

Research Article

Composición elemental y contenido de metales en sedimentos marinos de la bahía Mejillones del Sur, Chile: evaluación ambiental de la zona costera

Jorge Valdés¹ & Abdel Sifeddine^{2,3}

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

²IRD, UR 055, Paleotropique, 32 Avenue Henri Varagnat, F-93143 Bondy Cedex, France

³Departamento de Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, Niteroi, RJ, Brasil

RESUMEN. Se midió la concentración de carbono total, nitrógeno total, azufre total, materia orgánica, Ni, Cd, Pb, Cu y Zn en sedimentos costeros (10 m de profundidad de columna de agua) de ocho sectores de la bahía Mejillones. La composición elemental de los sedimentos sería el resultado de la abundante materia orgánica autóctona presente en este sistema costero. El orden de abundancia de los metales analizados fue: Zn > Cu > Ni > Pb > Cd. La concentración de metales no se explicaría por el contenido de materia orgánica ni la composición granulométrica de los sedimentos costeros. La evaluación del contenido de metales en los sedimentos, mostró que el Ni, Zn y Pb estarían levemente enriquecidos en la actualidad, aún cuando los valores se mantienen dentro de un rango cercano a los niveles preindustriales. El análisis del dendrograma de similitud de los sectores de estudio separó la línea de costa de Mejillones en dos grandes zonas; una asociada a la actividad industrial desarrollada en la bahía, y otra correspondiente al área de desarrollo urbano de Mejillones con características similares a aquellos ambientes libres de actividad antrópica directa.

Palabras clave: sedimentos marinos, metales pesados, análisis elemental, Mejillones, Chile.

Elemental composition and metal contents in the marine sediments of Mejillones del Sur Bay, Chile: an environmental assessment of the coastal zone

ABSTRACT. The total carbon, total nitrogen, total sulphur, organic matter, Ni, Cd, Pb, Cu, and Zn concentrations were measured in coastal sediments (10 m water depth) at eight stations in Mejillones Bay. The elemental composition of these sediments is a function of the autochthonous organic matter generated in this coastal system. The order of abundance for the metals was: Zn > Cu > Ni > Pb > Cd. The metal content is not explained by the organic matter content or grain size of these coastal sediments. The evaluation of the concentration metals in the sediments showed that Ni, Zn, and Pb are slightly enriched at the present, although with values that are similar to preindustrial concentrations. A cluster analysis of the similarity in the study area separated the Mejillones coast into two main zones: one related to the industrial activity developed in this bay and the other related to the urban develop of Mejillones city, with characteristics similar to environments free of direct human activity.

Keywords: marine sediments, heavy metals, elemental analysis, Mejillones, Chile.

Corresponding author: Jorge Valdés (jvaldes@uantof.cl)

INTRODUCCIÓN

Los sistemas costeros constituyen ambientes fuertemente influenciados por el desarrollo socioeconómico. La zona litoral inmediatamente adyacente a los asentamientos humanos e industriales son áreas de influen-

cia directa de la actividad antrópica, y por lo tanto, pueden registrar de manera más precisa los impactos de dichas actividades.

Los sedimentos marinos son el depósito final de las sustancias producidas en las aguas superficiales y de aquellas introducidas al mar por procesos naturales y

antrópicos. Dependiendo de las variaciones físicas y químicas del ambiente de depositación, estos sedimentos pueden actuar como sumidero o fuente de una serie de sustancias que modifican las propiedades naturales de la columna de aguas y la trama trófica marina (Alagarsamy, 2006; Buccolieri *et al.*, 2006). Por tal motivo, el conocimiento de las propiedades y composición de los sedimentos de fondo permite evaluar la condición de los ambientes marinos y reconocer eventuales perturbaciones derivadas de la acumulación de sustancias antropogénicas y naturales que puedan constituir riesgos para la salud del ecosistema. Este conocimiento permite, además, aplicar medidas apropiadas y realistas que no pongan en riesgo la salud de estos ambientes ni el desarrollo socio-económico de las comunidades costeras.

Mejillones del Sur es una bahía con uno de los desarrollos industriales más importantes del norte de Chile. La ciudad de Mejillones tiene un plano regulador que ha delimitado claramente las actividades desarrolladas en el borde costero; hacia el sector noreste se localiza el parque industrial constituido por termoelectricas, empresas pesqueras, plantas de transferencia de ácidos para la minería, puertos de embarque de minerales, entre otros, mientras que hacia el suroeste se localiza la zona residencial y comercial. Todas estas actividades económicas que se desarrollan en el borde costero, generan una presión importante sobre el sistema marino, que hasta la fecha no es conocida en su totalidad. Los estudios ambientales en esta bahía son escasos, con sólo un par de trabajos que dan cuenta de la distribución de metales en sedimentos marinos y columna de agua (Valdés *et al.*, 2005, 2008). Por el contrario, hay una gran cantidad de información sobre mecanismos y procesos oceanográficos tales como eventos de surgencia, productividad biológica, variabilidad ENOS, evolución océano-climática, entre otros aspectos (Rodríguez *et al.*, 1991; Escribano, 1998; Marín & Olivares, 1999; Ortlieb *et al.*, 2000; Páez *et al.*, 2001; Marín *et al.*, 1993, 2003; González *et al.*, 2004; Vargas *et al.*, 2007; Valdés *et al.*, 2008). Entonces, existe un desequilibrio en el esfuerzo científico orientado a conocer la variabilidad de las condiciones naturales de la bahía, respecto de aquellos orientados a evaluar características ambientales que incorporen directamente la actividad antrópica como una variable relevante en el entendimiento de la condición actual de este sistema marino. Tan sólo la combinación de conocimiento derivado de ambos enfoques científicos permitirá proponer planes de manejo y medidas de contingencia que aseguren el desarrollo económico de la comunidad, generando una mínima perturbación del sistema natural.

En el presente trabajo se analizan los sedimentos superficiales costeros de Mejillones, con el propósito de caracterizar su composición geoquímica en cuanto al contenido de metales pesados (Ni, Pb, Cd, Cu, Zn) y composición elemental (CNS), su distribución espacial y eventuales eventos de enriquecimiento relacionados con la diversidad de usos de la zona costera de esta bahía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectaron muestras de sedimentos marinos superficiales en ocho sectores de la bahía Mejillones (Fig. 1). La ubicación de los sectores de muestreo se determinó en función de los diferentes tipos de uso identificados a lo largo de la zona costera de Mejillones. De esta manera, los puntos 1 y 8 corresponden a sectores sin intervención humana, mientras que los otros seis sectores están asociados a las diversas actividades antrópicas realizadas en esta bahía.

Las muestras fueron colectadas en triplicado mediante buceo semi-autónomo, en la isóbata de los 10 m de profundidad, removiendo solamente el sedimento superficial (10 mm) y depositándolo en bolsas plásticas previamente tratadas. Todas las muestras fueron guardadas a menos de 6°C durante su transporte al laboratorio y posteriormente, fueron puestas a secar a 40°C hasta alcanzar un peso constante. El análisis granulométrico se realizó mediante el uso de un agitador de tamices que permitió separar las diferentes fracciones de sedimento presentes en las muestras colectadas, las cuales fueron descritas de acuerdo a la escala de tamaño de partículas de Wentworth (Wentworth, 1922). El contenido de materia orgánica (MO) fue medido por la técnica de pérdida de peso por ignición a 600°C por 2 h en una mufla (Buchanan, 1984; Luczak *et al.*, 1997). La diferencia de peso entre la muestra seca y la muestra calcinada corresponde a la materia orgánica, la que fue expresada como porcentaje del peso seco.

El contenido de Cd, Cu, Ni, Zn y Pb fue medido en la fracción de sedimento menor a 63 µm según el siguiente procedimiento: las muestras de sedimento fueron tratadas con agua regia (HCl y HNO₃) a 150°C por 3 h. Posteriormente fueron filtradas a través de 45 µm y aforadas a 25 mL. La lectura del contenido de metales se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica Shimadzu modelo 6300, mediante técnica de llama. El procedimiento analítico fue chequeado mediante el uso de sedimento estándar MESS-3 y HISS-1 de la National Research Council of Canada, con una tasa de recuperación de entre 93 y 101%. Los resultados son expresados en mg kg⁻¹. El contenido de carbono total (CT), nitrógeno total (NT) y azufre total

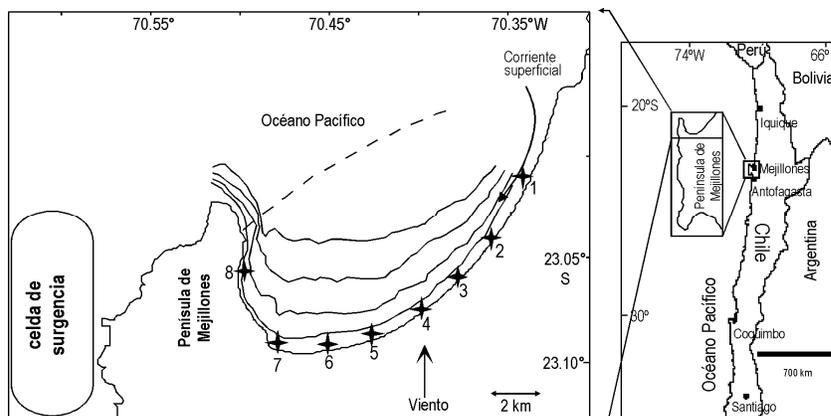


Figura 1. Bahía Mejillones del Sur y sus principales características oceanográficas; la línea punteada representa el frente térmico descrito por Marín *et al.* (2003), la flecha curva indica el movimiento más probable de las corrientes superficiales, las isóbatas se muestran cada 25 m. Se indican los sectores de muestreo; los sectores 1 y 8 corresponden a áreas sin actividad antrópica en la costa, los sectores 2 a 5 corresponden a áreas con actividad industrial, el sector 6 corresponde a la localización media de la ciudad de Mejillones (zona urbana) y el sector 7 corresponde a actividades de cultivo.

Figure 1. Mejillones bay and their principal oceanographic characteristics; the dashed line represent the thermic front proposed by Marín *et al.* (2003), the curved arrow indicate the most probable displacement of surface waters, depth water is showed each 25 m. The study areas are showed; areas 1 and 8 correspond to zones without anthropogenic activities in the coast, areas 2 to 5 correspond to zones with industrial activities, area 6 correspond to urban zone of Mejillones city, and area 7 correspond to aquaculture activity.

(ST), expresado como porcentaje de la fracción seca, fue medido en un analizador elemental CHNS LECO, del Institut de Recherche pour le Développement (Francia).

Los resultados fueron analizados mediante la aplicación de un análisis de varianza de una vía y un dendrograma de similitud según el método de Ward, utilizando el programa computacional Minitab 14.

RESULTADOS

La estadística descriptiva de las variables medidas en los sedimentos costeros de Mejillones se muestra en la Tabla 1. El tamaño medio de los sedimentos varió entre arena muy fina y arena gruesa. La fracción menor a 63 μm registró valores altos en el extremo este y

central de la zona de estudio (Fig. 2), con una media global de 12%.

El contenido de CT varió entre 1% y poco más de 8%, con una tendencia a aumentar hacia la zona oeste (Fig. 3). El NT tuvo una media de 0,1% y el valor máximo se registró en el sector T3. El ST presentó una media de 0,3% y su distribución fue similar a la mostrada por el CT. El contenido de MO registró una media de 2,6%, con una distribución caracterizada por valores bajos en los extremos de la zona de estudio (T1 y T8) y un notorio aumento en la zona media.

El orden de abundancia de los metales analizados fue $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cd}$ (Tabla 1). La concentración de cada uno de los metales en los ocho sectores estudiados se observa en la Fig. 4. El Zn presentó

Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables medidas en los sedimentos costeros de la bahía Mejillones del Sur. DS: desviación estándar.

Table 1. Descriptive statistic of the variables measured in the coastal sediments of Mejillones bay. DS: standard deviation.

Variable	N° datos	Media	DS	Mínimo	Máximo
N (%)	21	0,13	0,17	0,10	0,78
C (%)	21	2,39	1,55	1,14	8,58
S (%)	21	0,33	0,25	0,06	1,21
MO (%)	21	2,56	0,88	1,18	4,04
Cu (mg kg^{-1})	24	40,75	22,32	10,02	83,86
Zn (mg kg^{-1})	21	51,37	32,53	12,13	99,48
Ni (mg kg^{-1})	22	35,26	24,25	3,61	86,67
Cd (mg kg^{-1})	22	6,81	3,07	2,38	14,59
Pb (mg kg^{-1})	21	15,09	5,02	8,77	28,58

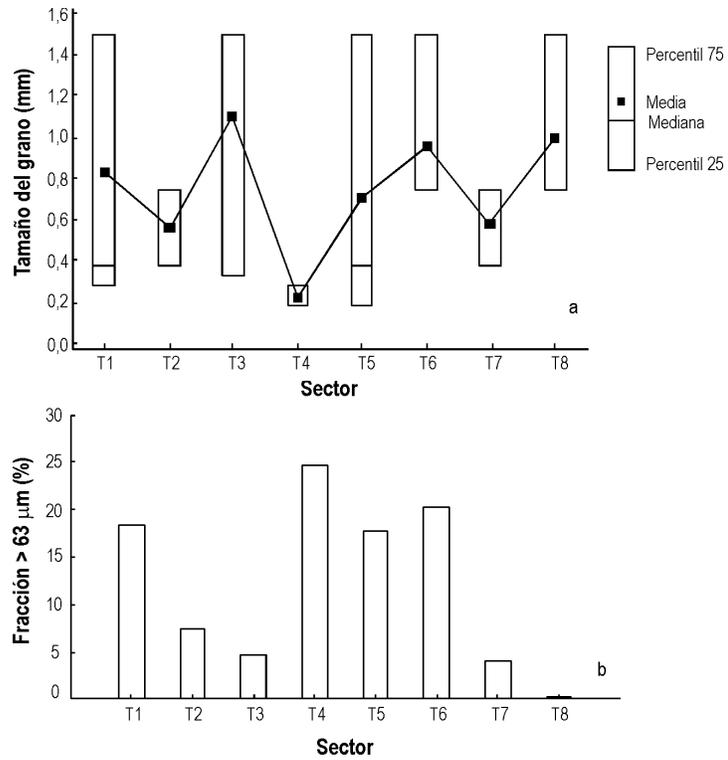


Figura 2. a) Distribución del tamaño medio de partículas en los sedimentos costeros de la bahía Mejillones, b) Porcentaje de la fracción fina (< 63 μm) en cada sector analizado.

Figure 2. a) Distribution of grain size of coastal sediments of Mejillones bay, b) Fine fraction (< 63 μm) abundance in each area studied.

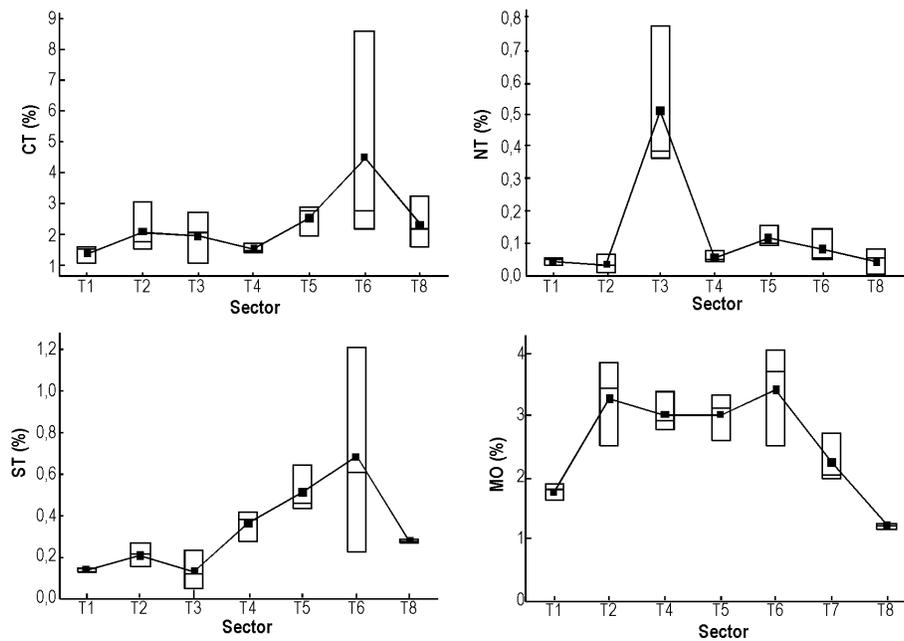


Figura 3. Distribución de carbono total (CT), nitrógeno total (NT), azufre total (ST) y materia orgánica (MO) en los sedimentos costeros de la bahía Mejillones del Sur.

Figure 3. Total carbon (CT), total nitrogen (NT), total sulphur (ST) and organic matter (MO) distribution in coastal sediments of Mejillones bay.

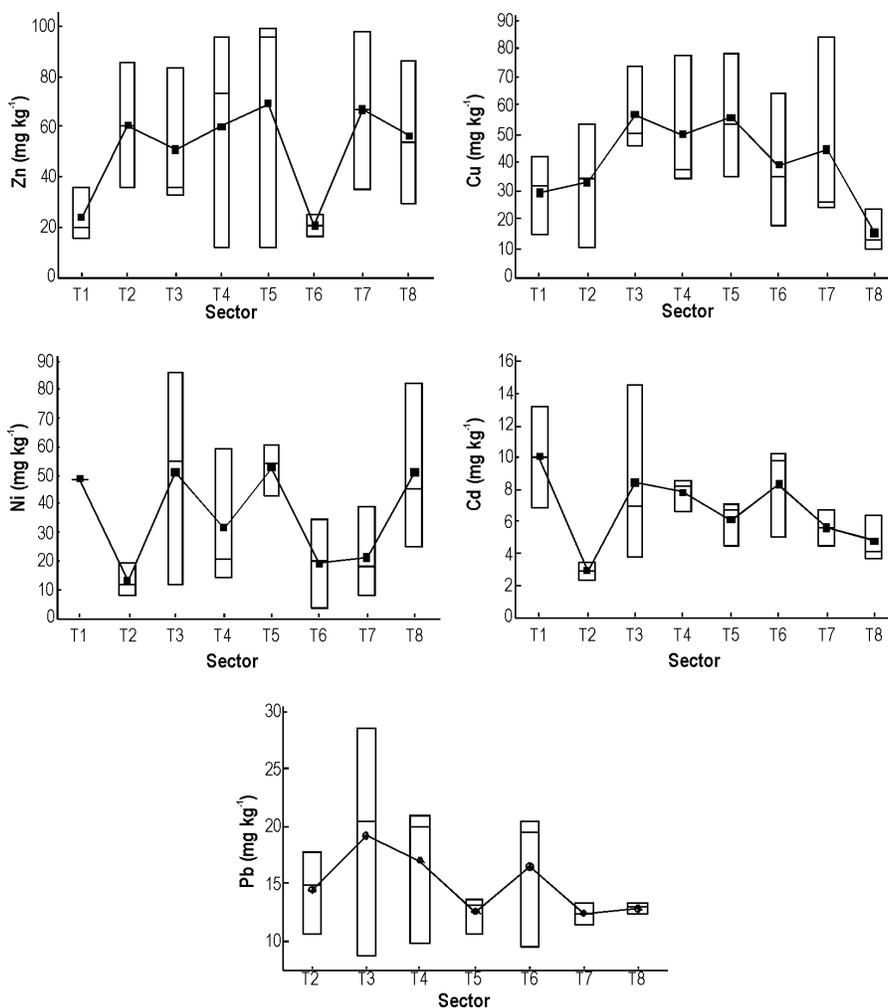


Figura 4. Distribución de metales en los sedimentos costeros de la bahía Mejillones del Sur.

Figure 4. Metal distribution in coastal sediments of Mejillones bay.

una distribución caracterizada por valores bajos y más homogéneos en los sectores 1 y 6, y un rango de concentraciones que varió entre 12 y 100 mg kg^{-1} (Tabla 2). El Cu registró una media de 41 mg kg^{-1} y los valores más bajos se registraron en las estaciones 1 y 8 (Fig. 4). El Ni presentó una mayor variabilidad de las concentraciones medidas en los ocho sectores, con una media de 35 mg kg^{-1} . La concentración de Cd fluctuó alrededor de una media de 7 mg kg^{-1} (Tabla 2); y en general, los valores más altos y variables se registraron en la zona este de la bahía, mientras que la zona oeste presentó valores bajos y más homogéneos. La distribución de Pb evidenció una tendencia espacial caracterizada por una zona de altas concentraciones hacia el este de la bahía y una zona de bajas concentraciones hacia el oeste. La concentración media de este metal fue de 15 mg kg^{-1} , mientras que su rango de variación fue 8-29 mg kg^{-1} (Tabla 2).

DISCUSIÓN

La fracción de sedimento menor a 63 μm presente en la zona costera de Mejillones sugiere que los sectores hidrodinámicamente más estables se localizan hacia el este de la bahía (T1) y en el sector medio (T4, T5, T6), ya que registran un alto porcentaje de sedimento fino depositado. Por el contrario, el sector T8 registró el menor contenido de sedimento fino (< 63 μm), lo que sugiere una circulación de mayor intensidad. Además, este sector se ubica a los pies de la península Mejillones y tiene una batimetría de alta pendiente que puede influir en la capacidad de retención de sedimento fino y/o favorecer la remoción del mismo por fenómenos de deslizamiento.

La composición elemental de los sedimentos costeros de Mejillones estaría explicada en su mayoría, por el aporte de materia orgánica autóctona generada en

Tabla 2. Niveles de metales en sedimentos superficiales de diversos ambientes costeros. Concentración de metales en mg kg⁻¹.**Table 2.** Metals level in surface sediments of different coastal environments. Metal concentrations in mg kg⁻¹.

Localidad	Cu	Pb	Cd	Zn	Ni	Ambiente depositacional	Referencia
Mejillones	--	--	21,9	29,7	20,6	Submareal	Valdés <i>et al.</i> , 2005
Mejillones ¹	53,5	4,7*	20,5	13,1	30,2	Testigos de sedimento	Valdés, 2004
Mejillones	40,8	15,1	6,8	51,4	35,3	submareal	Este estudio
Bahía San Jorge, Chile	37,8	--	--	--	--	Playa de arena	Lépez <i>et al.</i> , 2001
Chañaral, Chile	1659	21,2	0,093	28,1	0,17	Playa de arena	Ramírez <i>et al.</i> , 2005
Bahía Concepción, Chile	41,0	40,1	6,27	91,8	23,7	submareal	Salamanca <i>et al.</i> , 1988
Bahía San Vicente, Chile	27,7	17,4	3,06	77,6	45,6	submareal	Salamanca <i>et al.</i> , 1988
Campeche Sound, Golfo de México	18,8	11,1	--	75,2	104	submareal	Vázquez & Sharma, 2004
Bahía Izmit, Mar Marmara	89,4	94,9	6,4	753,8	52,1	submareal	Pekey <i>et al.</i> , 2004
Ferro Ria, España	66	74	--	259	32	submareal	Cobelo-García <i>et al.</i> , 2004
Bahía de Cádiz, España	106,3	55,4	0,23	230	--	submareal	Ponce <i>et al.</i> , 2000

¹Valores preindustriales para Mejillones

*datos no publicados

las aguas superficiales de esta bahía (Valdés *et al.*, 2005). Particularmente, el CT sería el resultado de la disolución de restos carbonáticos biogénicos derivados del tipo de fauna bentónica presente en Mejillones (Zúñiga *et al.*, 1983; Páez *et al.*, 2001) y de la materia orgánica acumulada en la zona costera de la bahía. La distribución de CT y MO presentó valores más altos en el sector T6, probablemente asociado a la localización del sector urbano de la bahía y al puerto de desembarque de la actividad pesquera artesanal (Fig. 3). Aún cuando las actividades de cultivos tienden a concentrar una alta biomasa y a generar un mayor flujo de restos orgánicos hacia los sedimentos de fondo, los resultados sugieren que la zona urbana localizada frente al sector T6 ejerce una mayor influencia sobre la composición biogénica de los sedimentos de fondo que las actividades de cultivos desarrolladas en el sector T7, ya que los valores de MO son menores en este último caso (Fig. 3). La distribución de ST en los sedimentos de la zona costera de Mejillones sugiere que el proceso de sulfato-reducción sería más intenso hacia el oeste, como consecuencia de un mayor aporte de materia orgánica rica en compuestos metabolizables, necesarios para este proceso (Lückge *et al.*, 1999; Valdés *et al.*, 2004).

Los valores de metales encontrados en este estudio fueron comparados con concentraciones reportadas en

estudios previos de esta bahía y con sistemas costeros de diferentes zonas geográficas (Tabla 2). La abundancia de Cu en los sedimentos costeros de Mejillones fue levemente superior a la registrada por Lépez *et al.* (2001) en la bahía San Jorge localizada 50 km al sur. Sin embargo, en este último trabajo, las mediciones fueron realizadas en playas de arena (Tabla 2), cuyo mayor tamaño de grano ofrece una menor superficie relativa para la adsorción de metales en comparación con partículas más finas (Cobelo-García & Prego, 2004), como es el caso de los sedimentos analizados en el presente estudio. Una comparación con otros puertos chilenos indica que los valores de Pb son menores en el caso de Mejillones, mientras que el Cu es solamente superior al puerto de San Vicente (38°S). El Cd es más abundante en Mejillones que en los otros sistemas de bahía reportados en la Tabla 2 debido, principalmente, a las favorables condiciones para su precipitación y preservación en los sedimentos de fondo (Valdés, 2004; Valdés *et al.*, 2005, 2006). Sin embargo, la abundancia de Cd medida en este estudio resultó menor a la reportada por Valdés *et al.* (2005), debido a que en el trabajo del 2005 se consideró toda la bahía como zona de estudio, de manera que se registraron concentraciones en sedimentos depositados a profundidades mayores a los 50 m, donde las condiciones de pobreza de oxígeno (Escribano, 1998) favorecen la precipitación y preservación de Cd en los sedimentos reductores (Russell & Morford, 2001;

Böning *et al.*, 2005). El Zn y el Ni se encuentran por debajo de los valores reportados para otros ambientes costeros de Chile, pero son superiores a las mediciones realizadas en esta misma bahía por Valdés *et al.* (2005). Esto último, sugiere un aumento en la concentración de ambos metales en los sedimentos de Mejillones en los últimos años, situación que puede reflejar eventuales impactos de la actividad antrópica en la zona costera.

Es conocido que la materia orgánica es un factor que controla el contenido de metales en los sedimentos acuáticos (Tribovillard *et al.*, 2006). En el ambiente marino, la materia orgánica tiende a adsorber metales en su tránsito por la columna de agua y a acumularlos en los sedimentos de fondo. Además, el tamaño de partículas también ejerce influencia sobre el contenido de metales, ya que los sedimentos más finos son capaces de adsorber una mayor cantidad de metales debido a su mayor superficie relativa (Cobelo-García & Prego, 2004). Sin embargo, en la zona costera de Mejillones, el contenido de materia orgánica no presentó correlación con ninguno de los metales analizados ($r^2 < 0,12$). Por otro lado, el contenido de sedimento fino ($< 63 \mu\text{m}$) tampoco parece ejercer una notoria influencia en la abundancia de metales en la zona costera de esta bahía, ya que los valores de correlación estadística tampoco fueron significativos ($r^2 < 0,17$). Ambos resultados sugieren que el contenido de metales en los sedimentos costeros de Mejillones se relaciona con factores independientes de aquellos que explican la distribución de sedimento fino y el contenido de materia orgánica.

El análisis de varianza realizado para comparar los sectores estudiados en la bahía Mejillones, no arrojó diferencias significativas en el caso de los metales. Por el contrario, el NT, ST y la MO presentaron diferencias significativas en las concentraciones registradas en cada sector (Tabla 3). El análisis de comparación múltiple de Tukey, evidenció que el sector T3 presenta valores de NT significativamente diferentes al resto de la bahía. En el caso del ST y la MO, los sectores con diferencias significativas fueron el T5-T6 y T1-T7-T8, respectivamente. Se requieren nuevos estudios para identificar las causas de estas diferencias, pero es po-

sible que se deban a factores que afectan principalmente el contenido de restos orgánicos en los sedimentos, ya que en el caso de los metales, el análisis de varianza no arrojó diferencias significativas entre los sectores analizados (Tabla 3). Aún así, el análisis de Cluster realizado para comparar las características de los sectores estudiados mostró que se pueden distinguir dos zonas geoquímicamente diferentes a lo largo de la línea de costa de Mejillones (Fig. 5). Una zona comprendida por los sectores T1, T6 y T8, y otra zona correspondiente al resto de los sectores. Los sectores T1 y T8 se ubican en los extremos de la bahía (Fig. 1), libre de actividad antrópica, mientras que el sector T6 corresponde a la zona residencial de la ciudad. El resto de los sectores corresponden a la localización de la actividad industrial desarrollada en la bahía. De esta manera, las características químicas de los sedimentos costeros parecieran relacionarse con la diversidad de ambientes y heterogeneidad de usos que se desarrollan en la bahía Mejillones.

Comúnmente se usa el índice de Geoacumulación (I_{geo}) para evaluar eventuales enriquecimientos de metales en sedimentos acuáticos, mediante una comparación con niveles preindustriales. Para ello se utiliza la fórmula propuesta por Müller (1979):

$$I_{\text{geo}} = \log_2 (C_n / 1,5 B_n)$$

En donde C_n es el valor medido de un metal en las muestras de sedimento y B_n es el valor de base de dicho metal. Se utiliza un factor de 1,5 para representar posibles variaciones en el nivel de base del metal medido en el ambiente, y como un factor de corrección de una eventual influencia antropogénica en el cálculo (Buccolieri *et al.*, 2006). Para los valores preindustriales, normalmente se utilizan concentraciones de formaciones geológicas como pizarras (Turekian & Wedepohl, 1961) o aquellos correspondientes a la corteza continental (Taylor, 1972). Sin embargo, en aquellos lugares en donde los sedimentos preservan su estructura primaria y, por lo tanto, no existe mezcla vertical de ellos, es factible utilizar valores provenientes de muestras de columnas de sedimento que sean equivalentes a períodos anteriores al desarrollo industrial de dicha zona (Sainz & Ruiz, 2006). En el caso de

Tabla 3. Análisis de varianza de una vía para los parámetros medidos en los sedimentos costeros de Mejillones del Sur.

Table 3. One-way ANOVA for the parameters measured in coastal sediments of Mejillones bay.

	CT	NT	ST	MO	Zn	Ni	Cu	Pb	Cd
<i>F</i>	1,53	10,26	3,19	9,46	0,73	1,56	1,32	0,76	1,56
<i>p</i>	0,24	0,00	0,03	0,00	0,65	0,23	0,3	0,71	0,23

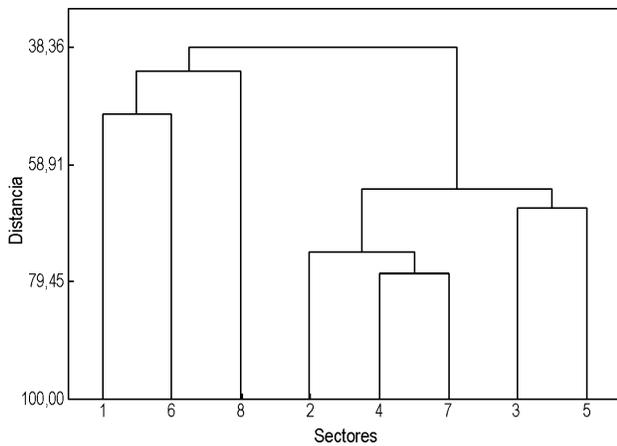


Figura 5. Dendrograma de similitud basado en el método de Ward de distancia Euclidiana, para los sectores estudiados en la bahía Mejillones del Sur.

Figure 5. Dendrogramme of similitude based on Ward's methods (Euclidian distance), for the studied zones of Mejillones bay.

Mejillones, diversos trabajos de reconstrucciones paleoambientales han demostrado la buena preservación de los sedimentos marinos, lo que permite disponer de un modelo cronológico de los pasados 300-400 años de sedimentación, con una resolución decenal (Ortlieb

et al., 2000; Valdés *et al.*, 2003, 2004; Vargas *et al.*, 2004, 2007). Basado en esta característica, en el presente trabajo se han utilizado valores de concentraciones de metales correspondientes a testigos de sedimento próximos a la costa (Valdés, 2004) que representan períodos anteriores a 1870 (de acuerdo a tasas de sedimentación de 156 cm kaño^{-1} según Vargas *et al.*, 2004, 2007) (Tabla 2). Debido a que el desarrollo industrial en esta bahía es de comienzos del siglo XX (Panadés *et al.*, 1995), dichos valores pueden considerarse como representativos de ambientes libres de influencia antrópica.

Los resultados del cálculo del I_{geo} mostrados en la Fig. 6 fueron utilizados para medir la calidad de los sedimentos marinos de Mejillones de acuerdo a la clasificación propuesta por Müller (1979) que es mostrada en la Tabla 4. De acuerdo a esto, los sedimentos costeros de Mejillones presentarían en la actualidad valores de Cu y Cd similares a los niveles preindustriales, mientras que el Ni, el Pb y el Zn estarían enriquecidos. Sin embargo, este enriquecimiento puede considerarse leve, en comparación con el alto grado de desarrollo industrial de la zona, y aún no representan problemas serios de daño ambiental en esta bahía, ya que los sectores que presentaron ese enriquecimiento tienen índices correspondientes a la parte baja de la escala de calidad de sedimentos (Fig. 6; Tabla 4).

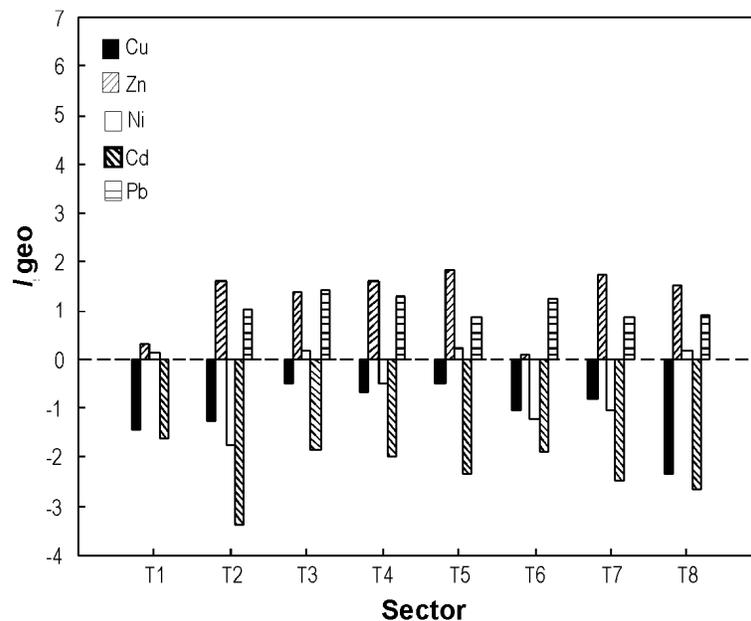


Figure 6. Índice de geoacumulación (I_{geo}) para los metales medidos en los sedimentos costeros de la bahía Mejillones del Sur.

Figure 6. Geoaccumulation Index for the metals analyzed in coastal sediments of Mejillones bay.

Tabla 4. Calidad de los sedimentos marinos de acuerdo a la clasificación del I_{geo} (Müller, 1979).

Table 4. Description of sediment quality according to I_{geo} classification (Müller, 1979).

I_{geo}	Categoría	Descripción de la calidad de los sedimentos
>5	6	Extremadamente contaminado
4-5	5	Fuertemente a extremadamente contaminado
3-4	4	Fuertemente contaminado
2-3	3	Moderadamente a fuertemente contaminado
1-2	2	Moderadamente contaminado
0-1	1	No contaminado a moderadamente contaminado
< 0	0	No contaminado

Los resultados del presente estudio sugieren que los sedimentos costeros de Mejillones comienzan a registrar las primeras evidencias de perturbación como consecuencia de la ocupación antrópica de la línea de costa, de manera que se hace necesario realizar estudios sistemáticos a lo largo del tiempo que permitan identificar, evaluar y remediar eventuales alteraciones del ambiente natural que sean consecuencia del desarrollo industrial de esta bahía.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a INNOVA-CORFO que a través del proyecto 04CR7IXM-04 "Alianza universidad-gobierno-empresa: un enfoque ecosistémico para una estrategia de manejo sustentable de la bahía Mejillones del Sur", financió el desarrollo de este trabajo, y a todos los que colaboraron en las diferentes etapas de dicho proyecto. También se agradece el apoyo del Institut de Recherche pour le Développement (Francia) por el apoyo en el análisis de algunos de los parámetros reportados en este trabajo. Se agradece a César Calderón por el apoyo prestado en parte del trabajo analítico desarrollado en este estudio.

REFERENCIAS

Alagarsamy, R. 2006. Distribution and seasonal variation of trace metals in surface sediments of the Madavi estuary, west coast of India. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 67: 333-339.

Böning, Ph., S. Cuypers, M. Grunwald, B. Schnetger & H. Brumsack. 2005. Geochemical characteristics of Chilean upwelling sediments at ~36°S. *Mar. Geol.*, 220: 1-21.

Buchanan, J. 1984. Sediment analysis. In: N.A. Holme & A.D. McIntyre (eds.). *Methods for the study of marine benthos*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 41-64.

Buccolieri, A., G. Buccolieri, N. Cardellicchio, A. Dell'Atti, A. Di Leo & A. Maci. 2006. Heavy metals in the marine sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, southern Italy). *Mar. Chem.*, 99: 227-235.

Cobelo-García, A. & R. Prego. 2004. Influence of point source on trace metal contamination and distribution in a semi-enclosed industrial embayment: the Ferrol Ria (NW Sapin). *Est. Coast. Shelf Sci.*, 60: 695-703.

Escribano, R. 1998. Population dynamics of *Calanus chilensis* in the Chilean eastern boundary Humboldt Current. *Fish. Oceanogr.*, 7(3/4): 245-251.

González, H., R. Giesecke, C. Vargas, M. Pavéz, J. Iriarte, P. Santibañez, L. Castro, R. Escribano & F. Pagés. 2004. Carbon cycling through the pelagic foodweb in the northern Humboldt off Chile (23°S). *J. Mar. Sci.*, 61: 572-584.

Lépez, I., L. Furet & O. Aracena. 2001. Población de *Emerita analoga* (Stimpson 1957) en playas Amarilla y Rinconada, Antofagasta: aspectos abióticos, bióticos y concentraciones de cobre. *Gayana*, 65(1): 59-87.

Luczak, C., M. Janquin & A. Kupka. 1997. Simple standard procedure for the routine determination of organic matter in marine sediment. *Hydrobiologia*, 345: 87-94.

Lükge, A., M. Boussafir, E. Lallier-Vergès & R. Littke. 1996. Comparative study of organic matter preservation in immature sediments along the continental margins of Peru and Oman. Part I, Results of petrographical and bulk geochemical data. *Org. Geochem.*, 24(4): 437-451.

- Marín, V., L. Rodríguez, L. Vallejo, J. Fuenteseca & E. Oyarce. 1993. Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de la bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 66: 479-491.
- Marín, V. & G. Olivares. 1999. Estacionalidad de la productividad primaria en bahía Mejillones del Sur (Chile): una aproximación proceso-funcional. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 72: 629-641.
- 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.
- Müller, G. 1979. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau*, 79: 778-783.
- Navea, E. & O. Miranda. 1980. Ciclo anual de las condiciones oceanográficas en Mejillones del Sur. *Rev. Biol. Mar.*, 17(1): 97-133.
- Ortlieb, L., R. Escribano, R. Follegati, O. Zuñiga, 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.
- Páez, M., O. Zúñiga, J. Valdés & L. Ortlieb. 2001. Foraminíferos bentónicos recientes en sedimentos micrónicos de la bahía Mejillones del Sur (23°S). *Rev. Biol. Mar. Oceanog.*, 36: 123-133.
- Panadés, J., O. Ovalle & P. Rojas. 1995. Mejillones un pueblo con historia. *Ilustre Municipalidad de Mejillones, Mejillones*, 156 pp.
- Pekey, H., D. Karakas, S. Ayberk, L. Tolun & M. Bakoglu. 2004. Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (northeastern Marmara Sea) Turkey. *Mar. Pollut. Bull.*, 48: 946-953.
- Ponce, R., J. Forja & A. Gómez-Parra. 2000. Influencia de la actividad antropogénica en la distribución vertical de Zn, Cd, Pb, y Cu en agua intersticial y sedimentos marinos costeros (bahía de Cádiz, SW de España). *Cienc. Mar.*, 26(3): 479-502.
- Ramírez, M., S. Massolo, R. Frache & J. Correa. 2005. Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine, Chile. *Mar. Pollut. Bull.*, 50: 62-72.
- Rodríguez, L., V. Marín, M. Farías & E. Oyarce. 1991. Identification of an upwelling zone by remote sensing and *in situ* measurement. *Mejillones del Sur Bay (Antofagasta- Chile)*. *Sci. Mar.*, 55(3): 467-473.
- Russell, A. & J. Morford. 2001. The behavior of redox-sensitive metals across a laminates-massive-laminated transition in Saanich Inlet, British Columbia. *Mar. Geol.*, 174: 341-354.
- Sainz, A. & F. Ruiz. 2006. Influence of the very polluted inputs of the Tinto-Odiel system on the adjacent littoral sediments of southwestern Spain: a statistical approach. *Chemosphere*, 62: 1612-1622.
- Salamanca, M., L. Chuecas & F. Carrasco. 1988. Heavy metal content and distribution in surface sediments from three areas of Chilean coast. *Gayana*, 9(1-4): 3-16.
- Taylor, S. 1972. Abundante of chemical elements in the continental crust; a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28: 1273.
- Tribovillard, N., T. Algeo, T. Lyons & A. Riboulleau. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chem. Geol.*, 232: 12-32.
- Turekian, K. & K. Wedepohl. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 72: 175-192.
- 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 Mejillones del Sur. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 76: 347-362.
- Valdés, J. 2004. Evaluación de metales redox-sensitivos como proxies de paleoxigenación en un ambiente marino hipóxico del norte de Chile. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 77: 121-138.
- Valdés, J., A. Sifeddine, E. Lallier-Verges & L. Ortlieb. 2004. Petrographic and geochemical study of organic matter in surficial sediments from an upwelling system (Mejillones del Sur bay, northern Chile). *Org. Geochem.*, 35(5): 881-894.
- Valdés, J., G. Vargas, A. Sifeddine, L. Ortlieb & M. Guiñez. 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, G. Alvarez, L. Ortlieb & M. Guiñez. 2008. Metals content in surface waters of an upwelling system of the northern Humboldt Current (Mejillones Bay, Chile). *J. Mar. Syst.*, 71: 18-30.
- Vargas, G., L. Ortlieb, J. Pichon, J. Bertaux & M. Pujos. 2004. Sedimentary facies and high resolution primary production inferences from laminated datomacous sediments off northern Chile (23°S). *Mar. Geol.*, 211: 79-99.

- 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: L13607.
- Vázquez, F. & V. Sharma. 2004. Major trace elements in sediments of the Campeche Sound, southeast Gula of Mexico. *Mar. Pollut. Bull.*, 48: 87-90.
- Wentworth, C. 1922. A scale of grade and classterm for clastic sediments. *J. Geol.*, 30(5): 377-392.
- Zúñiga, O., H. Baeza & R. Castro. 1983. Análisis de la macrofauna bentónica del sublitoral de la bahía de Mejillones del Sur. *Estud. Oceanol., Antofagasta*, 3: 41-62.

Received: 11 December 2007; Accepted: 24 November 2008