

Research Article

Textura, materia orgánica y composición química elemental (C y N) de sedimentos marinos superficiales de la zona Puerto Montt a Boca del Guafo (Norpatagonia chilena)

Nelson Silva¹ & María Inés Astorga¹

¹Laboratorio de Biogeoquímica Marina, Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Casilla 1020, Valparaíso, Chile

RESUMEN. Se determinó la distribución horizontal de la textura, concentración de materia orgánica, carbono orgánico e inorgánico y nitrógeno orgánico, del sedimento en muestras superficiales, recolectadas entre Puerto Montt y Boca del Guafo, durante los cruceros CIMAR 10 Fiordos (2004), CIMAR 11 Fiordos (2005) y CIMAR 12 Fiordos (2006). La distribución superficial de las características químicas permitió identificar dos zonas: una norte, entre Puerto Montt y el grupo de islas Deserto-Apio-Quehui-Lemuy con concentraciones, que en general fueron altas (MOT > 5%, C-org > 1,6%, C-inorg > 0,4% y N-org > 0,2%), y una sur, entre dicho grupo de islas y la Boca del Guafo con concentraciones, en general, bajas (MOT < 5,0%, C-org < 1,6%, C-inorg < 0,4% y N-org < 0,2%). Esta zonación se atribuyó a condiciones oceanográficas (estuarinas *versus* oceánicas; aporte de nutrientes, corrientes, mareas, producción planctónica primaria y secundaria), y aporte de material terrígeno de la zona adyacente. El sedimento terrígeno del borde de los ríos continentales Petrohué, Cochamó, Puelo, Reñihue y Yelcho presentó concentraciones altas de MOT > 7,5%, C-org > 2,4%, C-inorg > 0,4% y N-org > 0,2%. La textura de las muestras marinas fue arenosa y limo-arcillosa, siendo la presencia de grava escasa e inferior al 4% en algunas muestras. El sedimento terrígeno del borde de los ríos fue preferentemente arenoso. La procedencia del sedimento (marino *versus* terrígeno) se infirió sobre la base de los valores de la relación C:N. Este resultó ser, mayoritariamente de origen marino, con la excepción de los fiordos continentales en que la componente terrígena fue importante.

Palabras clave: materia orgánica total, carbono orgánico, nitrógeno orgánico, textura del sedimento, fiordos, canales australes, Chile.

Grain size, total organic matter, organic carbon, inorganic carbon and organic nitrogen in surface marine sediments from Puerto Montt to Boca del Guafo (Chilean North Patagonia)

ABSTRACT. The horizontal distribution of the organic matter, organic and inorganic carbon, organic nitrogen content, and surface sediment texture was determined between Puerto Montt and Boca del Guafo using samples collected during the cruises CIMAR 10 Fiordos (2004), CIMAR 11 Fiordos (2005) and CIMAR 12 Fiordos (2006). Two zones were identified: the northern zone (from Puerto Montt to the Deserto-Apio-Quehui-Lemuy island group) had mostly high concentrations (TOM > 5%; C-org > 1.6%; C-inorg > 0.4% and N-org > 0.2%) the southern zone (from the same island group to Boca del Guafo) had mostly low concentrations (TOM < 5.0%, C-org < 1.6%, C-inorg < 0.4% and N-org < 0.2%). This segregation is attributed to the effect of oceanographic conditions (estuarine *versus* oceanic; nutrient contribution, currents, tides, primary and secondary planktonic production), and contributions of terrigenous material from the adjacent area. The terrigenous sediment from the edges of four continental rivers (Petrohué, Cochamó, Puelo, Reñihue, Yelcho) presented mostly high concentrations of TOM > 7.5%, C-org > 2.4%, C-inorg > 0.4% and N-org > 0.2%. The texture of the marine sediments was mostly sand and silt + clay; gravel was scarce and less than 4% in some samples. The terrigenous sediment from the river edges was mostly sandy. The sediment origins (marine *versus* terrigenous), as a first approach, were inferred from the values of the C:N ratio. The sediments

were mostly marine in origin, except in the continental fjords, where the terrigenous component was important.

Keywords: total organic matter, organic carbon, organic nitrogen, sediment texture, fjords, austral channels, Chile.

Corresponding author: Nelson Silva (nsilva@ucv.cl)

INTRODUCCIÓN

Chile posee una de las más extensas zonas de fiordos del planeta, ubicada entre 41° y 56°S, la que cubre un área de alrededor 241.000 km² (Borgel, 1970-1971), y está compuesta por un gran número de islas, canales, fiordos y golfos, rodeados por montañas con elevaciones máximas del orden de 3.500 m (Pickard & Stanton, 1980). Estos fiordos y canales fueron formados por el avance y retroceso de los glaciares durante el cuaternario y por el hundimiento tectónico del valle central (Borgel, 1970-1971).

Una vez que los hielos se retiraron, el socavamiento glaciar fue inundado por el mar adyacente, lo que, junto al aporte de agua dulce proveniente de los ríos, escurrimiento costero y derretimiento de glaciares de los campos de hielo aledaños, dio origen al sistema estuarino actual.

Este sistema, dada su intrincada geografía, se caracteriza por ser una zona protegida de las condiciones climáticas adversas y de la influencia directa del océano adyacente, lo que junto a la disponibilidad de aguas prácticamente no contaminadas, debido a la baja densidad poblacional de las provincias que rodean la zona (531.104 habitantes al 2002, en un área de 39.353 km² ó 13,5 habitantes km⁻²) y baja actividad industrial, centrada principalmente en la explotación ganadera, forestal y pesquera (www.chile.com.X Región, 2009), la hace una zona favorable para la instalación de centros de cultivos marinos.

La actividad acuicultora se inició en Chile en la década del 80 y debido a su éxito fue aumentando rápidamente, de modo tal que durante la última década, junto con otros centros de cultivo a lo largo del país, la producción de peces aumentó de 141.000 ton, en 1995 a 614.000 ton, en el 2005 (SERNAPESCA, 2006). Como consecuencia secundaria, esta actividad trae un incremento en el ingreso de materia orgánica al sedimento de esta zona estuarina, debido al alimento no consumido y fecas que ella produce.

Desde el punto de vista oceanográfico, el sistema estuarino chileno prácticamente no había sido estudiado hasta la década del 70, ya que con anterioridad a esta fecha sólo se había realizado la

expedición Lund University-Chile, entre los años 1948 y 1949, la cual abarcó desde Puerto Montt (41°32'S) hasta la parte central del canal Moraleda (44°24'S) (Brattström & Dahl, 1951). Posteriormente en el año 1970 se realizó la expedición Hudson-Chile 70, la que abarcó la zona entre Puerto Montt y seno Almirantazgo (54°20'S) (Pickard, 1971). Posterior a estas expediciones pioneras y hasta 1994, en la zona de Puerto Montt a Boca del Guafo no se habían realizado nuevas expediciones, por lo que no se disponía de información oceanográfica de la columna de agua ni de las características físicas y químicas del sedimento marino de la zona.

Debido a lo anterior y frente al creciente uso que se estaba haciendo de ella, el Comité Oceanográfico Nacional (CONA) inició en 1994 el Programa Cruceros de Investigación Marina en Áreas Remotas (CIMAR), con el fin de obtener el conocimiento de las características y procesos oceanográficos que afectan la zona de los canales y fiordos australes. En 1995 se realizó la primera expedición oceanográfica (CIMAR 1 Fiordos) la que abarcó la zona Puerto Montt a laguna San Rafael (46°39'S), crucero que incluyó la toma de muestras de sedimento superficial marino. Como uno de los resultados de este crucero, Silva *et al.* (1998) establecieron una zonación latitudinal del contenido de materia, carbono y nitrógeno orgánico de sedimento superficial, zonación que estos autores asociaron a la producción planctónica y a las características oceanográficas y topográficas del área. Sin embargo, durante este crucero el muestreo de sedimento en los canales orientales de la isla de Chiloé y en los fiordos occidentales de Chiloé continental, fue escaso. Debido a lo anterior, se planificó un muestreo más intensivo del sedimento de estos canales y fiordos, incluyéndose además el muestreo de los ríos, el que posteriormente se realizó durante los cruceros CIMAR 10, 11 y 12 Fiordos, a fin de aumentar el conocimiento sobre el contenido y distribución espacial de su contenido orgánico elemental (C y N) en esta zona norpatagónica.

Sobre la base de la información generada en los cruceros CIMAR 10, 11 y 12 Fiordos en la zona desde Puerto Montt hasta Boca del Guafo, se planteó como objetivo de este trabajo el incrementar el conocimiento

sobre la distribución horizontal de la textura y de los contenidos de materia orgánica, carbono orgánico e inorgánico y nitrógeno orgánico, del sedimento superficial (2-3 cm). Se planteó además, estimar su procedencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio abarcó los canales australes de la zona comprendida entre Puerto Montt y la Boca del Guafo (43°40'S), la cual fue muestreada durante la realización de las etapas de invierno de los cruceros CIMAR 10 Fiordos (C10F; 20 al 31 de agosto de 2004), CIMAR 11 Fiordos (C11F; 12 al 31 de julio de 2005) y CIMAR 12 Fiordos (C12F; 8 al 24 de julio de 2006). Los tres cruceros fueron realizados con el buque AGOR 60 Vidal Gormaz de la Armada de Chile.

En C10F, se tomaron muestras en 38 estaciones marinas y 4 estaciones fluviales (ríos Petrohué, Puelo, Reñihue y Yelcho) (Fig. 1a); en C11F, en 40 estaciones marinas y 2 estaciones fluviales (ríos Petrohué y Puelo) (Fig. 1b) y en C12F, en 11 estaciones marinas y 2 estaciones fluviales (ríos Cochamó y Puelo) (Fig. 1c). En C11F y C12F se realizó el muestreo más intenso del estero Reloncaví, de los canales de la zona de Calbuco y del borde oriental de la isla de Chiloé, donde se realizaron siete minisecciones, las que se denominaron de acuerdo a los canales que involucraron: Calbuco-Pilolcura (C-P); Dalcahue-Quinchao (D-Q); Dalcahue-Hudson (D-H); Castro-Lemuy (C-L); Lemuy-Yal (L-Y); (Compu-Queilen (C-Q); Quellón-Laitec (Q-L); Hornopiren-Comau (H-C), con 6-9 estaciones cada una (Figs.1b-1c).

Las muestras de sedimento marino superficial fueron colectadas con un Box Corer, de las cuales se obtuvieron submuestras de aproximadamente 250 g en los primeros dos a tres centímetros del sedimento. Las muestras de sedimento terrígeno de los ríos fueron tomadas río arriba, en un sector donde la marea ya no tiene influencia y por lo tanto sólo afectadas por agua dulce. Su recolección se realizó manualmente en el costado de ellos. Ambos tipos de muestras fueron guardadas húmedas en bolsas de polietileno y conservadas congeladas hasta su posterior análisis físico y químico. En el laboratorio las muestras fueron descongeladas, se les retiró la macrobiota, se homogeneizaron y se tomaron dos submuestras. Una se utilizó para el análisis de textura, por lo que se mantuvo intacta, mientras que la otra se utilizó para los análisis químicos, siendo secada a 60°C y molida hasta polvo muy fino en mortero de cerámica. La textura fue determinada mediante tamizado vía

húmeda, separando las fracciones del sedimento de acuerdo a la escala de Udden Wentworth.

El contenido de materia orgánica total (MOT) fue determinado gravimétricamente por la técnica de pérdida de peso por ignición (Byers *et al.*, 1978), calcinando la muestra en una mufla a temperatura constante de 450°C durante cuatro horas.

Los análisis de carbono fueron realizados mediante un analizador elemental LECO modelo CR-12, quemando las muestras a 1.300°C en corriente de oxígeno. Para el análisis de carbono total (C-tot), una submuestra molida y seca fue quemada directamente, mientras que para el análisis de carbono orgánico (C-org) la submuestra se trató previamente con HCl diluido 1:3 con el fin de eliminar todos los carbonatos, el C-org fue determinado quemando el remanente seco. El carbono inorgánico (C-inorg) fue estimado como la diferencia entre el C-tot y el C-org. Mayores detalles de la técnica se indican en Silva *et al.* (1998). El nitrógeno total (N-org) fue determinado usando la técnica de micro-Kjeldhal modificada por Branstreet (Walton, 1970). Para la calibración de los análisis de carbono y nitrógeno se utilizaron estándares de suelo proveídos por la empresa LECO, los cuales están certificados de acuerdo a las normas del National Institute of Standards and Technology (NIST).

Los análisis de MOT, C-tot, C-org y N-org, fueron realizados en 2-3 réplicas y sus resultados se expresaron como porcentajes (%) del sedimento seco. Para el cálculo de relaciones estequiométricas de C-org y N-org (C:N), se utilizaron las unidades de $\mu\text{g-at C/g}$ y $\mu\text{g-at N/g}$ de sedimento seco.

Se prepararon tablas con la estadística básica para las muestras marinas de cada crucero (Tabla 1). Sin embargo, para las muestras terrígenas de ríos, debido a que el número de muestras por crucero era pequeño (2 a 4), se preparó una tabla con el conjunto de los datos de los tres cruceros, aumentando así a 9 el número de muestras, de modo de obtener valores estadísticos más robustos (Tabla 2).

Para el análisis de la distribución geográfica de la textura y de los diferentes compuestos químicos del sedimento, se prepararon mapas de la concentración de cada uno de ellos. De acuerdo a lo propuesto por Silva *et al.* (1998), y sobre la base de la escala Udden-Wentworth, la textura fue agrupada en tres clases: gravas (> 2 mm); arenas (2-0,063 mm) y limo+arcillas (< 0,063 mm). En el caso de la MOT, C-org, C-inorg y N-org, sus concentraciones porcentuales se agruparon en cinco clases, cuyos intervalos se indican en las figuras 2d a 4c.

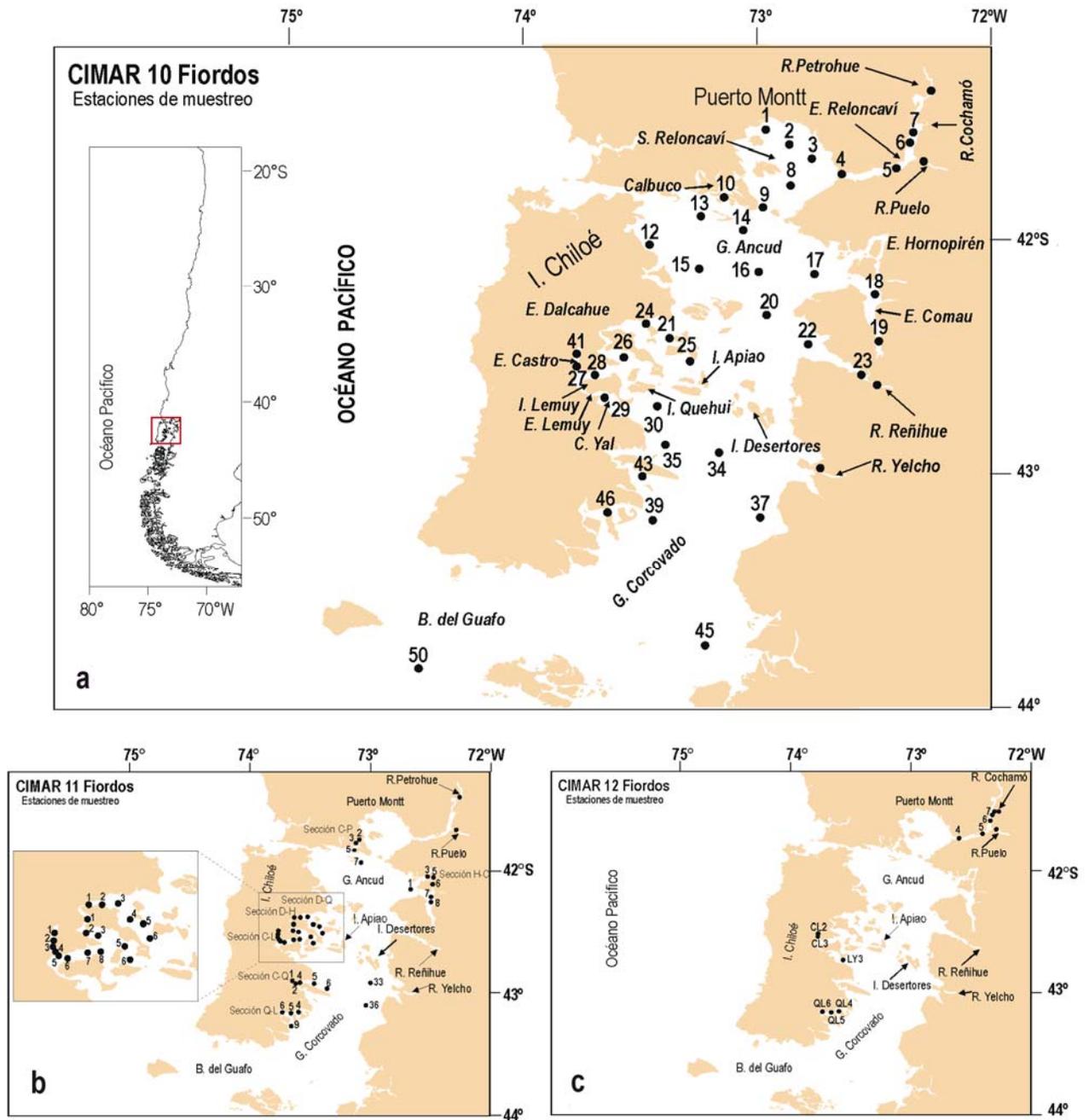


Figura 1. Posición geográfica de las estaciones de muestreo de sedimento superficial (0-3 cm), de la zona Puerto Montt a Boca del Guafo: a) CIMAR 10 Fjords (agosto 2004), b) CIMAR 11 Fjords (julio 2005) y c) CIMAR 12 Fjords (julio 2006). (C-P: Calbuco-Pilolcura; D-Q: Dalcahue-Quinchao; D-H: Dalcahue-Hudson; C-L: Castro-Lemuy; L-Y: Lemuy-Yal; C-Q: Compu-Queilen; Q-L: Quellón-Laitec; H-C: Hornopirén-Comau).

Figure 1. Geographic position of the sampling surface sediments (0-3 cm) stations, from Puerto Montt to Boca del Guafo: a) CIMAR 10 Fjords (August 2004), b) CIMAR 11 Fjords (July 2005) and c) CIMAR 12 Fjords (July 2006) cruises. (C-P: Calbuco-Pilolcura; D-Q: Dalcahue-Quinchao; D-H: Dalcahue-Hudson; C-L: Castro-Lemuy; L-Y: Lemuy-Yal; C-Q: Compu-Queilen; Q-L: Quellón-Laitec; H-C: Hornopirén-Comau).

Tabla 1. Estadística básica para MOT, C-org, C-inorg, N-org y relación C:N, en muestras de sedimentos marinos superficiales, obtenidas durante los cruceros C10F (agosto 2004), C11F (julio 2005) y C12F (julio 2006). ND: no detectado, DS: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, (*): $\mu\text{g-át C}\cdot\text{g}^{-1}/\mu\text{g-át N}\cdot\text{g}^{-1}$.

Table 1. Basic statistics for TOM, C-org, C-inorg, N-org, and the C:N ratio in samples of the marine surface sediments taken during the cruises C10F (August 2004), C11F (July 2005) and C12F (July 2006). ND: not detected, DS: standard deviation, CV: coefficient of variation, (*): $\mu\text{g-at C}\cdot\text{g}^{-1}/\mu\text{g-at N}\cdot\text{g}^{-1}$.

	MOT (%)			C-org (%)			C-inorg (%)			N-org (%)			C:N (*)		
	C10F	C11F	C12F	C10F	C11F	C12F	C10F	C11F	C12F	C10F	C11F	C12F	C10F	C11F	C12F
Máximo	10,76	10,29	11,06	2,33	2,28	2,63	0,55	0,66	0,97	0,36	0,31	0,37	13,5	12,6	13,1
Mínimo	0,96	1,33	1,56	0,18	0,13	0,30	N.D.	N.D.	0,07	0,03	0,02	0,05	6,3	5,1	6,7
Media	3,9	2,53	5,75	0,93	0,47	1,42	0,23	0,14	0,35	0,12	0,07	0,18	9	8,0	9,4
Mediana	4,53	3,71	5,25	1,03	0,76	1,40	0,23	0,2	0,25	0,14	0,11	0,17	8,7	7,9	9,4
DS	2,56	2,56	3,33	0,67	0,67	0,74	0,18	0,19	0,29	0,1	0,09	0,10	1,6	1,4	1,6
CV (%)	66	101	57	72	142	52	78	136	82	83	128	56	18	18	17
Nº Est.	38	40	11	38	40	11	38	40	11	38	40	11	38	40	11

Tabla 2. Estadística básica de MOT, C-org, C-inorg, N-org y relación C:N, para el conjunto de muestras de sedimentos terrígenos superficiales del borde de ríos obtenidas durante los cruceros C10F (agosto 2004), C11F (julio 2005) y C12F (julio 2006). DS: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, (*): $\mu\text{g-át C}\cdot\text{g}^{-1}/\mu\text{g-át N}\cdot\text{g}^{-1}$.

Table 2. Basic statistics for TOM, C-org, C-inorg, N-org, and the C:N ratio for the total of terrigenous surface sediments samples from the river edges taken during the cruises C10F (August 2004), C11F (July 2005) and C12F (July 2006). DS: standard deviation, CV: coefficient of variation, (*): $\mu\text{g-at C}\cdot\text{g}^{-1}/\mu\text{g-at N}\cdot\text{g}^{-1}$.

	MOT (%)	C-org (%)	C-inorg (%)	N-org (%)	C:N (*)
Máximo	25,21	9,38	0,92	2,26	17,43
Mínimo	2,24	0,64	0,07	0,06	9,60
Media	9,19	3,29	0,42	0,61	13,90
Mediana	6,61	1,75	0,25	0,32	14,72
DS	7,53	2,90	0,34	0,70	3,12
CV (%)	81	88	81	115	22
Nº Estaciones	9	9	9	9	9

RESULTADOS

Textura del sedimento y distribución horizontal

La textura del sedimento superficial estuvo compuesta mayoritariamente por arenas y limo-arcillas (Figs. 2a-2c). La presencia de las gravas en las 89 muestras marinas analizadas (38 de C10F, 40 de C11F y 11 de C12F) fue baja, encontrándose concentraciones mayores al 1% en solo seis de ellas.

El sedimento de la mayoría de las estaciones ubicadas en las microcuencas profundas (200-400 m) de los esteros Reloncaví, Hornopirén y Comau, seno

Reloncaví y golfo Ancud estuvo compuesta mayoritariamente por fracciones limo-arcillosas, mientras que aquellas ubicadas en el golfo Corcovado y Boca del Guafo presentaron en su mayoría textura areno-limosa (Figs. 2a-2c).

Las minisecciones C-P, D-H y Q-L se caracterizaron por ser mayoritariamente de textura arenosa, mientras que la minisección HC presentó en su mayoría una textura de tipo limo-arcillosa. Las minisecciones C-Q, C-L, D-Q presentaron sedimentos con textura mayoritariamente variable, en ocasiones arenosas y en otras limo-arcillosa (Figs. 2a-2c).

El sedimento terrígeno del borde de los ríos Petrohué, Puelo y Reñihue se caracterizó por una textura mayoritariamente arenosa (Figs. 2a-2c).

Contenido de MOT, C-org, C-inorg, N-org y relación C:N

Los valores de las concentraciones máximas y mínimas del contenido de MOT, C-org, C-inorg, N-org y relación C:N, de las muestras de sedimento marino superficial obtenidas durante C10F, C11F y C12F, así como sus estadísticos de tendencia central y variabilidad, se presentan en la Tabla 1. En términos generales, la MOT fluctuó entre 0,96 y 11,06%, el C-org entre 0,13 y 2,66%, el C-inorg entre bajo el límite de detección y 0,97%, el N-org entre 0,02 y 0,37% y la relación C:N entre 5,1 y 13,5.

En el caso de las muestras de sedimentos terrígenos del borde de los ríos, los estadísticos de tendencia central y variabilidad, para el total de las muestras de los tres cruceros, se presentan en la Tabla 2. En términos generales, la MOT fluctuó entre 2,24 y 25,21%, el C-org entre 0,64 y 9,38%, el C-inorg entre concentraciones 0,07 y 0,92% el N-org entre 0,06 y 2,26% y la relación C:N 9,6 y 17,4 (Tabla 2).

Las concentraciones de MOT, C-org, C-inorg y N-org de las muestras marinas presentaron una alta variabilidad (CV 52 a 142%), incluso si se compara la misma variable entre los diferentes cruceros, por ejemplo, los CV en C11F son mayores que en C10F o C12F (Tabla 1). Sin embargo, cuando se analiza la relación C:N, la situación es diferente, la variabilidad es menor y similar para los tres cruceros (CV 17-18%).

Distribución horizontal del contenido de MOT, C-org, N-org, C-inorg y relación C:N

Las mayores concentraciones de MOT (> 5,0%), C-org (> 1,6%), C-inorg (> 0,4%) y N-org (> 0,2%), del sedimento marino superficial, tanto para C10F como para C11F y C12F, se encontraron ubicadas preferentemente en la zona entre Puerto Montt y el grupo de islas Desertores-Apiao-Quehui-Lemuy (Figs. 2d-2f a 4a-4c). Las menores concentraciones de MOT (< 5,0%), C-org (< 1,6%), C-inorg (< 0,4%) y N-org (< 0,2%), se presentaron ubicadas preferentemente al sur de este grupo de islas, en el golfo Corcovado y Boca del Guafo.

Los canales ubicados en el borde costero oriental de la isla de Chiloé y en la zona de Calbuco presentaron, en general, bajas concentraciones de orgánicos e inorgánico. No siguió este patrón general algunas estaciones de las cabezas de las minisecciones

D-Q, C-L y C-Q y una estación central de la minisección C-L (Figs. 2d-2f, 3a-3c y 4a-4c).

Los esteros Reloncaví, Comau-Hornopirén, ubicados en la zona costera de Chiloé continental, presentaron concentraciones preferentemente altas de MOT, C-org y N-org (Figs. 2d-2f a 4a-4c).

Los sedimentos terrígenos del borde de los ríos continentales Petrohué, Cochamó, Puelo, Reñihue y Yelcho, presentaron concentraciones preferentemente altas de MOT y C-org y N-org (Figs. 2d-2f, 3a-3c y 4a-4c). El C-inorg, no presentó un patrón definido (Figs. 3d a 3f).

Los mayores valores de la relación C:N de las muestras marinas (> 10) para C10F, C11F y C12F, se encontraron ubicadas preferentemente en las zonas costera y los menores (< 10) indistintamente en la zona central o zonas costeras del área (Figs. 4d-4f). Esta relación no mostró una segregación norte sur definida, como ocurrió con las otras variables analizadas.

En el caso de las muestras terrígenas del borde de los ríos, la relación C:N fue alta y en general superior a 10 (Figs. 4d-4f).

DISCUSIÓN

Zonación latitudinal de la composición química del sedimento superficial

Silva *et al.* (1998), Silva & Prego (2002) y Silva (2008), indican que de acuerdo a las características químicas orgánicas generales de los sedimentos marinos superficiales (MOT, C-org y N-org), muestreados durante el crucero C1F, la zona Puerto Montt a laguna San Rafael, puede ser segregada en cuatro zonas. Una zona norte, ubicada entre Puerto Montt y el grupo de las islas Desertores, Apiao, Quehui y Lemuy con concentraciones preferentemente altas (MOT > 5%, C-org > 1,6% y N-org > 0,2%) y una zona central, ubicada entre estas islas y la boca norte del canal Moraleda (incluyendo Boca del Guafo y la zona oceánica), con concentraciones preferentemente bajas (MOT < 5%, C-org < 1,6% y N-org < 0,2%), una zona sur con concentraciones preferentemente altas entre la boca norte del canal Moraleda y el canal Pulluche (incluyendo la boca Wickham y bahía Anna Pink) y finalmente una zona sur glaciar, con concentraciones preferentemente bajas, entre el canal Pulluche y la laguna San Rafael (Figs. 2-6 de Silva *et al.*, 1998).

El muestreo realizado durante C10F, C11F y C12F, abarcó solo las zonas norte y central mencionadas anteriormente, pero con un muestreo más intensivo de

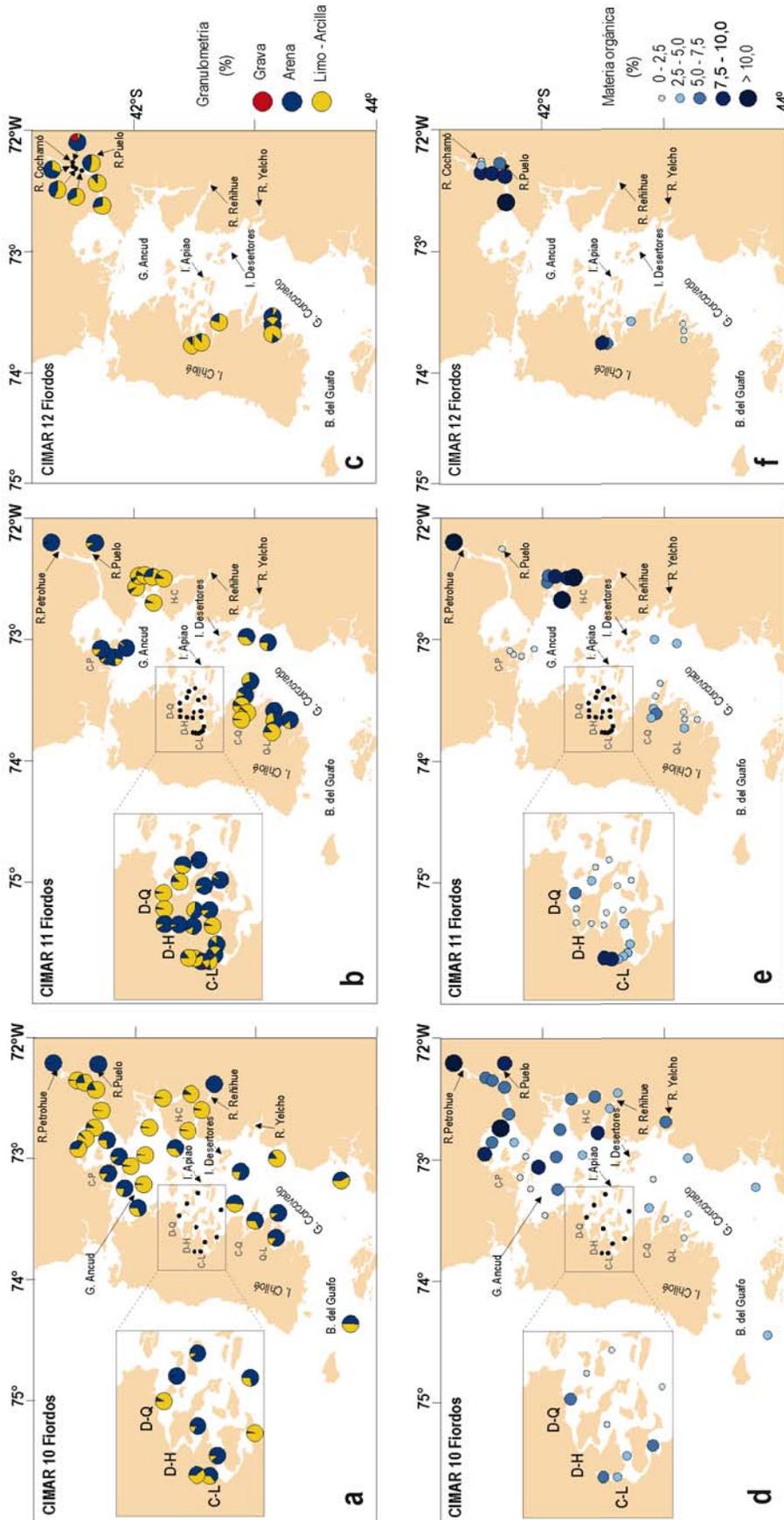


Figura 2. Distribución horizontal de la granulometría del sedimento superficial (0-3 cm), de la zona Puerto Montt a Boca del Guafo para: a) CIMAR 10 Fjords, b) CIMAR 11 Fjords; c) CIMAR 12 Fjords y distribución horizontal de materia orgánica (%) para: d) CIMAR 10 Fjords, e) CIMAR 11 Fjords, f) CIMAR 12 Fjords. (C-P: Calbuco-Pilolcura; D-Q: Dalcahue-Quinchao; C-L: Castro-Lemuy; L-Y: Lemuy-Yal; C-Q: Compu-Queilen; Q-L: Quellón-Laitec; H-C: Hornopirén-Comau).

Figure 2. Horizontal grain size distribution in the surface sediment (0-3 cm), from Puerto Montt to Boca del Guafo for: a) CIMAR 10 Fjords, b) CIMAR 11 Fjords, c) CIMAR 12 Fjords and horizontal distribution of organic matter (%) for: d) CIMAR 10 Fjords and f) CIMAR 12 Fjords cruises. (C-P: Calbuco-Pilolcura; D-Q: Dalcahue-Quinchao; D-H: Dalcahue-Hudson; C-L: Castro-Lemuy; L-Y: Lemuy-Yal; C-Q: Compu-Queilen; Q-L: Quellón-Laitec; H-C: Hornopirén-Comau).

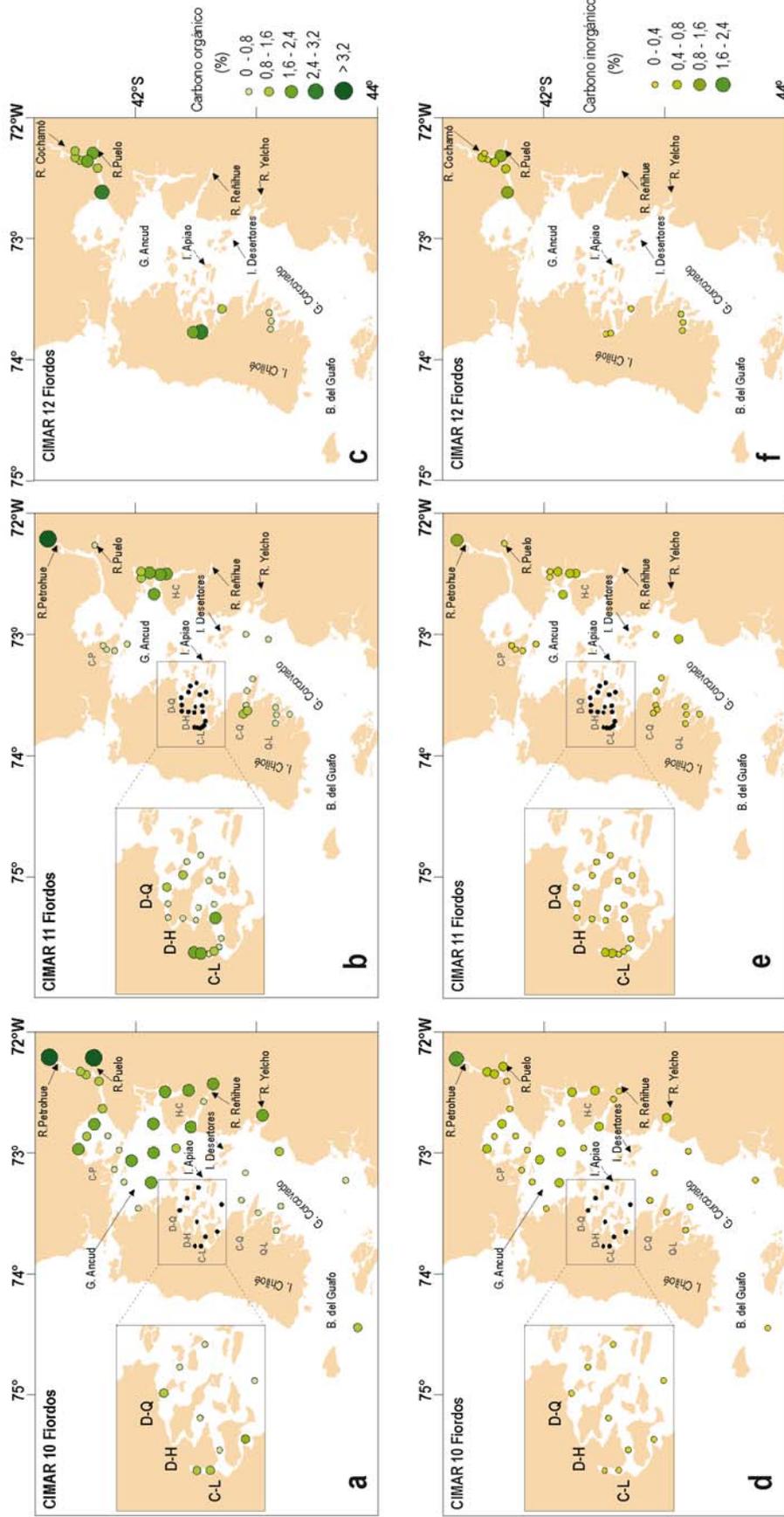


Figure 3. Distribución horizontal de carbono orgánico (%) del sedimento superficial (0-3 cm), de la zona Puerto Montt a Boca del Guafo para: a) CIMAR 10 Fjordos, b) CIMAR 11 Fjordos, c) CIMAR 12 Fjordos y distribución horizontal de carbono inorgánico (%) para: d) CIMAR 10 Fjordos, e) CIMAR 11 Fjordos y f) CIMAR 12 Fjordos. (C-P: Calbuco-Pilolcura; D-Q: Dalcahue-Quinchao; D-H: Dalcahue-Hudson; L-Y: Lemuy-Yai; C-Q: Compu-Queilen; Q-L: Quellón-Laitec; H-C: Hornopirén-Comau).

Figure 3. Horizontal distribution of organic carbon in the surface sediment (0-3 cm), from Puerto Montt to Boca del Guafo for: a) CIMAR 10 Fjordos, b) CIMAR 11 Fjordos, c) CIMAR 12 Fjordos and horizontal distribution of inorganic carbon (%) for: d) CIMAR 10 Fjordos, e) CIMAR 11 Fjordos and f) CIMAR 12 Fjordos cruises. (C-P: Calbuco-Pilolcura; D-Q: Dalcahue-Quinchao; D-H: Dalcahue-Hudson; L-Y: Lemuy-Yai; C-Q: Compu-Queilen; Q-L: Quellón-Laitec; H-C: Hornopirén-Comau).

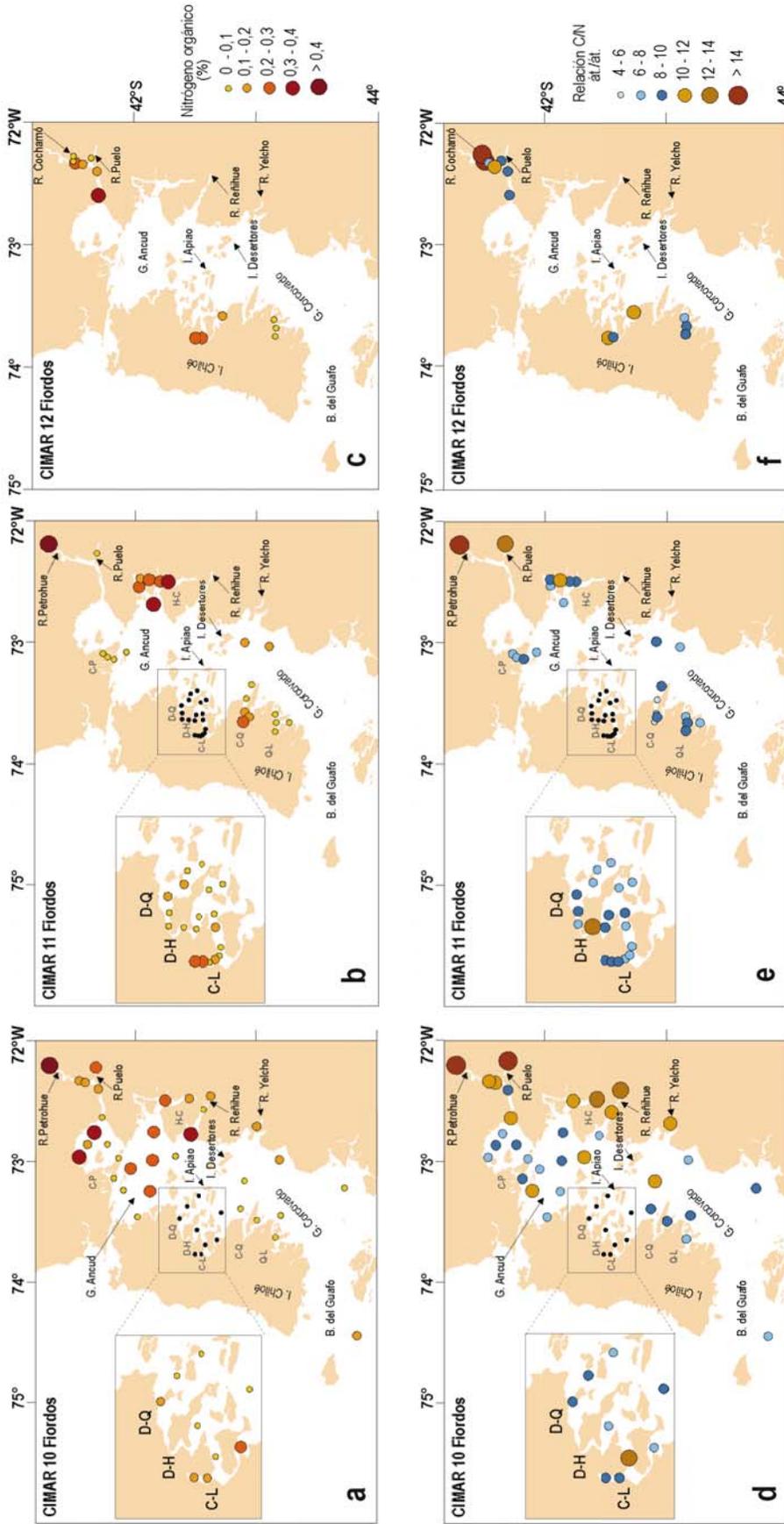


Figura 4. Distribución horizontal de nitrógeno orgánico (%) del sedimento superficial (0-3 cm), de la zona Puerto Montt a Boca del Guafo para: a) CIMAR 10 Fjords, b) CIMAR 11 Fjords, c) CIMAR 12 Fjords y distribución horizontal de la relación C:N ($\mu\text{g-át C-g}^{-1} / \mu\text{g-át N-g}^{-1}$) para: d) CIMAR 10 Fjords, e) CIMAR 11 Fjords y f) CIMAR 12 Fjords. (C-P: Calbuco-Pilolcura; D-Q: Dalcahué-Quinchao; D-H: Dalcahué-Hudson; C-L: Castro-Lemuy; L-Y: Lemuy-Yal; C-Q: Compu-Queilen; Q-L: Quellón-Laitec; H-C: Hornopirén-Comau).

Figure 4. Horizontal distribution of organic nitrogen (%) in the surface sediment (0-3 cm), from Puerto Montt to Boca del Guafo zone: a) CIMAR 10 Fjords, b) CIMAR 11 Fjords, c) CIMAR 12 Fjords and horizontal distribution of the C:N ratio ($\mu\text{g-at C-g}^{-1} / \mu\text{g-at N-g}^{-1}$) for: d) CIMAR 10 Fjords, e) CIMAR 11 Fjords and f) CIMAR 12 Fjords cruises. (C-P: Calbuco-Pilolcura; D-Q: Dalcahué-Quinchao; D-H: Dalcahué-Hudson; C-L: Castro-Lemuy; L-Y: Lemuy-Yal; C-Q: Compu-Queilen; Q-L: Quellón-Laitec; H-C: Hornopirén-Comau).

los canales orientales de la isla de Chiloé y de los fiordos occidentales de Chiloé continental. Los resultados obtenidos en estos cruceros son, en general, coincidentes con los de C1F, confirmando la zonación propuesta por Silva *et al.* (1998). Un análisis más detallado de la concentración de C-inorg indicó que éste también presenta una zonación similar a la de MOT, C-org y N-org, con las mayores concentraciones (C-inorg > 0,4%) ubicadas preferentemente en la zona al norte del grupo de islas Deserto-Apio-Quehui-Lemuy y las menores concentraciones (C-inorg < 0,4%) ubicadas preferentemente al sur de ellas, lo cual no fue detectada por los autores anteriores.

De acuerdo a Silva *et al.* (1998), la segregación observada en la distribución horizontal de la composición química orgánica general de los sedimentos superficiales en el área de estudio puede ser explicada sobre la base de la presencia/ausencia de condiciones estuarinas, comparativamente altas biomasa de fitoplancton y zooplancton, aporte de material orgánico terrígeno desde la zona continental e insular adyacente, intensidad de las corrientes, presencia de microcuencas profundas y/o pasos estrechos y someros.

En el caso de las condiciones estuarinas, éstas prevalecen al norte de la constricción-umbral formado por el grupo de las islas Deserto-Apio-Quehui-Lemuy, donde se presenta una columna de agua fuertemente estratificada en los primeros 20-30 m, debido a la confluencia de agua de mar proveniente del océano adyacente y de agua dulce aportada por escurrimiento costero y ríos continentales (Silva *et al.*, 1997). El mar aporta principalmente fosfato y nitrato a la zona estuarina, mientras que los ríos de la zona aportan principalmente el silicato (Silva, 2006), lo cual genera condiciones que favorecen la proliferación de fitoplancton.

Por otra parte, es ampliamente conocido que existe una relación directa entre la materia orgánica particulada depositada en el piso marino de la zona costera y la intensidad de los procesos productivos que ocurren en la columna de agua (Wassmann, 1984). La mayor productividad de una zona va a estar asociada con un mayor aporte de material orgánico autóctono al sedimento y por lo tanto con un aumento en la concentración de la composición química orgánica general.

Las mediciones de clorofila *a*, integrada entre 0 y 25 m, realizadas en el muestreo de primavera de C1F (1995) (Ramírez & Pizarro, 2006), en las etapas de invierno de C10F (2004), invierno y primavera de C11F (2005) (Montecino *et al.*, 2009) y de invierno y primavera de C12F (2006) (H. González, *com. pers.*),

indican que las mayores concentraciones (> 100 mg m⁻²), se ubicaron preferentemente en la zona de seno Reloncaví y golfo Ancud (zona norte), mientras que las menores concentraciones (< 100 mg m⁻²), se ubicaron, preferentemente en la zona golfo Corcovado (zona sur). Escapó a este patrón general, el muestreo de primavera de C10F, donde la situación se invirtió y las mayores concentraciones se ubicaron preferentemente en la zona sur (Montecino *et al.*, 2009). De los siete muestreos de clorofila *a* realizados, en seis de ellos se observó que el patrón de concentración de clorofila *a*, fue mayor en la zona norte y menor en la zona sur, lo cual implica que ésta es la situación prevaleciente en la zona, lo cual concuerda con el patrón de mayor abundancia de componentes orgánicos observados en el sedimento superficial durante C1F (Silva *et al.*, 1998) y C10 a 12F (Figs. 2d-2f, 3a-3c y 4a-4c).

En la zona norte existen tres microcuencas que superan los 300 m de profundidad compuestas por los golfos de Reloncaví y Ancud, y esteros Reloncaví, Hornopirén y Comau (Rodrigo, 2008), las cuales tienen un intercambio restringido con la zona oceánica adyacente a través de constricciones-umbrales generalmente someros y estrechos. Estas constricciones-umbrales restringen el flujo libre de las corrientes marinas, lo que favorece que estas microcuencas actúen como “trampas de sedimentos”, aumentando la retención del material fino orgánico en el piso marino. Esto se manifiesta en la textura limo-arcillosa y los altos valores de la componente química orgánica del sedimento de estas microcuencas (Figs. 2a-2f, 3a-3c y 4a-4c).

Pese a que los resultados de C1F mostraron que la zona norte tiene concentraciones preferentemente altas en la composición química orgánica general (Silva *et al.*, 1998), el muestreo intensivo de algunos canales costeros insulares y continentales realizados durante C10F y C11F, mostró desviaciones de este patrón. Los canales de las minisecciones C-P, D-Q y D-H, ubicados en la zona norte, presentaron en general concentraciones menores de las esperadas, ya que ellas fueron preferentemente bajas (Figs. 2d-2f, 3a-3c y 4a-4c). Esta situación no fue detectada en C1F debido al escaso y en ocasiones nulo, muestreo realizado en estos canales.

La característica que presenta la mayor diferencia entre estos canales costeros y, los golfos y senos de la zona norte, corresponde a las relativamente bajas profundidades que presentan los primeros, las que fluctúan entre 20 y 100 m en el centro, mientras que los segundos suelen superar los 300 m en el centro. Ello hace que el fondo de los canales costeros sea afectado por las corrientes de la zona, que son domi-

nadas por las mareas que en algunos lugares alcanzan amplitudes de 3 a 5 m (SHOA, 2007). En el caso de las corrientes, en algunos lugares, como por ejemplo la bahía Quellón donde Cáceres *et al.* (2008), han registrado magnitudes residuales sobre 10 cm s^{-1} , con máximos de 19 cm s^{-1} . Estas corrientes dificultan la deposición de material fino ya sea resuspendiéndolo y/o trasladándolo fuera de la zona de ingreso (material alóctono) o de producción (material autóctono). Por lo tanto, en los lugares más someros se acumulan preferentemente arenas y/o gravas, como se encontró en la mayoría de los canales costeros (Figs. 2a-2c).

Silva *et al.* (1998), mostraron una relación inversa entre el tamaño de las partículas del sedimento de la zona y su contenido de componentes orgánicos, donde la fracción fina limo-arcillosa presenta, en general, mayor contenido de compuestos orgánicos. Las minisecciones C-P, D-H, parte de C-L y Q-L tienen mayoritariamente sedimento tipo arenoso y contenido orgánico bajo. Esto sería el resultado de la acción de las corrientes de marea en estos canales, que son relativamente someros y algunos casos con dos o más extremos abiertos en varias direcciones, lo que facilita el transporte de partículas finas en suspensión fuera de ellos durante las fases de llenante y vaciante de las mareas. Esto dificulta la deposición de las fracciones limo-arcillosas del sedimento en estos canales costeros, que generalmente son más ricos en material orgánico.

Las dos estaciones de la cabeza de la minisección C-L, escapan al patrón general anterior ya que sus contenidos orgánicos son altos (Figs. 2d-2f, 3b-3c y 4b-4c). Esto se debería a que en la cabeza se recibe el aporte de material terrígeno transportado por escurrimiento costero local y a que este canal termina en una cabeza o “fondo de saco”, donde la marea permitiría que el material mantenga un movimiento de vaivén pudiendo decantar. Esto está en concordancia con la textura limo-arcillosa predominante en estas dos estaciones (Figs. 2a-2b).

Las comparativamente bajas concentraciones de MOT, C-org y N-org de los sedimentos superficiales de la zona al sur de la constricción-umbral formado por el grupo de las islas Desertores-Apiáo-Quehui-Lemuy, se debería a que está más expuesta a la influencia de la zona oceánica adyacente a través de la Boca del Guafo, que es profunda y amplia (profundidad mínima en el centro $\approx 150 \text{ m}$, ancho mínimo $\approx 66 \text{ km}$), facilitando la presencia de condiciones de tipo oceánico ingresen al golfo Corcovado. En esta zona el viento y las intensas corrientes locales facilitan la mezcla vertical y la inestabilidad de la columna de agua (Silva *et al.*, 1997), lo que genera condiciones menos favorables

que la zona norte para la proliferación del plancton. A su vez, las corrientes favorecen que el material fino que decanta en el golfo Corcovado sea transportado fuera éste, lo cual se refleja en la presencia de sedimento mayoritariamente arenoso (Figs. 2a y 2b).

La acción de los procesos antes señalados, presencia/ausencia de: condiciones estuarinas; altas biomásas de plancton; aporte terrígeno; corrientes y mareas intensas; presencia de microcuencas profundas y/o pasos estrechos y someros; ya sea en forma individual o conjunta, favorecen que el contenido orgánico del sedimento de una zona particular puede presentar, en general, concentraciones menores.

Procedencia del sedimento: proporción C:N

La proporción C:N para fitoplancton marino es de 6,6 (Redfield *et al.*, 1963) y en el sedimento marino fresco varía entre 7 y 10 (Rullkötter, 2000), mientras que en las plantas terrestres es mayor de 20 (Deevy, 1973). Debido a esto, es posible utilizar la proporción C:N como un “proxy” para inferir, en una primera aproximación, la posible procedencia del material que compone el sedimento. En el caso de los sedimentos de la zona, de acuerdo a los valores individuales de las diferentes estaciones, estos corresponden a sedimentos marinos frescos, ya que los valores C:N, en general, fluctuaron entre 6 y 10 con un CV de 17-18% (Tabla 1, Figs. 4d-4f). Una situación similar observó Silva *et al.* (1998), para los sedimentos superficiales de la zona sobre la base de las muestras tomadas en C1F.

La relación C:N en el sedimento de muestras terrígenas, tomadas a los costados de los ríos, fue superior a 10 alcanzando hasta 18 con un CV de 22% (Tabla 2, Figs. 4d-4f), resultante de la presencia de material orgánico de plantas terrestres. Este material es introducido por el río en la zona costera, donde sedimenta mayoritariamente en sectores cercanos a sus desembocaduras.

En 15 estaciones marinas, esteros Reloncaví (4), Hornopiren-Comau (4), Castro (1), Dalcahue (1) y Lemuy (1); golfos Ancud (2) y Corcovado (1); y canal Yal (1), la razón C:N del sedimento fluctuó entre 10 y 14 (Figs. 4d-4f). Estos valores de C:N pueden ser tomados, en una primera aproximación, como evidencia que estas estaciones tienen, además del aporte autóctono marino local, una componente terrígena importante.

La utilización de la proporción C:N como un “proxy” para estimar la procedencia del sedimento debe ser considerada con cautela, ya que en la medida que el material orgánico decanta hacia el fondo o se entierra, puede sufrir degradación preferencial de nitrógeno (Burdige & Martens, 1988; Jørgensen,

1996). Esta degradación aumenta parcialmente el valor C:N, alterando parcialmente la señal que esta relación entrega respecto al origen de la materia orgánica. Sin embargo, debido a que la zona no es demasiado profunda y que las muestras marinas son superficiales (2-3 cm), el tiempo de acumulación debería ser corto, alrededor de 7 a 10 años, asumiendo que la tasa de sedimentación promedio de alrededor de 0,27 cm año⁻¹ estimada mediante ²¹⁰Pb para la zona de Aysén (Rojas, 2002; Salamanca & Jara, 2003; Sepúlveda *et al.*, 2005), también es válida para la zona de las aguas interiores de Chiloé.

Por lo tanto, es factible esperar que el sedimento no esté demasiado degradado y de acuerdo a lo propuesto por Rullkötter (2000), los valores C:N de la mayoría de las muestras marinas estarían dentro del intervalo considerado como sedimentos con material orgánico de origen marino fresco (C:N = 7-10), con la excepción de aquellas cercanas a la cabeza de los esteros continentales y algunos canales insulares, donde el aporte terrígeno es importante (C:N > 10).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Hacienda, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y al Comité Oceanográfico Nacional (CONA), por el financiamiento parcial de los proyectos CONA-C10F 04-17, CONA-C11F 05-19 y CONA-C12F 06-09. También desean agradecer a: Comandantes y dotaciones del AGOR Vidal Gormaz de los cruceros CIMAR 10, 11 y 12 Fiordos, Francisco Gallardo, Jasna Haro y Nora Rojas, por su cooperación en el muestreo y a Paola Reinoso y Carolina Gallardo por su trabajo en el muestreo abordo y por los análisis químicos de las muestras.

REFERENCIAS

- Borgel, R. 1970-1971. Geomorfología de las regiones australes de Chile. *Rev. Geogr. Chile Terra Australis*, 20: 135-140.
- Brattström, H. & E. Dahl. 1951. Reports of the Lund University. Chile expedition 1948-1949. I general account, list of stations, hydrography. *Lunds Universitets*, 88 pp.
- Burdige, D.J. & C.S. Martens. 1988. Biogeochemical cycling in an organic-rich coastal marine basin: 10. The role of amino acids in sedimentary carbon and nitrogen cycling. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 1571-1584.
- Byers S., E. Mills & P. Stewart. 1978. A comparison of methods of determining organic carbon in marine sediments, with suggestions for a standard method. *Hidrobiología*, 58(1): 43-47.
- Cáceres, M., A. Valle-Levinson & M. Bello. 2008. Residual flow over a bump in Quellón Bay. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 43(3): 629-639.
- Deevy, E. 1973. Sulfur, nitrogen and carbon in the biosphere. In: G.M. Woodwell & E.V. Peacan (eds.). *Carbon and the biosphere*. USAEC, Washington D.C., pp. 182-190.
- Jorgensen, B. 1996. Material flux in the sediment. In: B. Jorgensen & K. Richardson (eds.). *Coastal and estuarine studies*. American Geophysical Union, pp. 115-135.
- Montecino, V., P. Uribe, D. Soto, H. González, J. Riveros, G. Alarcón, S. Giglio, V. Martínez & M.A. Paredes. 2009. Bio-óptica y diversidad de tamaños del fitoplancton del mar interior de Chile: variabilidad espacial en invierno-primavera 2004 y 2005. *Cienc. Tecnol. Mar*, 32(2): in press.
- Pickard, G. 1971. Some physical oceanographic features of inlets of Chile. *J. Fish. Bd. Can.*, 28: 1077-1106.
- Pickard, G & B. Stanton, 1980. *Pacific fjords a review of the water characteristics*. Plenum Press, New York, pp. 1-51.
- Ramírez, B. & M. Pizarro. 2006. Distribución de clorofila *a* y feopigmentos en los canales australes chilenos comprendidos entre Puerto Montt y laguna San Rafael, Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 28(1): 45-62.
- Redfield, A., B. Ketchum & F. Richards. 1963. The influence of organism on the composition of sea water. In: M. Hill (ed.). *The Sea*. Interscience, New York, pp. 26-76.
- Rodrigo, C. 2008. Submarine topography in the Chilean North Patagonian channels. In: N. Silva & S. Palma (eds.), *progress in the oceanographic knowledge of Chilean inner waters, from Puerto Montt to Cape Horn*. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso pp. 19-23.
- Rojas, N. 2002. Distribución de materia orgánica, carbono y nitrógeno, y diagénesis temprana en sedimentos de la zona de canales australes entre los golfos Corcovado y Elefantes, Chile. Tesis de Oceanografía. Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 80 pp.
- Rullkötter, J. 2000. Organic matter: the driving force for early diagenesis. In: H.D. Schulz & M. Zabel (ed.). *Marine geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 129-172.
- Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA). 2006. *Gráfico - 4 1995 2005.pdf*. www.sernapesca.cl/in-

- dex.php?option=com_remository&Itemid=54&func=select&id=146. Revised: 17 February 2009.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). 2007. Gráficos y estadísticas de temperaturas superficiales y nivel del mar de estaciones ambientales costeras. www.shoa.cl/cendocjsp/index.jsp. Revised: 12 April 2008.
- Salamanca, M. & B. Jara. 2003. Distribución y acumulación de plomo (Pb y ^{210}Pb) en sedimentos de los fiordos de la XI Región. Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 26(2): 61-71.
- Sepúlveda, J., S. Pantoja, K. Hughen, C. Lange, F. González, P. Muñoz, L. Rebolledo, R. Castro, S. Contreras, A. Ávila, P. Rossel, G. Lorca, M. Salamanca & N. Silva. 2005. Fluctuations in export productivity over the last century from sediments of a southern Chilean fjord (44°S). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 65: 587-600.
- Silva, N. 2008. Dissolved oxygen, pH, and nutrients in the austral Chilean channels and fjords. In: N. Silva & S. Palma (eds.), *Progress in the oceanographic knowledge of Chilean inner waters, from Puerto Montt to Cape Horn*. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 37-43.
- Silva, N. & R. Prego. 2002. Carbon and nitrogen spatial segregation and stoichiometry in the surface sediments of southern Chilean inlets (41°-56°S). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 55: 763-775.
- Silva, N., C. Calvete & H. Sievers. 1997. Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero CIMAR Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 20: 23-106.
- Silva, N., J. Maturana, J.I. Sepúlveda & R. Ahumada. 1998. Materia orgánica, C y N, su distribución y estequiometría, en sedimentos superficiales de la región norte de los fiordos y canales australes de Chile (Crucero CIMAR Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21: 49-74.
- Walton, H.F. 1970. *Principios y métodos de análisis químico*. Reverté Mexicana, México, 225 pp.
- Wassmann, P. 1984. Sedimentation and benthic mineralization of organic detritus in a Norwegian fjord. *Mar. Biol.*, 83: 83-94.
- www.chile.com. 2009. www.chile.com/tpl/articulo/detalle/ver.tpl?cod_articulo=06. Revised: 10 June 2008.

Received: 27 February 2008; Accepted: 20 July 2009

