

Variación espacial y estacional de metales y compuestos orgánicos en los sedimentos costeros del Golfo de Arauco

Spatial and seasonal variation of metals and organic compounds in the coastal sediments of the Gulf of Arauco

Cristian Chandía^{1,2,*}, Marco Salamanca^{1,2}, Aldo Hernández³, Luis Bermedo^{2,4}, Eduardo Hernández-Miranda^{1,5,6} & Oscar Inostroza-Michael³

¹Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

²Laboratorio de Oceanografía Química (LOQ), Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

³Centro de Investigación en Recursos Naturales HOLON SpA, Concepción, Chile.

⁴Programa de Magíster en Ciencias con mención en Oceanografía, Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

⁵Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR), Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

⁶Laboratorio de Investigación en Ecosistemas Acuáticos (LIInEA), Concepción, Chile.

*Corresponding author: crchandi@udec.cl

RESUMEN

Los sedimentos del Golfo de Arauco (GA) están bajo la influencia de diversos aportes provenientes desde actividades industriales, agrícolas, forestales y urbanas, las cuales generan impactos significativos en las condiciones ambientales de la zona costera. La información disponible del estado ambiental del GA es escasa y fragmentada. Este estudio evaluó la composición química de los sedimentos del GA durante primavera 2021, verano e invierno 2022. Los resultados dan cuenta de notables diferencias en la distribución espacial de los parámetros analizados, identificando áreas con mayores concentraciones de metales y compuestos orgánicos, específicamente en la zona que comprende Escuadrón Sur, Bahía Coronel y Bahía Lota, las cuales son centros industriales y urbanos. Estas zonas presentaron un dominio de arenas finas a muy finas e índices de Igeo y PLI que clasifican estos sedimentos como alterados, lo que sugiere que las emisiones antropogénicas liberadas tienden a acumularse próximas a las fuentes de origen. Por otro lado, las zonas entre la Desembocadura del río Biobío hasta el sector Escuadrón Norte y desde Laraquete a Punta Lavapié dan cuenta de menores concentraciones de metales y compuestos orgánicos, con predominio de arenas medias a finas, e índices de Igeo y PLI bajos, clasificando estos sedimentos como no contaminados. Se observaron patrones de distribución comparables entre campañas de muestreo, sin evidenciarse diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Los parámetros analizados en sedimentos muestran que existen variaciones espaciales, pero no temporales para la zona costera del GA.

Palabras clave: Golfo de Arauco, sedimentos, metales extraíbles, compuestos orgánicos.

ABSTRACT

The sediments of the Gulf of Arauco (GA) are under the influence of several inputs from industrial, agricultural, forestry, and urban activities, which generate significant impacts on the environmental conditions of the coastal zone. The available information on the environmental status of the GA is limited and fragmented. This study evaluated the chemical composition of the GA sediments during spring 2021, summer, and winter 2022. The results show notable differences in the spatial distribution of the parameters analyzed, identifying areas with higher concentrations of metals and organic compounds, specifically in the area that includes Escuadrón Sur, Bahía Coronel, and Bahía Lota, which are industrial

and urban centers. These areas presented a dominance of fine to very fine sands and Igeo and PLI index that classify these sediments as altered; suggesting that the released anthropogenic emissions tend to accumulate close to the sources. On the other hand, the areas between the mouth of the Biobío river up to the Escuadrón Norte sector and from Laraquete to Punta Lavapiés show lower concentrations of metals and organic compounds, with a predominance of medium to fine sands, and low Igeo and PLI index, classifying these sediments as uncontaminated. Comparable distribution patterns were observed between sampling campaigns, with no statistically significant differences between them. The parameters analyzed in sediments show that there are spatial, but not temporal, variations in the GA coastline.

Keywords: Gulf of Arauco, sediments, extractable metals, organic compounds.

INTRODUCCIÓN

El Golfo de Arauco es un cuerpo de agua semicerrado orientado al norte, que limita por el oeste con la Isla Santa María, la cual divide la entrada del golfo en dos segmentos: una apertura principal que se dirige al norte (Boca Grande), extendiéndose por aproximadamente 25 km en una dirección este-oeste, y una segunda apertura más somera (Boca Chica) que presenta un intercambio de agua limitado por la plataforma continental al oeste (Figueroa & Moffat 2000; Valle-Levinson *et al.* 2003).

La composición de los sedimentos marinos superficiales (*i.e.*, menos de 2 cm) depende de las condiciones geomorfológicas y de los procesos fisicoquímicos que determinan la depositación y preservación del material sedimentado. Los sedimentos presentes en los golfos y bahías son reconocidos como el depósito final de las actividades industriales, urbanas y aportes naturales de su entorno (Giordano *et al.* 1992; French 1993). Los residuos provenientes de las actividades industriales y portuarias usualmente contienen una alta carga de metales pesados y otros compuestos de origen orgánico (Rizzo *et al.* 2010; Chester & Jickells 2012), los que determinan las concentraciones en los sedimentos marinos, pudiendo resultar en efectos deletéreos para organismos marinos y, eventualmente, para la población humana (Calderón & Valdés 2012). El estudio de los metales y compuestos orgánicos en los sedimentos marinos es de gran relevancia, ya que los sedimentos actúan como reservorios de éstos y pueden ser utilizados como indicadores de cambios ambientales a lo largo del tiempo. Asimismo, la información obtenida desde la matriz sedimentaria es fundamental para la gestión y protección de los ecosistemas marinos, favoreciendo su preservación en el tiempo.

Los metales son parte de la corteza terrestre, lo que significa que están presentes en todos los sistemas naturales. Su abundancia está influenciada por factores geográficos,

climáticos, oceanográficos y antropogénicos (Libes 2009). Si bien, la mayoría de los metales se liberan al medio ambiente desde fuentes naturales y antrópicas, estas últimas tienen un impacto más significativo y determinan las concentraciones actuales, especialmente en sistemas costeros semicerrados como golfos y bahías, que actúan como sumideros de aportes provenientes del continente y su entorno (Vignati *et al.* 2020). Las vías de ingreso de los metales a los sistemas naturales varían según sus propiedades físico químicas. La depositación atmosférica es una de las principales rutas de entrada, promoviendo la depositación en áreas cercanas a las fuentes de emisión. Esto también depende de la forma química en la que los metales están presentes al momento de su liberación (Ruilian *et al.* 2008; Zhang *et al.* 2016).

Los metales y compuestos orgánicos que llegan a la columna de agua de la zona costera experimentan una serie de procesos biogeoquímicos que pueden favorecer que los aportes se hundan y depositen en los sedimentos superficiales, pudiendo posteriormente ser resuspendidos y movilizados nuevamente a la columna de agua. La removilización desde los sedimentos puede tener su origen en procesos naturales como corrientes, mareas, olas de viento, tormentas e interacción entre olas y corrientes, así como también por factores antropogénicos tales como dragados, transporte y actividad pesquera, entre otras (Buruaem *et al.* 2021). Por otra parte, tanto los metales como los compuestos orgánicos pueden ser biomagnificados a través de las tramas tróficas hasta los consumidores finales, lo cual puede generar efectos deletéreos de distinto nivel bajo condiciones de exposición aguda y crónica de los organismos (Bay *et al.* 2012; Karimi *et al.* 2016; Bradley *et al.* 2017).

El Golfo de Arauco presenta una marcada variabilidad estacional meteorológica e hidrográfica (Vergara *et al.* 2023), además de múltiples fuentes de origen antropogénico, los cuales durante los últimos 30 años se han focalizado en las Bahías de Lota y Coronel (Chandía *et al.* 2022, Chandía *et al.* 2024), lo que ha llevado a tener una desmejorada

condición ambiental de estas zonas, y la denominación de zonas de sacrificio ambiental (Holifield & Day 2017). Este golfo es uno de los ecosistemas marinos más productivos del sur de Chile en términos de sus tasas de productividad primaria y pesquerías, también es una zona de gran importancia socioeconómica, donde se ha establecido un activo desarrollo pesquero, portuario, urbano e industrial (Della Croce *et al.* 1995). Sin embargo, el Golfo de Arauco cuenta con una escasa y fraccionada información ambiental de los sedimentos marinos, que no permite determinar el estado ambiental actual, sus zonas de riesgo y así, contar con medidas de control efectivas para preservar su biodiversidad. Es por esto que el Ministerio de Medio Ambiente adjudicó a la Universidad de Concepción el proyecto Red de Monitoreo Ambiental de Ecosistemas Marinos del Golfo de Arauco (RE. N° 0366/2021 [<https://pras.mma.gob.cl/>]), donde uno de los objetivos fue evaluar la concentración y distribución de metales y compuestos orgánicos de interés ambiental en los sedimentos marinos de la costa del Golfo de Arauco, y con ello determinar su variabilidad espacial y temporal a través de análisis estadísticos e índices geoquímicos de calidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

DISEÑO DE MUESTREO

Este estudio se llevó a cabo durante octubre 2021 (primavera), enero 2022 (verano) y agosto 2022 (invierno), recolectándose muestras en 21 sitios del submareal costero, 19 del intermareal y 2 muestras estuarinas en la desembocadura del río Biobío (Fig. 1). En todos los sitios se recolectaron muestras de sedimentos superficiales, y se analizó la granulometría, carbono orgánico total (COT), potencial redox (Redox), cadmio extraíble (Cd), plomo extraíble (Pb), mercurio total (Hg), compuestos orgánicos halogenados (AOX), hidrocarburos totales (HCT), en tanto que el aluminio (Al) se analizó sólo en las estaciones del humedal, Desembocadura río Biobío (H.1 y H.2), y de los sectores Escuadrón, Coronel y Lota (estaciones IA.1 a IA.12 y S.1 a S.13); el arsénico extraíble (As) y el vanadio extraíble (V) fueron analizados sólo en las Bahías de Coronel y Lota (estaciones IA.6 a IA.12 y S.7 a S.13), mientras que los compuestos orgánicos extraíbles (EOX) fueron analizados sólo en las estaciones localizadas entre Chivilingo y Carampangue (estaciones IA.13 a IA.16 y S.15 a S.18).

Las muestras de los sedimentos superficiales del ambiente submareal fueron obtenidas con una Draga van Veen de 0,1 m² de mordida, y submuestreado los primeros 2 a 3 cm del sedimento mediante el uso de un mini sacatestigos de plexiglás para los parámetros inorgánicos y de acero inoxidable para los parámetros orgánicos. Los sedimentos del ambiente intermareal se obtuvieron directamente desde la orilla utilizando la misma metodología de submuestreo del ambiente submareal. Las muestras estuarinas se obtuvieron

mediante una draga de 0,025 m² de mordida a la que posteriormente con una paleta de teflón se le retiraron los primeros 2 a 3 cm. Todas las muestras fueron guardadas en bolsas estériles previamente rotuladas con la identificación del sitio, fecha y análisis a realizar, para luego preservar en frío (4 °C) con Ice Pack y en oscuridad hasta llegar al laboratorio. Una vez en el laboratorio las muestras fueron secadas a 35 °C para luego comenzar con el tratamiento de extracción, purificación y lectura de cada uno de los analitos.

ANÁLISIS QUÍMICOS

Los análisis químicos fueron realizados en el Laboratorio de Oceanografía Química de la Universidad de Concepción (LOQ-UdeC) basado en métodos estandarizados (ver Tabla 1), y validados para la matriz marina por el LOQ-UdeC, permitiendo obtener límites de cuantificación que están al menos un orden de magnitud bajo las concentraciones naturales, lo que asegura la adecuada cuantificación y sensibilidad de los parámetros analizados.

CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

El control de calidad consideró estrictos y rigurosos procedimientos de limpieza, verificación de la curva de calibración, además cada 10 muestras se analizaron viales limpios vacíos (blanco equipo), blancos de reactivos, soluciones estándar de 10, 5 y 1 ppb y Material de Referencia Certificado (MRC). Para determinar la exactitud de los análisis de metales extraíbles se utilizó el MRC MESS-4, para HCT se utilizó un estándar interno de 1-clorooctadecano y blancos fortificados con una mezcla de hidrocarburos alifáticos del n-C10 a n-C38, para los análisis de COT se utilizó el MRC OAS-B2152, para el EOX se utilizó un estándar interno de 1,2,3,4,10,10-hexacloro-1,2,4a,5,8,8a-hexahidro-1,4-endo,exo-5,8-dimetanonaftalina, y para los análisis de AOX se utilizó material de referencia interno del LOQ-UdeC, que cuenta con una incertidumbre < 10 % de la concentración. La precisión y exactitud de los parámetros analizados en sedimentos variaron.

Los ensayos realizados permitieron evaluar la precisión y exactitud de los métodos analíticos empleados, fluctuando entre un 90,85 % y un 106,63 %, con desviaciones estándar menores al 10 % en todos los casos.

ÍNDICES GEOQUÍMICOS EN SEDIMENTOS

Para establecer la calidad ambiental de los sedimentos se utilizó como criterio las concentraciones de metales preindustriales reportados para la Bahía de Coronel en Cd y Pb por Hidalgo (2017), y para Hg por Chandía *et al.* (2022), en tanto que, el As y V corresponden a valores de corteza terrestre superficial (Rudnick & Gao 2003). Los cálculos de índices geoquímicos en los sedimentos permiten establecer una medida cuantitativa de los procesos de acumulación y deterioro ambiental de los sedimentos superficiales evaluados.

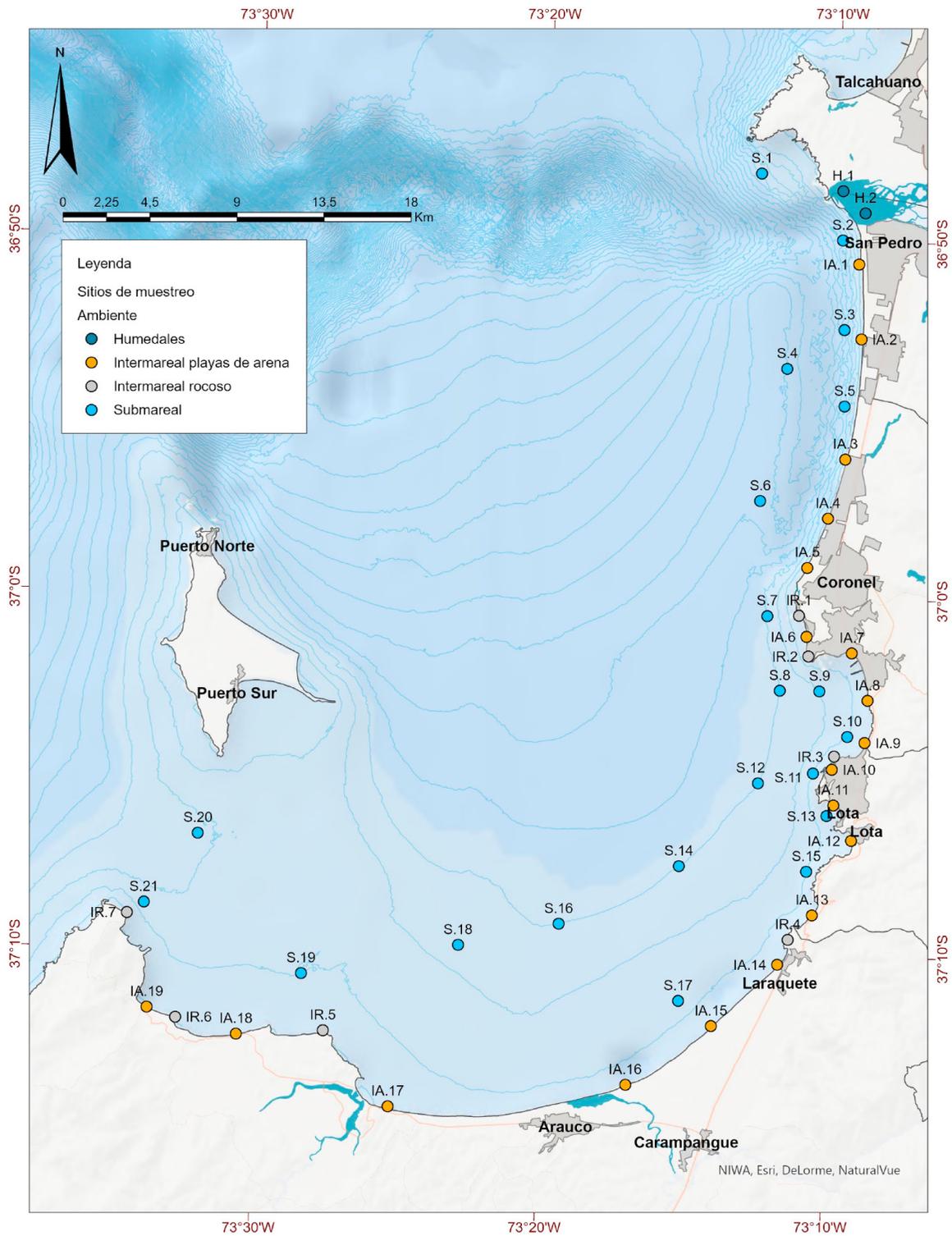


FIGURA 1. Mapa de los sitios de muestreo para sedimentos superficiales del submareal (circulo celeste), intermareal (circulo naranja) y humedal del rio Biobío (circulo azul) en el Golfo de Arauco. Coordenadas en grados, Datum WGS-84. / Sampling sites map for surface sediments of the subtidal (light blue circle), intertidal (orange circle) and Biobío River wetland (blue circle) in the gulf of Arauco. Coordinates in degrees, WGS-84 Datum.

TABLA 1. Parámetros, límite de cuantificación (LC), unidades, metodologías y referencias utilizadas en el análisis de sedimentos superficiales del Golfo de Arauco / Parameters, limit of quantification (LC), units, methodologies and references used in the analysis of superficial sediments from the Gulf of Arauco.

Parámetros	LC	Unidades	Metodologías	Referencias
Granulometría	0,001	%	Gravimetría	Resolución Exenta N° 3612 de 2009, numeral 26, de la Subsecretaría de Pesca.
COT	0,01	%	Análisis Elemental (CHN)	Método validado: Vector. CHN/O Analyzer. User Manual. TeKmar-Dohrmann.
Potencial Rédox	0,1	mV	Potenciometría	Resolución Exenta N° 3612 de 2009, numeral 29, de la Subsecretaría de Pesca.
Cadmio extraíble	0,015	µg g ⁻¹	ICP-MS	Método validado: EPA 3051 A. // B. Spence. 2004. The Determination of Metals in Environmental Samples Using the X Series ICP-MS.
Plomo extraíble	0,015	µg g ⁻¹	ICP-MS	Método validado: EPA 3051 A. // B. Spence. 2004. The Determination of Metals in Environmental Samples Using the X Series ICP-MS.
Mercurio total	0,0002	µg g ⁻¹	DMA	Método validado: EPA 7473.
AOX	7,00	µg g ⁻¹	Microcoulombimetría	Método validado: Accredited Qual Assur. DOI:10.1007/s00769-007-0308-z.
HCT (C10-C38)	0,012	µg g ⁻¹	GC-MS	Método validado: EPA Method 8270 D.
Aluminio extraíble	60,0	µg g ⁻¹	FAAS	Método validado: EPA Method 3051 A. // Silva, N., Haro, J. &, Prego, R. (2009). Estuarine, Coastal and Shelf Science. 82. 469 – 476.
Arsénico extraíble	1,5	µg g ⁻¹	HGAAS	Método validado: EPA Method 3052 // Zhang, Y., & Adelojou, S., 2008. Talanta, 76, 724-730.
Vanadio extraíble	50,00	µg g ⁻¹	FAAS	Método validado: EPA 3051 A. // Silva, N., Haro, J. &, Prego, R. (2009). Estuarine, Coastal and Shelf Science. 82. 469 – 476.
EOX	1,00	µg g ⁻¹	Microcoulombimetría	Método validado: EPA 9023 / Extractable Organic Halides (EOX) in Solids.

ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN (Igeo)

El Igeo se calculó utilizando la expresión de Müller (1979), donde C_n es la concentración medida de un metal en los sedimentos y B_n es la concentración de referencia del metal. El factor 1,5 corresponde a la corrección de la matriz de referencia producto de posibles procesos litogénicos ocurridos en los sedimentos superficiales (Buccolieri *et al.* 2006; Al-Haidarey *et al.* 2010).

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

Para la evaluación se utilizaron las Clases de Contaminación propuestas por Müller (1981):

- < 0: no contaminado.
- 0 - 1: no contaminado a levemente contaminado.
- 1 - 2: moderadamente contaminado.
- 2 - 3: contaminado.
- 3 - 4: muy contaminado.
- 4 - 5: muy fuertemente contaminado.
- > 5: totalmente contaminado.

ÍNDICE DE CARGA DE CONTAMINANTES (PLI)

Para comparar el contenido total de metales en los diferentes sitios de muestreo, se utilizó el Índice de Carga de Contaminación por metales (Tomlinson *et al.* 1980), obtenido por la siguiente ecuación:

$$PLI = (Cf_1 * Cf_2 * \dots * Cf_n)^{1/n}$$

Donde C_{f_n} es el factor de contaminación, calculado como la relación entre la concentración de metal en sedimentos y su nivel de referencia, y n es el número de metales analizados.

PLI = < 1: ausencia de contaminantes

PLI = 1: contaminación transitoria

PLI = > 1: contaminado

Los niveles siguientes (2, 3, ..., 10) indican el deterioro progresivo de los sedimentos.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

La determinación de patrones espacio-temporales fueron abordadas mediante un análisis de prueba de hipótesis,

utilizando Modelos Lineales Generalizados (GLM; Myers 2010), se utilizaron las concentraciones de cada parámetro como variable dependiente y las reclasificaciones por campaña (oct-21, ene-22 y ago-22) y sitio de muestreo como fuentes de variación. Los resultados del análisis exploratorio demostraron ausencia de normalidad en las variables analizadas, por lo que, para el ajuste de residuales en los GLM, se consideró una familia Quasi-Poisson (quasipoisson) como descriptora de la distribución del error y una función de vínculo de tipo logarítmico (log).

Para resumir los resultados del GLM en representaciones únicas, se seleccionaron las variables que demostraron significancia estadística entre campañas y sitios de muestreo, ejecutándose Análisis de Componentes Principales (PCA) confirmatorios por cada fuente de variación, independientemente. Para evaluar la significancia multivariada de cada fuente de variación se realizó el Análisis de Varianza Permutacional Multivariado (PERMANOVA), de una o más variables, y de uno o más factores (Anderson 2001).

El análisis estadístico fue efectuado en R 4.3.2 (R Core Team 2023) utilizando las librerías dplyr (Wickham *et al.* 2023), pastecs (Grosjean & Ibanez 2018), PerformanceAnalytics (Peterson & Carl 2020), vegan (Oksanen *et al.* 2022), ggplot2 (Whickham 2016) y ggpubr (Kassambara 2023).

RESULTADOS

SEDIMENTOS DEL ESTUARIO E INTERMAREAL

La composición granulométrica de los sedimentos intermareales (Fig. 2), permite observar que los sitios del intermareal ubicados hacia el norte de Lota (H.1 a IA.9) muestran un predominio de arenas medias y gruesas, mientras que hacia el sur de Lota y hasta Punta Lavapié (IA.11 a IA.19) predominan las arenas finas y medias. Este patrón es consistente en las tres campañas, con variaciones menores en cuanto a los porcentajes de representatividad de las distintas fracciones granulométricas.

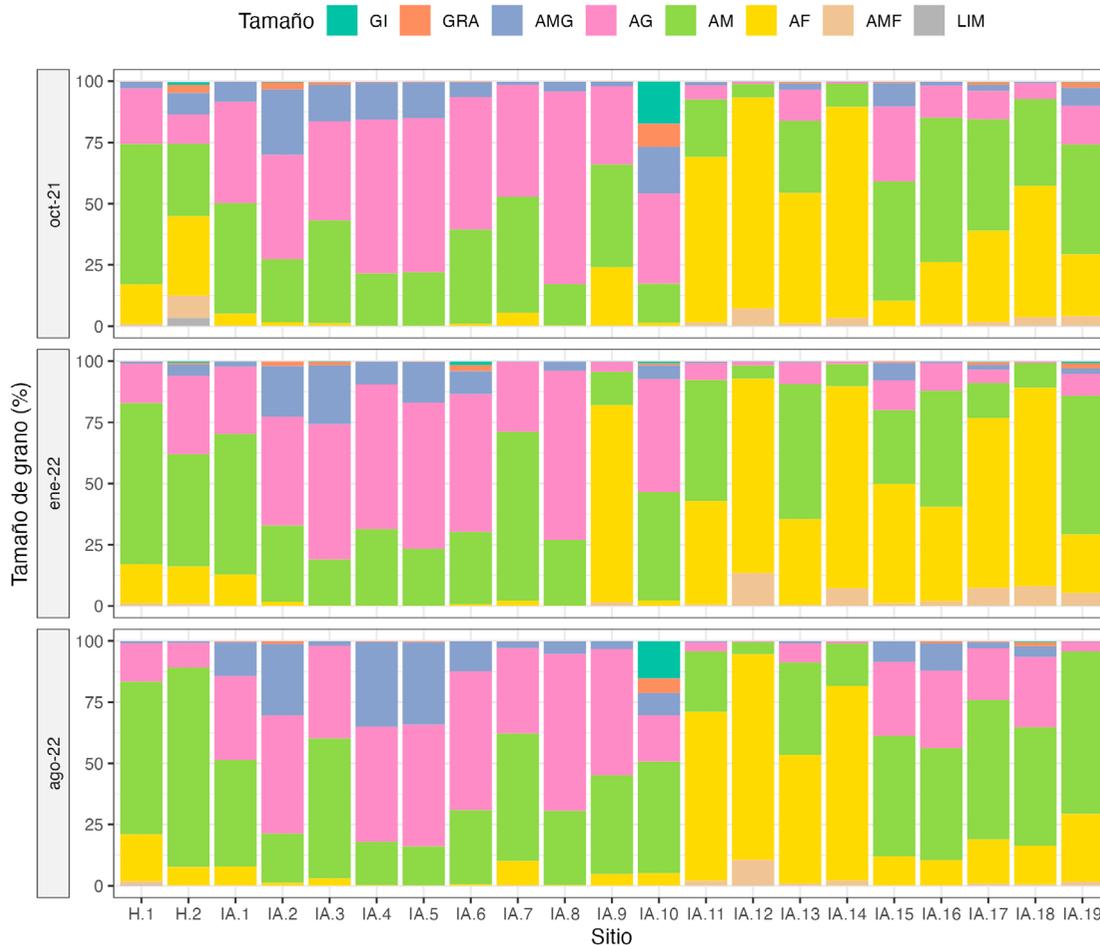


FIGURA 2. Composición granulométrica para los sedimentos del estuario (H.1 y H.2) y del intermareal (IA.1 a IA.19) por campaña y sitio de muestreo. / Particle size composition for estuarine (H.1 and H.2) and intertidal (IA.1 to IA.19) sediments by campaign and sampling site.

La estadística descriptiva por parámetro medido en los sedimentos intermareales permite observar que el EOX mostró el 100 % de los datos por debajo del límite de cuantificación de laboratorio, razón por la cual no fue incluido en los análisis posteriores. De los 11 parámetros medidos, cuatro (Al, V, AOX y Redox) mostraron una distribución de frecuencias cercana a la distribución normal (normtest- $p > 0,05$), mientras que los siete restantes no se distribuyeron normalmente. Adicionalmente, destacaron el Hg, COT e HCT por mostrar una alta dispersión, con coeficientes de variación (cv%) que superaron el 100 % (Tabla A y B, Material Suplementario).

El análisis del comportamiento individual de cada parámetro por campaña y sitio de muestreo permite observar que, los sitios de muestreo del estuario (H.1 y H.2) y las estaciones IA.10 y IA.11, ubicadas en las cercanías de Lota, mostraron, en general, concentraciones más altas de Hg y Pb. Además, solo IA.10 y IA.11 exhibieron mayores concentraciones de HCT y de COT. Destaca la tendencia ascendente en las concentraciones de As observadas entre IA.6 y IA.12 y concentraciones de AOX más altas entre H.2

e IA.8 (Escuadrón y Coronel) y en IA.14 (Laraquete), mientras que el Redox se mantuvo positivo en todos los sitios de muestreo. La diferenciación entre campañas de muestreo resultó moderada, destacando concentraciones más elevadas de Al, Cd, Hg, HCT y TOC durante la campaña de primavera 2021 (Tabla A, Material Suplementario).

Las pruebas estadísticas GLM, orientadas a determinar la existencia de diferencias temporales (campañas) y espaciales (sitios de muestreo), fueron aplicadas a todos aquellos parámetros que fueron medidos en todos los sitios de muestreo, lo que implicó descartar Al, As y V de este análisis. El resultado del análisis revela que los modelos analizados explicaron entre el 42 y 94 % de la variabilidad de cada parámetro, siendo el sitio de muestreo el efecto que explicó una mayor proporción de la variabilidad (25 a 88 %), resultando estadísticamente significativo para seis de los siete parámetros analizados, exceptuando el Redox (Tabla 2). La fuente de variación campaña de muestreo explicó entre un 1 y 17 % de la variabilidad, resultando estadísticamente significativa para Hg, COT, HCT y Redox.

TABLA 2. Resultados de los modelos lineales generalizados (GLM) ejecutados para el análisis de la significancia estadística de las fuentes de variación (Efecto) campaña de muestreo (Campaña) y sitio de muestreo (Sitio). Parámetros medidos en sedimentos del intermareal. g.l.: grados de libertad; Devianza: variabilidad explicada por los efectos; resid: grado de libertad residuales; Dev. Resid.: variabilidad residual; (P(>Chi) razón de verosimilitud; sig: “+” indica $p < 0,05$; %DE: porcentaje de la devianza explicada por cada efecto / Results of the generalized linear models (GLM) executed for the analysis of the statistical significance of the sources of variation (Effect) sampling campaign (Campaign) and sampling site (Site). Parameters measured in intertidal sediments. d.f.: degrees of freedom; Deviance: variability explained by the effects; resid: residual degree of freedom; Dev. Resid.: residual variability; (P(>Chi) likelihood ratio; sig: “+” indicates $p < 0.05$; %SD: percentage of the deviance explained by each effect).

Parámetro	Efecto	g.l.	Devianza	g.l. resid	Dev. Resid.	Pr(>Chi)		%DE
Cd	Campaña	2	0,003	60	0,173	0,2436		1%
	Sitio	20	0,137	40	0,036	0,0000	+	78%
Hg	Campaña	2	0,038	60	0,480	0,0000	+	7%
	Sitio	20	0,424	40	0,056	0,0000	+	82%
Pb	Campaña	2	1,290	60	72,131	0,1847		2%
	Sitio	20	57,778	40	14,352	0,0000	+	79%
AOX	Campaña	2	6,498	60	424,123	0,0530		2%
	Sitio	20	380,215	40	43,908	0,0000	+	88%
COT	Campaña	2	6,868	60	35,191	0,0000	+	16%
	Sitio	20	32,797	40	2,395	0,0000	+	78%
HCT	Campaña	2	245,486	60	1251,249	0,0000	+	16%
	Sitio	20	1134,347	40	116,902	0,0000	+	76%
Redox	Campaña	2	6901,362	60	34889,342	0,0036	+	17%
	Sitio	20	10366,171	40	24523,171	0,6589		25%

Los PCA realizados para aquellos parámetros que mostraron diferencias estadísticamente significativas para cada uno de los efectos analizados se muestran en la Fig. 3, donde es posible observar que las dos primeras componentes principales del PCA entre campañas (Fig. 3a) explican el 85 % de la variabilidad de la base de datos de entrada, y que la diferenciación entre campañas logra explicar un 10 % de la ordenación. En este caso, durante la campaña de octubre-21 se observó concentraciones más altas de HCT, Hg y COT, mientras que en agosto-22 se observaron Redox más altos.

Las dos primeras componentes principales del PCA para parámetros que mostraron diferencias entre sitios explicaron un 72 % de la variabilidad de los datos de entrada, con una diferenciación espacial que explicó un 78 % de la ordenación (Fig. 3b). En este caso, la diferenciación entre sitios de muestreo se explica por las concentraciones más elevadas de HCT, COT, Hg y Pb, observadas en IA.10 e IA.11 (Lota) y por las mayores concentraciones de Cd y AOX observadas en H.2 (Estuario), y en IA.13 e IA.14 (Chivilingo y Laraquete).

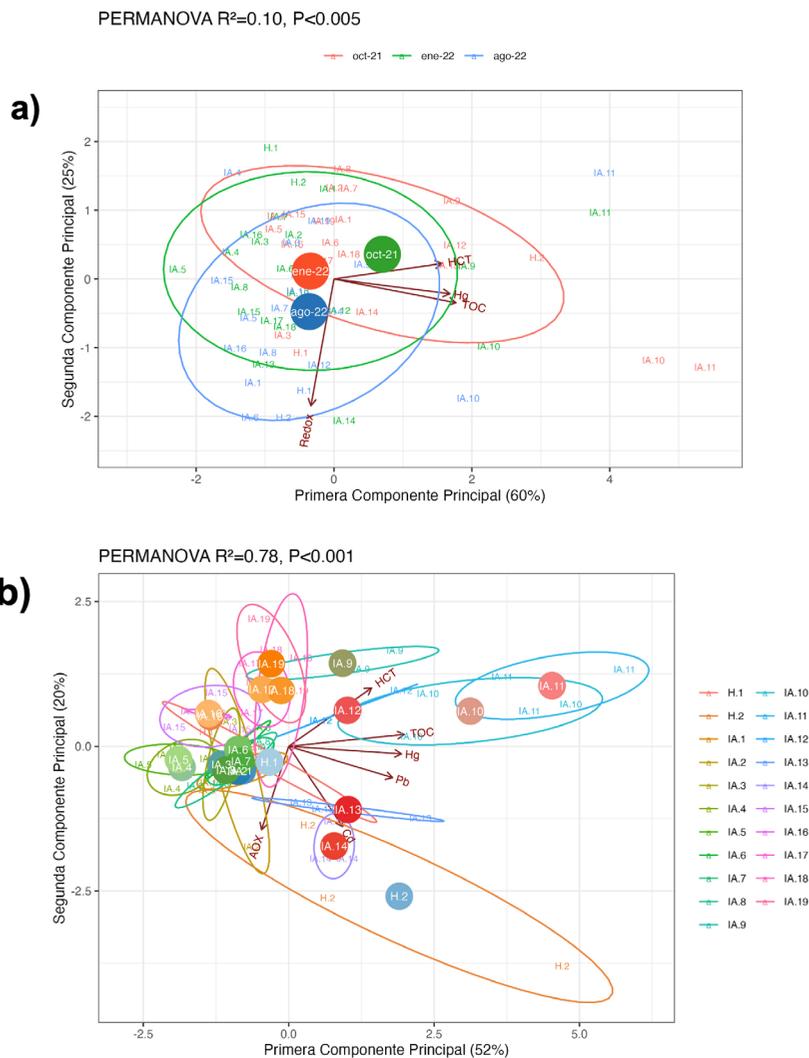


FIGURA 3. Resultados del PCA para parámetros medidos en sedimentos del intermareal que mostraron diferencias estadísticamente significativas por campaña de muestreo (a) y sitio de muestreo (b). En cada PCA se incluye la elipse del 95% confianza para cada reclasificación y el centroide asociado. Sobre cada gráfica se entrega el resultado del PERMANOVA, incluyendo el coeficiente de determinación (R^2) y la prueba de significancia estadística (P). / PCA results for parameters measured in intertidal sediments that showed statistically significant differences by sampling campaign (a) and sampling site (b). The 95% confidence ellipse for each reclassification and the associated centroid are included in each PCA. The result of the PERMANOVA is provided on each graph, including the coefficient of determination (R^2) and the test of statistical significance (P).

Estos resultados revelan que los sedimentos intermareales del Golfo de Arauco muestran una composición granulométrica temporalmente estable, que permite diferenciar dos zonas: la primera entre la desembocadura del Biobío y Lota, donde predominan arenas gruesas y medias, y la segunda desde Lota hasta Punta Lavapié, donde predominaron arenas medias y finas. Los parámetros analizados mostraron una diferenciación espacial estadísticamente significativa, por sobre la variabilidad temporal, destacando concentraciones más altas de HCT, COT, Hg y Pb, en los sitios de muestreo cercanos a Lota y mayores concentraciones de Cd y AOX en Chivilingo y Laraquete. Temporalmente se observó mayores concentraciones de HCT, Hg y COT en octubre-21 y Redox más altos en agosto-22.

SEDIMENTOS SUBMAREALES

El análisis granulométrico de los sedimentos del submareal (Fig. 4), permite observar que los sitios ubicados en el sector Escuadrón y alrededores (S.4 a S.8) muestran una alta variabilidad en su composición, con presencia de limos, arenas finas, medias y gruesas, observándose una mayor proporción de sedimentos gruesos durante la campaña de octubre-21. Mientras que en Coronel y Lota (S.10 a S.15) predominan limos, arenas muy finas y finas, con mezcla de fracciones más gruesas en S.12 y S.13, particularmente durante octubre-21. Hacia el sur de Laraquete y hasta Punta Lavapié (S.16 a S.21) se observa el predominio de arenas finas y medias, con una baja proporción de otras fracciones granulométricas.

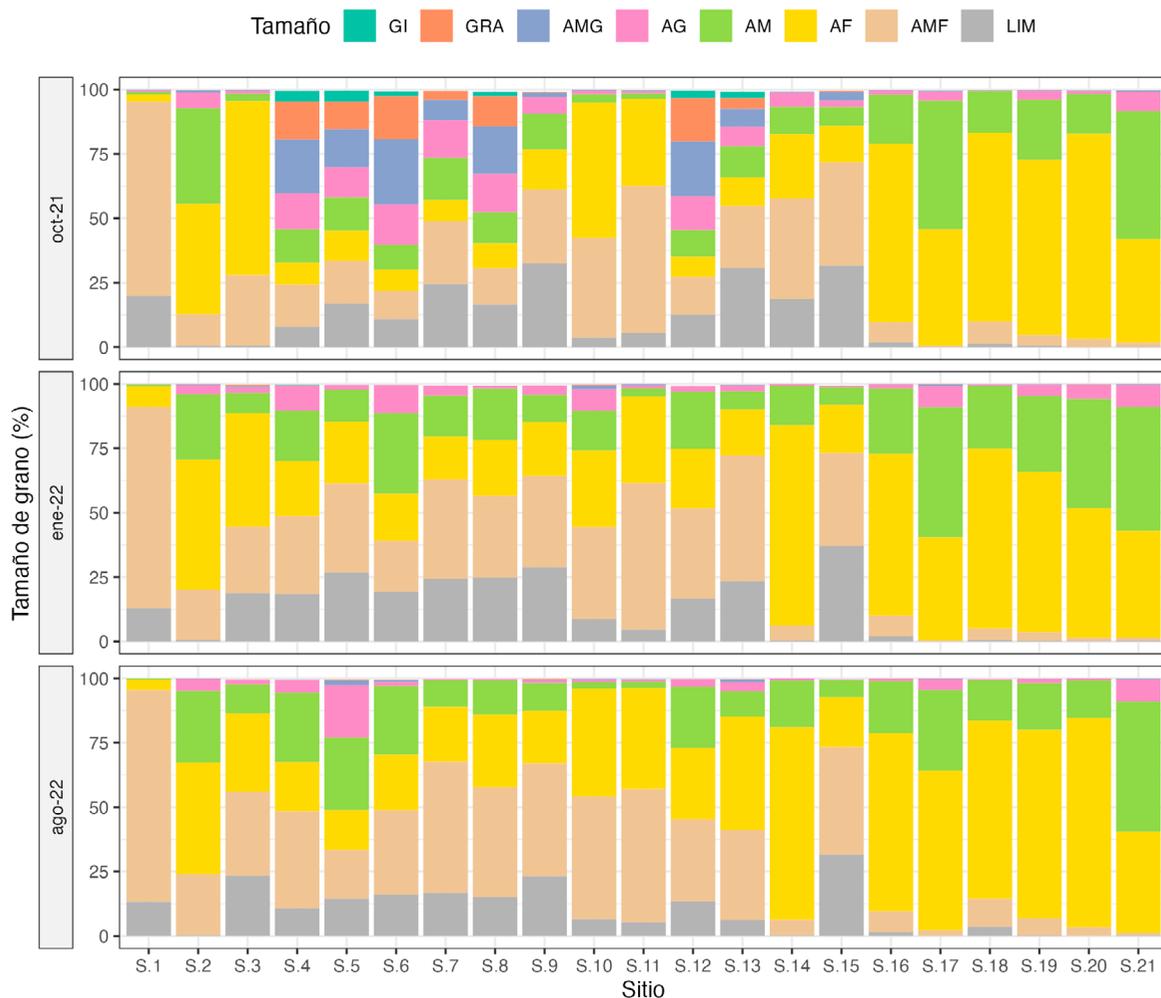


FIGURA 4. Composición granulométrica para sedimentos del submareal por campaña de muestreo (ver rótulos a la izquierda) y sitio de muestreo (eje x). / Grain size composition for subtidal sediments by sampling campaign (see labels on the left) and sampling site (x-axis).

La estadística descriptiva por parámetro (Tabla B y C, Material Suplementario) permite observar que el EOX presentó el 100% de los datos por debajo del límite de cuantificación de laboratorio, razón por la cual no fue incluido en los análisis posteriores. Ninguno de los parámetros analizados mostró distribución normal (normtest. $p > 0,05$). Adicionalmente, el Cd, COT, HCT y Redox mostraron una alta variabilidad, con coeficientes de variación superiores al 100 %. (Tabla A y C, Material Suplementario).

El análisis por parámetro, campaña y sitio de muestreo permite observar mayores concentraciones de metales y compuestos orgánicos entre los sitios S6 a S9 (Escuadrón y Coronel) y en los sitios S.12 y S.13 (frente a Lota), con menores concentraciones en S.10 y S.11 (norte de Lota). Esta tendencia se observa para la mayoría de los parámetros analizados y en las 3 campañas de muestreo, observándose además Redox negativos entre S.3 y S.15 durante las 3 campañas. La diferenciación entre campañas de muestreo

resultó baja, destacando incrementos puntuales de As y AOX en octubre-21 y de HCT en enero-22. (Tabla A, Material Suplementario).

Las pruebas estadísticas GLM, orientadas a determinar la existencia de diferencias temporales (campañas) y espaciales (sitios de muestreo), fueron aplicadas a todos aquellos parámetros que fueron medidos en todos los sitios de muestreo, lo que implicó descartar de este análisis los parámetros Al, As y V.

El resultado de este análisis permite observar que los modelos explicaron entre el 65 y el 93 % de la variabilidad de cada parámetro, siendo el sitio de muestreo el efecto que explicó una mayor proporción de la variabilidad (64 a 93 %), resultando estadísticamente significativo para los siete parámetros analizados (Tabla 3). La fuente de variación campaña de muestreo explicó entre un 0 % y 7 % de la variabilidad, resultando estadísticamente significativa para Pb y HCT.

TABLA 3. Resultados de los modelos lineales generalizados (GLM) ejecutados para el análisis de la significancia estadística de las fuentes de variación (Efecto) campaña de muestreo (Campaña) y sitio de muestreo (Sitio). Parámetros medidos en sedimentos del submareal. g.l.: grados de libertad; Devianza: variabilidad explicada por los efectos; resid: grado de libertad residuales; Dev. Resid.: variabilidad residual; (P(>Chi) razón de verosimilitud; sig: “+” indica $p < 0,05$; %DE: porcentaje de la devianza explicada por cada efecto. / Results of the generalized linear models (GLM) executed for the analysis of the statistical significance of the sources of variation (Effect) sampling campaign (Campaign) and sampling site (Site). Parameters measured in subtidal sediments. d.f.: degrees of freedom; Deviance: variability explained by the effects; resid: residual degrees of freedom; Dev. Resid.: residual variability; (P(>Chi) likelihood ratio; sig: “+” indicates $p < 0.05$; %SD: percentage of the deviance explained by each effect.

Parámetro	Efecto	g.l.	Devianza	g.l. resid	Dev. Resid.	Pr(>Chi)	%DE
Cd				62	73,232		
	Campaña	2	1,080	60	72,152	0,0529	1%
	Sitio	20	64,655	40	7,496	0,0000	+ 88%
Hg				62	3,529		
	Campaña	2	0,009	60	3,520	0,5286	0%
	Sitio	20	3,238	40	0,283	0,0000	+ 92%
Pb				62	189,121		
	Campaña	2	2,458	60	186,663	0,0259	+ 1%
	Sitio	20	172,959	40	13,704	0,0000	+ 91%
AOX				62	1815,205		
	Campaña	2	6,072	60	1809,133	0,5739	0%
	Sitio	20	1599,051	40	210,082	0,0000	+ 88%
COT				62	123,418		
	Campaña	2	0,007	60	123,411	0,9848	0%
	Sitio	20	114,453	40	8,958	0,0000	+ 93%
HCT				62	1811,588		
	Campaña	2	128,720	60	1682,869	0,0000	+ 7%
	Sitio	20	1490,075	40	192,794	0,0000	+ 82%
Redox				62	1677730,782		
	Campaña	2	23256,534	60	1654474,249	0,4491	1%
	Sitio	20	1073406,356	40	581067,893	0,0000	+ 64%

Los dos primeros componentes principales del PCA realizado para los parámetros que mostraron diferencias estadísticamente significativas entre campañas (Fig. 5a) explicaron cerca del 100 % de la variabilidad de la base de datos de entrada, mientras que la diferenciación entre campañas explicó sólo un 2 % de la ordenación, sin ser estadísticamente significativa ($P=0,606$).

El PCA para parámetros que mostraron diferencias significativas entre sitios explicó un 83 % de la variabilidad

de los datos de entrada, con una diferenciación espacial que explicó un 88 % de la ordenación (Fig. 5b). En este caso, la diferenciación entre sitios de muestreo se explica por las concentraciones más altas de AOX, Cd, Hg, Pb, COT e HCT observadas en los sitios S.4 a S.9 (Escuadrón y Coronel) y en S.15 (sur de Lota), mientras que en los sitios S.1 y S.2 (frente a la desembocadura del Biobío) y S.17 a S.21 Laraquete a Punta Lavapié se observaron potenciales redox positivos durante las 3 campañas de muestreo.

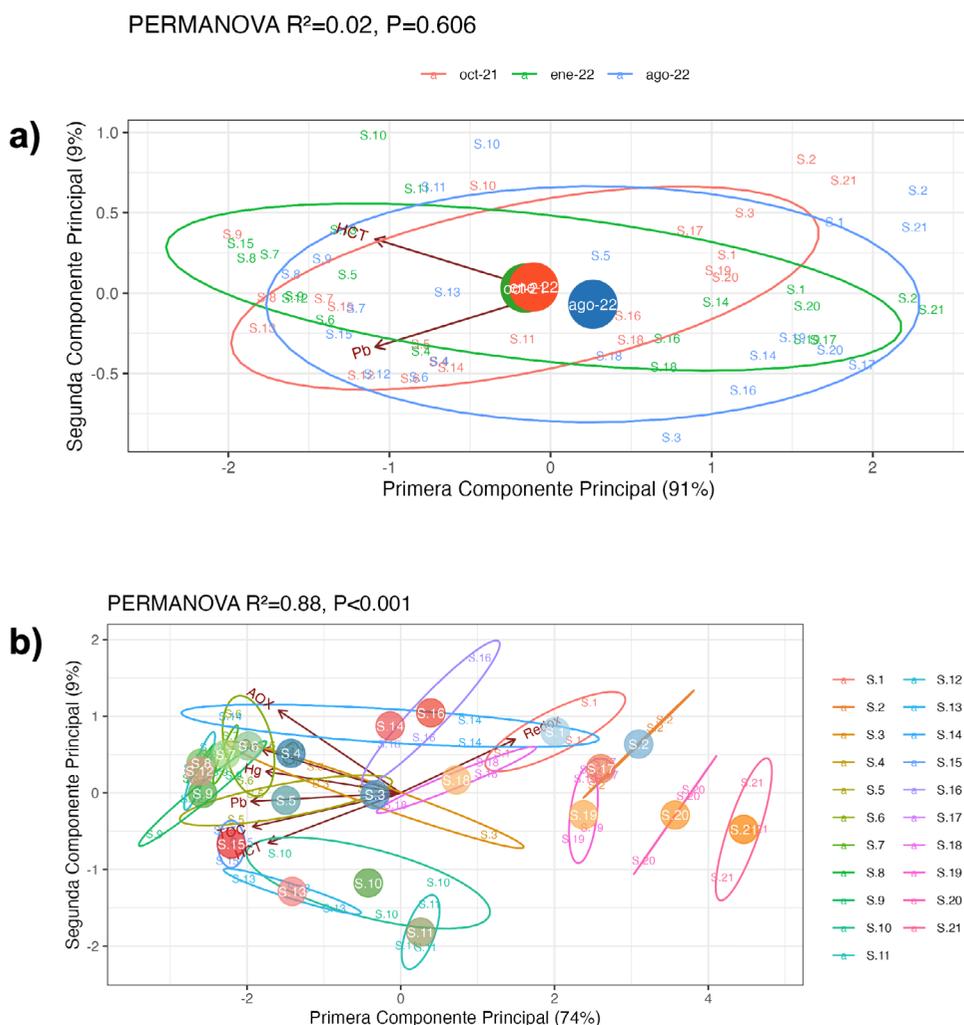


FIGURA 5. Resultados del PCA para parámetros medidos en sedimentos del submareal que mostraron diferencias estadísticamente significativas por campaña de muestreo (a) y sitio de muestreo (b). En cada PCA se incluye la elipse del 95% confianza para cada reclasificación y el centroide asociado. Sobre cada gráfica se entrega el resultado del PERMANOVA, incluyendo el coeficiente de determinación (R^2) y la prueba de significancia estadística (P). / PCA results for parameters measured in subtidal sediments that showed statistically significant differences by sampling campaign (a) and sampling site (b). The 95% confidence ellipse for each reclasification and the associated centroid are included in each PCA. The result of the PERMANOVA is provided on each graph, including the coefficient of determination (R^2) and the test of statistical significance (P).

Estos resultados permiten establecer que los sedimentos submareales costeros del Golfo de Arauco poseen una composición granulométrica con mayor proporción de sedimentos finos (limos y arenas muy finas) entre la desembocadura del río Biobío y Lota, cambiando a una mayor proporción de arenas finas y medias entre Laraquete y Punta Lavapié. Los parámetros analizados mostraron una significativa diferenciación espacial, que predominó por sobre la variabilidad temporal, destacando concentraciones más altas de AOX, Cd, Hg, Pb, COT e HCT, además de Redox negativos, en los sitios de muestreo dispuestos frente a Escuadrón, Coronel y al sur de Lota. Por otro lado, los sitios ubicados frente a la desembocadura del río Biobío y desde Laraquete a Punta Lavapié se caracterizaron por mostrar potenciales redox positivos, con menores concentraciones de metales y compuestos orgánicos. Destacó además la zona ubicada al norte de Lota, donde se registró concentraciones moderadas a bajas para la mayoría de los parámetros analizados.

ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN (Igeo)

El cálculo del Igeo obtenido para los metales As, Cd, Hg, Pb y

V en el ambiente intermareal y estuarino, resultó en valores negativos para todas las Campañas, Sitios y Metales analizados (Tabla 4), lo cual permite clasificar estos sedimentos como no contaminados, a excepción de los sitios IA.12 en As y IA.11 para Hg, ambas ubicados en el intermareal de Lota, y que son clasificadas como levemente contaminadas. Los sedimentos submareales dan cuenta de mayores Igeo (> 1,0 hasta 4,67, Tabla 5), registrados en las zonas de Escuadrón Sur (S.4 a S.7), Coronel y Lota (S.8 a S.13) y en algunas estaciones dispuestas entre Chivilingo y Carampangue (S.14, S.15, S.17 y S.18), sedimentos que se clasifican entre moderadamente contaminado a muy contaminado, en respuesta a las mayores concentraciones de Cd, Hg y en menor grado de As, en tanto que, Pb en las mismas zonas presentó los menores Igeo (-1,0 a 0,68) clasificando estos sedimentos como no contaminados o levemente contaminados. En cambio, el V presentó valores negativos de Igeo clasificado como no contaminado, y los sitios entre Arauco y Punta Lavapié (S.16, S.19 a S.21) presentaron un Igeo menor a 1 para todos los metales, por lo que son considerados zonas libres de contaminación de acuerdo con este índice.

TABLA 4. Índice de Geoacumulación (Igeo) e Índice de Carga de Contaminantes (PLI) para los metales extraíbles en los sedimentos intermareales y estuarinos del río Biobío. / Geoaccumulation Index (Igeo) and Pollutant Load Index (PLI) for extractable metals in intertidal and estuarine sediments from Biobío River.

Estaciones	As-Igeo	Cd-Igeo	Hg-Igeo	Pb-Igeo	V-Igeo	PLI
H.1		-2,68	-2,94	-1,98		0,32
H.2		-1,58	-2,35	-0,72		0,79
IA.1		-2,62	-2,30	-2,33		0,34
IA.2		-2,62	-3,18	-2,47		0,29
IA.3		-2,55	-3,75	-2,39		0,23
IA.4		-2,68	-4,07	-2,62		0,23
IA.5		-2,55	-4,32	-2,57		0,21
IA.6	-2,26	-2,62	-3,87	-2,13	-0,60	0,63
IA.7	-1,88	-2,68	-3,40	-2,08	-0,65	0,52
IA.8	-1,78	-2,83	-3,79	-2,12	-0,68	0,46
IA.9	-0,78	-3,17	-1,40	-1,33	-1,54	1,16
IA.10	-0,99	-2,75	-0,37	-0,82	-1,38	1,79
IA.11	-0,28	-2,22	0,94	-0,59	-1,23	1,49
IA.12	0,07	-2,83	-2,36	-0,87	-1,54	1,28
IA.13		-1,99	-2,71	-0,97		0,69
IA.14		-2,32	-1,94	-0,91		0,57
IA.15		-2,99	-3,98	-2,04		0,24
IA.16		-2,99	-4,03	-1,91		0,23
IA.17		-2,83	-3,11	-1,67		0,29
IA.18		-2,43	-2,97	-2,11		0,33
IA.19		-2,55	-2,82	-2,46		0,30

TABLA 5. Índice de Geoacumulación (Igeo) e Índice de Carga de Contaminantes (PLI) para los metales extraíbles en los sedimentos del submareal del Golfo de Arauco. / Geoaccumulation Index (Igeo) and Pollutant Load Index (PLI) for extractable metals in the subtidal sediments of the Gulf of Arauco.

Estaciones	As-Igeo	Cd-Igeo	Hg-Igeo	Pb-Igeo	V-Igeo	PLI
S.1		-0,83	2,64	-1,41		1,30
S.2		-1,65	0,92	-1,98		0,82
S.3		1,76	3,35	-0,29		2,31
S.4		2,41	3,36	0,35		3,33
S.5		2,71	3,51	0,36		3,40
S.6		3,33	3,47	0,54		4,28
S.7	1,00	3,42	3,07	0,56	-0,14	3,41
S.8	1,25	3,88	2,97	0,71	-0,22	3,58
S.9	1,04	3,72	2,82	0,67	-0,12	3,64
S.10	0,68	0,91	1,54	-0,55	-1,19	3,11
S.11	0,29	-0,30	2,04	-0,27	-0,79	2,28
S.12	1,53	4,67	3,03	0,68	-0,11	3,94
S.13	0,78	1,82	2,54	0,20	-0,77	2,76
S.14		1,75	0,84	-0,52		4,17
S.15		3,84	1,54	-0,68		4,12
S.16		-1,68	-1,07	-1,31		2,86
S.17		3,12	0,98	-1,00		0,39
S.18		3,02	2,60	0,65		1,60
S.19		0,03	-1,28	-1,19		0,56
S.20		-2,27	-3,31	-1,30		0,19
S.21		-2,91	-3,01	-2,05		0,16

ÍNDICE DE CARGA DE CONTAMINANTES (PLI)

El PLI es un indicador de contaminación ponderado, calculado a partir de los cinco metales analizados (As, Cd, Hg, Pb y V), el cual refleja la acumulación combinada de la contaminación por metales (Tablas 4 y 5). Los sedimentos intermareales de los sitios ubicados en Coronel y Lota (AI.9 a AI.12) son clasificados bajo una condición de contaminación transitoria por el PLI, en tanto que la zona estuarina del río Biobío, Escuadrón, y desde Chivilingo hasta Punta Lavapié presentan ausencia de contaminación por metales de acuerdo con el PLI (Tabla 4). En el ambiente submareal se distingue una distribución del PLI (Tabla 5) que considera desde Escuadrón hasta frente a Laraquete (S.3 a S.16), con valores de 1,0 a 4,3 PLI, lo cual refleja un grado de contaminación moderado a muy contaminado, en tanto que los sitios ubicados en la desembocadura del río Biobío (S.1 y S.2) junto con los sitios ubicados entre Carampangue y Punta Lavapie (S.17 a S.21) presentaron valores de PLI que son clasificados con ausencia de contaminación por este índice.

DISCUSIÓN

El Golfo de Arauco es una de las áreas más productivas de la zona centro-sur de Chile (Daneri *et al.* 2000), donde confluyen múltiples procesos (surgencia estacional, sombras de surgencia y mínimas de oxígeno) y factores (descarga de ríos, industrias, asentamientos urbanos, pesquería industrial y artesanal), responsables de una alta interacción y dinámica que existen entre sus componentes físicos, químicos y biológicos (Strub *et al.* 1998; Daneri *et al.* 2000; Krautz *et al.*, 2017; Wong *et al.* 2021; Mardones *et al.* 2022; Vergara *et al.* 2023). Esto resalta la relevancia de los resultados obtenidos a partir de las mediciones de metales extraíbles y compuestos orgánicos en los sedimentos superficiales del Golfo de Arauco (Figs. 6 y 7). Nuestros resultados permiten evaluar la condición ambiental durante la primavera 2021, verano e invierno de 2022, crucial para establecer la salud ambiental y la posible exposición de los organismos a sustancias potencialmente dañinas.

Los resultados recabados en este estudio indican que los sedimentos del Golfo de Arauco exhiben una diferenciación

espacial en lo que respecta a los metales extraíbles y los compuestos orgánicos analizados. Pudiendo identificarse áreas de mayor concentración en los sitios con una mayor influencia industrial y antropogénica (Figs. 6 y 7). Por otro lado, en las zonas con una menor intervención humana, las concentraciones de todos los parámetros analizados fueron consistentemente inferiores, y cercanos a niveles considerados naturales y/o preindustriales (Hidalgo 2017; Rudnick & Gao 2003; Chandía *et al.* 2022). El análisis

temporal de las concentraciones de metales extraíbles y compuestos orgánicos reveló una mínima variación, sin diferencias estadísticamente significativas entre los tres períodos evaluados, lo cual demuestra una consistencia temporal y su valor ambiental para el registro sedimentario. Esta matriz actúa como reservorio, acumulando e integrando temporalmente los aportes naturales y antropogénicos que provienen del entorno del ecosistema (Salamanca *et al.* 1988; Valdés & Castillo 2014; Ružičková *et al.* 2018).

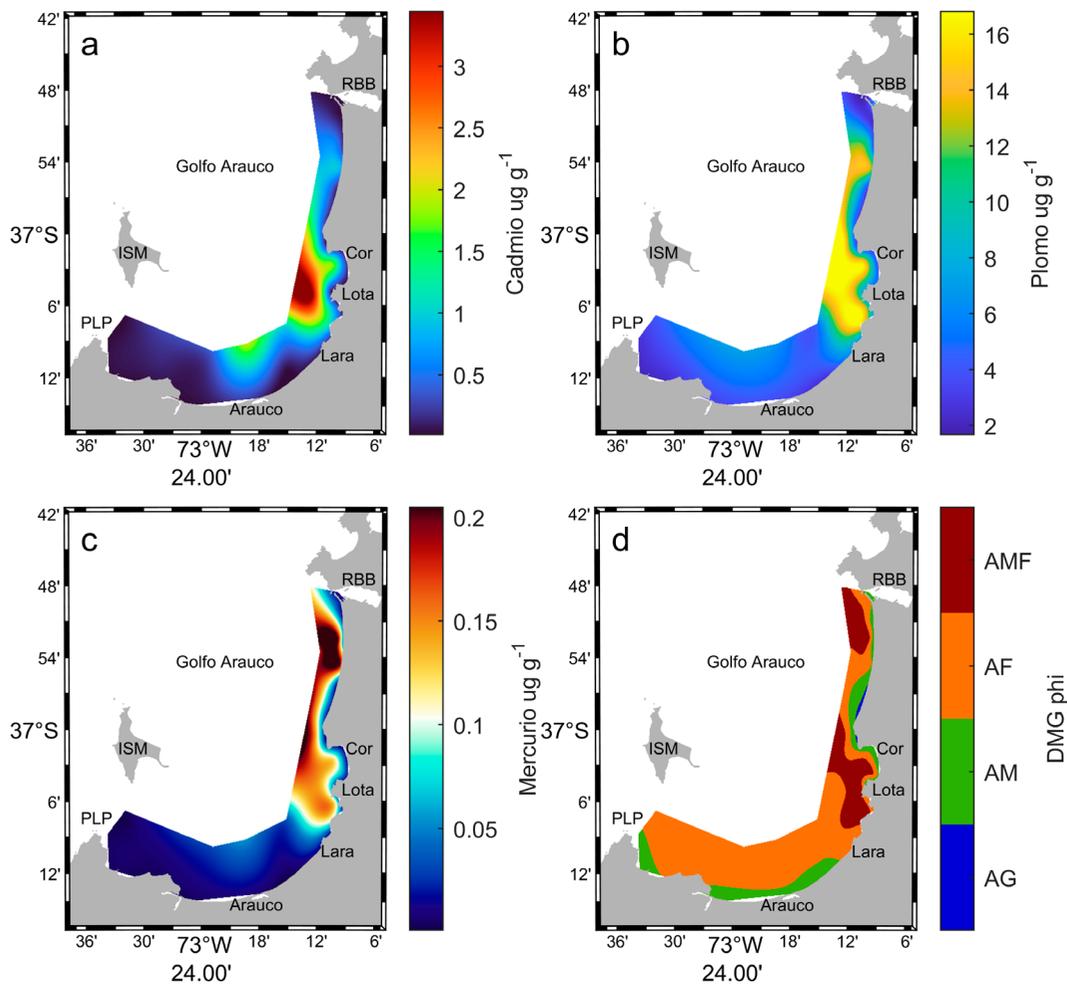


FIGURA 6. Distribución espacial de metales extraíbles, mediante interpolaciones de a) cadmio, b) plomo, C) mercurio y d) tamaño medio de grano (DMG) en sedimentos superficiales del borde costero del Golfo de Arauco, considerando la mediana como valor de tendencia central para los períodos de muestreo octubre 2021, enero 2022 y agosto 2022 . ISM: Isla Santa María, RBB: Río Biobío, Cor: Coronel, Lara: Laraquete y PLP: Punta Lavapié. / Spatial distribution of extractable metals, through interpolations of a) cadmium, b) lead, C) mercury and d) mean grain size (MGS) in surface sediments of the coastal edge of the Gulf of Arauco, considering the median as the central tendency value for the sampling periods October 2021, January 2022 and August 2022. ISM: Santa María Island, RBB: Biobío River, Cor: Coronel, Lara: Laraquete and PLP: Punta Lavapié.

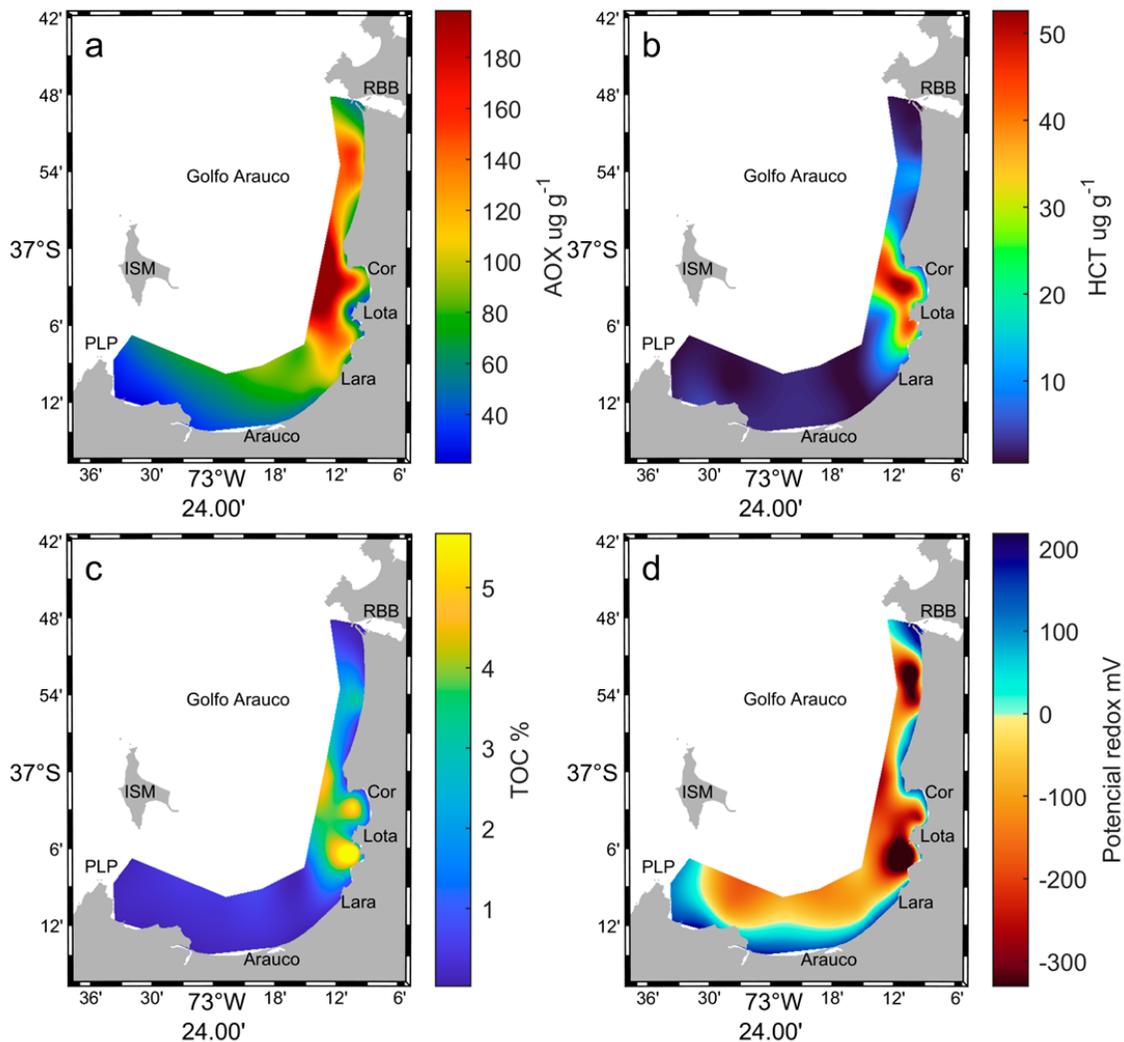


FIGURA 7. Distribución espacial de compuestos orgánicos mediante interpolación de a) AOX, b) hidrocarburos totales, C) COT (carbono orgánico total) y d) potencial redox en sedimentos superficiales del borde costero del Golfo de Arauco, considerando la mediana como valor de tendencia central para los periodos de muestreo octubre 2021, enero 2022 y agosto 2022. ISM: Isla Santa María, RBB: Río Biobío, Cor: Coronel, Lara: Laraquete y PLP: Punta Lavapié / Spatial distribution of organic compounds through interpolation of a) AOX, b) total hydrocarbons, C) TOC (total organic carbon) and d) redox potential in surface sediments of the coastal edge of the Gulf of Arauco, considering the median as the central tendency value for the sampling periods October 2021, January 2022 and August 2022. ISM: Isla Santa María, RBB: Río Biobío, Cor: Coronel, Lara: Laraquete and PLP: Punta Lavapié.

El AI fue medido desde la desembocadura del río Biobío por el norte, hasta las bahías de Coronel y Lota por el sur, la distribución de sus concentraciones da cuenta de mayores contenidos en la zona centro y norte de Escuadrón, es decir, sigue una distribución asociable con la pluma de descarga del río Biobío, la cual durante gran parte de otoño e invierno se desplaza por la costa en dirección al sur, ingresando a bahía de Coronel cuando las lluvias aumentan de manera importante sus caudales. As y V sólo fueron analizados en las Bahías de Coronel y Lota, debido al potencial nexo con las emisiones atmosféricas provenientes de la industria termoeléctrica de

carbón. Los resultados muestran un patrón de distribución comparable entre As y V con mayores concentraciones dentro de la zona norte de la Bahía Coronel, donde se concentran las actividades industriales y termoeléctricas de la comuna.

La comparación con estándares y regulaciones internacionales es una de las herramientas más utilizadas para gestionar adecuadamente los sedimentos marinos (Komnitsas *et al.* 2015). El principio central de esta comparación se basa en la premisa de la existencia de un nivel umbral de concentración para ciertos compuestos o elementos presentes en los sedimentos, que podrían causar

efectos negativos sobre la vida acuática. Para este artículo, se comparan los resultados obtenidos (Tabla 6) con la Directrices de Calidad de Sedimentos Canadienses (CSQG 2000), Calidad de Agua Dulce y Marina para Australia y Nueva Zelanda (ANZECC 2000), Calidad de Sedimentos marinos para la Protección de la Vida Acuática en Canadá (CCME 2002), Norma Secundaria de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Marinas y Sedimentos de la Bahía Quintero-Puchuncavi, Chile (Decreto-43, MMA 2024) y valores de la corteza terrestre superficial (Rudnick & Gao 2003). Las guías de calidad para sedimentos establecen rangos de clasificación que ayudan a identificar el nivel de efecto umbral, los que permiten determinar la concentración de compuestos y elementos que potencialmente podrían causar efectos negativos en la fauna que habita en ellos. El contenido de los metales obtenidos en los sedimentos intermareales del Golfo de Arauco (Tabla 6), muestran que todos los registros de Cd, Hg y Pb se encuentra por debajo de los niveles de efecto más bajo (LEL), concentración de activación (ISQG-Low), umbral de efecto (TEL) y corteza terrestre superficial (UC), al igual que los valores promedio de As. Sin embargo, el 21 % de los registros sobrepasa los valores definidos por el LEL, un 14 % los ISQG-Low y un 33 % los de UC (Tabla 6), en tanto que, V sólo puede ser comparado con UC, cuyos valores promedio están bajo la referencia, aunque existe un 4,8 % que sobrepasa a los de UC. Los resultados de los sedimentos submareales por su parte presentan concentraciones promedio de Cd, Hg y Pb bajo los niveles de LEL, ISQG-Low y TEL, mientras que el contenido promedio de As superó estos niveles. Al comparar los promedios obtenidos para Cd, Hg, As y V con la UC, estos

superaron los niveles de referencia, y sólo el Pb presentó concentraciones menores a los reportados para UC. El Cd, Hg, As y V mostraron concentraciones superiores a las de referencia (Tabla 6), registrando incrementos del 49 %, 36 %, 100 % y 66 %, respectivamente.

Recientemente en Chile se aprobó la primera Norma Secundaria de Calidad Ambiental para la Bahía Quintero-Puchuncavi (NSCA-BQ; MMA 2024), estableciendo límites máximos para metales extraíbles, de los cuales 4 han sido evaluados en los sedimentos del Golfo de Arauco (Tabla 6). A partir de este contraste se observa que las concentraciones de As, Cd, Hg y V en los sedimentos submareales superan la norma en un 10 %, 57 %, 35 % y 100 % del total de las determinaciones, en tanto que, todos los valores de Pb están por debajo de los niveles normados. En los sedimentos intermareales, sólo el V supera la norma en un 90 % de los casos, mientras que las concentraciones de As, Cd, Hg y Pb nunca superaron los límites de la NSCA-BQ. Es importante destacar que casi todas las determinaciones que superan la norma están restringidas a la zona comprendida entre el sur de Escuadrón y las bahías de Coronel y Lota, zona de mayor concentración de usos industriales.

Los AOX presentaron un promedio y rango de 106,4 $\mu\text{g g}^{-1}$ (25,1 a 277,1 $\mu\text{g g}^{-1}$) en el submareal y de 53,3 $\mu\text{g g}^{-1}$ (19,3 a 95,1 $\mu\text{g g}^{-1}$) en el intermareal. Se puede mencionar que los registros obtenidos en el intermareal y en las zonas de la desembocadura del río Biobío y, entre Chivilingo y Punta Lavapié están en el rango de los reportados en zonas control de golfo de Finlandia (50 a 94 $\mu\text{g g}^{-1}$) por Kankaanpaa & Tissari (1994) y en la Bahía de Hangzhou, China (11,3 a 112,7

TABLA 6. Concentraciones utilizadas para el contraste de los metales Cd, Hg, Pb, As y V en $\mu\text{g g}^{-1}$ (peso seco) con guías internacionales y referencias para la matriz. / Concentrations used for the contrast of the metals Cd, Hg, Pb, As and V in $\mu\text{g g}^{-1}$ (dry weight) with international guides and references for the matrix.

Clasificación	Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$)	As ($\mu\text{g g}^{-1}$)	V ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Referencias
Lowest effect level (LEL)	0,6	0,2	31	6	-	CSQG 2000
Severe effect level (SEL)	10	2	250	33	-	
ISQG-Low	1,5	0,15	50	20	-	ANZECC 2000
ISQG-High	10	1	220	70	-	
ISQGs	0,7	0,13	30,2	7,24	-	CCME 2002
Probable effect level (PEL)	4,21	0,7	112	41,6	-	
Upper Crust (UC)	0,09	0,05	17	4,8	97	Rudnick & Gao 2003
NSCA - BQ	0,40	0,13	30,2	20	33,9	MMA 2024
Sedimentos Intermareal	0,022 (0,014-0,038)	0,0021 (0,0002-0,0407)	2,43 (1,42-7,88)	3,63 (1,50-10,12)	62,2 (28,5-97,9)	Datos de este estudio
Sedimentos Submareal	0,458 (0,017-6,564)	0,0738 (0,0015-0,2253)	8,08 (2,07-19,62)	13,35 (7,57-21,07)	124,9 (44,9-143,7)	Datos de este estudio

$\mu\text{g g}^{-1}$) por Ya-Wei *et al.* (2018). En cambio, los registros de AOX obtenidos para Escuadrón, Bahía Coronel y Lota están en el rango de 115,8 a 227,1 $\mu\text{g g}^{-1}$, datos comparables con los reportados para zonas industrializadas del golfo de Finlandia (120 a 620 $\mu\text{g g}^{-1}$) (Kankaanpaa & Tissari 1994a, 1994b; Hayer *et al.* 1996).

El contenido de COT registrado en los sedimentos del submareal en este estudio presentó concentraciones ($2,1 \pm 2,0 \%$, rango 0,09-8,61 %, $n = 63$) más altas que las registradas en el golfo de México ($0,9 \pm 0,3 \%$; Escobar-Briones & García-Villalobos, 2009) y que la Península de Leizhou, China ($0,4 \pm 0,2 \%$; Xia Jia 2022), pero dentro del rango obtenido para los márgenes continentales de Perú y otras zonas costeras (4-16 % en Arthur *et al.* 1998; $>1,5 \%$ en Seiter *et al.* 2004) y, más bajos que los registrados en el estuario de los ríos Cedar y Ortega en Florida, USA ($2,3$ a $22,6 \%$; Ouyang & Zhang 2006). Los valores de COT mayores a 1,0 % se observaron en las estaciones S.3 a S.13 y S.15, dispuestas en Escuadrón, Bahía Coronel y Lota, coincidiendo con registros más altos de HCT, las cuales son las zonas de mayor densidad industrial y urbana. Los ambientes intermareales y estuarinos presentaron concentraciones de COT ($0,24 \pm 0,66 \%$, rango 0,03-4,04 %, $n = 63$) casi un orden de magnitud menor que en el submareal, pero comparables con el rango reportado para los sedimentos intermareales de Bahía Todos los Santos en Brasil (0,02 a 4,01 %; Silva *et al.* 2014).

Los HCT fueron detectados en todas las estaciones y campañas en el submareal ($19,61 \pm 25,93 \mu\text{g g}^{-1}$, rango 0,31-110,0 $\mu\text{g g}^{-1}$, $n = 63$) e intermareal y estuario ($7,48 \pm 24,61 \mu\text{g g}^{-1}$, rango 0,46-174,6 $\mu\text{g g}^{-1}$, $n = 63$). Los sitios con las mayores concentraciones ($> 20 \mu\text{g g}^{-1}$) en el submareal corresponden a S.7 a S.13 y S.15 (Bahías Coronel y Lota) y en el intermareal de IA.10 y IA.11, ubicados en la zona sur de Bahía Coronel y norte de Bahía Lota. Estos valores de HCT han sido reportados en sedimentos superficiales en el sur de Chile (Valdivia), con niveles que oscilan entre 0,82 a 30,43 $\mu\text{g g}^{-1}$, en un estudio que evaluó zonas impactadas y no impactadas por contaminación de diésel (Palma-Fleming *et al.* 2012). Las concentraciones de HCT en sedimentos registrados para Bahía Coronel y Lota están sobre el rango descrito por Palma-Fleming *et al.* (2012) en las costas de Valdivia.

El Redox registrado en el submareal permite diferenciar claramente sitios con Redox positivos (S.1, S.2, S.16 a S.21) dispuestos en la desembocadura del río Biobío y desde Carampangue hasta Punta Lavapié, de aquellas ubicadas en Escuadrón, Bahía Coronel y Lota (S.3 a S.15) con Redox muy negativos (-429 a -150 mV). Por otra parte, los ambientes intermareales y estuarinos presentaron Redox positivos en todos los sitios (138 a 250 mV), sugiriendo condiciones óptimas de oxigenación existentes en estos ambientes, donde la intensa energía de las olas y la agitación constante del entorno no facilitan la captura de materia orgánica ni la depositación de partículas finas, factores cruciales que influyen en el agotamiento de oxígeno en los sedimentos.

La zona sur de Escuadrón y las Bahías de Coronel y Lota presentan características topográficas e hidrodinámicas naturales que favorecen la retención y/o sedimentación de compuestos y elementos de diverso origen, entre ellos metales y compuestos orgánicos, condición que dificulta el establecer responsabilidades asociadas a posibles efectos o impactos sobre la biodiversidad. Una de las herramientas más efectivas para supervisar y evaluar las condiciones físico químicas de un cuerpo de agua y sedimentos es el monitoreo regular, proceso que registra las fluctuaciones temporales y espaciales, permitiendo identificar posibles impactos y así, evaluar los cambios ambientales que se podrían generar (Bean, *et al.* 2017). Este tipo de estudios y el monitoreo sistemático del Golfo de Arauco contribuiría a una comprensión más completa de su condición ambiental, y es central para las medidas de gestión y políticas públicas que aborden posibles problemas de contaminación, además de proteger y preservar sus ecosistemas marinos y estuarinos.

CONCLUSIÓN

El análisis de los sedimentos superficiales en el Golfo de Arauco reveló que los metales y compuestos orgánicos presentaron una distribución comparable entre las campañas de muestreo sin mostrar diferencias estadísticamente significativas.

Los metales extraíbles y compuestos orgánicos analizados presentan un patrón espacial, identificando tres localidades de mayor concentración: Escuadrón Sur, Bahía Coronel y Bahía Lota, zonas altamente industrializadas y densamente pobladas, lo que sugiere que los aportes antropogénicos tienden a acumularse en zonas adyacentes a las fuentes de emisión, lo que se ve favorecido por la dinámica costera local, que favorece procesos de retención.

Se identificaron 3 zonas dentro del Golfo de Arauco, la primera conformada por la zona sur de Escuadrón, bahía Coronel y bahía Lota (S.4 a S.13 y S.15; IA.3 a IA.13), zonas que tienen en común una mayor abundancia de sedimentos finos a muy finos ($< 250 \mu\text{m}$). La segunda zona representada por la desembocadura del río Biobío y Escuadrón norte (S.1, S.2 y S.3; H.1, H.2, IA.1 y IA.2) y la tercera zona que reúne los sitios dispuestos entre Laraquete y Punta Lavapié (S.14, S.17 a S.21; IA.13 a IA.19), las zonas 2 y 3 presentan un menor contenido de metales y compuestos orgánicos, junto con un tamaño de grano que varió entre arenas medias a finas. Complementariamente los índices de Igeo y PLI dan cuenta de una calidad deficiente en la zona 1 y no contaminados en las zonas 2 y 3.

Este estudio concluye que los niveles más altos de metales extraíbles y compuestos orgánicos se encuentran en áreas cercanas a centros urbanos e industriales en la costa del Golfo de Arauco. Estos hallazgos sugieren que las actividades humanas han causado cambios en la calidad de

los sedimentos superficiales en este sistema costero. Por tanto, se recomienda implementar un programa de monitoreo continuo para evaluar los impactos de estas actividades antropogénicas en la salud ambiental del Golfo de Arauco.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen al Proyecto Red de Monitoreo Ambiental de Ecosistemas Marinos del Golfo de Arauco, financiado por el Ministerio del Medio Ambiente. Además, a los profesionales científico-técnicos que participaron de las actividades de terreno y a la tripulación de la L/C Kay-Kay II, del Departamento de Oceanografía de la Universidad de Concepción. Agradecemos también la revisión anónima realizada a nuestro manuscrito, cuyos comentarios y sugerencias permitieron generar una versión mejorada del artículo. Eduardo Hernández-Miranda fue financiado parcialmente por INCAR-FONDAP-1522A0004-1523A0007. Luis Bermedo agradece a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo del Gobierno de Chile, por la Beca Nacional de magister 2019, ANID N°22190273.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Datos de los sedimentos superficiales en los ambientes submareal, intermareal y estuario (Tabla A), junto con los resultados de la estadística descriptiva (Tabla B y C).

REFERENCIAS

- Al-Haidarey, M.J.S., Hassan, F.M., Al-Kubaisey, A.R.A., Douabul, A.A.Z. 2010. The geoaccumulation index of some heavy metals in Al-Hawizeh Marsh, Iraq. *European Journal of Chemistry* 7: 839178. <https://doi.org/10.1155/2010/839178>
- Anderson, M.J. 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology* 26(1): 32-46. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>
- Arthur, M.A., Dean, W.E., Laarkamp, K. 1998. Organic carbon accumulation and preservation in surface sediments on the Peru margin. *Chemical Geology* 152(3-4): 273-286. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00120-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00120-X)
- ANZECC. 2000. Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality. Volume 1, Chapter 3, Page 3.5-3. Sediment Quality Guidelines. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand. Canberra, Australia. URL: <https://www.waterquality.gov.au/sites/default/files/documents/anzecc-armcanz-2000-guidelines-vol1.pdf>
- Bay, S.M., Ritter, K.J., Vidal-Dorsch, D.E., Field, L.J. 2012. Comparison of national and regional sediment quality guidelines for classifying sediment toxicity in California. *Integrated Environmental Assessment and Management* 8(4): 597-609. <https://doi.org/10.1002/ieam.1330>
- Bean, T.P., Greenwood, N., Beckett, R., Biermann, L., et al. 2017. A Review of the Tools Used for Marine Monitoring in the UK: Combining Historic and Contemporary Methods with Modeling and Socioeconomics to Fulfill Legislative Needs and Scientific Ambitions. *Frontiers in Marine Science* 4:263. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00263>
- Bradley, M.A., Barst, B.D., Basu, N. 2017. A review of mercury bioavailability in humans and fish. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14(2):169. <https://doi.org/10.3390/ijerph14020169>
- Buccolieri, A., Buccolieri, G., Cardellicchio, N., Dell'Atti, A., Di Leo, A., Maci, A. 2006. Heavy metals in the marine sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy). *Marine Chemistry* 99(4): 227-235. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2005.09.009>
- Buruaem Moreira, L., Braga Castro, Í., Fillmann, G., et al. 2021. Dredging impacts on the toxicity and development of sediment quality values in a semi-arid region (Ceará state, NE Brazil). *Environmental Research* 193. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110525>
- CSQG. 2000. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Updated. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- CCME. 2002. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Council of Ministers of the Environment. URL: <http://www.popstoolkit.com/Tools/SitePrioritization/Files/Guidelines/SedQ%20aquatic%20life.pdf>
- Calderón, C., Valdés, J. 2012. Contenido de metales en sedimentos y organismos bentónicos de la Bahía San Jorge, Antofagasta, Chile. *Revista de biología Marina y Oceanografía* 47(1): 121-133. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572012000100011>
- Chandia, C., Salamanca, M., Hernández, A., Urrutia, R. 2022. Sediment mercury concentration changes as a response to increased industrial activity in Coronel Bay, Chile. *Marine Pollution Bulletin* 178. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113630>
- Chandía, C., Salamanca, M., Hernández, A., Urrutia, R. 2024. Mercury distribution in the coastal zone of Central Chile, Southeast Pacific: A comprehensive assessment of seawater, sediment, and biota. *Marine Pollution Bulletin* 199. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.116005>
- Chester, R., Jickells, T. 2012. *Marine Geochemistry*. Editorial Wiley-Blackwell, 3rd Edition. 411pp. <https://doi.org/10.1002/9781118349083>
- Daneri, G., Dellarossa, V., Quiñones, R., Jacob, B., Montero, P.,

- Ulloa, O. 2000. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Marine Ecology Progress Series* 197: 41-49.
- Della Croce, N., Parra, O., Stuardo, J., Arrizaga, A., Ahumada, R., Chong, J., Oyarzun, C. 1992. El río Biobío y el mar adyacente como unidad ambiental. Serie Monografía Científica. URL: <http://www.eula.cl/bibliovirtual/>
- Escobar-Briones, E., García-Villalobos, F.J. 2009. Distribution of total organic carbon and total nitrogen in deep-sea sediments from the southwestern Gulf of Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 61(1): 73-86.
- Figuroa, D., Moffat, C. 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean coast. *Geophysical Research Letters* 27(23): 3905-3908. <https://doi.org/10.1029/1999GL011302>
- French, P. 1993. Post- industrial pollutant levels in contemporary Severn estuary intertidal sediments, compared to pre-industrial. *Mar. Marine Pollution Bulletin* 26(1): 30-35. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(93\)90594-A](https://doi.org/10.1016/0025-326X(93)90594-A)
- Giordano, P., Musmeci, L., Ciaralli, L., Vernillo, I., Chirico, M., Piccioni, A., Costantini, S. 1992. Total contents and sequential extractions of mercury, cadmium, and lead in coastal sediments. *Marine Pollution Bulletin* 24(7): 350-357. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(92\)90372-D](https://doi.org/10.1016/0025-326X(92)90372-D)
- Grosjean, P., Ibanez, F. 2004. Package for analysis of space-time ecological series. En PASTECS version 1.2-0 for R v.2.0.0 & version 1.0-1 for S+ 2000 rel (p. 76). <https://cran.r-project.org/web/packages/pastecs/pastecs.pdf>
- Hayer, F., Wagner, P., Pihan, J.C. 1996. Monitoring of extractable organic halogens (EOX) in chlorine bleached pulp and paper mill effluents using four species of transplanted aquatic mollusks. *Chemosphere* 33(11): 2321-2334. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(96\)00323-2](https://doi.org/10.1016/0045-6535(96)00323-2)
- Hidalgo, M.A. 2017. Evaluación Temporal del Contenido de Metales Pesados en Sedimentos de la Bahía de Coronel, Chile. Tesis de Biólogo Marino, Universidad de Concepción, Chile.
- Holifield, R., Day, M. 2017. A framework for a critical physical geography of 'sacrifice zones': Physical landscapes and discursive spaces of frac sand mining in western Wisconsin. *Geoforum* 85: 269-279. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.08.004>
- Kankaanpaa, H., Tissari, J. 1994a. Analysis for EOX and AOX in two industry influenced coastal areas in the Gulf of Finland: Levels of EOX and AOX in the Kotka region, Finland levels of EOX in the Neva Bay, Russia. *Chemosphere* 29(2): 241-255. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0045-6535(94)90102-3)
- Kankaanpaa, H., Tissari, J. 1994b. Background levels of EOX and AOX in sediments of the Gulf of Finland: Molecular weight distribution of EOX in the sediments. *Chemosphere* 28(1): 99-116. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)90204-6](https://doi.org/10.1016/0045-6535(94)90204-6)
- Karimi, R., Chen, C.Y., Folt, C.L. 2016. Comparing nearshore benthic and pelagic prey as mercury sources to lake fish: The importance of prey quality and mercury content. *Science of The Total Environment* 565(15): 211-221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.162>
- Kassambara, A. 2023. ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots. R package version 0.6.0. <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>
- Krautz, M.C, Hernández-Miranda, E., Veas, R., Bocaz, P., Riquelme, P., Quiñones, R.A. 2017. An estimate of the percentage of non-predatory dead variability in coastal zooplankton of the southern Humboldt Current System. *Marine Environmental Research*. 132: 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.10.008>.
- Libes, S. 2009. Introduction to Marine Biogeochemistry. Academic Press Elsevier New York, USA. 928 pp.
- Mardones, P., Wong, Z., Contreras-Rojas, J., Muñoz, R., Hernández-Miranda, E., Sobarzo, M. 2022. Upwelling shadows driven by the low-level jet along the subtropical west coast of South America. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 127(8): e2021JC017979.
- MMA. 2024. Decreto 43. Norma Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Marinas y Sedimentos de la Bahía de Quintero-Puchuncaví. Ministerio de Medio Ambiente, Chile. <https://bcn.cl/T6huVT>
- Müller, G. 1979. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit. *Umschau* 79: 778-783.
- Müller, G. 1981. The Heavy Metal Pollution of the Sediments of Neckars and its Tributary A Stocktaking. *Chemiker Zeitung*, 105: 157-164.
- Myers, R., Montgomery, D.C., Vining, G.G., Robinson, T.J. 2010. Generalized Linear Models with Applications in Engineering and Sciences. John Wiley & Sons Inc. 496 pp.
- Oksanen, J., Simpson, G.L., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., Durand, S., Evangelista, H.B.A., FitzJohn, R., Friendly, M., Furneaux, B., Hannigan, G., Hill, M. O., Lahti, L., McGlenn, D., Ouellette, M.H., Cunha, E.R., Smith, T., Stier, A., Ter Braak, C.J.F., Weedon, J. 2022. Package "Vegan" Title Community Ecology Package. Cran: 1-297.
- Ouyang, Y., Zhang, J.E., Ou, L.-T. Temporal and spatial distributions of sediment total organic carbon in an estuary river. *Journal of Environmental Quality* 35(1): 93-100. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0221>
- Palma-Fleming, H., Quiroz, E., Campillay, C., Figuroa, M., Varas, A., Velásquez, D., Jara, B., Palma-Larrea, X. 2012. Temporal and spatial trends of total aliphatic hydrocarbons of diesel range and trace elements in sediments and mussels of the Corral Bay area, Valdivia, south central Chile. *Journal of Chilean Chemical Society* 57(2): 1074-1082. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072012000200003>.
- Peterson, B.G., Carl, P., Boudt, K., Bennett, R., Ulrich, J.,

- Zivot, E., Lestel, M., Balkissoon, K., Wuertz, D. 2014. PerformanceAnalytics: Econometric tools for performance and risk analysis. R package <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.PerformanceAnalytics>
- Komnitsas, K., Pylilotis I., Zaharaki, D., Manoutsoglou, E. 2015. Using Various Guidelines and Approaches for the Assessment of Marine Sediment Quality. *Environmental Forensics* 16(1):109-116. <https://doi.org/10.1080/15275922.2014.991006>
- Rizzo, A., Daga, R., Arcagni, M., Pérez Catán, S., Bubach, D., Sánchez, R., Ribeiro, S., Arribére, M. 2010. Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos de lagos andinos de Patagonia Norte. *Argentina, Ecología Austral*, 20: (2)155-171.
- Rudnick, R.L., Gao, S. 2003. The Composition of the Continental Crust. In: Holland, H.D. and Turekian, K.K. (Eds.) *Treatise on Geochemistry, Vol. 3, The Crust*, Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-64. <http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Ruilian, Y.U., Xing, Y., Yuanhui, Z., Gongren, H.U., Xianglin, T.U. 2008. Heavy metal pollution in intertidal sediments from Quanzhou Bay, China. *Journal of Environmental Sciences* 20(6): 664-669. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62110-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62110-5)
- Ružičková, S., Remeteiová, D., Mičková, V., Dirner, V. 2018. Sediment matrix characterization as a tool for evaluating the environmental impact of heavy metals in metal mining, smelting, and ore processing areas. *Environmental Monitoring & Assessment* 190(3): 158. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6551-4>
- Salamanca, M., Chuecas, L., Carrasco, F. 1988. Heavy metal content and distribution in surface sediments from three areas of Chilean coast. *Gayana Miscelánea* 9: 3-16.
- Seiter, K., Hensen, C., Schröter J., Zabel, M. 2004. Organic carbon in surface sediments – defining regional provinces. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 51(12): 2001-2026. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.06.014>
- Silva, C.S., Moreira, I.T., de Oliveira, O.M., Queiroz, A.F., Garcia, K.S., Falcão, B.A., Escobar, N.F., Rios, M.C. 2014. Spatial distribution and concentration assessment of total petroleum hydrocarbons in the intertidal zone surface sediment of Todos os Santos Bay, Brazil. *Environ Monit Assess* 186(2): 1271-1280. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3456-0>
- Strub, P.T., Mesías, J., Montecino, V., Rutland, J., Salinas, S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. The global coastal ocean, regional studies and synthesis. The sea. Wiley, New York. 273-313 pp.
- Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffrey, D.W. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters* 33: 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
- Valdés, J., Castillo, A. 2014. Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos marinos en el sistema de Bahías de Caldera (27°S), Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research* 42(3): 497-513.
- Valle-Levinson, A., Atkinson, L. P., Figueroa, D., Castro, L. 2003. Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research* 108(C2): 3054. <https://doi.org/10.1029/2001JC001272>
- Vergara, O.A., Echevin, V., Sobarzo, M., Sepúlveda, H.H., Castro, L., Soto-Mendoza, S. 2023. Impacts of interannual freshwater discharge on hydrodynamical patterns in the Gulf of Arauco (central-southern Chile) using a high-resolution model. *Journal of Marine Systems* 240: 103862. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103862>
- Vignati, D.A.L., Bettinetti, R., Boggero, A., Valsecchi, S. 2020. Testing the Use of Standardized Laboratory Tests to Infer Hg Bioaccumulation in Indigenous Benthic Organisms of Lake Maggiore (NW Italy). *Applied Sciences* 10(6): 1970.
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D. 2023. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.2 <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- Wickham, H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Third Edition. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4.
- Wong, Z., Saldías, G.S., Largier, J.L., Strub, P.T., Sobarzo, M. 2021. Surface Thermal Structure and Variability of Upwelling Shadows in the Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research, Oceans* 126(4): 1-21. <https://doi.org/10.1029/2020JC016194>
- Xia, J., Han, Y., Tan, J., Abarike, G.A., Song, Z. 2022. The Characteristics of Organic Carbon in the Offshore Sediments Surrounding the Leizhou Peninsula, China. *Frontiers in Earth Science* 10: 648337. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.648337>
- Xie, Y., Chen, L., Liu, R., Tian, J. 2018. AOX contamination in Hangzhou Bay, China: Levels, distribution and point sources. *Environmental Pollution* 235: 462-469. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.089>
- Zhang, R., Guan, M., Shu, Y., Shen, L., Chen, X., Zhang, F., Li, T. 2016. Historical record of lead accumulation and source in the tidal flat of Haizhou bay, yellow sea: insights from lead isotopes. *Marine Pollution Bulletin* 106(1-2): 383-387.

Received: 31.08.2023

Accepted: 12.06.2024

Editor: Fulgencio Lisón