

Research Article

Concentración de metales pesados (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) en la biota y sedimentos de una playa artificial, en la bahía San Jorge 23°S, norte de Chile

Gabriel Castro¹ & Jorge Valdés¹

¹Laboratorio de Sedimentología y Paleoambientes, Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Facultad de Recursos del Mar, Universidad de Antofagasta
P.O. Box 170, Antofagasta, Chile

RESUMEN. Se evaluó el contenido de metales pesados (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) en la biota y el sedimento de una playa artificial (Paraíso) y una playa natural (El Lenguado), ubicadas en la bahía San Jorge, norte de Chile. Los resultados fueron utilizados para comparar ambos sistemas, el grado de cumplimiento de la normativa ambiental nacional e internacional, y el efecto de la construcción de la playa artificial sobre el nivel de contaminación por metales existentes históricamente en esa zona. En cada playa se ubicaron estaciones equidistantes que abarcaron desde el intermareal hasta el submareal de las cuales fueron extraídos los organismos. Se tomaron muestras de sedimento en cada playa y se determinaron las pendientes con el método de Emery. El análisis granulométrico evidenció el predominio de arena media en playa El Lenguado, y arena media y fina en playa Paraíso. El contenido de materia orgánica fue mayor en El Lenguado. En playa Paraíso se determinaron cinco phylum/superclase agrupados en 19 taxa, mientras que en El Lenguado se encontraron cuatro phylum/superclase agrupados en 22 taxa. El contenido de metales en sedimentos y en la mayoría de organismos presentó valores mayores en playa Paraíso. Estos resultados, junto a las normas de calidad chilenas y norteamericanas, sugieren un evidente deterioro en la calidad ambiental de playa Paraíso lo que se demostró por un incremento en las concentraciones de estos metales desde su construcción, los que sobrepasan los límites establecidos por ambas normas.

Palabras clave: metales pesados, playa artificial, normas de calidad, calidad ambiental, sedimentos, biota, Chile.

Heavy metals concentration (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb), in biota and sediments of an artificial beach, in San Jorge bay 23°S, northern Chile

ABSTRACT. It was evaluated the heavy metal content (Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) in biota and sediment of an artificial beach (Paraíso) and a natural beach (El Lenguado), both located in San Jorge bay, northern Chile. The results were used to compare both systems, the degree of fulfillment of national and international environmental regulations, and the effect of the construction of the artificial beach on the level of metal contamination historically existing in that area. Equidistant stations were located at each beach in which the organisms were extracted, that ranged from the intertidal to the subtidal. Sediment samples were taken at each beach and slopes were determined with the Emery method. The granulometric analysis evidenced the predominance of medium sand in El Lenguado beach, and medium and fine sand in Paraíso beach. The organic matter content was greater in El Lenguado. In Paraíso beach were determined 5 phylum/superclass, grouped in 19 taxa, while in El Lenguado were found 4 phylum/superclass grouped in 22 taxa. The metal content in sediments and in the majority of organisms shows higher values in Paraíso beach. This results along with the Chilean and American quality norms suggest an evident deterioration of the environmental quality of Paraíso beach, which is demonstrated by an increase in the concentrations of these metals from its construction, which exceed the established limits by both norms.

Keywords: heavy metals, artificial beach, quality norms, environmental quality, sediments, biota, Chile.

INTRODUCCIÓN

Los metales pesados son parte fundamental de las fuentes antropogénicas provenientes de desechos domésticos, agrícolas e industriales, los cuales son peligrosos para la biota marina, el hombre y el ambiente en general. Bajo este escenario, los sedimentos, uno de los principales reservorios de estos elementos, actúan como recursos secundarios de contaminación en el medio ambiente marino (Rubio *et al.*, 1996). Los metales trazas presentan concentraciones relativamente elevadas en los sedimentos superficiales de las zonas costeras alteradas por el hombre. Estos metales guardan relación en su concentración con el tamaño de la partícula y la cantidad de materia orgánica sedimentaria, alterando el equilibrio ecológico y biogeoquímico del ecosistema (Sadiq, 1992). En tal sentido, la determinación de metales en los sedimentos, así como también en la biota marina es un buen indicador del origen de los contaminantes en el medio y de los impactos que éstos pueden producir.

A nivel internacional, como consecuencia de este creciente problema, durante las últimas décadas se ha desarrollado un procedimiento técnico, denominado Sediment Quality Guideline (SQG) o Guía de Calidad de Sedimentos (CCME, 2002), para predecir los efectos adversos producidos por sedimentos contaminados, sobre los organismos acuáticos (Di Toro *et al.*, 1991; US EPA, 1992; Long *et al.*, 1995; Ankley *et al.*, 1996; MacDonald *et al.*, 2000). Los objetivos del SQG son proteger a los organismos que viven en los sedimentos acuáticos de los efectos negativos producidos por sustancias químicas presentes en estos ambientes, evaluar y comparar los patrones de distribución espacial de sedimentos contaminados y, diseñar y aplicar programas de monitoreo y remediación (Birch & Taylor, 2002; Crane & MacDonald, 2003). Este procedimiento normativo es una aproximación numérica que identifica tres rangos de concentración de efectos biológicos adversos delimitados por los percentiles 10th y 50th llamados Efecto de Rango Bajo (ERL en inglés) y Efecto de Rango Medio (ERM en inglés), respectivamente (Long *et al.*, 1995). Así, concentraciones por debajo del ERL indican ausencia de efectos adversos, concentraciones entre ERL y ERM indican efectos adversos ocasionales y concentraciones superiores a ERM indican efectos adversos más frecuentes (McCreedy *et al.*, 2006). Por su parte, en Chile está en discusión un proyecto de ley sobre normas de calidad de sedimentos marinos y lacustres en el cual se proponen concentraciones de metales correspondientes a ERL y ERM (UPA, 2002).

Por el contrario, en nuestro país, aún cuando se ha avanzado, persisten vacíos en esta materia. Recientemente se promulgó en Chile la Norma Secundaria de Calidad Ambiental que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza (Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente). Sin embargo, para el caso de los sedimentos marinos, la región de Aysén es la única que cuenta con un anteproyecto en elaboración de Norma de Calidad Secundaria para Sedimentos Marinos (Resolución Exenta N°1152). Este documento se finalizó en diciembre de 2005. Esta norma se encuentra relacionada con el Decreto Supremo 90, ya que este decreto regula la emisión de descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, y de acuerdo a los antecedentes entregados previamente el origen de la contaminación por metales pesados en los sedimentos ocurre principalmente debido a las fuentes antropogénicas provenientes de desechos domésticos, agrícolas e industriales.

Las playas artificiales, creadas con el objetivo de satisfacer las necesidades de esparcimiento de la sociedad, significan una alteración de las condiciones naturales de la línea de costa ya que modifican las condiciones físicas y geomorfológicas de una playa que originalmente ya existía. Esta modificación puede darse por la extracción de la arena existente y la inyección de nueva arena a la playa, dinamitando el lecho rocoso, dragando el fondo marino, rellenando con rocas y expandiendo el frente y la superficie. Muchas veces estas actividades se aplican como una medida de remediación de problemas ambientales existentes en determinadas zonas costeras. En la bahía San Jorge, y particularmente dentro del perímetro de la ciudad de Antofagasta, existen actualmente tres playas artificiales. Una de éstas, El Carboncillo, actualmente denominada playa Paraíso, consideró la remoción de sedimento de playa y de fondo, construcción de diques de abrigo e inyección de arena traída del sector de La Rinconada y fue entregada al uso público el año 2006.

Históricamente, la playa Paraíso (ex El Carboncillo) presentó problemas sanitarios debido a las altas concentraciones de plomo, zinc y otros metales pesados en sus arenas, cuyo origen fue el acopio y transporte de minerales que se realizaba entre la estación del ferrocarril y el puerto de Antofagasta, y la eliminación de residuos por el emisario ubicado al norte de esta playa (información evaluada por estudios

de la DIA del proyecto “Construcción y habilitación de playas artificiales sector centro, Antofagasta, II Región” (Resolución N°3581). Posterior a la construcción de la playa artificial, Montenegro (2007) llegó a la conclusión de que los valores de los metales pesados en el sedimento habían disminuido debido al cambio físico del lugar. Sin embargo, según estándares internacionales establecidos para otros ambientes (As: $6 \mu\text{g g}^{-1}$, Pb: $35 \mu\text{g g}^{-1}$ y Zn: $123 \mu\text{g g}^{-1}$), los valores de As, Pb y Zn siguen siendo altos (Montenegro, 2007).

Los cambios realizados en la playa Paraíso, generan una interrogante respecto del estado de salud ambiental, particularmente en relación al contenido de metales. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es evaluar el contenido de metales pesados en la biota y sedimentos de esta playa y determinar si estos valores se asemejan o son diferentes a los de una playa natural, además de establecer si se encuentran dentro de límites aceptables según la normativa nacional e internacional. Para ello se determinaron diferencias o similitudes en el contenido de metales de la biota y el sedimento entre las playas Paraíso y El Lenguado. Esta última corresponde a la playa natural utilizada como control para dicha comparación.

Como hipótesis se plantea que la remoción de sustrato original contaminado e inyección de arenas limpias permitió una disminución considerable de la concentración de metales pesados en playa Paraíso, por lo que la fauna bentónica así como el sustrato de esta playa presentarán bajas concentraciones de estos metales, cuyos valores no serán significativamente distintos de los registrados en El Lenguado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Campaña de muestreo

Se colectaron muestras de macroinfauna bentónica y sedimentos intermareales y submareales en playa Paraíso ($23^{\circ}38'15''\text{S}$, $70^{\circ}23'74''\text{W}$) y playa El Lenguado ($23^{\circ}46'25.1''\text{S}$, $70^{\circ}28'29.5''\text{W}$) los días 24 de abril y 1 de mayo 2009, respectivamente (Fig. 1). Paraíso se caracteriza por ser una playa de arena de 264 m de longitud, protegida en sus extremos por rompeolas. El Lenguado, por su parte, corresponde a una playa semi-expuesta de arena de 113 m de longitud limitada por rocas en sus extremos.

En ambas playas se diseñó una grilla de muestreo, con 15 estaciones en playa Paraíso y 12 en playa El Lenguado. Dentro de la grilla de playa Paraíso, cinco estaciones quedaron ubicadas en el intermareal arenoso, mientras que las restantes se posicionaron en el submareal. Las últimas cinco estaciones subma-

reales se ubicaron en el límite exterior de la playa. En la grilla de El Lenguado, cuatro estaciones se ubicaron en el intermareal arenoso, y las ocho restantes en el submareal. Los muestreos de ambas playas se realizaron durante la bajamar.

La obtención de muestras de macroinfauna y sedimentos intermareales se realizó mediante un testigo de 16 cm de diámetro, con una superficie de muestreo de 201 cm^2 . Para separar los organismos del sedimento, se empleó un tamiz circular de 1 mm de abertura de malla. Las muestras submareales fueron obtenidas mediante buceo autónomo. En cada estación del submareal se colocó un cuadrante de PVC de 25 x 25 cm en el fondo y se extrajeron manualmente todos los organismos que se encontraron dentro del cuadrante. Una vez obtenida las muestras, se almacenaron en bolsas plásticas, etiquetadas y selladas. Los organismos se congelaron a -20°C para su posterior identificación y análisis de metales pesados.

Se determinaron los perfiles de cada playa utilizando el método de Emery (1961), a través de sus respectivas pendientes (b) empleando el coeficiente a/d , donde a es la sumatoria de las alturas entre los puntos de muestreo y d la sumatoria de distancias entre cada punto, esta relación se expresa finalmente como $1/b$ o distancia de intermareal para la cual existe 1 m de declive. Finalmente, teniendo el valor de la pendiente de cada playa, se expresó en grados mediante el cálculo del arcotangente de la pendiente, y en porcentaje considerando los 90° como un 100% de inclinación.

Utilizando la clasificación en base al oleaje incidente como playas reflectivas (pendiente $>15\%$), disipativas (pendiente $<5\%$) (Brazeiro, *et al.*, 1998) e intermedias (condiciones intermedias entre disipativas y reflectivas), y aplicando el criterio de clasificación de McLachlan, se determinó el tipo de playa según su pendiente.

Tratamiento de muestras en el laboratorio

Las muestras fueron lavadas con agua destilada, limpiando cualquier elemento que pudiera perjudicar la identificación taxonómica. Los organismos fueron separados por grupo taxonómico al nivel más específico posible, con una lupa estereoscópica, guías de biodiversidad, y claves de identificación taxonómica (Osorio, 1979; Rozbaczlyo, 1980; McLean, 1984; Zuñiga, 2002).

Los organismos identificados fueron contabilizados y pesados con una balanza analítica Sartorius 0,0001 g de sensibilidad y una balanza granataria Petit Balance 0,001 g de sensibilidad, dependiendo del tamaño y peso del organismo. Las muestras de

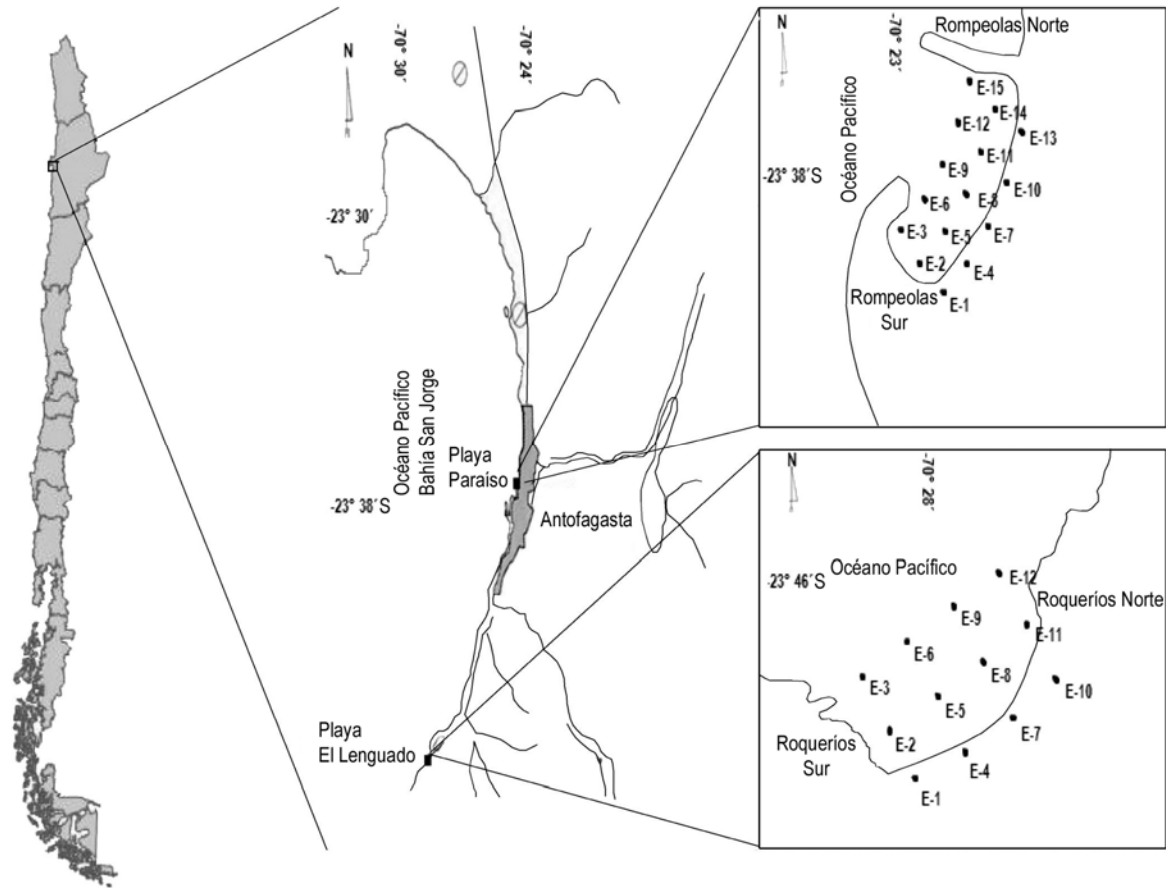


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Se señalan las estaciones de muestreo para las playas Paraíso y El Lenguado.

Figure 1. Geographic location of study area. The sampling stations for the Paraíso and El Lenguado beaches.

sedimento fueron colocadas en bandejas plásticas rotuladas y secadas en una estufa a 45°C hasta obtener peso constante.

La caracterización granulométrica de los sedimentos colectados se realizó de acuerdo a la metodología indicada por Holme & McIntyre (1971). Para ello, se pesó un promedio de 459 g de sedimento en una balanza granataria, se tamizó durante 10 min utilizando un rotap Retsch y luego se pesó cada fracción de sedimento (4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μ m, 250 μ m, 125 μ m, 63 μ m y <63 μ m). Se obtuvo los estadígrafos promedio gráfico (PG) y grado de selección (GS). Adicionalmente, se determinó el contenido de materia orgánica en la fracción total de los sedimentos mediante ignición en mufla a 450°C por 4,5 h (Chauvaud *et al.*, 1996).

Contenido de metales pesados en organismos y sedimento

Los ejemplares se separaron por especie en una bandeja plástica previamente tratada. Se seleccionaron

por tamaño y con una tijera y pinzas anatómicas lavadas con agua desionizada se extrajo tejido del músculo, gónada y manto. Para aquellos organismos de menor tamaño o que presentaron estructuras duras, se utilizó la totalidad del tejido del animal. El tejido de mayor tamaño fue picado en partes más pequeñas y se homogeneizó, triturándolo en un mortero hasta transformarlo en una pasta húmeda.

Se pesaron entre 0,5 y 1,0 g de muestra, correspondiente a peso húmedo, con una balanza analítica en un vaso precipitado. Se adicionaron 10 mL de HNO₃ concentrado y 10 mL de agua desionizada. El vaso precipitado se tapó con un embudo y vidrio reloj (sistema de reflujo), la muestra se calentó a 150°C por 2 h en una plancha calefactora bajo campana, se dejó enfriar y luego se filtró en un sistema al vacío. Finalmente se aforó a 25 mL con agua desionizada y se almacenó en un frasco plástico rotulado.

En el caso de los sedimentos, se pesó entre 0,2 y 0,8 g de la fracción menor a 63 μ y se adicionó 15 mL de agua regia (mezcla de HCl con HNO₃ en

proporción 3:1), se tapó el vaso con un sistema de reflujo y se calentó en una plancha calefactora a 150°C por 2 h, para realizar la digestión total de las muestras. Finalmente, se dejaron enfriar, se filtraron en un sistema al vacío y se aforaron a 25 mL con agua desionizada para luego almacenarlas en frascos plásticos rotulados.

Las muestras de sedimento y tejido biológico se analizaron con un espectrofotómetro de absorción atómica Shimadzu, modelo AA-6300, siguiendo el procedimiento descrito para metales en sólidos US EPA 3050B (US EPA, 1996). Para la totalidad de los metales analizados (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni), se utilizó una llama aire-acetileno.

En el caso del tejido biológico, el procedimiento analítico fue chequeado mediante el uso de material de referencia certificado DORM-3 (Dogfish) adquirido en el National Research Council of Canada, NRC. En el caso del análisis en sedimento, el procedimiento analítico fue verificado mediante el uso de sedimento estándar MESS-3 y HISS-1 de la National Research Council of Canada. En ambos casos, se observó un error inferior al 5%.

Contenido de metales en playa Paraíso para tres períodos de tiempo

Se utilizaron datos de concentraciones de Ni, Pb y Zn en playa Paraíso obtenidos el 2001 y 2007 para realizar una comparación con los datos del presente estudio y determinar su variabilidad. Los datos del 2001 correspondieron a información de la DIA del proyecto "Construcción y habilitación de playas artificiales sector centro, Antofagasta, II Región" (Resolución N°3581), mientras que los datos del 2007 fueron obtenidos en el mismo laboratorio donde se procesaron las muestras del presente trabajo, que fueron reportados por Montenegro (2007).

Tratamiento estadístico de los datos

Se efectuaron cuatro pruebas estadísticas ANDEVA de una vía ($P = 0,05$). Las dos primeras para determinar la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones de metales pesados encontrados en los organismos de cada estación, en cada playa por separado y para determinar la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones de metales pesados de especies comunes a ambas playas, agrupadas por dieta, respectivamente; las dos últimas para determinar la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones de metales pesados en sedimentos de ambas playas y para comprobar la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones de Ni, Pb y Zn en sedimentos de playa Paraíso entre el

2007 y 2009, respectivamente. Los datos se trabajaron con el programa computacional Minitab 14 y las concentraciones de metales transformadas mediante Log_{10} para su normalización.

RESULTADOS

De acuerdo a la escala propuesta por McLachlan (1983), Paraíso corresponde a una playa protegida, con moderada acción de las olas y pendiente de 25% con un valor de 22,5°. Por su parte, El Lenguado corresponde a una playa expuesta, con acción de las olas entre moderada y fuerte, dependiendo de las condiciones de las mareas y pendiente de 10%, con un valor de 11,1°.

Granulometría y contenido de materia orgánica de los sedimentos

Las muestras de sedimento recolectadas en las estaciones de la zona intermareal de playa Paraíso se caracterizaron por la presencia de material biogénico (calcáreo), principalmente fragmentos de conchas y exoesqueletos de crustáceos. En esta zona el sustrato fue principalmente de tipo simétrico, con partículas que variaron desde mal a moderadamente seleccionadas.

Las muestras de sedimento obtenidas en las estaciones de la zona submareal de playa Paraíso presentaron escaso material biogénico, además de una coloración más oscura que las muestras del intermareal. El sustrato de esta zona presentó un moderado exceso de finos, con partículas que variaron desde mal a muy bien seleccionadas.

En las estaciones de la zona intermareal de playa El Lenguado, las muestras de sedimento presentaron gran cantidad de material biogénico (calcáreo), principalmente exoesqueletos de crustáceos y fragmentos de conchas. En esta zona el sustrato fue en su totalidad simétrico con partículas que variaron desde mal a muy mal seleccionadas.

El sedimento obtenido en las estaciones de la zona submareal de playa El Lenguado, presentó menor cantidad de material biogénico. Al igual que en el intermareal, el sustrato de esta zona fue en su totalidad simétrico con partículas que variaron desde mal a muy mal seleccionadas.

En la Tabla 1 se indican los valores de promedio gráfico (PG), grado de selección (GS), clasificación del sedimento y porcentaje de materia orgánica total (%MOT) del sustrato intermareal y submareal de las playas Paraíso y El Lenguado.

Tabla 1. Atributos de los sedimentos en la totalidad de las estaciones muestreadas en playa Paraíso y playa El Lenguado. Valores en unidades phi para el promedio gráfico (PG) y el grado de selección por tamaño (GS). Se indica la clasificación del sedimento. La materia orgánica total se expresa en porcentaje (%MOT).

Table 1. Attributes of the sediments in the totality of the sampled stations of Paraíso beach and El Lenguado beach. Values in units phi for the graphic average (PG) and the degree of selection by size (GS). The classification of the sediment it's indicated. Total organic matter expressed as a percentage (%MOT).

| Estación | Atributo Paraíso | | | | Atributo El Lenguado | | | | Zona | |
|----------|------------------|------|------|-------|----------------------|------|------|-------|-------------|-----------------|
| | PG | GS | %MOT | Clase | PG | GS | %MOT | Clase | Intermareal | Submareal (3 m) |
| 1 | 1,87 | 0,6 | 0,97 | AM | 1,85 | 0,39 | 1,16 | AM | ✓ | - |
| 2 | 0,98 | 0,35 | 0,97 | AG | 2,15 | 0,37 | 1,53 | AF | - | ✓ |
| 3 | 1,06 | 0,27 | 1,01 | AM | 1,80 | 0,49 | 1,31 | AM | - | ✓ |
| 4 | 1,50 | 0,5 | 1,04 | AG | 2,01 | 0,35 | 1,23 | AF | ✓ | - |
| 5 | 0,77 | 0,31 | 1,17 | AG | 1,90 | 0,44 | 3,99 | AM | - | ✓ |
| 6 | 0,87 | 0,28 | 1,24 | AG | 1,80 | 0,48 | 1,53 | AM | - | ✓ |
| 7 | 1,35 | 0,36 | 1,0 | AM | 1,89 | 0,35 | 1,49 | AM | ✓ | - |
| 8 | 0,87 | 0,29 | 1,11 | AG | 1,98 | 0,35 | 1,45 | AM | - | ✓ |
| 9 | 0,8 | 0,27 | 1,16 | AG | 2,02 | 0,33 | 1,51 | AF | - | ✓ |
| 10 | 0,93 | 0,34 | 0,99 | AG | 1,70 | 1,35 | 1,26 | AM | ✓ | - |
| 11 | 0,93 | 0,63 | 1,07 | AG | 1,99 | 0,35 | 1,40 | AM | - | ✓ |
| 12 | 0,59 | 0,41 | 1,13 | AG | 1,85 | 0,45 | 1,62 | AM | - | ✓ |
| 13 | 0,72 | 0,35 | 1,06 | AG | - | - | - | - | ✓ | - * |
| 14 | -0,28 | 1,21 | 1,06 | AM G | - | - | - | - | .* | ✓ * |
| 15 | 0,74 | 0,21 | 1,18 | AG | - | - | - | - | .* | ✓ * |

* Solo presente en playa Paraíso.

AF: Arena fina, AM: Arena media, AG: Arena gruesa, AMG: Arena muy gruesa.

Taxa encontrados en ambas playas

En playa Paraíso se recolectó un total de 329 especímenes agrupados en 19 taxa y 5 phylum/superclase. El phylum Mollusca presentó el mayor número de especies con 11, seguido del phylum Echinodermata con tres especies, luego la superclase Crustacea con dos especies y una familia indeterminada, el phylum Cnidaria con una especie y el phylum Annelida con una familia indeterminada (Tabla 2).

En playa El Lenguado se recolectó un total de 351 ejemplares pertenecientes a 22 taxa y 4 phylum/superclase. Al igual que en playa Paraíso, el phylum Mollusca presentó la mayor cantidad de especies observándose 10, seguido del phylum Echinodermata con cinco especies, luego la superclase Crustacea con cuatro especies y una familia indeterminada, y el phylum Annelida con dos familias indeterminadas (Tabla 3).

El phylum Cnidaria sólo fue observado en playa Paraíso, no encontrándose ningún ejemplar en El Lenguado. En esta última playa se encontraron dos

especies más que en Paraíso pertenecientes a la superclase Crustacea.

Contenido de metales en sedimentos y organismos, y evaluación ambiental bajo normas de calidad

La Tabla 4 indica la estadística descriptiva de las variables medidas en los sedimentos de ambas playas. La concentración más alta de los cinco metales analizados en playa Paraíso correspondió al Pb, con valor máximo de 1080 $\mu\text{g g}^{-1}$, mientras que la concentración más baja se observó en el Ni con máximo de 81 $\mu\text{g g}^{-1}$. En playa El Lenguado, al igual que en Paraíso, la mayor concentración de los cinco metales analizados correspondió al Pb con máximo de 194 $\mu\text{g g}^{-1}$, mientras que la menor concentración fue observada en el Zn, con máximo de 58 $\mu\text{g g}^{-1}$.

La Tabla 5 señala las concentraciones promedio expresadas en $\mu\text{g g}^{-1}$ de los cinco metales pesados encontrados en los organismos analizados en las playas Paraíso y El Lenguado. Los valores de referencia de las SQG, las normas de calidad de sedimentos marinos y lacustres, y las concentraciones medidas en este estudio se indican en la Tabla 6.

Tabla 2. Taxa encontrados en playa Paraíso. Se indica la ubicación de cada especie.**Table 2.** Taxa found in Paraíso beach. The location of each species it's indicated.

| Phylum/Superclase | Especie | Ubicación de la especie |
|-------------------|--|-------------------------|
| Mollusca | <i>Tegula tridentata</i> (Potiez & Michaud, 1838) | Submareal |
| | <i>Tegula luctuosa</i> (D'Orbigny, 1840) | Submareal |
| | <i>Tegula atra</i> (Lesson, 1830) | Submareal |
| | <i>Nassarius gayi</i> (Kiener, 1835) | Submareal |
| | <i>Tagelus dombeii</i> (Lamarck, 1818) | Submareal |
| | <i>Protothaca thaca</i> (Molina, 1782) | Submareal |
| | <i>Crepidula dilatata</i> (Lamarck, 1822) | Submareal |
| | <i>Crepidula phillippiana</i> Gallardo, 1977 | Submareal |
| | <i>Concholepas concholepas</i> (Bruguière, 1789) | Submareal |
| | <i>Brachiodontes granulatus</i> (Hanley, 1843) | Submareal |
| | <i>Chiton cummingsii</i> Frembly, 1827 | Submareal |
| Echinodermata | <i>Tetrapygyus niger</i> Molina, 1782 | Submareal |
| | <i>Stichaster striatus</i> Müller & Troschel, 1840 | Submareal |
| | <i>Athyonidium chilensis</i> (Semper, 1868) | Submareal |
| Crustacea | <i>Emerita analoga</i> (Stimpson, 1857) | Intermareal |
| | <i>Liopetrolisthes mitra</i> (Dana, 1852) | Submareal |
| | Penaeidae, indeterminado | Submareal |
| Cnidaria | <i>Actinia equina</i> Linnaeus, 1758 | Submareal |
| Annelida | <i>Fauveliopsidae</i> , indeterminado | Intermareal |

Tabla 3. Taxa encontrados en playa El Lenguado. Se indica la ubicación de cada especie.**Table 3.** Taxa found in El Lenguado beach. The location of each species it's indicated.

| Phylum/Superclase | Especie | Ubicación de la especie |
|-------------------|--|-------------------------|
| Mollusca | <i>Tegula tridentata</i> (Potiez & Michaud, 1838) | Submareal |
| | <i>Tegula luctuosa</i> (D'Orbigny, 1840) | Submareal |
| | <i>Tegula atra</i> (Lesson, 1830) | Submareal |
| | <i>Concholepas concholepas</i> (Bruguière, 1789) | Submareal |
| | <i>Chiton cummingsii</i> (Frembly, 1827) | Submareal |
| | <i>Protothaca thaca</i> (Molina, 1782) | Submareal |
| | <i>Oliva peruviana</i> (Lamarck, 1810) | Submareal |
| | <i>Turritella cingulata</i> Sowerby, 1825 | Submareal |
| | <i>Brachiodontes granulatus</i> (Hanley, 1843) | Submareal |
| | <i>Fissurella maxima</i> (Sowerby, 1835) | Submareal |
| Echinodermata | <i>Tetrapygyus niger</i> Molina, 1782 | Submareal |
| | <i>Loxechinus albus</i> (Molina, 1782) | Submareal |
| | <i>Heliaster helianthus</i> Lamarck, 1816 | Submareal |
| | <i>Stichaster striatus</i> Müller & Troschel, 1840 | Submareal |
| | <i>Athyonidium chilensis</i> (Semper, 1868) | Submareal |
| Anellida | <i>Fauveliopsidae</i> , indeterminado | Intermareal |
| | <i>Onuphidae</i> , indeterminado | Intermareal |
| Crustacea | <i>Emerita analoga</i> (Stimpson, 1857) | Intermareal |
| | <i>Liopetrolisthes mitra</i> (Dana, 1852) | Submareal |
| | <i>Rhynchocinetes typus</i> H. Milne Edwards, 1837 | Submareal |
| | <i>Pagurus edwardsii</i> (Dana, 1852) | Submareal |
| | Penaeidae, indeterminado | Submareal |

Tabla 4. Estadística descriptiva de las variables medidas en los sedimentos de playa Paraíso y playa El Lenguado. DS: desviación estándar.

Table 4. Descriptive statistic of the variables measured in the sediments of Paraíso beach and El Lenguado beach. DS: standard deviation.

| Playa | Variable | N° datos | Media | DS | Mínimo | Máximo |
|-------------|-----------------------------|----------|-------|------|--------|--------|
| Paraíso | MOT (%) | 15 | 1,08 | 0,08 | 0,97 | 1,24 |
| | Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 15 | 152 | 41 | 87 | 240 |
| | Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 15 | 454 | 226 | 167 | 1081 |
| | Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 15 | 47 | 16 | 21 | 81 |
| | Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 15 | 103 | 25 | 50 | 153 |
| | Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 15 | 119 | 35 | 64 | 175 |
| El Lenguado | MOT (%) | 12 | 1,62 | 0,76 | 1,16 | 3,99 |
| | Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 12 | 49 | 19 | 18 | 87 |
| | Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 12 | 100 | 42 | 32 | 194 |
| | Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 12 | 29 | 13 | 10 | 62 |
| | Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 12 | 44 | 21 | 23 | 100 |
| | Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$) | 12 | 36 | 15 | 11 | 58 |

Al comparar las concentraciones de los cinco metales pesados en los sedimentos de ambas playas (Fig. 2), se observaron concentraciones significativamente más altas en playa Paraíso (Cu: $P < 0,0001$; Pb: $P < 0,0001$; Ni: $P = 0,002$; Cd: $P < 0,0001$; Zn: $P < 0,0001$).

La Figura 3 indica las concentraciones de los cinco metales pesados encontrados en las especies comunes a ambas playas, que fueron: *Emerita analoga*, *Protothaca thaca*, *Tetrapygyus niger*, *Tegula tridentata*, *Athyonidium chilensis*, *Concholepas concholepas* y *Stichaster striatus*. De acuerdo a esta figura, el Cu, Pb y Ni en los organismos de playa Paraíso tuvieron valores más altos que en El Lenguado. Sin embargo *Protothaca thaca* presentó valores de Zn mayores en El Lenguado, mientras que en *Tegula tridentata* también se encontraron concentraciones mayores de Zn y Cd.

La prueba ANDEVA (una vía) entregó los siguientes resultados al comparar las concentraciones de metales en estas especies, agrupadas por tipo de dieta: en los filtradores solamente se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de Cu ($P = 0,008$), Ni ($P < 0,0001$) y Pb ($P = 0,019$); en los herbívoros ocurrió lo mismo, con valores de significancia para el Cu ($P = 0,038$), Ni ($P = 0,031$) y Pb ($P = 0,064$); los detritívoros presentaron diferencias significativas en las concentraciones de Cu ($P = 0,005$), Pb ($P = 0,002$), Ni ($P = 0,008$) y Zn ($P = 0,016$), con excepción del Cd ($P = 0,761$). Finalmente, los carnívoros sólo presentaron diferencias signifi-

cativas en las concentraciones de Cd ($P = 0,029$). En el Cu ($P = 0,153$), Pb ($P = 0,118$), Ni ($P = 0,194$) y Zn ($P = 0,62$), no se encontraron diferencias significativas.

La Figura 4 indica las concentraciones promedio de Ni, Zn y Pb encontradas en sedimentos de playa Paraíso en tres períodos analizados: 2001, 2007 y 2009 respectivamente. Se observó una disminución considerable en los niveles de estos tres metales pesados entre 2001 y 2007. Sin embargo, en 2009, año en que se realizó este estudio, se observó un incremento en las concentraciones de Ni, Zn y Pb en playa Paraíso a niveles cercanos a los encontrados el 2001. Estos resultados concuerdan con la prueba ANDEVA (una vía) de la comparación realizada entre el 2007 y 2009, en el contenido de estos tres metales en sedimentos de esta playa, donde se observaron diferencias significativas en los tres.

DISCUSIÓN

Comparación de atributos sedimentológicos

Las características morfodinámicas y la composición granulométrica de playa Paraíso concuerdan con las características de una playa reflectiva (Short & Wright, 1983; McArdle & McLachlan, 1991, 1992). El predominio en valores simétricos que presentó el sedimento intermareal, se explicaría por la utilización de arena media limpia durante las actividades de relleno de esta zona, cuando se realizaron las obras de construcción y habilitación de playa Paraíso

Tabla 5. Concentraciones promedio ($\mu\text{g g}^{-1}$) de cada uno de los cinco metales pesados determinados en los organismos analizados en playa Paraíso y playa El Lenguado.

Table 5. Average concentrations ($\mu\text{g g}^{-1}$) of each one of the five heavy metals determined in the analyzed organisms of Paraíso beach and El Lenguado beach.

| Especie | Playa Paraíso | | | | | Playa El Lenguado | | | | |
|--------------------------------|---------------|----|-------|----|-----|-------------------|----|-------|-------|----|
| | Zn | Cu | Cd | Ni | Pb | Zn | Cu | Cd | Ni | Pb |
| <i>Protothaca thaca</i> | 13 | 22 | 0,01 | 5 | 115 | 15 | 7 | 0,001 | 0,02 | 30 |
| <i>Crepidula dilatata</i> | 10 | 36 | 0,004 | 2 | 63 | * | * | * | * | * |
| <i>Crepidula phillipiana</i> | 24 | 46 | 0,01 | 6 | 118 | * | * | * | * | * |
| <i>Tegula tridentata</i> | 3 | 24 | 0,01 | 4 | 81 | 10,01 | 6 | 0,02 | 0,1 | 41 |
| <i>Tegula luctuosa</i> | * | * | * | * | * | 3 | 2 | 0,001 | 0,1 | 28 |
| <i>Tegula atra</i> | * | * | * | * | * | 1 | 2 | 0,01 | 0,2 | 32 |
| <i>Concholepas concholepas</i> | 3 | 10 | 0,01 | 2 | 53 | 1 | 3 | 0,001 | 0,001 | 21 |
| <i>Tagelus dombeii</i> | 21 | 28 | 0,004 | 4 | 94 | * | * | * | * | * |
| <i>Fissurella maxima</i> | * | * | * | * | * | 4 | 1 | 0,004 | 0,01 | 13 |
| <i>Athyonidium chilensis</i> | 10 | 79 | 0,01 | 6 | 130 | 1 | 2 | 0,01 | 0,01 | 15 |
| <i>Tetrapygyus niger</i> | 18 | 66 | 0,01 | 7 | 124 | 5 | 2 | 0,01 | 4 | 63 |
| <i>Loxechinus albus</i> | * | * | * | * | * | 2 | 4 | 0,003 | 0,02 | 17 |
| <i>Stichaster striatus</i> | 13 | 22 | 0,01 | 2 | 64 | 11 | 10 | 0,003 | 1 | 46 |
| <i>Heliasther helianthus</i> | * | * | * | * | * | 5 | 4 | 0,001 | 0,001 | 11 |
| <i>Emerita analoga</i> | 6 | 12 | 0,01 | 2 | 33 | 2 | 3 | 0,002 | 0,02 | 21 |
| <i>Pagurus edwardsii</i> | * | * | * | * | * | 15 | 8 | 0,003 | 0,02 | 78 |
| <i>Actinia equina</i> | 36 | 39 | 0,01 | 6 | 99 | * | * | * | * | * |

Tabla 6. Valores guía de ERB y ERM para los metales traza ($\mu\text{g g}^{-1}$) de acuerdo con ambas normativas y concentraciones medidas en este estudio ($\mu\text{g g}^{-1}$). ERB: Efectos de Rango Bajo, ERM: Efectos de Rango Medio.

Table 6. ERL and ERM guideline values for trace metals ($\mu\text{g g}^{-1}$) according with both norms and concentrations measured in this study ($\mu\text{g g}^{-1}$). ERL: Effects Range-Low, ERM: Effects Range-Median.

| Químico | Guías* | | Guías** | | Concentraciones medidas en este estudio | |
|---------|--------|-----|---------|-----|---|--|
| | ERB | ERM | ERB | ERM | Concentración media en playa Paraíso | Concentración media en playa El Lenguado |
| Cu | 34 | 270 | 23 | 200 | 152 | 49 |
| Pb | 47 | 218 | 32 | 200 | 454 | 100 |
| Ni | 21 | 52 | - | - | 47 | 29 |
| Cd | 1 | 10 | 1 | 6 | 103 | 44 |
| Zn | 150 | 410 | 70 | 350 | 119 | 36 |

* Long *et al.* (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environ. Manage.* 19(1): 81-97.

** Universidad de Playa Ancha. (2002). Antecedentes técnico-científicos para la Generación de la Norma de Calidad Secundaria de Sedimentos Marinos y Lacustres. CONAMA, Capítulo 7, Pág. 11.

(CONAMA, 2001). El sedimento submareal mostró un predominio de moderado exceso de finos en el tipo de grano. Esto se explicaría por una mezcla de sedimento original con el sedimento usado en las actividades de relleno de la zona intermareal gracias a la acción del oleaje. Por el contrario, en playa El Lenguado se observaron características morfodi-

námicas diferentes. El valor de la pendiente permitió clasificarla de tipo intermedio (Short & Wright, 1983; McArdle & McLachlan, 1991, 1992). Los valores simétricos del sedimento intermareal y submareal obtenido en playa El Lenguado también concuerdan con la definición de playa intermedia según estos mismos autores.

Taxa en ambas playas

Brown & McLachlan (1990) revelan que los crustáceos, poliquetos y moluscos son los taxa más frecuentes de la macroinfauna en el norte de Chile. Esto explicaría el predominio de los moluscos en ambas áreas de estudio, dado que la mayoría de las estaciones de muestreo en cada playa, se ubicaron en el submareal, hábitat característico de la mayoría de los moluscos de playas arenosas.

De los moluscos identificados en ambas playas, se observó la ocurrencia de *Crepidula dilatata* y *C. philippiana* sólo en playa Paraíso (Tabla 2). De acuerdo con Paredes & Cardoso (2007), la familia Calyptraeidae (Lamarck, 1809), incluye Caenogastropodos mayormente sedentarios, habitantes de fondos rocosos desde el intermareal hasta el sublitoral, lo que coincide con las características de esta playa. Por el contrario, playa El Lenguado no presentó estaciones con fondos rocosos, por lo que se justifica la ausencia de estas especies. Por su parte, los cnidarios solo se encontraron en playa Paraíso, con *Actinia equina* (Linnaeus, 1758) como representante, mientras que en El Lenguado no se identificó ninguna especie de este grupo (Tabla 3). Según Sebens (1976, 1982) y Day (1994) la distribución espacial de los cnidarios estaría asociada a fondos duros, lo que coincide con la ocurrencia de *A. equina* en una estación de fondo rocoso de playa Paraíso.

En las estaciones del intermareal de ambas playas, la especie predominante fue *Emerita analoga* (Stimpson, 1857). Al respecto Jaramillo (2001) indica que esta especie es una de las más comunes de la macroinfauna de playas de arena en el norte de Chile.

Indicadores químicos

De las concentraciones de los cinco metales analizados en los sedimentos, claramente se observó un mayor enriquecimiento en playa Paraíso (Fig. 2). Particularmente, en el caso del Cu, las concentraciones registradas fueron superiores a las reportadas por López *et al.* (2001), que encontraron concentraciones de 36 y 45 $\mu\text{g g}^{-1}$ en los sedimentos de playa Amarilla y La Rinconada, ambas localizadas en los extremos sur y norte de la bahía San Jorge, respectivamente (Fig. 1). Estos datos de distribución de Cu en la zona costera de esta bahía sugieren un significativo incremento de este metal en playa Paraíso, probablemente, como consecuencia de la historia de este sector y por su cercanía con el puerto de embarque de minerales de Antofagasta, donde se han reportado concentraciones medias de Cu de más de 3000 $\mu\text{g g}^{-1}$ en la zona submareal (Valdés *et al.*, 2010).

Las diferencias encontradas en el contenido de Cu, Ni y Pb en el grupo de los filtradores de ambas playas

se explicarían por diferencias en la tasa de filtración, pues según Waldichuk (1974) y Laws (1981) el Cu es bioacumulado por organismos vivos filtradores, además se asocia fácilmente con el Ni, mientras que las concentraciones medias de Pb presentaron valores muy diferentes en los ejemplares de ambas playas, lo que explicaría estas diferencias (Fig. 3).

En cuanto a los herbívoros de ambas playas, se observaron diferencias en el contenido de los mismos metales que en los filtradores, lo que se explicaría por ciertas similitudes en los hábitos alimenticios de ambos grupos, a pesar de la forma en que obtienen su alimento, ya que muchas especies son filtradoras-herbívoras (Fig. 3).

Diferencias observadas sólo en el contenido de Cd para el grupo de los carnívoros de ambas playas (Fig. 3), puede explicarse en ciertas fuentes de variación en el contenido de metales como: la longitud (Latouche & Mix, 1982), sexo (Orren *et al.*, 1980; Latouche & Mix, 1982), época del año (Orren *et al.*, 1980; Boalch *et al.*, 1981; Ouellette, 1981), o variabilidad residual (Lobel *et al.*, 1989).

Diferencias significativas observadas en el contenido de todos los metales, excepto el Cd para el grupo de los detritívoros de ambas playas, se deberían a que las concentraciones promedio de la totalidad de metales, exceptuando al Cd, presentaron valores bastante más elevados en playa Paraíso que en El Lenguado para este grupo. Esto podría estar asociado a cualquiera de las fuentes de variación en el contenido de metales antes mencionadas (Fig. 3).

Variabilidad temporal del contenido de metales en playa Paraíso

Dado que se tienen mediciones de Ni, Pb y Zn en tres períodos diferentes (Fig. 4), se puede establecer tendencia y evaluar el impacto de la construcción de playa Paraíso sobre estos metales. Se observó en un principio que la construcción de la playa artificial, terminada a fines de 2006, constituyó una medida remedial efectiva para el problema de las altas concentraciones de metales en ese sector, ya que éstas disminuyeron significativamente respecto a las concentraciones medidas en 2001 (Fig. 4), antes del inicio de las obras. Sin embargo, los datos de 2009 (poco más de 2 años después de la apertura de la playa artificial) muestran un incremento en las concentraciones de los tres metales, con diferencias significativas de acuerdo a un ANDEVA aplicado a estos valores (Fig. 4). Esto sugiere dos posibles explicaciones: i) que con el paso del tiempo la acción del oleaje ha mezclado los sedimentos nuevos depositados en este sector con sedimentos antiguos que no fueron removidos y mantenían altas

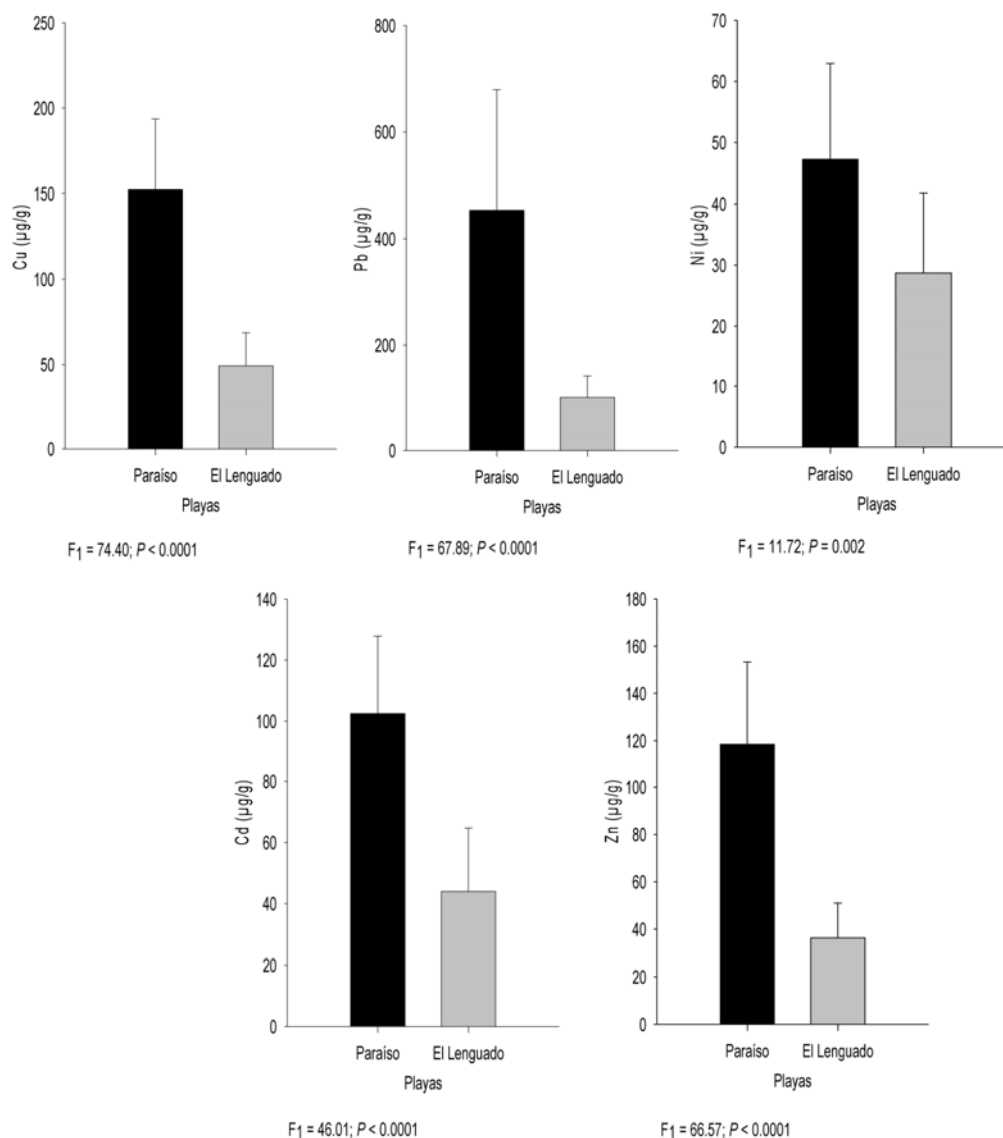


Figura 2. Concentraciones promedio de los cinco metales pesados determinados en sedimentos de ambas áreas de estudio y valores de la prueba ANDEVA (una vía) para cada metal analizado.

Figure 2. Average concentrations of the five heavy metals found in sediments, of both areas of study, and values of the ANOVA (one way) test for each metal analyzed.

concentraciones de estos metales, y/o ii) que las actividades de embarque de minerales continúan generando impacto en la zona costera.

Evaluación ambiental bajo normas de calidad

De acuerdo a la Tabla 6, los valores de Cu y Ni registrados en ambas playas sugieren efectos adversos ocasionales sobre las comunidades de organismos. En el caso del Cu, esta situación difiere de la registrada en el sector del puerto de Antofagasta (cercano a playa Paraíso), donde concentraciones medidas en sedimentos submareales sobrepasan la normativa nacional e internacional, con efectos adversos evidentes sobre

los organismos (Valdés *et al.*, 2010), debido probablemente, a un mayor impacto de la actividad de embarque de este mineral cerca del puerto. Por su parte, el Zn indica que en el caso de la norma internacional, ambas playas no presentarían efectos adversos para las comunidades de organismos, mientras que en el caso de la normativa nacional es posible encontrar efectos ocasionales en playa Paraíso. Finalmente, en el caso del Pb son evidentes las diferencias entre ambas playas; mientras que en playa Paraíso los valores determinados indican efectos adversos evidentes (bajo ambas normativas), en playa El Lenguado estos efectos serían solo ocasionales.

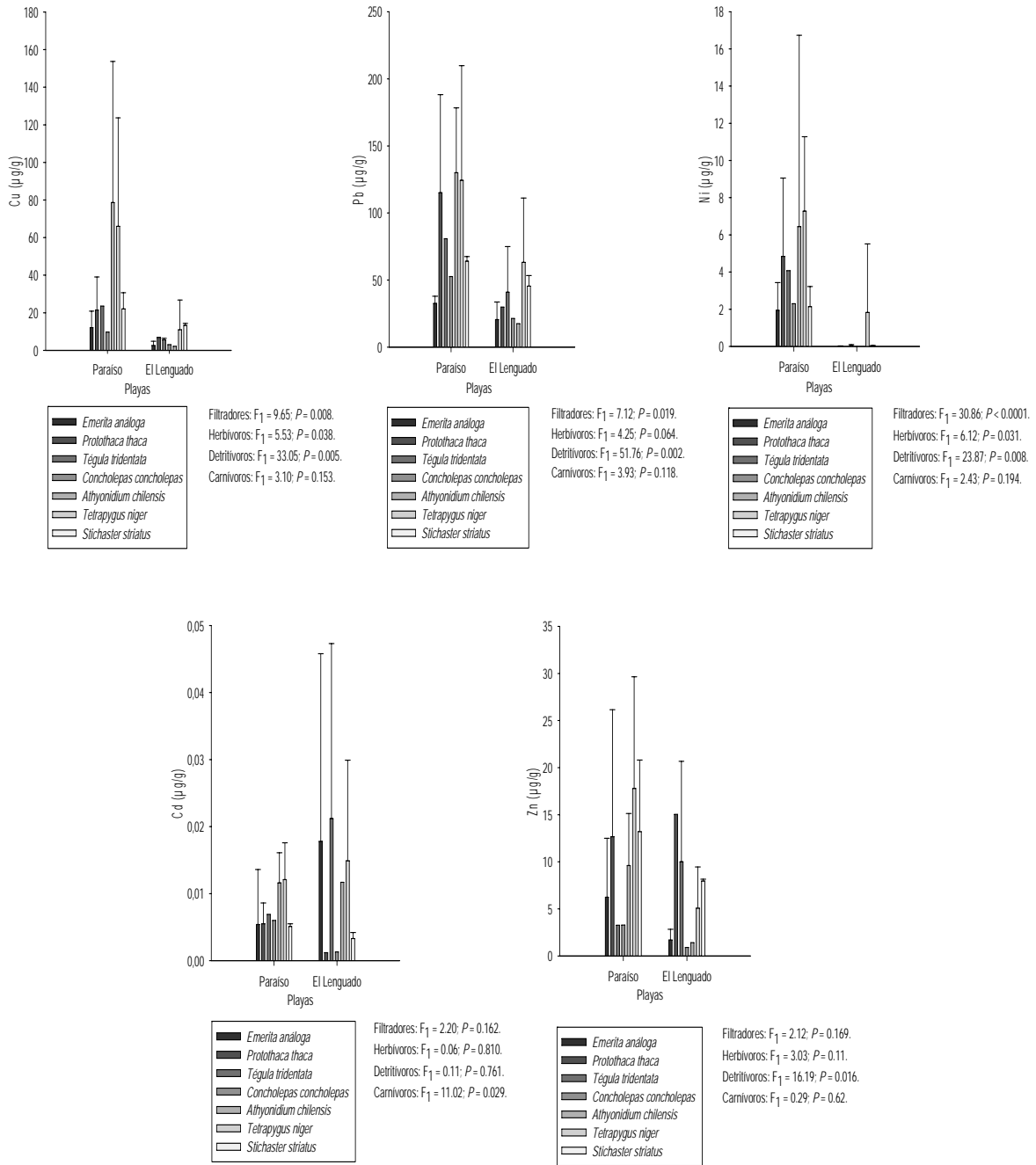


Figura 3. Concentraciones de los cinco metales pesados encontrados en especies comunes en ambas playas y valores de la prueba ANDEVA (una vía) para cada metal analizado en organismos de ambas playas separados por grupo dietario.

Figure 3. Concentrations of the five heavy metals found in species common to both beaches and values of the ANOVA (one way) test for each metal analyzed in organisms from both beaches, separated by dietary group.

Valdés *et al.* (2010) registraron valores de Pb levemente inferiores a la normativa nacional e internacional en el sector del puerto de Antofagasta, lo que sugiere que playa Paraíso sigue siendo una zona altamente impactada por la actividad de embarque de concentrado de Pb realizada en la bahía.

Según estudios llevados a cabo por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE.UU (NOAA, 1999), las concentraciones de Ni, Pb y Zn que pueden ser toleradas por la mayoría de organismos bentónicos son: 16, 31 y 120 µg g⁻¹, respectivamente. Al comparar estos límites de tole-

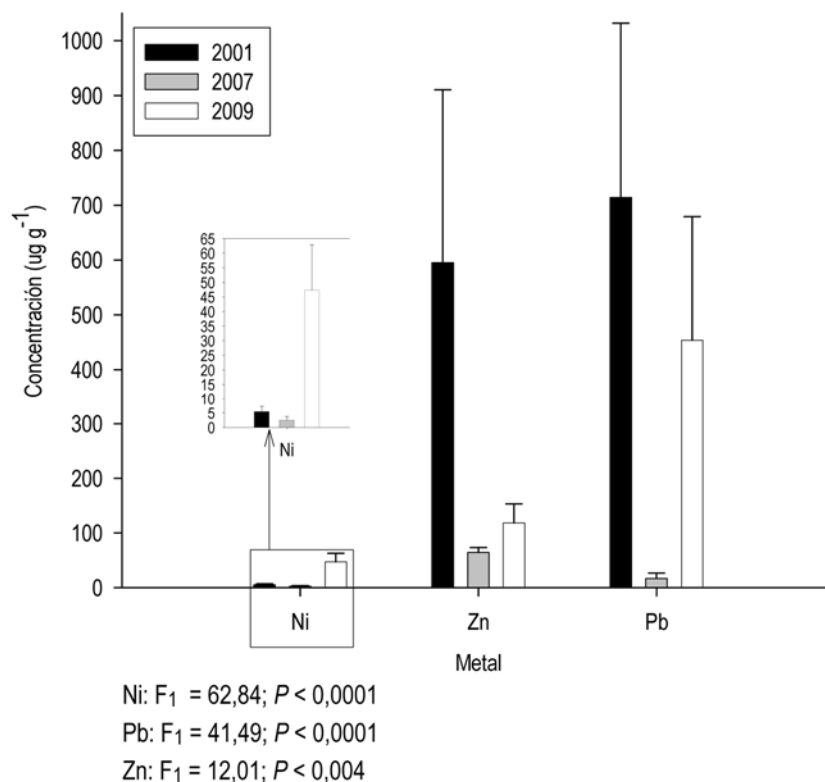


Figura 4. Concentraciones promedio de Ni, Zn y Pb determinados en sedimentos de playa Paraíso en tres períodos de tiempo y valores de la prueba ANDEVA (una vía) de la comparación entre los períodos 2007 y 2009, para Ni, Pb y Zn.

Figure 4. Average concentrations of Ni, Zn y Pb determinated in sediments of Paraíso beach for three time periods and values of the ANOVA (one way) test for the comparison between periods 2007 and 2009, for Ni, Pb y Zn.

rancia, para playa Paraíso se puede determinar que todas las especies a las que se les midió el contenido de metales presentaron concentraciones de Ni dentro del límite de tolerancia; en el caso del Pb las concentraciones de todos los organismos son mayores a la del límite de tolerancia; mientras que el contenido de Zn en la totalidad de organismos analizados está dentro de los límites de tolerancia. En el caso de playa El Lenguado, los valores de Ni para la totalidad de organismos analizados estuvieron muy por debajo del valor límite entregado por la NOAA para este metal, el Pb presentó valores por encima del límite de tolerancia en: *Tegula tridentata*, *T. atra*, *Tetrapygus niger*, *Stichaster striatus* y *Pagurus edwardsii*; finalmente los valores de Zn en el total de especies analizadas estuvieron muy por debajo del límite de tolerancia. En el caso del Cd se encontraron concentraciones inferiores a los límites máximos permitidos en la totalidad de organismos analizados según la norma del Ministerio de Salud, que establece el valor máximo de Cd en $0,1 \mu\text{g g}^{-1}$. El Cu, de acuerdo con la norma del Ministerio de Salud, que establece un valor máximo de $10 \mu\text{g g}^{-1}$, presentó valores por sobre la norma en todas las especies

analizadas de playa Paraíso, exceptuando a *Concholepas concholepas*. En el caso de playa El Lenguado la única especie que presentó una concentración de Cu por sobre la norma fue *Stichaster striatus* (Tabla 5).

Por lo tanto, la fauna bentónica y el sustrato de playa Paraíso presentan concentraciones muy elevadas de metales pesados, los que en algunos casos sobrepasan la normativa nacional e internacional. Estos metales, al compararlos con playa El Lenguado, presentan diferencias estadísticamente significativas. Es probable que bajo el sedimento inyectado, aún permanezca sustrato original no removido, que ocasione un aumento en las concentraciones de metales y/o que las actividades portuario-industriales cercanas continúan generando un impacto en esta zona.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores anónimos por las correcciones efectuadas al manuscrito, las que fueron de gran ayuda para su mejoramiento. Se

agradece también al equipo de trabajo del Laboratorio de Sedimentología y Paleoambientes del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad de Antofagasta. Asimismo a los ecólogos marinos Alexis Castillo, Marcos Guíñez, Rodrigo Saavedra, Andrés Garay y Barnett Bustamante. Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto FNDR-CONAMA BIP 30059576-0 "Levantamiento de información científica para el manejo ambiental de la bahía San Jorge, Antofagasta".

REFERENCIAS

- Ankley, G.T., D.M. Di Toro, D.J. Hansen & W.J. Berry. 1996. Technical basis and proposal for deriving sediment quality criteria for metals. *Environ. Toxicol. Chem.*, 15: 2055-2066.
- Birch, G.F. & S.E. Taylor. 2002. Assessment of possible toxicity of contaminated sediments in Port Jackson, Sydney. *Hydrobiología*, 472: 19-27.
- Brazeiro, A., N. Rozbaczylo & J.M. Fariña. 1998. Distribución espacial de la macrofauna en una playa expuesta de Chile central: efectos de la morfo-dinámica intermareal. *Invest. Mar.*, Valparaíso, 26: 119-126.
- Boalch, R., S. Chan & D. Taylor. 1981. Seasonal variation in the trace metal content of *Mytilus edulis*. *Mar. Pollut. Bull.*, 12(8): 276-280.
- Brown, A. & A. McLachlan. 1990. Ecology of sandy shores. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 328 pp.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 2002. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: summary tables. Updated 2002. [http://www.ccme.ca/assets/pdf/sedqg_summary_table.pdf]. Revisado: octubre 2010.
- Chauvaud, L., G. Thouzeau & G. Grall. 1996. Experimental collection of great scallop post larvae and other benthic species in the Bay of Brest: settlement patterns in relation to spatio-temporal variability of environmental factors. *Aquaculture*, 4: 238-288.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2001. Informe Técnico DIA del proyecto Construcción y habilitación de playas y piscinas artificiales en sector centro, Antofagasta, II Región. [http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientes/Evaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=3201]. Revisado: Marzo 2010.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2001. Informe Técnico DIA del proyecto Construcción y habilitación de playas y piscinas artificiales en sector Centro, Antofagasta, II Región. [http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientes/Evaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=3201]. Revisado: Marzo 2010.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 1995. Ley 19.300: Bases generales del medio ambiente. [http://www.sinia.cl/1292/articles-26087_ley_bases.pdf]. Revisado: marzo 2010.
- Crane, J.L. & D.D. MacDonald. 2003. Applications of numerical sediment quality targets for assessing sediment quality conditions in a US Great Lakes area of concern. *Environ. Manage.*, 32: 128-140.
- Day, R.J. 1994. Algal symbiosis in *Bunodeopsis*: Sea anemones with "auxiliary" structures. *Biol. Bull.*, 186: 182-194.
- Di Toro, D.M., C.S. Zarba, D.J. Hansen, W.J. Berry, R.C. Swartz & C.E. Cowan. 1991. Technical basis for establishing sediment quality criteria for nonionic organic chemicals using equilibrium partitioning. *Environ. Toxicol. Chem.*, 10: 1541-1583.
- Emery, K.O. 1961. A simple method of measuring beach profiles. *Limnol. Oceanogr.*, 6: 90-93.
- Jaramillo, E. 2001. The sand beach ecosystem of Chile. In: U. Seeliger & B. Kjerfve (eds.). Coastal marine ecosystems of Latin America. Ecological studies, Berlin, 144: 219-227.
- Latouche, Y.D. & M.C. Mix. 1982. The effects of depuration, size and sex on trace metal levels in bay mussels. *Mar. Pollut. Bull.*, 13(1): 27-29.
- Laws, E.A. 1981. Aquatic pollution. An introductory text. J. Wiley & Sons, New York, 611 pp.
- 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.
- Lobel, P.B., S.P. Belkhole, S.E. Jackson & H.P. Longerich. 1989. A universal method for quantifying and comparing the residual variability of element concentrations in biological tissues using 25 elements in the mussel *Mytilus edulis* as a model. *Mar. Biol.*, 102: 513-518.
- Long, E., D. MacDonald, S. Smith & F. Calder. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environ. Manage.*, 19: 81-97.
- McArdle, S.B. & A. McLachlan. 1991. Dynamics of the swash zone and effluent line on sandy beaches. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 76: 91-99.
- McArdle, S.B. & A. McLachlan. 1992. Sand beach ecology: swash features relevant to the macrofauna. *J. Coast. Res.*, 8: 398-407.
- McCready, S., G. Birch & E. Long. 2006. Metallic and organic contaminants in sediments of Sydney Harbour, Australia and vicinity. A chemical dataset

- for evaluating sediment quality guideline. *Environ. Int.*, 32: 455-465.
- MacDonald, D.D., L.M. DiPinto, J. Field, C.G. Ingersoll, E.R. Long & R.C. Swartz. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment effect concentrations for polychlorinated biphenyls. *Environ. Toxicol. Chem.*, 19: 1403-1413.
- McLachlan, A. 1983. Sandy beach ecology: a review. In: A. McLachlan & T. Erasmus (eds.). *Sandy beaches as ecosystems*. W. Junk Publishers, The Hague, 321-380.
- McLean, J.H. 1984. Systematics of *Fissurella* in the Peruvian and Magellanic faunal provinces (Gastropoda: Prosobranchia). *Contrib. Sci. Nat. Mus. Los Angeles County*, 345: 1-70.
- Montenegro, C. 2007. Efecto de la construcción de una playa artificial sobre la distribución de metales pesados, en la bahía San Jorge 23°S, Norte de Chile. Universidad de Antofagasta, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, 27 pp.
- Nacional Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 1999. Sediment quality guidelines developed for the National Status and Trends Program. [ccma.nos. noaa.gov/publications/sqg.pdf]. Revisado: diciembre 2011.
- Osorio, C. 1979. Clave para determinar algunos moluscos marinos con importancia económica en Chile. *Biol. Pesq.*, 11: 3-47.
- Orren, M.J., G. Eagle, H.F.K. O'Henning & A. Green. 1980. Variations in trace metals content of the mussel *Choromytilus meridionalis* (Kr) with season and sex. *Mar. Pollut. Bull.*, 11: 253-257.
- Ouellette, T.R. 1981. Seasonal variations of trace metals in the mussel *Mytilus californianus*. *Environ. Conserv.*, 8(1): 53-58.
- Paredes, C. & F. Cardoso. 2007. La familia Calyptraeidae en el Perú (Gastropoda: Caenogastropoda). *Rev. Peru. Biol.*, 13: 177-184.
- Resolución Exenta N°1152. 2006. Norma Secundaria de Calidad Ambiental para Sedimentos Marinos en la Región de Aysén. [http://www.eclac.cl/ilpes/noticias/paginas/4/39104/Cuadros-_DIA_2_conama.pdf]. Revisado: octubre 2010.
- Rozbaczylo, N. 1980. Clave para el reconocimiento de familias de anélidos poliquetos del mar chileno. *Stud. Neotrop. Fauna Environ.*, 15(3-4): 167-196.
- Rubio, B., L. Gago, F. Vilas, M. Nombela, S. García-Gil, I. Alejo & O. Pazos. 1996. Interpretación de tendencias históricas de contaminación por metales pesados en testigos de sedimentos de la Ría de Pontevedra. *Thalassa*, 12: 137-152.
- Sadiq, M. 1992. Toxic metal chemistry in marine environments. Marcel Dekker, New York, 390 pp.
- Sebens, K.P. 1976. The ecology of Caribbean Sea Panama: utilization of space on a coral reef. In: G.O. Mackie (ed.). *Coelenterate ecology and behaviour*. British Columbia, pp. 67-77.
- Sebens, K.P. 1982. Competition for space: growth rate reproductive output and escape in size. *Amer. Nat.*, 120(2): 189-197.
- Short, A.D. & L.D. Wright. 1983. Physical variability of sandy beaches. In: A. McLachlan & T. Erasmus (eds.). *Sandy beaches as ecosystem*. W. Junks Publishers, The Hague, pp. 133-144.
- Universidad de Playa Ancha (UPLA). 2002. Antecedentes técnico-científicos para la generación de la norma de calidad secundaria de sedimentos marinos y lacustres. Proyecto Programa Priorizado de Normas, Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile. Informe Final, 156 pp.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). 1996. Method 3050B, Acid digestion of sediments, sludges, and soils. [http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3050b.pdf]. Revisado: Diciembre 2010.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). 1992. Sediment classification methods compendium. US EPA 823-R-92-006, Washington DC, 229 pp.
- Valdés, J., D. Román, M. Guíñez, L. Rivera, T. Morales, J. Ávila & P. Cortés. 2010. Distribution and temporal variation of trace metal enrichment in surface sediments of San Jorge Bay, Chile. *Environ. Monitoring Assessment*, 167: 185-197.
- Waldichuk, M. 1974. Some biological concern in heavy metals pollution. In: F.J. Vernberg & W. Vernberg (eds.). *Pollution and physiology of marine organisms*. Academic Press, New York, pp. 1-59.
- Zuñiga, O. 2002. Guía de biodiversidad N°1. Vol. I. Macrofauna y algas marinas. Moluscos. [http://www.uantof.cl/crea/guia%20moluscos.pdf]. Revisado: Enero 2010.
- Zuñiga, O. 2002. Guía de biodiversidad N°2. Vol. I. Macrofauna y algas marinas. Crustáceos. [http://www.uantof.cl/crea/guia%20crustaceos.pdf]. Revisado: Enero 2010.