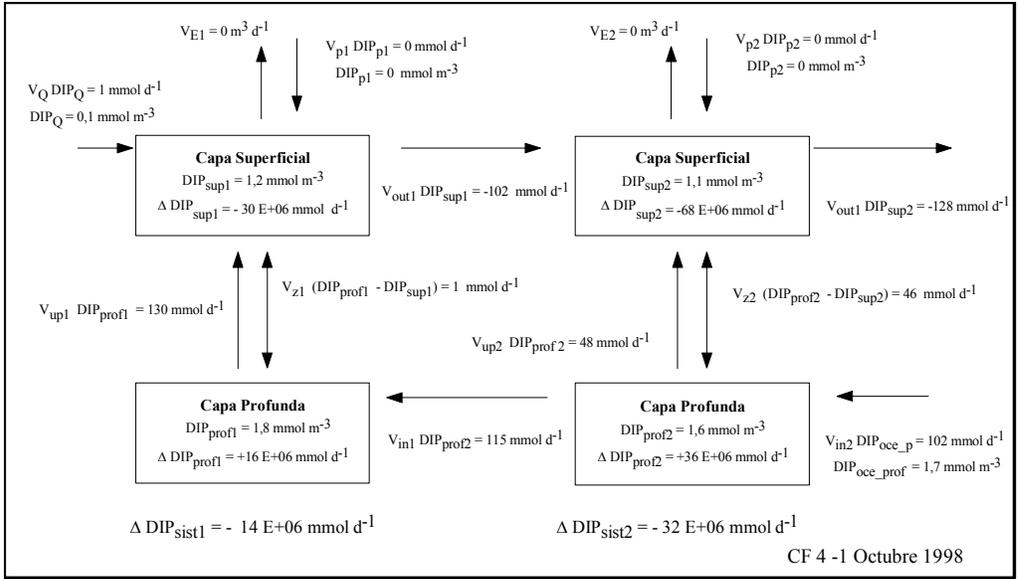


Figura 23. Balance de fósforo en un sistema estacionario de dos cajas y dos capas para el seno Aysén (a) octubre, 1998 y (b) marzo, 1999.