

Research Article

Variabilidad espacial y temporal de la materia orgánica sedimentaria, asociada a la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO), en un ambiente costero del norte de la corriente de Humboldt, bahía de Mejillones, Chile

Marcos Guíñez^{1,2}, Jorge Valdés¹ & Abdel Siffedine³

¹Laboratorio de Sedimentología y Paleoambientes, Instituto de Investigaciones Oceanológicas Facultad de Recursos del Mar, Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chile

²Programa de Doctorado de Ciencias Aplicadas, Mención Sistemas Marinos Costeros Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile

³UR055 Paleotropique, Institut de Recherche pour le Developpement, France

RESUMEN. Se analizó la variabilidad estacional y espacial de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) y su influencia sobre la composición del material orgánico que se deposita en los sedimentos de la bahía de Mejillones del Sur. Los resultados obtenidos indicaron que el límite superior de la ZMO fluctuó durante el año entre 20 y 45 m de profundidad. En verano este límite fluctuó entre 20 y 30 m, mientras que en invierno fluctuó entre 40 y 55 m. Los valores obtenidos del análisis de Rock-Eval, indicaron que la materia orgánica presente en los sedimentos más profundos (100 m) estaba mejor preservada, en comparación con el material más somero (35 m). Además este análisis permitió determinar que el sedimento depositado en la bahía era de origen marino fitoplanctónico (Tipo II) e inmaduro. La relación entre el azufre total y el carbono orgánico total mostró que la estación A (35 m) presentó valores entre 0,8 y 3,9% en comparación con las estaciones más profundas (70 y 100 m), con valores entre 5,7 y 10,3%. La relación C:N en los sedimentos presentó una variabilidad entre los periodos fríos y cálidos con valores promedio de 9,13 y 7,74 respectivamente y un máximo de 11 en invierno. Los resultados del ANDEVA indicaron que el oxígeno disuelto ($P < 0,001$), carbono total (C) ($P < 0,001$), nitrógeno total (N) ($P < 0,008$), carbono orgánico total (COT) ($P < 0,001$) y el índice de hidrógeno (IH) ($P < 0,019$) presentaron diferencias significativas en relación a la profundidad. Se encontró una relación entre la concentración de oxígeno disuelto y la conservación del material orgánico en los sedimentos, por lo tanto el material orgánico contenido en los sedimentos de mayor profundidad presentó una mayor preservación debido al efecto de la ZMO.

Palabras clave: preservación, materia orgánica, surgencia costera, sistemas marinos costeros, Chile, Pacífico, suroriental.

Spatial and temporal variability of the sedimentary organic matter associated with the Oxygen Minimum Zone (OMZ) in a coastal environment of the northern Humboldt Current, Mejillones Bay, Chile

ABSTRACT. This work analyzes the seasonal and spatial variability of the Oxygen Minimum Zone (OMZ) and its influence on the composition of the organic matter deposited on the bottom sediments of Mejillones Bay. The obtained results indicate that the upper limit of the OMZ fluctuated during the year between 20 and 45 m depth. In summer, this limit ranged from 20 to 30 m depth, whereas in winter it ranged from 40 to 55 m depth. According to a Rock-Eval analysis, the organic matter present in the deepest sediments (100 m) is better preserved than the shallow material (35 m). This analysis revealed that the sediment deposited in the bay is marine phytoplanktonic in origin (Type II) and immature. The ratio of total sulfur to total organic carbon ranges from 0.8 to 3.9% at station A (35 m) and from 5.7 to 10.3% at the deeper stations (70 and 100 m). The C:N ratio in the sediments varies between cold and warm periods, with respective averages of 9.13 and 7.74 and a wintertime peak of 11%. The ANDEVA results indicate that the dissolved oxygen ($P < 0.001$), total carbon (C) ($P < 0.001$), total nitrogen (N) ($P < 0.008$), total organic carbon (TOC) ($P < 0.001$), and hydrogen index (HI) (mg HC g COT-1) ($P < 0.019$) differ significantly by depth. The dissolved oxygen concentration

was found to be related to the conservation of organic matter in the sediments: the organic matter in the deeper sediments was preserved better due to the effect of the OMZ.

Keywords: preservation, organic matter, coastal upwelling, coastal marine system, Chile, southeastern, Pacific.

Corresponding author: Marcos Guíñez (mguinez@uantof.cl)

INTRODUCCIÓN

El material orgánico acumulado en los sedimentos marinos puede registrar en su estructura y composición las fluctuaciones de la productividad primaria, las variaciones del contenido de oxígeno disuelto de la columna de agua, velocidad de sedimentación, aporte continental, etc. Al respecto, Wakeham & Lee (1993) indican que la materia orgánica presente en la columna de agua y que finalmente es acumulada en los sedimentos marinos, está compuesta por material orgánico autóctono y alóctono que es sometido a una intensa degradación durante su descenso por la columna de agua y sólo una pequeña fracción (< 10%) alcanza el piso marino. Pantoja *et al.* (2004) indican que el material particulado que sedimenta presenta una mayor degradación en los estratos superficiales (zona fótica), en comparación con los estratos más profundos y que además ciertos compuestos, como las proteínas, no presentan grandes diferencias en su potencial de degradación a distintas profundidades. Entre los factores que influyen en la composición, cantidad, distribución y preservación de los restos orgánicos está la productividad primaria, profundidad, contenido de oxígeno disuelto en la columna de agua, tasa de sedimentación, bioperturbación y absorción de materia orgánica en las fases minerales (Stein, 1990; Hartnett *et al.*, 1998; Hulthe *et al.*, 1998). Todas estas condiciones se pueden observar en los sistemas de surgencia costera, los cuales son de gran importancia en el océano, porque permiten la renovación de aguas superficiales, donde el contenido de nutrientes disminuye significativamente debido a la productividad primaria (Jorgensen *et al.*, 1990). El alto flujo de material orgánico, la deficiencia de oxígeno disuelto y escasez de fauna bentónica que caracteriza a los ambientes de surgencia, favorece la preservación de material orgánico en los sedimentos de fondo (Milessi *et al.*, 2005). El material orgánico que cae hacia los sedimentos juega un rol importante en el ciclo global del carbono, principalmente por la exportación de carbono orgánico biológicamente fijado hacia aguas más profundas, donde se acumula en los sedimentos. Esta exportación de materia orgánica, tiene como consecuencia que la concentración de oxígeno disuelto disminuya

rápida con la profundidad, condición que limita los procesos de degradación y favorece la preservación de restos biogénicos (Lazarus *et al.*, 2006).

Mejillones del Sur (23°S), es una bahía orientada hacia el norte, ubicada a orillas del desierto de Atacama, que es el más seco del planeta. Esta bahía es parte del centro de surgencia de punta Angamos, localizado en la zona norte del Sistema de la Corriente de Humboldt (Marín *et al.*, 1993). Al interior de la bahía de Mejillones se distinguen tres masas de agua; Agua Superficial Subtropical (ASST), Agua Superficial Subantártica (ASSA) y Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS), que presentan diferentes grados de mezcla durante el año (Valdés *et al.*, 2006). En esta bahía se han registrado valores de producción primaria media de 3170 mg C m⁻² d⁻¹ y alta diversidad zooplanctónica (Palma & Apablaza, 2004). Las condiciones físicas de la columna de agua (temperatura, salinidad y contenido de oxígeno disuelto), presentan una variación estacional representada por un período frío (otoño-invierno) y otro cálido (primavera-verano), donde se observan las variaciones típicas de temperatura y concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua (Avaria & Muñoz, 1982; Rodríguez & Escribano, 1996).

Mejillones se encuentra bajo la influencia de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) que se extiende desde el sur de Perú hasta el centro de Chile y se ubica entre 60 y 500 m de profundidad frente a la costa de Mejillones (Strub *et al.*, 1998). Al interior de la bahía de Mejillones, se han registrado valores de oxígeno disuelto inferiores a 1 mL L⁻¹ a partir de 50 m de profundidad (Navea & Miranda, 1980; Escribano, 1998), mientras que desde 60 a 80 m, estos valores son menores a 0,1 mL L⁻¹, dependiendo de la época del año (Valdés *et al.*, 2004b). Debido a que la profundidad máxima de la bahía es de 110 m, gran parte del ambiente de fondo se encuentra bajo la influencia de la ZMO.

En esta bahía se ha realizado una serie de estudios sobre la composición y estructura de los sedimentos marinos submareales, los cuales sugieren que los sedimentos acumulados en la bahía muestran claras evidencias del predominio de condiciones subóxicas/anóxicas dominantes en el ambiente de depositación al

menos en el último milenio (Ortlieb *et al.*, 2000; Valdés *et al.*, 2001, 2005; Valdés, 2004; Vargas 2002; Vargas *et al.*, 2004). Valdés *et al.* (2000, 2004b) señalan que aunque los datos geoquímicos y petrográficos sugieren un origen similar para el material orgánico. Este material estaría influenciado por la descomposición a la cual es sometido en su paso por la columna de agua y en la interface agua-sedimento. Sin embargo, estos trabajos han sido realizados solo en ambientes con baja concentración de oxígeno disuelto, lo cual no permite evaluar la composición del sedimento en relación a los diferentes ambientes de depositación dentro de la bahía y como consecuencia, no se puede establecer la relación entre la composición del material orgánico sedimentable y la ZMO. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la concentración de oxígeno disuelto sobre la cantidad, calidad y preservación de la materia orgánica sedimentable, sobre la base de una comparación entre diferentes periodos (estival e invernal) y distintos ambientes de depositación localizados al interior de la bahía de Mejillones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras de sedimento fueron colectadas durante la época estival (16 enero de 2003) e invernal (24 julio de 2003) en el área central de la bahía de Mejillones, a tres profundidades: 35 m (estación A), 70 m (estación B) y 100 m (estación C) (Fig.1). Para ello, se utilizó nucleador de caja (box corer) de 225 cm² de superficie de muestreo, con el cual se colectaron los primeros 5 mm de sedimento superficial. Posteriormente, los sedimentos fueron depositados en recipientes plásticos y secados a 40°C hasta llegar a peso constante. Adicionalmente, en cada uno de los puntos se registró quincenalmente entre octubre de 2002 y diciembre de 2003, la temperatura y el contenido de oxígeno disuelto de la columna de agua con un CTDO Sea Bird Plus 19. Para la calibración del sensor de oxígeno disuelto, las mediciones de CTDO se compararon con los lances de una sonda ISY 6600 previamente calibrada en laboratorio contra el método de Winkler. La concentración de clorofila-*a* al interior de la bahía, se obtuvo desde imágenes satelitales SeaWiFS procesadas con el programa ENVI 3.4 (www.ocean-color.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/).

Las muestras de sedimento fueron analizadas mediante pirolisis programada Rock-Eval 6, utilizando 100 mg de sedimento seco. El procedimiento analítico consideró la calcinación de la muestra a temperaturas desde 100 hasta más de 850°C al interior de una atmósfera de Helio o Nitrógeno, y la adición de CO₂ cuando el análisis alcanzó 400°C (Lafargue *et al.*,

1998). Este método permite obtener los siguientes parámetros: Carbono Orgánico Total (COT), Índice de Hidrógeno (IH) en mg HC/g COT, Temperatura de pirolisis máxima (Tmax) e Índice de Oxígeno (IO) en mg CO₂/g COT. Cada uno de estos parámetros aporta información sobre la cantidad, calidad y estado de preservación de la materia orgánica sedimentaria.

Adicionalmente, se utilizó un analizador elemental CHNS para cuantificar la composición elemental (Carbono, Nitrógeno y Azufre) de los sedimentos, los cuales se expresaron como porcentaje de la fracción seca. Para esto se pesó menos de 1 mg de muestra, que luego fue sometida a temperaturas entre 1200 y 1800°C durante el análisis. Para su calibración se utilizó ácido sulfanílico (C₆H₇NO₃S) suprapur (Merck) como estándar. También se calculó el índice de sulfato reducción (ISR) utilizando la siguiente fórmula $ISR = (TOC + (ST/1,33))/TOC$ (Lallier-Vergés *et al.*, 1993), donde TOC es el carbono orgánico total y ST es la concentración de azufre total. Este índice permite relacionar la materia orgánica metabolizable con la reducción de sulfato que ocurre en los sedimentos. Cuando los valores de este índice aumentan y los valores de TOC disminuyen, significa que toda la materia orgánica metabolizable ha sido degradada por acción bacteriana (Bertrand *et al.*, 1994).

La exploración de datos y el análisis estadístico se efectuó con el programa Minitab 14. Para determinar la normalidad de los datos se realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov y se evaluó la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de F. Los datos fueron normalizados mediante la transformación Log (x). Luego de verificada la normalidad, se aplicó un ANDEVA de una vía para evaluar las diferencias significativas ($P < 0,05$), entre periodos (estivales e invernales) y entre las profundidades de muestreo.

RESULTADOS

Variabilidad de las condiciones oceanográficas

Los datos oceanográficos muestran que la ZMO presentó una variación estacional caracterizada por un límite superior localizado a mayor profundidad durante el periodo invernal (marzo a julio, ~45 m aprox.), mientras que durante el periodo estival (octubre a enero), tiende a ser más somero ~20 m aprox. (Fig. 2). El análisis de ANDEVA evidenció diferencias significativas ($P < 0,001$ y $P < 0,001$) para el oxígeno disuelto en las distintas profundidades y estaciones (Tablas 2 y 3). La concentración de clorofila-*a* en la capa de agua superficial presentó una variación similar, caracterizada por altas concen-

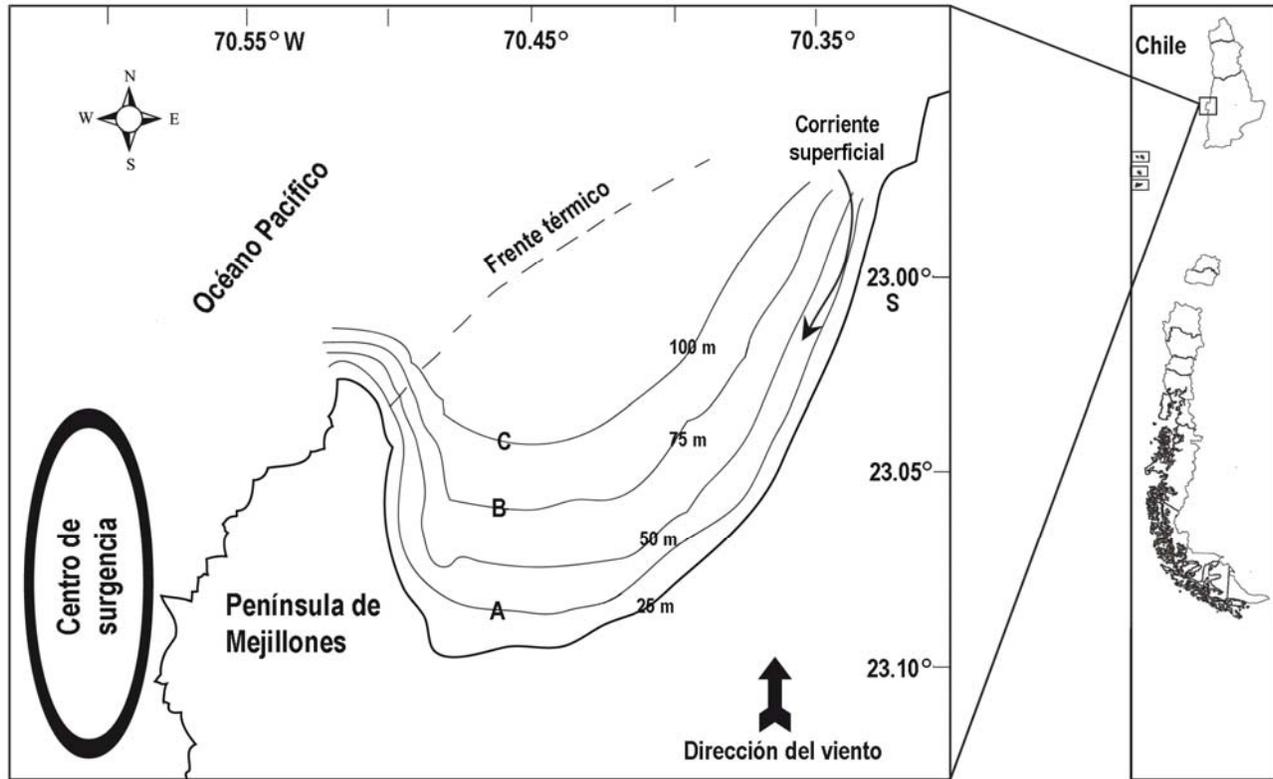


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos marinos en la bahía de Mejillones. Stations A (35 m), B (70 m) y C (100 m). La línea discontinua indica la posición del frente térmico que genera una "sombra de surgencia" en la bahía, según Marín *et al.* (2003). Los datos de clorofila se obtuvieron entre las estaciones A y C.

Figure 1. Localization of sampling stations in Mejillones bay. Stations A (35 m), B (70 m) and C (100 m). The dashed line corresponds to a thermal front responsible for an "upwelling shadow" in Mejillones bay, according to Marín *et al.* (2003). The chlorophyll data were taken between the stations A and B.

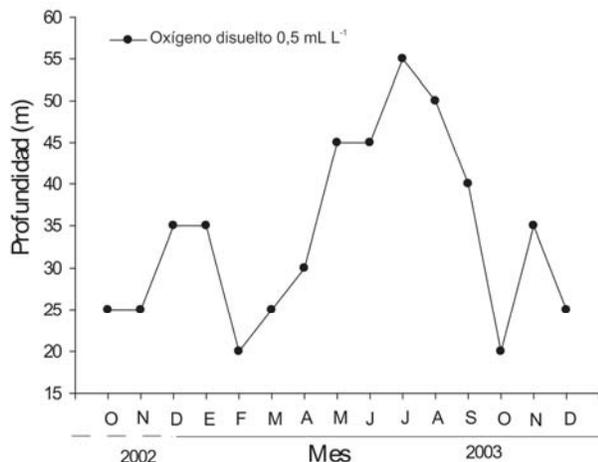


Figura 2. Profundidad de la isolínea de oxígeno disuelto de 0,5 mL L⁻¹, correspondiente al límite superior de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO).

Figure 2. Depth of the 0,5 mL L⁻¹ dissolved oxygen-isoline, corresponding to the upper limit of the Oxygen Minimum Zone (OMZ).

traciones durante el periodo estival (13,89 $\mu\text{g L}^{-1}$) y bajas en el periodo invernal (1,2 $\mu\text{g L}^{-1}$) (Fig. 3).

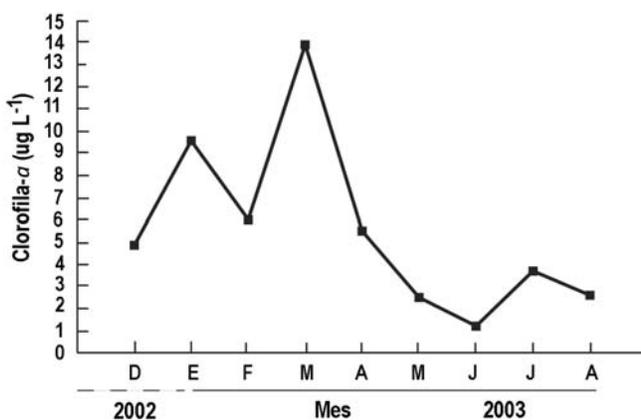
Análisis geoquímicos

Los valores de CT (carbono total) fluctuaron entre 1,48 y 13,9%, los de NT (nitrógeno total) variaron entre 0 y 1,26%, y los de ST (azufre total) entre 0 y 2,07% (Tabla 1). En todos los casos, la composición elemental (C, N, S) mostró una variación asociada al gradiente batimétrico, con valores bajos en la zona somera (estación A), aumentando hacia la zona más profunda (estación C). Esta característica fue similar en ambos periodos de muestreo (Figs. 4 y 5).

Los porcentajes de COT y temperatura máxima de pirolysis (Tmax) registraron los valores más bajos a 35 m, aumentando en profundidad (Tabla 1, Figs. 6a y 6d). Los valores entregados por IO sugieren que la MO en la estación A (35 m) presentó una mayor oxidación, con valores medios de 989,5 (mg CO₂/g COT), mientras que en la estación C (100 m)

Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables en estudio en relación a la profundidad.**Table 1.** Descriptive statistics of the studied variables in relation to depth changes.

Parámetros		Estaciones		
		A	B	C
Profundidad (m)		35	70	100
Rock Eval (pirolisis)				
COT: Carbono orgánico total (%)	Promedio	1,52	6,68	8,69
	DS	0,91	1,19	1,29
	Min	0,79	5,25	7,33
	Max	3,29	8,43	10,01
TMAX: Temperatura de pirolisis máxima (°C)	Promedio	378,62	428,52	440,20
	DS	70,62	26,48	38,63
	Min	285	407	398
	Max	473	473	475
IH: Índice de hidrógeno (mg HC/g COT)	Promedio	405,00	431,71	453,00
	DS	68,02	83,73	57,90
	Min	285	407	398
	Max	473	473	475
IO: Índice de oxígeno (mg CO ₂ /g COT)	Promedio	989,52	560,85	422,70
	DS	331,71	300	210,58
	Min	459	100	109
	Max	1367	816	554
Análisis elemental				
CT: Carbono total (%)	Promedio	2,46	8,35	10,06
	DS	0,92	1,68	2,29
	Min	1,48	5,60	8,08
	Max	4,22	10,4	13,90
NT: Nitrógeno total (%)	Promedio	0,12	0,53	0,75
	DS	0,10	0,32	0,38
	Min	0	0,11	0,33
	Max	0,39	1,03	1,26
ST: Azufre total (%)	Promedio	0,29	0,73	0,97
	DS	0,20	0,53	0,64
	Min	0	0,22	0,46
	Max	0,61	1,84	2,07

**Figura. 3.** Distribución mensual de la clorofila-*a* superficial en la bahía de Mejillones (Diciembre 2002-Agosto 2003).**Figure. 3.** Monthly distribution of the superficial chlorophyll-*a* in Mejillones bay (December 2002-August 2003).

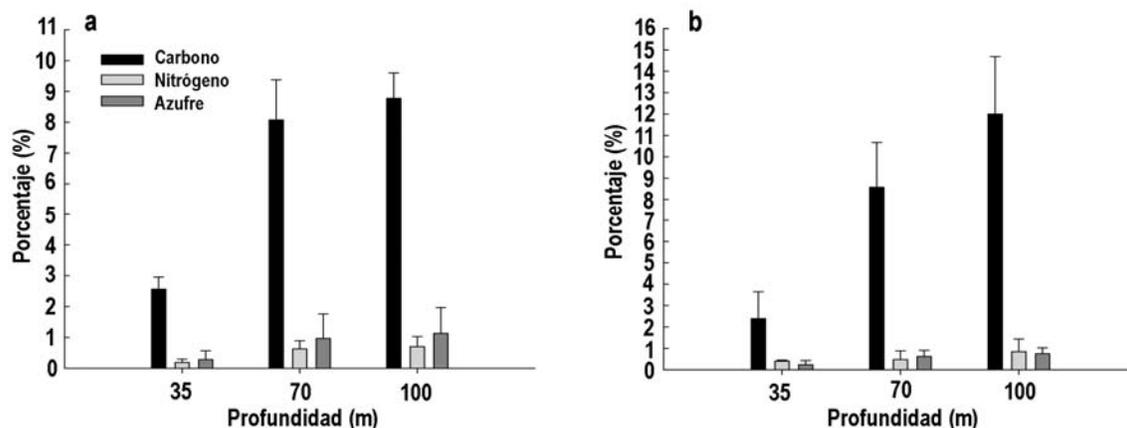


Figura 4. Distribución batimétrica del carbono total, nitrógeno total y azufre total en los distintos periodos de estudio. a) estival, b) invernal.

Figure 4. Bathymetric distribution of total carbon, total nitrogen and total sulfur in a) summer, and b) winter seasons.

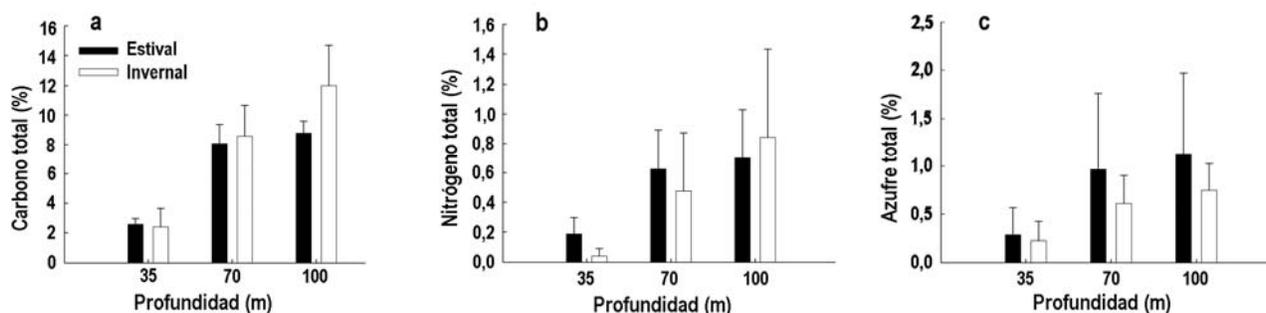


Figura 5. Variación de a) carbono total, b) nitrógeno total, y c) azufre total, en las profundidades y periodos en estudio.

Figure 5. Variability of a) total carbon, b) total nitrogen, and c) total sulfur, as related to depth seasons.

presentó valores de 422,7 mg CO₂/g COT (Tabla 1, Fig. 6c). Además el diagrama de Van Krevelen indicó que el sedimento al interior de la bahía es de origen marino, específicamente fitoplanctónico (Tipo II) y que la mayoría del material depositado es inmaduro (Figs. 7 y 8). El ISR calculado para la estación A presentó valores mayores en comparación con las estaciones B y C (Fig. 9). Los resultados del ANDEVA indicaron que CT ($P < 0,001$), NT ($P < 0,008$), COT ($P < 0,001$) e IH ($P < 0,019$) presentaron diferencias significativas en relación con la profundidad (Tabla 2). Por otra parte, el ANDEVA realizado para evaluar diferencias entre periodos (invernal-estival), sólo mostró diferencias significativas para el IH ($P < 0,022$) y el ISR ($P < 0,048$) (Tabla 3).

Al calcular la relación C:N en los sedimentos se encontró una variabilidad entre periodos (invernal-estival) con valores promedio de 9,13 y 7,74 respectivamente, mientras que el máximo valor para esta relación fue de 11 (invernal-estival). Sin embargo,

los resultados del ANDEVA no mostraron diferencias significativas entre periodos ni entre profundidades (Tabla 3).

DISCUSIÓN

Origen y estado de madurez de la materia orgánica sedimentaria en la bahía de Mejillones

Un parámetro que permite determinar el origen de la materia orgánica es la razón entre carbono y nitrógeno C:N. Scheffer & Schachtschabel (1984) indican que valores cercanos a 6 corresponden a materia orgánica de tipo marina. Estos valores pueden llegar a 10 cuando el detrito orgánico es descompuesto en la columna de agua, liberando los componentes ricos en proteínas (Niggeman *et al.*, 2007; Valdés *et al.*, 2004b; Ransom *et al.*, 1998). La razón C:N encontrada en los sedimentos de la bahía de Mejillones, entre 35 y 100 m de profundidad, varió entre 6 y 11, con lo cual se puede determinar que existe una degradación evidente del material orgánico a mayor profundidad,

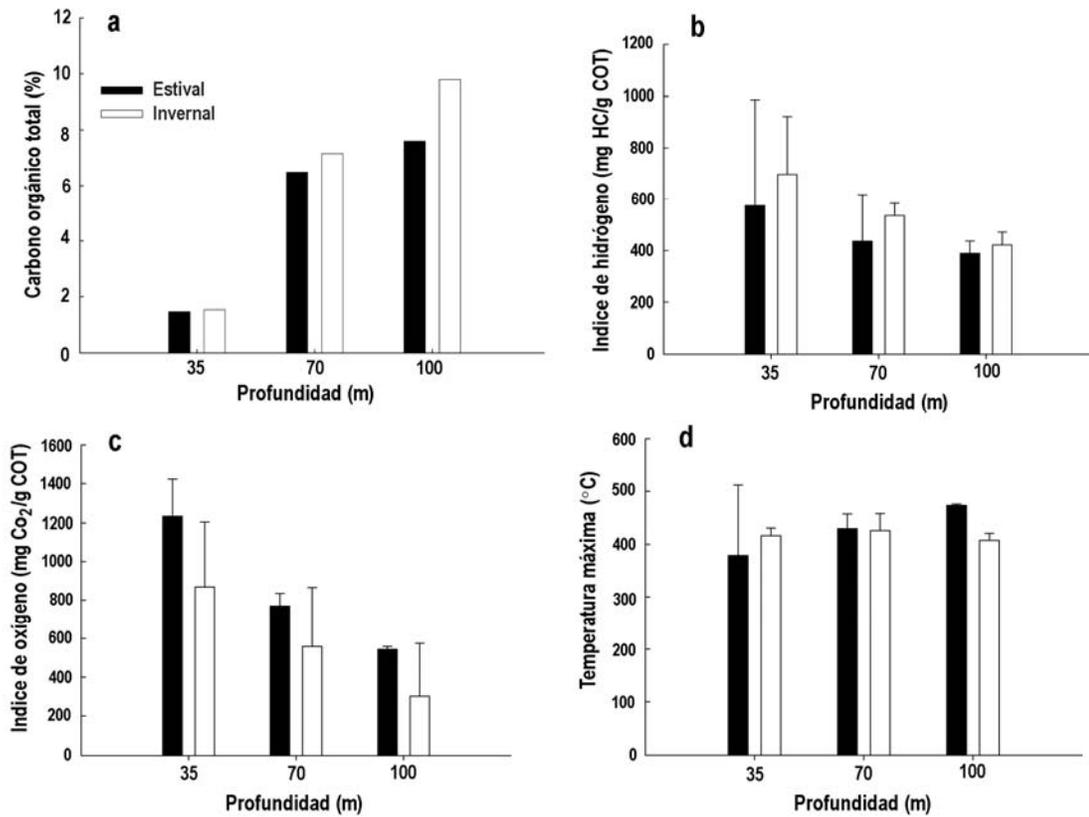


Figura 6. Análisis de Rock-Eval 6. a) Carbono orgánico total, b) índice de hidrógeno, c) índice de oxígeno, d) temperatura máxima de pirólisis en sedimentos de la bahía de Mejillones.

Figure 6. Rock-Eval 6 analysis. a) Total organic carbon, b) hydrogen index c), oxygen index, and d) maximum temperature of pyrolysis in sediments in Mejillones Bay.

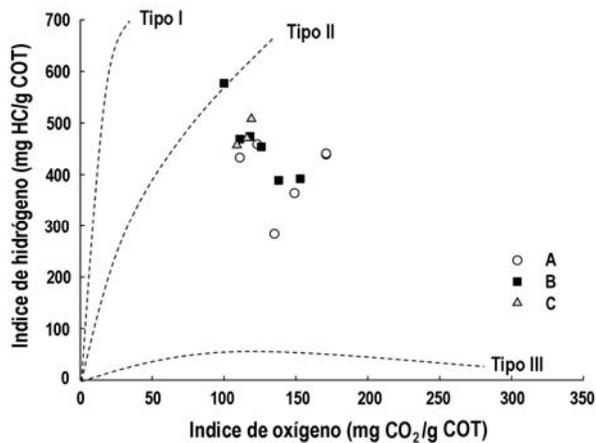


Figura 7. Diagrama de Van Krevelen del material orgánico colectado en las distintas estaciones (sedimentos).

Figure 7. Van Krevelen diagram. of the collected organic material in each station (sediments).

lo que puede ser explicado por la mayor distancia que deben recorrer las partículas en la columna de agua. Adicionalmente, esto indica una mejor preservación

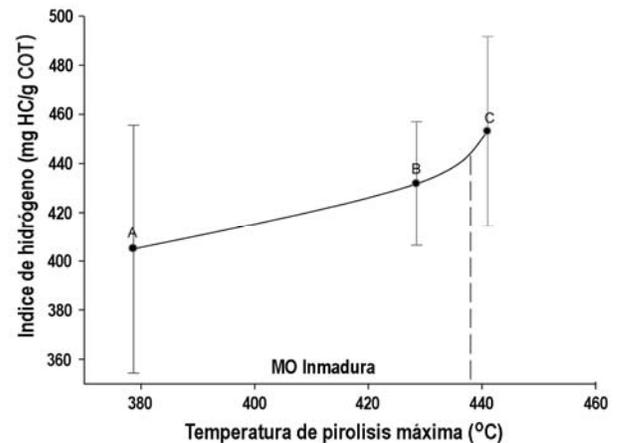


Figura 8. Diagrama de HI vs TMAX, indica el estado de madurez de la materia orgánica en las distintas estaciones. La línea discontinua indica que el valor límite de la materia orgánica inmadura (Lallier-Vergés *et al.*, 1993).

Figure 8. HI vs TMAX diagram, indicates the maturity state of the organic matter at the three studied stations, the dashed line indicates the organic matter maturity limit. (Lallier-Vergés *et al.*, 1993).

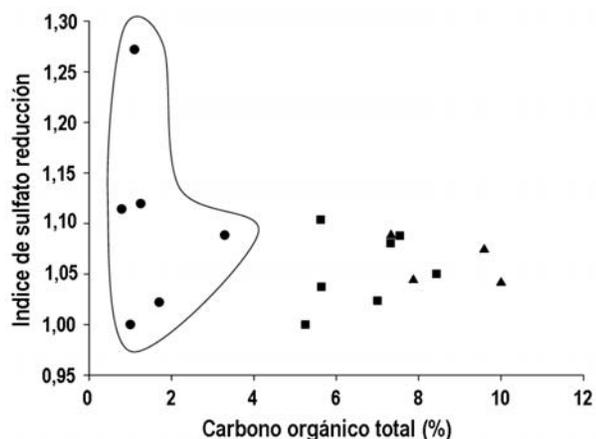


Figura 9. Índice de sulfato reducción vs carbono orgánico total. Los círculos, cuadrados y triángulos corresponden a las estaciones A, B y C respectivamente.

Figure 9. Sulphate reduction index vs total organic carbon. Circles, squares, and triangles correspond to station A, B and C, respectively.

en los sedimentos de los compuestos que comenzaron a ser degradados en las capas superficiales Niggemann *et al.* (2007) encontraron valores de C:N entre 8,6 y 12,0 en sedimentos submareales de la bahía de Mejillones a profundidades de 500 m. Todos estos valores de C:N en los sedimentos marinos de la zona costera y oceánica frente a Mejillones confirman que la materia orgánica sedimentaria es de origen marino (fitoplanctónico). De acuerdo a Niggemann *et al.* (2007), en esta zona, los valores de C:N de 5-7 encontrados en los sedimentos, corresponderían a MO rica en proteína asociada a producción nueva, mientras que valores cercanos a 12 indicarían una degradación preferencial de compuestos nitrogenados. No se determinaron diferencias significativas en los valores de C:N entre las distintas profundidades y periodos analizados (invernal-estival) (Tablas 2 y 3), debido a que la totalidad del material orgánico en los sedimentos de la bahía presenta un origen único, sin variabilidad estacional (Valdés *et al.*, 2004b).

Tabla.2. ANDEVA de una vía, aplicado a los resultados de los análisis geoquímicos y petrográficos, en sedimentos submareales al interior de la bahía de Mejillones. Los números con negrita indican diferencias significativas en relación con la profundidad.

Table 2. One way ANOVA, for the geochemical and petrographical analyses in subtidal sediments in the Mejillones bay. The numbers in bold indicate significant differences in relation to depth.

	O ₂	CT	NT	ST	COT	TMAX	HI	OI	ISR	C:N
F	13,49	37,37	6,81	2,88	57,02	0,82	2,93	5,37	1,01	0,99
P	0,001	0,001	0,008	0,087	0,001	0,465	0,087	0,019	0,389	0,393

Tabla 3. ANDEVA de una vía, realizado en los resultados de los análisis geoquímicos y petrográficos, en sedimentos submareales al interior de la bahía de Mejillones. Los números con negrita indican diferencias significativas en relación con los periodos.

Table 3. One way ANOVA, for the geochemical and petrographical analyses in subtidal sediments in Mejillones bay. The numbers which bold indicate significant differences in relation to seasons.

	O ₂	CT	NT	ST	COT	TMAX	HI	OI	ISR	C:N
F	20,1	0,30	0,20	0,86	1,33	3,19	6,27	0,31	4,5	0,46
P	0,001	0,593	0,663	0,366	0,264	0,091	0,022	0,582	0,048	0,515

Los valores promedio de Tmax, obtenidos para las estaciones A (378) y B (428) y C (440) (Tabla 1, Fig. 6d) están dentro del rango reportado en trabajos anteriores realizados en la misma bahía (Valdés *et al.*, 2004b) y representarían valores típicos de materia orgánica sedimentaria inmadura (Hetényi *et al.*, 2005). Sin embargo, a profundidades mayores a 90 m la materia orgánica presenta cierto grado de madurez, lo cual indica que este material orgánico depositado en

los sedimentos presenta un alto grado de preservación. Adicionalmente, el diagrama de Van Krevelen (Fig. 7) indica que la materia orgánica en los sedimentos es Tipo II (fitoplanctónica) e inmadura, es importante destacar que la materia orgánica Tipo I corresponde a materia orgánica lacustre y la de Tipo III a material orgánico de vegetales terrestres (Tabla 1, Figs. 7 y 8). En efecto, los restos identificados en los sedimentos corresponden en gran parte a frústulos de diatomeas y

materia orgánica amorfa (Valdés *et al.*, 2004b), derivados de la alta productividad biológica de la zona (Escribano *et al.*, 2002, 2004a). Por lo tanto, es importante destacar que todo el material orgánico que cae a los sedimentos, está determinado única y exclusivamente por la producción fitoplanctónica generada en las capas superficiales como resultado de procesos de surgencia.

Influencia de la ZMO y la estacionalidad en la composición de los sedimentos

A nivel local, la variabilidad estacional de la ZMO está asociada con la fluctuación que experimentan los procesos de surgencia costera, que son más frecuentes durante el periodo estival (Fig. 2). Al aumentar la productividad biológica (como es el caso del período estival), se incrementa también la cantidad de materia orgánica que desciende por la columna de agua, la cual consume oxígeno disuelto debido a su degradación (Hulthe *et al.*, 1998). Estas variaciones en la concentración de oxígeno disuelto y en los procesos degradativos, están asociadas con la profundidad, y repercuten en la cantidad y calidad del material orgánico depositado en los sedimentos (Suess, 1980; Valdés *et al.*, 2003). Al respecto, Stein (1991) sugiere una relación directa entre la profundidad y la preservación de la materia orgánica en los sedimentos marinos debido a que las zonas profundas presentan una menor concentración de oxígeno disuelto, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación. Hartnett *et al.* (1998) postulan que en un ambiente anóxico ($< 0,01 \text{ mL L}^{-1}$) o subóxico ($0,5 \text{ mL L}^{-1}$), las partículas depositadas en el sedimento, tienen una mayor preservación, porque el proceso de descomposición al que son sometidas a través de la columna de agua es mucho menor.

El análisis temporal (invernal y estival) en la concentración de oxígeno disuelto indica diferencias significativas entre periodos (Tabla 3). Por otra parte, la composición geoquímica de los sedimentos en la bahía, no mostró diferencias significativas en la mayoría de los casos, lo que sugiere que la variabilidad estacional no es un factor que influye notoriamente en las características de la materia orgánica sedimentaria, al menos a la resolución temporal utilizada en este trabajo. A una escala temporal mayor (interdecadal), Valdés *et al.* (2004b) y Vargas *et al.* (2007) han demostrado que los sedimentos de Mejillones presentan una alta variabilidad en su estructura y composición, como consecuencia de fluctuaciones del régimen oceánico-climático (y su efecto sobre la productividad y ZMO) imperante en la zona.

La variabilidad espacial de la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua y la composición geoquímica de los sedimentos, evaluada mediante una prueba de ANDEVA (Tabla 2) indica que para el O₂, CT, NT, COT e IO existen diferencias significativas ($P < 0,001$) entre las diferentes profundidades de muestreo, lo que refuerza la idea de que la ZMO presente en la bahía influye en la preservación de los restos orgánicos depositados en los sedimentos. Hulthe *et al.* (1998), Ransom *et al.* (1998) y Niggemann *et al.* (2007) indican que las condiciones físicas y biológicas influyen en los procesos de depositación y preservación de la materia orgánica, cambiando significativamente dentro de pequeñas distancias y profundidades. Por lo tanto, la ZMO ejerce una mayor influencia a profundidades mayores de 35 m (Fig. 3), ya que condiciona la disponibilidad de oxígeno disuelto y los procesos degradativos de la materia orgánica sedimentaria, tal como ha sido indicado por Hetényi *et al.* (2005) para ambientes pobres en oxígeno disuelto.

En el caso del azufre total (ST), aún cuando es posible observar un aumento de la concentración hacia los sedimentos más profundos (Fig. 5c), los resultados del ANDEVA indican que no existen diferencias significativas ($P < 0,087$) entre estas profundidades (Tabla 2), lo cual puede ser consecuencia de las bajas concentraciones de azufre presentes en los sedimentos de la bahía. El ISR, no muestra diferencias notorias en el desarrollo de este proceso en relación al contenido de COT de los sedimentos (Fig. 9). Al respecto Niggemann *et al.* (2007), en sus resultados utilizando testigos de sedimento colectados fuera de la bahía pero bajo la ZMO, indican que los valores del índice ISR reflejan cambios estacionales en la cantidad de carbono orgánico disponible. Estos antecedentes sugieren que al interior de la bahía de Mejillones, el ISR no responde a los mismos factores identificados para la zona más oceánica.

CONCLUSIONES

Al interior de la bahía de Mejillones del Sur, se genera un centro de depositación de material orgánico de origen fitoplanctónico, como consecuencia de los procesos de surgencia que ocurren en la península de Mejillones y al patrón de circulación interna de la bahía. Debido a los procesos degradativos que afectan el material orgánico que cae a los sedimentos, su potencial de conservación está influenciado principalmente por la profundidad y la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua. Estos factores influyen directamente en la composición, cantidad y calidad de la materia orgánica depositada en los

sedimentos. La variabilidad temporal de la ZMO, no genera grandes cambios en la composición del material orgánico depositado en los sedimentos de la bahía, lo cual puede ser consecuencia de la baja resolución temporal que abarca este estudio (periodo invernal y estival de un mismo año), pero a su vez la variabilidad espacial de la ZMO genera diferencias significativas en la composición de material orgánico.

Los resultados de este trabajo muestran que los factores más importantes que afectan los procesos degradativos son la profundidad y la concentración de oxígeno disuelto. El primer factor determina el tiempo de permanencia de la partícula en la columna de agua, mientras que la ZMO tiene un efecto relevante en la cantidad y calidad de las partículas depositadas en el sedimento marino.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Institut de Recherche pour le Développement (Francia) por el apoyo en el análisis de algunos de los parámetros analizados en este trabajo. Además se agradece al programa de doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Sistema Marinos Costeros por el apoyo económico brindado para la realización de este artículo. Al Laboratorio de Sedimentología y Paleoambientes (LASPAL) y además al Laboratorio Mixto Internacional PALEOTRACES. También se agradece a los correctores anónimos y al editor asociado que con sus correcciones y sugerencias ayudaron a mejorar este manuscrito.

REFERENCIAS

- Avaria, S. & P. Muñoz. 1982. Composición y biomasa del fitoplancton marino del norte de Chile en diciembre de 1980 (Operación oceanográfica MARCHILE XI-ERFEN II). *Cienc. Tecnol. Mar*, 6: 5-36.
- Bertrand, P. & E. Lallier-Vergés. 1993. Past sedimentary organic matter accumulation and degradation controlled by productivity. *Nature*, 364: 786-788.
- Bertrand, P., E. Lallier-Vergés & M. Boussafir. 1994. Enhancement of both accumulation and anoxic degradation of organic carbon controlled by cyclic productivity: a model. *Org. Geochem.*, 22(3): 511-520.
- Escribano, R. 1998. Population dynamics of *Calanus chilensis* in the Chilean Eastern Boundary Humboldt Current. *Fish. Oceanogr.*, 7(3/4): 245-251.
- Escribano, R. & C. Morales. 2004. Sistemas de surgencia costera. En: C. Werlinger (ed.). *Biología marina y oceanografía: conceptos y procesos*. Universidad de Concepción, Concepción, Vol. 2: pp. 473-496.
- Escribano, R., V. Marín, P. Hidalgo & G. Olivares. 2002. Physical-Biological interactions in the pelagic ecosystem of the nearshore zone of the northern Humboldt current system. The oceanography and ecology of the nearshore and bays in Chile. En: J.C. Castilla & J.L. Largier (eds.). *Proceedings of the international symposium on linkages and dynamics of coastal systems: open coast and embayments*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, pp. 145-175.
- Escribano, R., G. Daneri, L. Farias, V. Gallardo, H. González, D. Gutiérrez, C. Lange, C. Morales, O. Pizarro, O. Ulloa. & M. Braun. 2004. Biological and chemical consequences of the 1997-1998 el Niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis. *Deep-Sea Res. II*, 51: 2389-2411.
- Hartnett, H., R. Keil, J. Hedges. & A. Devol. 1998. Influence of oxygen exposure. Time on organic carbon preservation in continental margin sediments. *Nature*, 391: 572-574.
- Hetényi, M., T. Nyilas & T. Tóth. 2005. Stepwise Rock-Eval pyrolysis as tool for typing heterogeneous organic matter in soils. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 74: 45-54.
- Hulthe, G., S. Hulth. & P. Hall. 1998. Effect of oxygen on degradation rate of refractory and labile organic matter in continental margin sediments. *Geochim. Cosmoch. Acta*, 62(8): 1319-1328.
- Jorgensen, B., M. Bang & T. Blackburn. 1990. Anaerobic mineralization in marine sediments from the Baltic Sea-North Sea transition. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 59: 39-54.
- Lafargue, E., E. Marquis & D. Pillot. 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Rev. Inst. Français Pétrol.*, 53(4): 421-473.
- Lallier-Vergés, E., J. Hayes, M. Boussafir, D. Zaback, N. Tribouvillard, J. Connan & P. Bertrand. 1993. Productivity-induced sulphur enrichment of hydrocarbon-rich sediments from the Kimmeridge Clay Formation. *Chem. Geol.*, 134(4): 177-188.
- Lazarus, D., B. Bittniok, L. Diester-Haass, P. Meyers & K. Billups. 2006. Comparison of radiolarian and sedimentologic paleoproductivity proxies in the latest Miocene–Recent Benguela Upwelling System. *Mar. Micropaleontol.*, 60: 269-294.
- Marín, V., L. Delgado & R. Escribano. 2003. Upwelling shadows at Mejillones Bay (northern Chilean coast): a remote sensing *in situ* análisis. *Invest. Mar., Valparaíso*, 31(2): 47-55.

- Marín, V., L. Rodríguez, L. Vallejo, J. Fuenteseca & E. Oyarce. 1993. Efecto de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 66: 479-491.
- Milessi, A., J. Sellanes, V. Gallardo & C. Langue 2005. Osseous skeletal material and fish scales in marine sediments under the oxygen minimum zone off northern and central Chile. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 64: 185-190.
- Navea, E. & O. Miranda. 1980. Ciclo anual de las condiciones oceanográficas en Mejillones del Sur. *Rev. Biol. Mar.*, 17: 97-133.
- Niggemann, J., T. Feldelman, B. Lomstein, J. Kallmeyer & C. Schubert. 2007. How depositional conditions control input, composition, and degradation of organic matter in sediments from the Chilean coastal upwelling region. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 1513-1527.
- Ortlieb, L., R. Escribano, R. Follegati, O. Zúñiga, I. Kong, L. Rodríguez, J. Valdés, P. Iratchet & N. Guzmán. 2000. Ocean-climatic changes during the last 2,000 years in a hypoxic marine environment of northern Chile (23°S). *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 73: 221-242.
- Pantoja, S., J. Sepúlveda & H. González 2004. Decomposition of sinking proteinaceous material during fall in the oxygen minimum zone off northern Chile. *Deep-Sea Res. I*, 51: 55-70.
- Palma, S. & P. Aplablaza. 2004. Abundancia estacional y migración vertical del zooplancton gelatinoso carnívoro en un área de surgencia en el norte del sistema de corriente de Humboldt. *Invest. Mar., Valparaíso*, 32(1): 49-70.
- Ransom, B., D. Kim, M. Kastner & S. Wainwright. 1998. Organic matter preservation on continental slope, Importance of mineralogy and surface area. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62(8): 1329-1345.
- Rodríguez, L. & R. Escribano. 1996. Bahía de Antofagasta y bahía de Mejillones del Sur: observaciones de la temperatura, penetración de la luz, biomasa y composición fitoplanctónica. *Estud. Oceanol., Antofagasta*, 15: 75-85.
- Scheffer, F. & P. Schachtschabel. 1984. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke Verlag, Stuttgart, 442 pp.
- Stein, R. 1990. Organic carbon content/sedimentation rate relationship and its paleoenvironmental significance for marine sediments. *Geo-Mar. Lett.*, 75: 125-138.
- Stein, R. 1991. Accumulation of organic carbon in marine sediments. Results from the Deep Sea Drilling Project/Ocean Drilling Program (DSDP/ODP). Springer-Verlag, Heidelberg. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 34: 1-217.
- Strub, P., J. Mesías, V. Montecino, J. Rutllant & S. Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. coastal segment. En: A.R. Robinson & K.H. Brink (eds.). *The Sea*, Vol. 11: 273-313.
- Suess, E. 1980. Particulate organic carbon flux in the ocean-surface productivity and oxygen utilization. *Nature*, 288: 260-263.
- Vargas, G. 2002. Interactions ocean-atmosphère au cours des derniers siècles sur la côte du Désert d'Atacama: analyse multi-proxies des sédiments laminés de la baie de Mejillones (23°S). Tesis Doctoral, Universidad de Bordeaux I, Talence, 270 pp.
- Vargas, C. & H. González. 2004. Plankton community structure and carbon cycling in a coastal upwelling system. II. Microheterothopic pathway. *Aquat Microb. Ecol.*, 34: 165-180.
- Vargas, G., S. Pantoja, J. Rutllant, C. Lange & L. Ortlieb. 2007. Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru-Chile current since late 19th century. *Geophys. Res. Lett.*, 34 [on-line] < L13607, doi:10.1029/2006GL028812 >
- Valdés, J. 2004. Evaluación de metales redox-sensitivos como proxies de paleoxigenación en un ambiente marino hipoxico del norte de Chile. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 77: 121-138.
- Valdés, J. & L. Ortlieb. 2001. Paleoxigenación subsuperficial de la columna de agua en la bahía de Mejillones del Sur (23°S): indicadores geoquímicas en testigos de sedimento marino. *Invest. Mar., Valparaíso*, 29: 25-35.
- Valdés, J., L. Ortlieb & A. Sifeddine. 2003. Variaciones del sistema de surgencia de Punta Angamos (23°S) y la zona de mínimo oxígeno durante el pasado reciente. Una aproximación desde el registro sedimentario de la bahía. Una aproximación desde el registro sedimentario de la bahía de Mejillones del Sur. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 76: 347-362.
- Valdés, J., L. López, S. Lomónaco & L. Ortlieb. 2000. Condiciones paleoambientales de sedimentación y preservación de material orgánica en bahía de Mejillones del Sur (23°S), Chile. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 35(2): 169-180.
- Valdés, J., A. Sifeddine, Ch. Mariano & L. Ortlieb. 2004a. Partículas de carbón en sedimentos marinos de la bahía Mejillones del Sur (23°S). Implicancias ambientales en un contexto histórico. *Invest. Mar., Valparaíso*, 32(1): 93-99.
- Valdés, J., A. Sifeddine, E. Lallier-Verges & L. Ortlieb. 2004b. Petrographic and geochemical study of organic matter in surficial laminated sediments from

- an upwelling system (Mejillones del Sur Bay, northern Chile). *Org. Geochem.*, 35: 881-894.
- Valdés, J., G. Vargas, A. Sifeddine, L. Ortlieb & M. Guíñez. 2005. Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones bay (23°S), northern Chile: geochemical and statistical approach. *Mar. Pollut. Bull.*, 50: 1558-1568.
- Valdés, J., D. Román, P. Dávila, L. Ortlieb & M. Guíñez. 2006. Variabilidad estacional de cadmio en un sistema de surgencia costera del norte de Chile (bahía Mejillones del Sur, 23°S). *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 79: 517-535.
- Wakeham, S. & Lee. C. 1993. Organic geochemistry of particulate matter in the ocean: the role of particles in oceanic sedimentary cycles. *Org. Geochem.*, 14: 83-96.

Received: 4 May 2009; Accepted: 7 Jun 2010