



## Contaminación por elementos trazas en sedimentos superficiales marinos de la bahía del Callao, Perú

### Trace elements pollution in marine surface sediments of Callao Bay, Peru

Joseph Rosas<sup>1</sup>, Lorena Alvarino<sup>1</sup>, Angélica Guabloche<sup>1</sup>, Seid Romero<sup>1</sup>, Luz Castañeda<sup>1</sup> y Jose Iannacone<sup>1,2,3\*</sup>

0000-0002-9166-1255 0000-0003-1544-511X 0000-0002-3157-0650 0000-0002-6391-5684 0000-0002-4053-1741 0000-0003-3699-4732

1. Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA), Escuela Universitaria de Posgrado, Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Jr. Río Chepén 290, El Agustino, Perú. [joseph.rm.bio@gmail.com](mailto:joseph.rm.bio@gmail.com), [lorenaalvarino@gmail.com](mailto:lorenaalvarino@gmail.com), [angelguabloche2012@gmail.com](mailto:angelguabloche2012@gmail.com), [seid.romero@gmail.com](mailto:seid.romero@gmail.com), [lcastaneda@unfv.edu.pe](mailto:lcastaneda@unfv.edu.pe) y [joseiannaconeoliver@gmail.com](mailto:joseiannaconeoliver@gmail.com)\*
  2. Laboratorio de Zoología, Facultad de Ciencias Biológicas, Grupo de Investigación "One Health", Universidad Ricardo Palma, Av. Alfredo Benavides 5440, Santiago de Surco, Perú.
  3. Facultad de Ciencias Ambientales, Escuela de Ingeniería Ambiental, Coastal Ecosystems of Peru Research Group. Universidad Científica del Sur, Defensores del Morro, Lima, Perú.
- \* Autor de correspondencia / Corresponding Author

#### RESUMEN

En este estudio se evaluó la contaminación por elementos trazas en el sedimento superficial de la bahía del Callao, Perú. Se analizaron 28 elementos trazas en sedimentos marinos superficiales, provenientes de cuatro estaciones por cada temporada (otoño, invierno, primavera y verano), durante el período 2015-2016, a través de espectrofotometría de absorción atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Se utilizaron índices para determinar el grado de contaminación del sedimento. El As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn podrían estar asociados a efectos tóxicos sobre la biota del sedimento marino superficial con base en una evaluación de riesgo ecológico. Los valores de EF (factor de enriquecimiento) indicaron un enriquecimiento extremadamente alto por las medias anuales de As, Cd, Ag y Pb, mientras que los de CF (factores de contaminación) indicaron alta contaminación. Además, se determinó que el sedimento marino superficial de la bahía del Callao se encuentra altamente contaminado, debido principalmente a As, Cd y Pb:  ${}_m\text{Cd}$  (índice de riesgo ecológico potencial),  $\text{PI}_{\text{Avg}}$  (promedio de índice de contaminación) y  $\text{PI}_{\text{Nemerow}}$  (índice de contaminación de Nemerow).

**PALABRAS CLAVE:** Elementos trazas, indicadores ambientales, índices geoquímicos, riesgo ecológico, sedimentos.

#### ABSTRACT

In this study, trace element contamination in the superficial sediment of the Callao Bay, Peru was evaluated. 28 trace elements were analyzed by inductively coupled plasma atomic absorption spectrophotometry (ICP-MS) in surface marine sediments from four stations for each season (autumn, winter, spring, and summer) during the 2015 -2016 period. Contamination indices were used to determine the degree of contamination of the sediment. As, Cd, Cu, Hg, Pb, and Zn could be associated with toxic effects on the biota of the superficial marine sediment based on an ecological risk assessment. The EF (Enrichment Factor) values indicated an extremely high enrichment for the annual means of As, Cd, Ag, and Pb, while the Cfs (Contamination Factors) indicated high contamination. In addition, it was determined that the superficial marine sediment of the Callao Bay is highly contaminated, mainly due to As, Cd, and Pb:  ${}_m\text{Cd}$  (Index of the degree of contamination in sediments), RI (Index of potential ecological risk),  $\text{PI}_{\text{Avg}}$  (Average of contamination index), and  $\text{PI}_{\text{Nemerow}}$  (Nemerow pollution index).

**KEYWORDS:** Ecological risk, environmental indicators, geochemical indices, sediment, trace elements.

## INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los elementos trazas en los sistemas acuáticos de un entorno costero típico requiere una atención importante debido a la alteración antropogénica global de los ciclos de los elementos (Olatunde *et al.*, 2015). En los ecosistemas acuáticos naturales los elementos trazas presentan bajas concentraciones; sin embargo, los altos niveles de contaminación de los elementos trazas se han convertido en un problema de creciente preocupación debido a su toxicidad y su acumulación en el hábitat acuático (Hasan *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2020; Shirani *et al.*, 2020).

A lo largo del litoral marino de la Región Callao, Perú se desarrollan pequeñas y grandes industrias. En sus aguas, existe un intenso tráfico marítimo, pesca y turismo, y sus playas reciben millones de bañistas (Velazco, 2011). Los desechos domésticos, industriales y portuarios son la principal fuente de contaminación y de elementos trazas en las aguas costeras (Valdés *et al.*, 2011; Guíñez *et al.*, 2015; Sáez *et al.*, 2018). Los sedimentos marinos constituyen el principal reservorio de elementos trazas de la mayoría de las sustancias de origen antrópico en los ecosistemas marinos (Hasan *et al.*, 2013; Marín *et al.*, 2016; Braga-Castro *et al.*, 2018; Enrique-Romero *et al.*, 2019) y se ha registrado la presencia de Cd, Ni y Mn (Solís *et al.*, 2011).

En la actualidad no existen estudios que utilicen índices para evaluar la contaminación de sedimentos marinos superficiales en el Perú. Sin embargo, diversos estudios han utilizado índices de contaminación del sedimento como una herramienta para evaluar el nivel de polución de desembocaduras de ríos o en playas, y para el procesamiento, análisis y transmisión de información medioambiental en bruto para los tomadores de decisiones, técnicos o población en general (Caeiro *et al.*, 2005; Herrera *et al.*, 2019; Shirani *et al.*, 2020).

Los elementos trazas y los efectos adversos de la contaminación en los sedimentos marinos de la región costera del Callao es un tema de alta importancia (Guzmán, 1996; Solís *et al.*, 2011). El presente estudio evaluó la contaminación por elementos trazas en sedimentos superficiales marinos de la bahía del Callao, Perú.

## ÁREA DE ESTUDIO

La bahía del Callo se encuentra situada en la costa central del Perú, al norte de La Punta, e incluye el puerto del Callao y la desembocadura de los ríos Rímac y Chillón

## INTRODUCTION

The behavior of trace elements in the aquatic systems of a typical coastal environments-requires special attention, given the global anthropogenic alteration of the trace element cycles (Olatunde *et al.*, 2015). In natural aquatic systems, trace elements exhibit low concentrations. However, high pollution levels of trace elements have become a growing concern, given the toxicity of trace elements and their accumulation in the aquatic medium (Hasan *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2020; Shirani *et al.*, 2020).

Along the marine littoral of the Callao region (Perú), small and large industries are developing. In these waters, there is intense maritime traffic, fishing, and tourism, and their beaches receive millions of bathers (Velazco, 2011). Domestic, industrial, and port waste are the main source of pollution and trace elements in coastal waters (Valdés *et al.*, 2011; Guíñez *et al.*, 2015; Sáez *et al.*, 2018). Marine sediments constitute the main trace elements reservoir for most substances of anthropic origin in marine ecosystems (Hasan *et al.*, 2013; Marín *et al.*, 2016; Braga-Castro *et al.*, 2018; Enrique-Romero *et al.*, 2019), and the presence of Cd, Ni, and Mn has been recorded (Solís *et al.*, 2011).

There are currently no studies that use pollution indices to evaluate the contamination of surface marine sediments in Peru. However, diverse studies have used sediment contamination indices as a tool to evaluate the pollution level of river mouths or beaches, as well as for processing, analyzing, and transmitting raw environmental information for decision-makers, technicians, or the general population (Caeiro *et al.*, 2005; Herrera *et al.*, 2019; Shirani *et al.*, 2020).

Trace elements and the adverse effects of pollution on marine sediments in the Callao coastal region are an issue of great importance (Guzmán, 1996; Solís *et al.*, 2011). This study evaluated the trace elements pollution of surface marine sediments in Callao Bay, Perú.

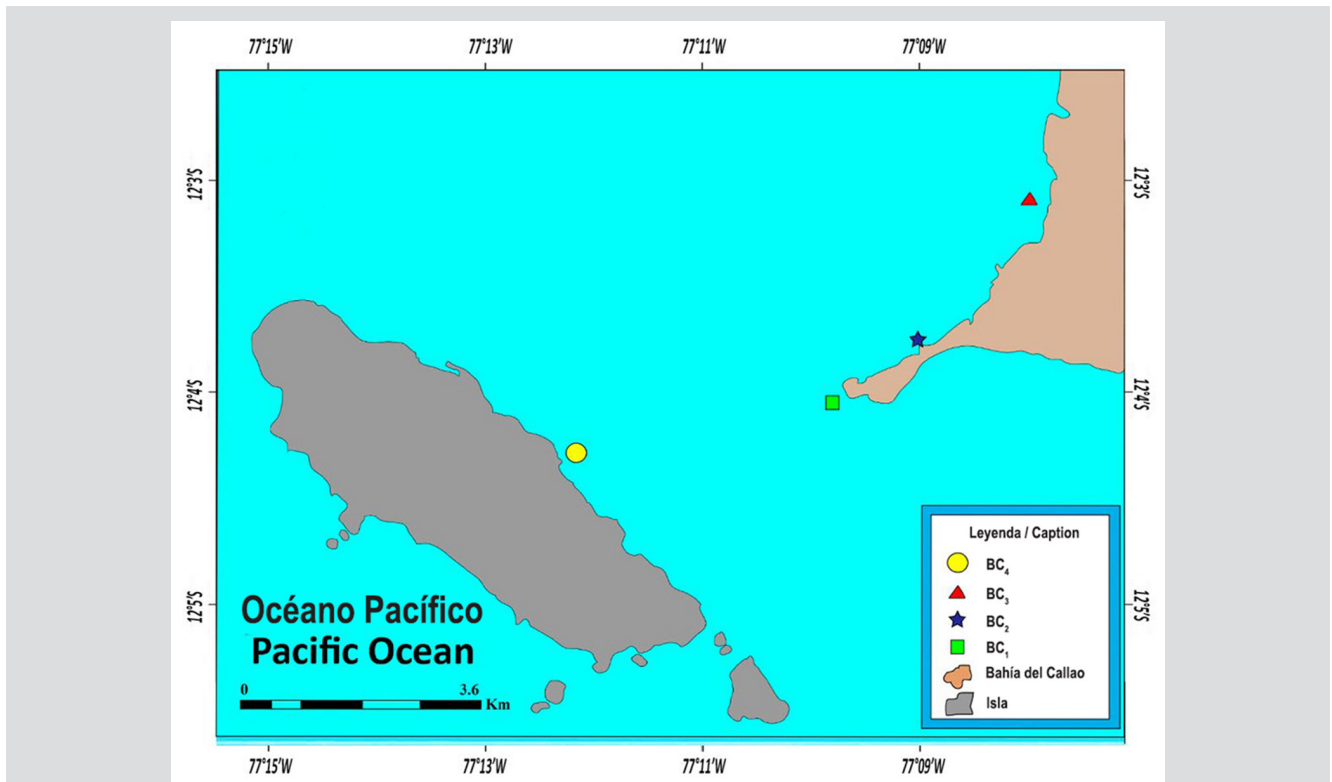
## STUDY AREA

Callao Bay is located in the central coast of Peru, north of La Punta, and includes Callao port and the Rímac and Chillón river mouths (Correa *et al.*, 2008). Its beaches are an important tourist center in summer and Callao port is the country's main port (Velazco, 2011; Suárez-Alemán *et al.*, 2019). In front of the coast are the San Lorenzo and El Frontón islands and the Palomino, Cabinzas, and Redondo

(Correa *et al.*, 2008). Sus playas son un importante foco turístico en verano y el Callao es el principal puerto del país (Velazco, 2011; Suárez-Alemán *et al.*, 2019). Frente a la costa se encuentran las islas San Lorenzo y Frontón y los islotes Palomino, Cabinzas y Redondo. Además, la zona costera recibe descargas de los ríos, de los efluentes orgánicos e inorgánicos procedentes de los colectores de toda la ciudad de Lima, así como otras fuentes de vertimiento (GRC, 2013; Velaochaga *et al.*, 2018). El primer punto de muestreo (BC<sub>1</sub>) correspondió a la zona frente a la Escuela Naval (12° 4' 3,30" S; 77° 10' 10,96" O); el segundo punto (BC<sub>2</sub>) se ubicó frente al Instituto del Mar del Perú (12° 3' 56,20" S; 77° 9' 30,70" O), el tercer punto (BC<sub>3</sub>) compete al área frente al muelle del Callao (12° 2' 34,10" S; 77° 9' 15,40" O). Finalmente, el último punto de muestreo (BC<sub>4</sub>) pertenece a la zona costera de la isla San Lorenzo (12° 5' 16,57" S; 77° 1' 52,03" O) (Figura 1), esta isla y sus alrededores presentan una biota bien conservada debido a la ausencia casi total de la actividad humana desde hace muchos años.

islets. Moreover, the coastal area receives discharges from the Rímac and Chillón rivers, from the organic and inorganic effluents from all collectors in the city of Lima as well as from other discharge sources (GRC, 2013; Velaochaga *et al.*, 2018).

The first sampling station (BC<sub>1</sub>) corresponded to the area in front of the naval school (12° 4' 3.30" S; 77° 10' 10.96" W); the second station (BC<sub>2</sub>) was located in front of the Peruvian Sea Institute (12° 3' 56.20" S; 77° 9' 30.70" W); the third station (BC<sub>3</sub>) corresponded to the area in front of Callao Harbor (12° 2' 34.10" S; 77° 9' 15.40" W); and the last sampling station (BC<sub>4</sub>) located in the coastal area of San Lorenzo Island (12° 5' 16.57" S; 77° 1' 52.03" W) (Figure 1). This island and its surroundings have a well-preserved biota due to the almost complete absence of human activity for many years.



**Figura 1.** Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo de sedimento marino superficial de la bahía del Callao, Perú. BC<sub>1</sub> = Frente a la Escuela Naval (12° 4' 3,30" S; 77° 10' 10,96" O). BC<sub>2</sub> = Frente al Instituto del Mar del Perú (12° 3' 56,20" S; 77° 9' 30,70" O). BC<sub>3</sub> = Frente al Muelle del Callao (12° 2' 34,10" S; 77° 9' 15,40" O). BC<sub>4</sub> = Isla San Lorenzo (12° 5' 16,57" S; 77° 1' 52,03" O).

**Figure 1.** Geographical location of the surface marine sediment sampling stations in Callao Bay, Peru. (BC<sub>1</sub>) in front of the Naval School (12° 4' 3,30" S; 77° 10' 10,96" W); the second station (BC<sub>2</sub>) was located in front of the Peruvian Sea Institute (12° 3' 56,20" S; 77° 9' 30,70" W); the third station (BC<sub>3</sub>) corresponded to the area in front of Callao dock (12° 2' 34,10" S; 77° 9' 15,40" W); and the last sampling station (BC<sub>4</sub>) belonged to the coastal area of San Lorenzo Island (12° 5' 16,57" S; 77° 1' 52,03" W).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se extrajeron un total de 16 muestras de sedimentos marinos costeros provenientes de cuatro estaciones (BC<sub>1</sub>, BC<sub>2</sub>, BC<sub>3</sub> y BC<sub>4</sub>), ubicadas en la zona costera de la bahía del Callao, Perú bajo un criterio estacional-espacial a lo largo de un año, entre mayo 2015 y enero 2016. El criterio estacional refirió a tomar cuatro muestras de sedimento por cada estación (otoño 2015, invierno 2015, primavera 2015 y verano 2016). Para el análisis de concentración de los elementos trazas en sedimentos se obtuvieron muestras de 500 g de sedimento superficial empleando una draga Van Veen de 0,04 m<sup>2</sup> de área de barrido por cada lanzada desde el bote usado para la colecta. Las muestras fueron conservadas y preservadas a -4 °C para su posterior análisis.

La determinación de los 28 elementos trazas (Al, Sb, As, Ba, Be, B, Ca, Ce, Cd, Co, Cr, Cu, St, P, Fe, Li, Mg, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, K, Na, T, V y Zn) del sedimento marino se realizó por espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, NexION 2000B, PerkinElmer, EE. UU.). El instrumento fue calibrado tres veces para un control de calidad y se determinó una desviación estándar de 6 %. Para la determinación de las concentraciones totales de los elementos trazas en sedimentos para el ICP-M se tomó una muestra de un gramo (peso seco) y se adicionaron 10 mL de una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico en relación de 6:2 hasta su digestión completa (Karadede y Ünlü, 2007). El Hg se digirió y se trató mediante la adición de una mezcla de ácidos: ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y permanganato de potasio (KMnO<sub>4</sub>), y su análisis se realizó por la técnica de absorción atómica acoplada a vapor frío (APHA, 2018). Las soluciones obtenidas de los sedimentos fueron introducidas tres veces al ICP-MS y los valores de las concentraciones fueron registradas como un promedio de las tres réplicas. A cada una de las muestras de sedimento se le determinó el contenido de arena, arcilla y limo por la técnica de los tamices (Gilabert de Brito *et al.*, 2015; APHA, 2018).

Debido a que en el Perú no existen estándares de calidad ambiental para elementos trazas en sedimentos marinos, se compararon las medias de las concentraciones de todos los elementos trazas analizados entre todas las estaciones (BC<sub>1</sub>, BC<sub>2</sub>, BC<sub>3</sub> y BC<sub>4</sub>), las temporadas (otoño, invierno, primavera y verano) y la media anual con los valores estándar establecidos en el ECA canadiense para sedimentos marinos y el ECA australiano-neozelandés para sedimentos marinos (Anzeccc–Armcanz, 2000; CCME, 2011). Las medias de las concentraciones de As, Cd, Cr, Cu,

## MATERIALS AND METHODS

A total of 16 coastal marine sediments were extracted from four stations (BC<sub>1</sub>, BC<sub>2</sub>, BC<sub>3</sub>, and BC<sub>4</sub>), located in the coastal zone of Callao Bay (Perú), under a seasonal-spatial criterion throughout one year, between May 2015 and January 2016. The seasonal criterion involved taking four sediment samples per season (Autumn 2015, Winter 2015, Spring 2015, and Summer 2016). To analyze the trace elements concentration in the sediments, 500 g samples of surface sediment were obtained using a Van Veen dredge with a 0.04 m<sup>2</sup> sweep area for each throw from the boat used for collection. The samples were conserved and preserved at -4 °C for later analysis.

The determination of the 28 trace elements (Al, Sb, As, Ba, Be, B, Ca, Ce, Cd, Co, Cr, Cu, St, P, Fe, Li, Mg, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, K, Na, T, V, and Zn) in the marine sediments was carried out via mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS, NexION 2000B, PerkinElmer, USA). The instrument was calibrated three times for quality control, and a 6 % standard deviation was established. To determine the total concentrations of the trace elements in the sediments for ICP-MS, a 1 g sample (dry weight) sample was taken, and 10 mL of a mixture of nitric acid and hydrochloric acid at a 6:2 ratio was added until full digestion was reached (Karadede and Ünlü, 2007). The Hg was digested and treated by adding a mixture of acids: sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), nitric acid (HNO<sub>3</sub>), and potassium permanganate (KMnO<sub>4</sub>). Its analysis was conducted via the cold vapor atomic absorption technique (APHA, 2018). The solutions obtained from the sediments were introduced three times into the ICP-MS, and the concentration values were recorded as an average of the three replications. For each sediment sample, the sand, clay, and silt contents were determined via the sieve technique (Gilabert de Brito *et al.*, 2015; APHA, 2018).

Given that in Peru there are no environmental quality standards for trace elements in marine sediments, the means of the concentrations of all the trace elements analyzed were compared between all the stations (BC<sub>1</sub>, BC<sub>2</sub>, BC<sub>3</sub>, and BC<sub>4</sub>) and seasons (Autumn, Winter, Spring, and Summer), as well as the annual mean with the standard values established in the Canadian EQS for marine sediments and the Australian-New Zealander EQS for marine sediments (Anzeccc–Armcanz, 2000; CCME, 2011). The means of the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn between seasons (Autumn, Winter, Spring,

Hg, Pb y Zn entre las temporadas (otoño, invierno, primavera y verano) y la media anual fueron sometidas a dos conjuntos de GCSs (guías de calidad de sedimentos) desarrolladas para ecosistemas marinos en una evaluación de riesgo ecológico a nivel de tamizaje, comparándola con GCS numéricos como TELs y PELs, y ERLs y ERMs. Los valores de rango bajo (es decir, ERLs o TELs) son concentraciones menores a las que no se esperarían efectos adversos sobre la fauna que habita en los sedimentos. Por el contrario, los ERM y PEL representan concentraciones químicas por encima de las cuales es probable que se produzcan efectos adversos (Luo *et al.*, 2010).

### Índices de Contaminación

#### • Factor de enriquecimiento (EF)

Este factor fue determinado para evaluar la relación existente entre las concentraciones de elementos trazas del sedimento y las concentraciones en la corteza terrestre, como consecuencia de la contaminación antropogénica (Abraham y Parker, 2008; Diop *et al.*, 2015). El factor de enriquecimiento fue calculado usando la siguiente ecuación (Sakan *et al.*, 2009).

$$EF = [Me / Al]_{sed} / [Me / Al]_{bg}$$

Donde  $[Me / Al]_{sed}$  es la relación de la concentración de elementos trazas – *Al* en la muestra de interés y  $[Me / Al]_{bg}$  es la misma relación en el material de la corteza superior (Diop *et al.*, 2015). *EF* < 1 indica que no existe enriquecimiento; < 3 es menor; 3-5 es moderado; 5-10 es moderadamente importante, 10-25 es importante; 25-50 es muy importante y > 50 es extremadamente importante (Sakan *et al.*, 2009). Los valores de la corteza superior de los elementos trazas analizados fueron los promedios de los valores de los elementos trazas de la corteza continental, establecidos por Valdés *et al.* (2011) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Niveles de referencia pre industrial ( $mg \cdot kg^{-1}$ ) y factores de respuesta tóxica de los elementos trazas analizados. Fuente: Valdés *et al.* (2011), Nkansah *et al.* (2017), Wang *et al.* (2018) y Kükrer *et al.* (2020).

Elemento analizado / Element analyzed	Factor de respuesta tóxica / Toxic response factors	Nivel de referencia pre industrial / Pre-industrial reference levels
Al	-	82300
Sb	7	1
As	10	1.8
Ba	1	425
Be	-	2.8
B	-	10

and Summer) and the annual mean were subjected to two GCS (sediment quality guides) developed for marine ecosystems in an ecological risk assessment at the sieve level, comparing this with numerical GCS such as TELs and PELs, and ERLs and ERMs. The low-range values (*i.e.*, ERLs or TELs) are concentrations lower than those from which no adverse effects would be expected on the fauna inhabiting the sediments. On the contrary, ERM and PEL represent chemical concentrations above which it is likely that adverse effects are generated (Luo *et al.*, 2010).

### Pollution indices

#### • Enrichment factor (EF)

This factor was determined to evaluate the existing relationship between the concentrations of sediment trace elements and the concentrations of the earth's crust, as a consequence of anthropogenic pollution (Abraham and Parker, 2008; Diop *et al.*, 2015). The enrichment factor was calculated using the following equation (Sakan *et al.*, 2009):

$$EF = [Me / Al]_{sed} / [Me / Al]_{bg}$$

Where  $[Me / Al]_{sed}$  is the trace elements-*Al* concentration ratio in the sample of interest, and  $[Me / Al]_{bg}$  is the same ratio in the upper crust's material. (Diop *et al.*, 2015). *EF* < 1 indicates that there is no enrichment; < 3 is lower; 3-5 is moderate; 5-10 is moderately important; 10-25 is important; 25-50 is very important; and > 50 is extremely important (Sakan *et al.*, 2009). The upper crust's values for the trace elements analyzed were the averages of the trace element values of the continental crust, as established by Valdés *et al.* (2011) (Table 1).

**Table 1.** Pre-industrial reference levels ( $mg \cdot kg^{-1}$ ) and toxic response factors of the trace elements analyzed. Source: Valdés *et al.* (2011), Nkansah *et al.* (2017), Wang *et al.* (2018) and Kükrer *et al.* (2020).

Elemento analizado / Element analyzed	Factor de respuesta tóxica / Toxic response factors	Nivel de referencia pre industrial / Pre-industrial reference levels
Cd	30	0.2
Ca	-	41500
Ce	1	60
Co	5	25
Cu	5	55
Cr	2	100
St	-	375
P	-	1050
Fe	-	56300
Li	-	20
Mg	-	23300
Mn	1	950
Hg	40	0.08
Mo	-	1.5
Ni	5	75
Ag	-	0.07
Pb	5	12.5
K	-	20900
Na	-	23600
Ti	-	5700
V	2	135
Zn	1	70

• **Factor de Contaminación ( $C_f$ )**

El término factor de contaminación describe la contaminación de una sustancia tóxica dada en una cuenca, donde  $C_e$  representa la concentración de un elemento en muestras de sedimento, y  $C_b$  representa los valores de la corteza continental para el elemento (Shirani *et al.*, 2020).

$$C_f = C_e / C_b$$

Las siguientes terminologías son utilizadas para describir al factor de contaminación  $C_f < 1$ , bajo factor de contaminación;  $1 \leq C_f < 3$ , factor de contaminación moderado;  $3 \leq C_f < 6$ , factor de contaminación considerable; y  $C_f \geq 6$ , factor de contaminación alto (Qingjie *et al.*, 2008).

• **Índice de grado de contaminación en sedimentos ( $_mCd$ )**

El grado de contaminación Cd es definido como la suma de todos los factores de contaminación de trazas de varios elementos.

• **Pollution factor ( $C_f$ )**

The term *pollution factor* describes the contamination by a given toxic substance in a basin, where  $C_e$  represents the concentration of an element in sediment samples, and  $C_b$  represents the continental crust values for the element (Shirani *et al.*, 2020).

$$C_f = C_e / C_b$$

The following terms are used to describe the pollution factor:  $C_f < 1$ , low pollution factor;  $1 \leq C_f < 3$ , moderate pollution factor;  $3 \leq C_f < 6$ , considerable pollution factor; and  $C_f \geq 6$ , high pollution factor (Qingjie *et al.*, 2008).

• **Sediment contamination level index ( $_mCd$ )**

The pollution level Cd is defined as the sum of all pollution factors of several trace elements.

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i$$

Mientras que el índice de grado de contaminación en sedimentos  ${}_mCd$  es definido como:

$${}_mCd = \frac{\sum_{i=1}^m C_f^i}{n}$$

Donde  $n$  es el número de elementos analizados e  $i = \text{ith}$  elemento. Las terminologías utilizadas para la descripción del índice de grado de contaminación en sedimentos son:  ${}_mCd < 1,5$ , muy bajo;  $1,5 \leq {}_mCd < 2$ , bajo;  $2 \leq {}_mCd < 4$ , moderado;  $4 \leq {}_mCd < 8$ , alto;  $8 \leq {}_mCd < 16$ , muy alto;  $16 \leq {}_mCd < 32$ , extremadamente alto; y  $32 \leq {}_mCd$ , ultra alto (Shirani *et al.*, 2020).

#### • Índice de riesgo ecológico potencial (RI)

Es definido como la suma de los factores de riesgo ecológico:

$$RI = \sum_{i=1}^m Er^i$$

Donde  $Er^i$  es el factor de riesgo ecológico potencial y  $m$  es la cantidad de elementos en la muestra. Las terminologías utilizadas para la descripción del índice de riesgo ecológico potencial son:  $RI < 150$ , bajo riesgo ecológico;  $150 \leq RI < 300$ , riesgo ecológico moderado;  $300 \leq RI < 600$ , riesgo ecológico considerable; y  $RI \geq 600$ , riesgo ecológico muy alto cuando se utilizan los factores de respuesta tóxica de los elementos As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn (Qingjie *et al.*, 2008).

#### • Promedio de índice de contaminación ( $PI_{Avg}$ )

El promedio de índice de contaminación ( $PI_{Avg}$ ) puede ser definido como

$$PI_{Avg} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i$$

Donde  $P_i$  es el índice de contaminación simple del elemento traza  $I$  y  $m$  es la cantidad de elementos trazas (Qingjie *et al.*, 2008). Un valor de  $PI_{Avg} > 1,0$  indica baja calidad de suelo por la contaminación. El índice de contaminación  $P_i$  se calcula dividiendo la concentración del elemento en la muestra entre el nivel permisible asumido (Bhattacharya *et al.*, 2006). Se utilizaron los valores máximos estándar de Sb, As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb y Zn entre el

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i$$

Meanwhile, the sediment pollution level index  ${}_mCd$  is defined as:

$${}_mCd = \frac{\sum_{i=1}^m C_f^i}{n}$$

Where  $n$  is the number of elements analyzed and  $i = \text{ith}$  element. The terms used to describe the sediment pollution level index are:  ${}_mCd < 1.5$ , very low;  $1.5 \leq {}_mCd < 2$ , low;  $2 \leq {}_mCd < 4$ , moderate;  $4 \leq {}_mCd < 8$ , high;  $8 \leq {}_mCd < 16$ , very high;  $16 \leq {}_mCd < 32$ , extremely high; and  $32 \leq {}_mCd$ , ultra-high (Shirani *et al.*, 2020).

#### • Potential ecological risk index (RI)

It is defined as the sum of the ecological risk factors:

$$RI = \sum_{i=1}^m Er^i$$

Where  $Er^i$  is the potential ecological risk factor, and  $m$  is the amount of elements in the sample. The terms used to describe the potential ecological risk factor are:  $RI < 150$ , low ecological risk;  $150 \leq RI < 300$ , moderate ecological risk;  $300 \leq RI < 600$ , considerable ecological risk; and  $RI \geq 600$ , very high ecological risk. All this, when the toxic response factors of the following elements are used: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn (Qingjie *et al.*, 2008).

#### • Pollution index average ( $PI_{Avg}$ )

The pollution index average ( $PI_{Avg}$ ) can be defined as:

$$PI_{Avg} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i$$

Where  $P_i$  is the simple pollution index of trace element  $I$ , and  $m$  is the amount of trace elements (Qingjie *et al.*, 2008). A value of  $PI_{Avg} > 1.0$  indicates low soil quality due to pollution. The pollution index  $P_i$  is calculated by dividing the concentration of the element in the sample by the assumed permissible level (Bhattacharya *et al.*, 2006). The standard maximum values of Sb, As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, and Zn were used as specified under the Canadian Environmental Quality Standard for marine sediments and the Australian and New Zealander Environmental Quality Standard for marine sediments.

Estándar de Calidad Ambiental Canadiense para sedimentos marinos y el de Calidad Ambiental Australiano y Neozelandés para sedimentos marinos.

• Índice de contaminación de Nemerow ( $PI_{Nemerow}$ )

$$PI_{Nemerow} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i\right)^2 + P_{i\max}^2}{2}}$$

Donde  $PI$  es  $Ci/Si$ ;  $i$ -th es índice de contaminación del elemento traza  $i$  th,  $Ci$  es la concentración medida del elemento traza,  $Si$  es el estándar requerido para el  $i$  th elemento traza y  $PI_{max}$  es el máximo valor del índice único de contaminación de todos los elementos trazas (Cheng *et al.*, 2007). De acuerdo con los valores de  $PI_{Nemerow}$  se clasificó la calidad del sedimento;  $PI_{Nemerow} < 0,7$ , dominio saludable;  $0,7 \leq PI_{Nemerow} < 1$ , dominio de precaución;  $1 \leq PI_{Nemerow} < 2$ , dominio ligeramente contaminado;  $2,0 \leq PI_{Nemerow} < 3,0$ , dominio contaminado moderadamente; y  $PI_{Nemerow} > 3,0$ , dominio contaminado seriamente (Cheng *et al.*, 2007).

RESULTADOS

Los tipos de sedimento, con base en su granulometría, variaron entre fango y arena en los diferentes puntos de muestreo (Tabla 2).

Tabla 2. Granulometría de los sedimentos marinos de la bahía del Callao, Perú.

	Tipo	BC <sub>1</sub>	BC <sub>2</sub>	BC <sub>3</sub>	BC <sub>4</sub>		BC <sub>1</sub>	BC <sub>2</sub>	BC <sub>3</sub>	BC <sub>4</sub>
Arena / Sand	Arena gruesa / Coarse sand	0.55	0.44	0.22	0.82	50.46	28.97	41.85	63.15	
	Arena media/ Medium sand	1.21	2.04	1.24	3.04					
	Arena fina / Fine sand	8.21	1.31	11.83	9.55					
	Arena muy fina / Very fine sand	40.48	25.18	28.56	49.74					
Fango / Mud	Limo / Silt	47.61	67.92	56.46	34.81	49.54	71.03	58.15	36.85	
	Arcilla / Clay	1.93	3.11	1.69	2.04					
		100.00	100.00	100.00	100.00	Fango Arenoso / Sandy mud	Fango / Mud	Fango / Mud	Fango Arenoso / Sandy mud	

Las mayores medias de los metales traza se encuentran dispersas en los diferentes puntos de muestreo; también estas medias variaron con el criterio estacional (Tabla 3).

• Nemerow pollution index ( $PI_{Nemerow}$ )

$$PI_{Nemerow} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i\right)^2 + P_{i\max}^2}{2}}$$

Where  $PI$  is  $Ci/Si$ ;  $i$ -th is the pollution index for the  $i$ -th trace element,  $Ci$  is the measured concentration of the trace element,  $Si$  is the required standard for the  $i$ -th trace element, and  $PI_{max}$  is the maximum value for the unique pollution index for all trace elements (Cheng *et al.*, 2007). According to the  $PI_{Nemerow}$  values, sediment quality was classified as follows;  $PI_{Nemerow} < 0.7$ , healthy domain;  $0.7 \leq PI_{Nemerow} < 1$ , caution domain;  $1 \leq PI_{Nemerow} < 2$ , slightly polluted domain;  $2.0 \leq PI_{Nemerow} < 3.0$ , moderately contaminated domain; and  $PI_{Nemerow} > 3.0$ , seriously contaminated domain (Cheng *et al.*, 2007).

RESULTS

The sediment types, according to the granulometry of marine sediments, varied between mud and sand at the different sampling stations (Table 2).

Table 2. Granulometry of the marine sediments of Callao Bay, Peru.

The highest means for trace metals are dispersed across the different sampling stations. These means also varied with the seasonal criterion (Table 3).





**Tabla 3.** Elementos trazas en sedimentos superficiales marinos de la bahía del Callao, Perú. Los valores máximos por punto de muestreo se indican en negritas, los valores máximos por temporada en cursivas y los valores que exceden los ECA aparecen subrayados.

**Table 3.** Trace elements in surface marine sediments in Callao Bay, Peru. “Bold” = maximum values by sampling station; “Italic” = maximum values by season; “Underlined” = values that exceed the EQS.

Elementos trazas / Trace elements	Medias de las concentraciones por punto de muestreo / Concentration measures by sampling station (mg·kg <sup>-1</sup> )				Medias de las concentraciones por temporada / Concentration measures by season					Estándares de Calidad Ambiental / Environmental Quality Standards	
	BC <sub>1</sub>	BC <sub>2</sub>	BC <sub>3</sub>	BC <sub>4</sub>	Annual / Annual	Otoño / Autumn	Invierno / Winter	Primavera / Spring	Verano / Summer	Canada (mg·kg <sup>-1</sup> )	Australia-Nueva Zelanda / Australia-New Zealand (mg·kg <sup>-1</sup> )
Al	10963.25	13275.5	<b>13572</b>	9592.25	11850.75	10605.5	9642.75	<u>13854.5</u>	13300.25	-	-
Sb	0.95	1.53	<b>3.7</b>	1.05	1.81	<u>2.68</u>	1.75	1.7	1.1	-	2
As	16.325	37.73	<b>179.15</b>	13.38	61.64	61.73	55.58	<u>92</u>	37.28	7.24	-
Ba	76.23	127.18	<b>139.53</b>	38.9	95.46	<u>103.33</u>	88.45	101.65	88.4	-	-
Be	0.34	0.37	<b>0.37</b>	0.25	0.33	<u>0.37</u>	0.26	0.36	0.35	-	-
B	21.19	<b>33.82</b>	23.15	23.06	25.3	23.26	20.63	<u>30.81</u>	26.53	-	-
Cd	1.73	<b>8.01</b>	5.96	3.43	4.78	4.69	3.64	<u>5.79</u>	5.01	0.7	1.5
Ca	41796.25	43510.5	16166.5	<b>43632.5</b>	36276.44	<u>45376</u>	34203	32758	32769	-	-
Ce	15.05	15.18	<b>19.76</b>	13.44	15.86	13.63	14.76	<u>18.22</u>	16.81	-	-
Co	5.1275	7.28	<b>10.28</b>	4.23	6.73	6.89	6.1	<u>7.44</u>	6.49	-	-
Cu	24.975	147.3	<b>177.05</b>	24.58	93.48	90.58	70.6	93.7	<u>119.03</u>	18.7	65
Cr	12.89	<b>27.36</b>	18.17	18.54	19.24	19.27	16.24	<u>21.68</u>	19.76	52.3	80
St	267.35	258.15	72.78	<b>287.25</b>	221.38	<u>262.5</u>	216.68	195.88	210.48	-	-
P	1347.75	1608	1292.25	<b>2056.75</b>	1576.19	1512.8	<u>1688.8</u>	1419.8	1683.5	-	-
Fe	16311.25	<b>22351.75</b>	2611.5	13380.25	19539.94	18007	16851	<u>23115</u>	20187	-	-
Li	17.475	<b>21.475</b>	19.78	15.925	18.66	16.48	14.68	<u>22</u>	21.5	-	-
Mg	6936.5	<b>9173.25</b>	8341.25	6198.5	7662.38	7142.8	6498.8	<u>8744.8</u>	8263.3	-	-
Mn	224.25	268.28	<b>426.35</b>	171.8	272.67	256.65	230.95	<u>332.1</u>	270.98	-	-
Hg	0.2975	<b>0.99</b>	0.45	0.27	0.5	0.37	0.47	<u>0.64</u>	0.52	0.13	0.15
Mo	1.16	<b>6.44</b>	1.53	2.04	2.79	2.95	2.21	<u>3.42</u>	2.59	-	-
Ni	5.635	<b>12.27</b>	8.89	6.43	8.31	8.27	6.57	<u>9.46</u>	8.93	-	21
Ag	0.375	1.45	<b>3.03</b>	0.475	1.33	1.4	0.85	<u>1.95</u>	1.13	-	1
Pb	30.025	<b>251.7</b>	232.4	26.175	135.08	<u>168.3</u>	89.73	159.08	123.2	30.2	50
K	1853.5	<b>2794.25</b>	2471.5	1871.75	2247.75	2014.5	1795.3	2596	<u>2585.3</u>	-	-
Na	9127	18876	8223.5	<b>11424.25</b>	11912.69	10321	9038.5	<u>15264</u>	13028	-	-
Ti	616.8	577.03	<b>752.4</b>	450.63	599.21	508.3	512.95	<u>696.28</u>	679.33	-	-
V	45	55.61	<b>65.75</b>	34.98	50.34	41.97	44.83	<u>62.17</u>	52.38	-	-
Zn	105.13	460.93	<b>987.2</b>	87.33	410.14	388	316.78	<u>501.45</u>	434.35	124	200

Se halló que las medias del As, Cd, Cu y Hg en todas las estaciones evaluadas excedieron los valores establecidos en ambos ECA analizados. En el caso de Ag, Pb y Zn se excedieron los ECA en BC<sub>2</sub> y BC<sub>3</sub>. En todas las estaciones Sb, Cr y Ni no excedieron los valores establecidos en ambos ECA analizados, salvo Sb que excedió en BC<sub>3</sub>. Además, de acuerdo con las concentraciones medias anuales y de todas las temporadas (otoño, invierno, primavera y verano), As, Cd, Cu, Hg, Ag, Pb y Zn excedieron los valores establecidos en ambos ECA analizados, salvo Ag en invierno. Las concentraciones promedio de Sb, Cr y Ni en ninguna temporada sobrepasaron los valores establecidos en los ECA canadiense y australiano-neozelandés, salvo Sb que excedió en otoño (Tabla 3). Los niveles de contaminación de elementos trazas en sedimentos marinos superficiales de la bahía del Callao de Perú de acuerdo con las guías de calidad de sedimentos son señaladas en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Niveles de contaminación de elementos trazas en sedimentos marinos superficiales de la bahía del Callao de Perú de acuerdo con las Guías de Calidad de sedimentos (GCS) (Luo *et al.*, 2010). O = Otoño, I = Invierno, P = Primavera, V = Verano, A = Anual. TEL = Nivel de efecto umbral. PEL = Nivel de efecto probable. ERL = Rango de efecto bajo. ERM = Rango de efecto medio.

Elementos trazas / Trace elements	GCSs (mg·kg <sup>-1</sup> )				Temporadas de acuerdo a los GCSs / Seasons according to the GCSs*		
	TEL	PEL	ERL	ERM	< ERL	ERL-ERM	> ERM
As	7.2	41.6	8.2	70	-	O,I,V,A	P
Cd	0.68	4.2	1.2	9.6	-	O,I,P,V,A	-
Cr	52.3	160.4	81	370	O,I,P,V	-	-
Cu	18.7	108.2	34	270	-	O,I,P,V,A	-
Hg	0.174	0.486	0.15	0.71	-	O,I,P,V,A	-
Pb	30.2	112.2	46.7	218	-	O,I,P,V,A	-
Zn	124	271	150	410	-	O,I	P,V,A

• **Factor de enriquecimiento (EF)**

De acuerdo con las medias anuales de las concentraciones de elementos trazas en sedimentos de la bahía del Callao, los EF de Be, Ni, K y Ti indicaron que no aportaban enriquecimiento al sedimento, los EF de Ba, Ce, Co, Cr, Fe, Mg, Mn y V indicaron bajo enriquecimiento, los EF de Bo, St, Na indicaron moderado enriquecimiento, los EF de Ca, Li indicaron enriquecimiento moderadamente importante, los EF de Sb, Cu, P y Mo indicaron enriquecimiento importante, los EF de Hg y Zn indicaron enriquecimiento muy importante y los EF de As, Cd, Ag y Pb indicaron enriquecimiento extremadamente importante (Tabla 5).

It was found that the measures of As, Cd, Cu, and Hg in all evaluated stations exceeded the values established as per both RCTs analyzed. In the case of Ag, Pb, and Zn, the RCTs were exceeded at BC<sub>2</sub> and BC<sub>3</sub>. At all stations, Sb, Cr, and Ni did not exceed the values established in both analyzed RCTs, except for Sb, which exceeded them at BC<sub>3</sub>. Furthermore, based on the mean annual concentrations and those of all seasons (Autumn, Winter, Spring, and Summer), As, Cd, Cu, Hg, Ag, Pb, and Zn exceeded the values established in both analyzed EQS, except for Ag in Winter. The average concentrations of Sb, Cr, and Ni did not exceed the Canadian and Australian-New Zealander RCTs in any season, except for Sb, which exceeded them in Autumn (Table 3). The trace elements pollution levels in surface marine sediments of Callao Bay (Peru) are shown in Table 4 according to the sediment Quality Guides.

**Table 4.** Trace elements pollution levels in surface marine sediments of Callao Bay (Peru), according to the sediment Quality Guides (GCS) (Luo *et al.*, 2010). O = Autumn, I = Winter, P = Spring, V = Summer, A = Annual. TEL = Threshold effect level. PEL = Probable effect level. ERL = Low effect range. ERM = Medium effect range.

• **Enrichment factor (EF)**

According to the annual means of the trace element concentrations for the sediments of Callao Bay, the EF of Be, Ni, K, and Ti indicated no contribution to the enrichment of the sediment; the EF of Ba, Ce, Co, Cr, Fe, Mg, Mn, and V indicated low enrichment; the EF of Bo, St, and Na indicated moderate enrichment; the EF of Ca and Li indicated moderately important enrichment; the EF of Sb, Cu, P, and Mo indicated important enrichment; the EF of Hg and Zn indicated very important enrichment; and the EF of As, Cd, Ag, and Pb indicated extremely important enrichment (Table 5).



**Tabla 5.** Índices simples de los elementos trazas ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en sedimento marino de la bahía del Callao, Perú.  $\bar{x}$  = Media anual. *Cf* = Factor de Contaminación. *EF* = Factor de enriquecimiento.

**Table 5.** Simple trace elements indices ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) in marine sediments of Callao Bay, Peru.  $\bar{x}$  = Annual mean. *Cf* = Contamination factor. *EF* = Enrichment factor.

Elementos trazas / Trace elements	$\bar{x}$	<i>Cf</i>	<i>EF</i>
Al	11850.75	0.14	-
Sb	1.81	1.81	12.54
As	61.64	34.25	237.83
Ba	95.46	0.22	1.56
Be	0.33	0.12	0.83
B	25.30	2.53	3.32
Cd	4.78	23.90	166.00
Ca	36276.44	0.87	6.07
Ce	15.86	0.26	1.84
Co	6.73	0.27	1.87
Cu	93.48	1.70	11.80
Cr	19.24	0.19	1.34
St	221.38	0.59	4.10
Pb	1576.19	1.50	10.42
Fe	19539.94	0.35	2.41
Li	18.66	0.93	6.48
Mg	7662.375	0.33	2.28
Mn	272.67	0.29	1.99
Hg	0.50	6.23	43.30
Mo	2.79	1.86	12.92
Ni	8.31	0.11	0.77
Ag	1.33	19.02	132.07
Pb	135.08	10.81	75.04
K	2247.75	0.11	0.75
Na	11912.69	0.50	3.51
Ti	599.21	0.11	0.73
V	50.34	0.37	2.59
Zn	410.14	5.86	40.69

En cambio, el EF de Sb en verano (6,81) indicó enriquecimiento moderadamente importante, los EF de Ca en primavera y verano (4,69 y 4,89; respectivamente) indicaron moderado enriquecimiento, el EF del St en invierno (5,43) indicó enriquecimiento moderadamente importante y el EF del Hg en invierno (50,41) indicó enriquecimiento extremadamente importante.

On the other hand, the EF of Sb in Summer (6.81) indicated a moderately important enrichment; the EF of Ca in Spring and Summer (4.69 and 4.89, respectively) indicated moderate enrichment; the EF of St in Winter (5.43) indicated moderately important enrichment; and the EF of Hg in Winter (50.41) indicated extremely important enrichment.

### • Factor de Contaminación (*Cf*)

Según las concentraciones promedio anuales del sedimento marino de la bahía del Callao se halló que el Al, Ba, Be, Ca, Ce, Co, Cr, St, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, K, Na, Ti y Va indicaron baja contaminación del sedimento. Mientras que los valores de *Cf* de Sb, Bo, Cu, P y Mo indicaron contaminación moderada del sedimento marino por estos elementos trazas, el *Cf* de Zn indicó considerable contaminación del sedimento por este elemento traza. Finalmente, los valores de *Cf* de As, Cd, Hg, Ag, Pb indicaron alta contaminación del sedimento marino por estos elementos (Tabla 5). Por el contrario, el *Cf* de Bo en primavera (3,08) indicó considerable contaminación, el *Cf* de Ca en otoño (1,09) indicó moderada contaminación, los *Cf* de Li en primavera y verano (1,1 y 1,08; respectivamente) indicaron moderada contaminación, los *Cf* de Hg en otoño e invierno (4,59 y 5,91; respectivamente) indicaron considerable contaminación y los *Cf* de Zn en primavera y verano (7,16 y 6,21; respectivamente) indicaron alta contaminación.

### Índice de grado de contaminación en sedimentos ( ${}_mCd$ )

El  ${}_mCd$  anual del sedimento superficial de la bahía del Callao (4,12) indicó alta contaminación, al igual que los  ${}_mCd$  de otoño y primavera (4,18 y 5,44; respectivamente). En cambio, los  ${}_mCd$  de invierno y verano indicaron moderada contaminación (3,29 y 3,55; respectivamente).

### Índice de riesgo ecológico potencial (*RI*)

Todos los *RI* correspondientes a la media anual y durante otoño, invierno, primavera y verano de los elementos trazas del sedimento superficial de la bahía del Callao (1393,77, 1333,66, 1153,08, 1793,94 y 1294,43), respectivamente, los que indicaron muy alto riesgo ecológico.

### Promedio de Índice de Contaminación ( $PI_{Avg}$ )

Todos los  $PI_{Avg}$  correspondientes a la media anual de los elementos trazas del sedimento superficial de la bahía del Callao y durante otoño, invierno, primavera y verano (2,31, 2,28, 2,3,14 y 1,66; respectivamente) indicaron baja calidad del sedimento por la contaminación.

### Índice de contaminación Nemerow ( $PI_{Nemerow}$ )

El  $PI_{Nemerow}$  anual del sedimento superficial de la bahía del Callao (3,38) indicó la existencia de un dominio contaminado seriamente, al igual que los  $PI_{Nemerow}$  de otoño, primavera y verano (3,32, 4,09 y 3,54; respectivamente). Solamente el  $PI_{Nemerow}$  de invierno (2,57) indicó un dominio de contaminación moderada.

### • Pollution factor (*Cf*)

According to the average annual concentrations of the marine sediment in Callao Bay, it was found that Al, Ba, Be, Ca, Ce, Co, Cr, St, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, K, Na, Ti, and Va indicated a low contamination of the sediment. The *Cf* values of Sb, Bo, Cu, P, and Mo indicated moderate contamination of the marine sediment by these trace elements. The *Cf* of Zn indicated considerable contamination of the sediment by this trace element. Finally, the *Cf* values of As, Cd, Hg, Ag, and Pb indicated high contamination of the marine sediment by these elements (Table 5). On the contrary, the *Cf* of Bo in Spring (3.08) indicated considerable contamination; the *Cf* of Ca in Autumn (1.09) indicated moderate contamination; the *Cf* of Li in Spring and Summer (1.1 and 1.08, respectively) indicated moderate contamination, the *Cf* of Hg in Autumn and Winter (4.59 and 5.91, respectively) indicated considerable contamination; and the *Cf* of Zn in Spring and Summer (7.16 and 6.21, respectively) indicated high contamination.

### Sediment pollution level index ( ${}_mCd$ )

The annual  ${}_mCd$  of the surface sediments of Callao Bay (4.12) indicated high pollution, as well as the  ${}_mCd$  of Autumn and Spring (4.18 and 5.44, respectively). On the other hand, the  ${}_mCd$  of Winter and Summer indicated moderate pollution (3.29 and 3.55, respectively).

### Potential ecological risk index (*RI*)

All the *RI* corresponding to the annual mean and to Autumn, Winter, Spring, and Summer for the trace elements of the surface sediment of Callao Bay (1393.77, 1333.66, 1153.08, 1793.94, and 1294.43 respectively) indicated a very high ecological risk.

### Pollution index average ( $PI_{Avg}$ )

All the  $PI_{Avg}$  corresponding to the annual mean of the trace elements in the surface sediment of Callao Bay, as well as those of Autumn, Winter, Spring, and Summer (2.31, 2.28, 2, 3.14, and 1.66, respectively) indicated a low sediment quality due to pollution.

### Nemerow pollution index ( $PI_{Nemerow}$ )

The annual  $PI_{Nemerow}$  of the surface sediment of Callao Bay (3.38) indicated the existence of a seriously contaminated domain, as well as the  $PI_{Nemerow}$  of Autumn, Spring, and Summer (3.32, 4.09, and 3.54, respectively). Only the  $PI_{Nemerow}$  of Winter (2.57) indicated a domain of moderate pollution.

## DISCUSIÓN

Las altas concentraciones de Cd, Pb y Cu en el sedimento marino superficial de la bahía del Callao se sugieren se deban a las descargas de los ríos Chillón y Rímac y desechos industriales (Guzmán, 1996). En la cuenca del río Chillón se ha identificado la presencia de Cd, Ca, Co, Cu, St, Fe, Mn, K, Pb, Ti y Zn y registrado actividad minera aurífera artesanal (Chui *et al.*, 2009; Loaiza y Galloso, 2010; GRC, 2011). En el Rímac hay presencia de Cd, Cu, Pb y Zn (GRC, 2011).

Así mismo, las estaciones BC<sub>3</sub> y BC<sub>2</sub> que fueron caracterizadas como suelo fangoso, presentaron las mayores concentraciones de la mayoría de elementos trazas analizados en el sedimento marino superficial, entre los que destacan el As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn. Guzmán (1996) halló que los sedimentos superficiales arcillo limosos concentraban mayor cantidad de materia orgánica frente los otros tipos de suelo de los sedimentos superficiales marinos de la bahía del Callao. Asimismo, el Cd, Cu y Pb se presentaron en mayor concentración en las áreas de sedimentos finos y de mayor concentración de materia orgánica. Con relación a ambos estudios, los sedimentos fangosos de la bahía del Callao acumulan una mayor cantidad de elementos traza de origen externo frente los otros tipos de sedimento marino de la bahía.

En este estudio las medias de las concentraciones de As, Cu, Pb y Zn en el sedimento superficial fangoso (BC<sub>2</sub> y BC<sub>3</sub>) resultaron mucho mayores frente a las medias de As, Cu, Pb y Zn de los fangos superficiales extraídos de la bahía de Makirina, Adriático central (Komar *et al.*, 2013). De esta manera se evidencia una alta contaminación de estos cuatro elementos traza de los sedimentos superficiales de la bahía del Callao.

En comparación con las concentraciones de Cd, Cu y Pb del sedimento marino superficial de la bahía del Callao (Guzmán, 1996) el Cd en su mayoría mostró valores superiores en el presente estudio, frente a lo estimado en las zonas ocupadas por BC<sub>2</sub> y BC<sub>3</sub>. Otro estudio realizado en primavera del 2008 (Solís *et al.*, 2011) en dos estaciones ubicadas al este de la isla San Lorenzo, se halló concentraciones medias de Cd y Ni que resultaron mayores a las concentraciones más altas de Cd y Ni en primavera del presente estudio, en cambio la concentración más alta de Mn en primavera del presente estudio resultó mayor a las medias de Mn de ambas estaciones en 2008. Se estima que en el transcurso del tiempo el Cd se ha ido acumulando en los sedimentos de la bahía del Callao y que en zonas ubicadas al este de la isla San Lorenzo se depositan mayores concentraciones de Cd y Ni.

## DISCUSSION

The high concentrations of Cd, Pb, and Cu in the surface marine sediment of Callao Bay are suggested to be due to the discharges of Chillón and Rímac rivers, and industrial waste (Guzmán, 1996). In the basin of Río Chillón, the presence of Cd, Ca, Co, Cu, St, Fe, Mn, K, Pb, Ti, and Zn has been identified, and artisanal gold mining activities have been reported (Chui *et al.*, 2009; Loaiza and Galloso, 2010; GRC, 2011). In the Rímac River there is presence of Cd, Cu, Pb, and Zn (GRC, 2011).

In the same way, the BC<sub>3</sub> and BC<sub>2</sub> stations, which were characterized as having muddy soil, showed the highest concentrations of most of the analyzed trace elements in the surface marine sediment, among which As, Cd, Cu, Hg, Pb, and Zn stand out. Guzmán (1996) found that clayey-loamy surface sediments concentrated a greater amount of organic matter in comparison with other types of soil than the marine surface sediments of Callao Bay. Similarly, Cd, Cu, and Pb were recorded in greater concentrations in areas with fine sediments and greater organic matter concentrations. Regarding both studies, the muddy sediments of Callao Bay accumulate a larger amount of trace elements of external origin when compared to other marine sediment types in Callao Bay.

In this study, the means of the concentrations of As, Cu, Pb, and Zn in surface muddy sediment (BC<sub>2</sub> and BC<sub>3</sub>) turned out to be much higher in comparison with the means of As, Cu, Pb, and Zn of surface mud extracted from Makirina Bay, central Adriatic (Komar *et al.*, 2013). Thus, high pollution by these four trace elements is evidenced in the surface sediments of Callao Bay.

In comparison with the Cd, Cu, and Pb concentrations in the surface marine sediment of Callao Bay in 1996 (Guzmán, 1996), Cd mostly showed higher values in this study, in comparison with that estimated in the areas covered by BC<sub>2</sub> and BC<sub>3</sub>. In another study carried out in Spring 2008 (Solís *et al.*, 2011) in at two stations located east of San Lorenzo Island, medium concentrations of Cd and Ni were found which turned out to be higher than the highest Cd and Ni Spring concentrations of this study. On the other hand, the highest Spring Mn concentration of this study turned out to be higher than the Mn means of both stations in 2008. It is estimated that, over time, Cd has been accumulating in the sediments of Callao Bay, and that, in areas located east of San Lorenzo Island, higher concentrations of Cd and Ni are deposited.

Al comparar el Cd, Cu, Ni y Hg de los sedimentos marinos superficiales de bahía de Mejillones, de la bahía de San Jorge (Chile), y del área Shalateen (mar Rojo, Egipto) con estos elementos traza presentes en el sedimento superficial marino de la bahía del Callao resultaron el Cd y Cu menores, y el Pb y Zn fueron mayores (Guíñez *et al.*, 2005; Valdés *et al.*, 2011). Así mismo, las concentraciones de elementos trazas en sedimentos marinos superficiales del área Shalateen el Co y St resultaron menores y el Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn fueron mayores (Nour *et al.*, 2019).

Las muestras extraídas del sedimento fangoso (BC<sub>2</sub> y BC<sub>3</sub>) contienen las mayores concentraciones de la mayoría de elementos trazas en el sedimento. Estos resultados sugieren que el contenido del tamaño de grano del sedimento impacta significativamente en la distribución de los elementos trazas. Estos elementos trazas se encuentran principalmente en los sedimentos fangosos (limo y arcilla) que son fracciones de grano fino y debido a su mayor superficie absorben más elementos trazas (Gargouri *et al.*, 2018).

Dos atributos importantes definen la “salud ambiental” de los sedimentos en un ecosistema acuático (Birch *et al.*, 2020). Uno de los atributos es la “calidad de los sedimentos” que es la capacidad de los sedimentos para mantener una comunidad bentónica saludable y se mide mediante una evaluación de riesgos ecológicos (Luo *et al.*, 2010). En el presente estudio, el As, Cd, Cu, Hg y Pb ocasionalmente se asocian con riesgos ecológicos sobre organismos acuáticos benthicos marinos, salvo el As que en primavera se asoció a efectos tóxicos.

En el caso del Zn en otoño e invierno se asoció a riesgos ocasionales, y, en primavera, verano y su media anual estarían asociados a riesgos ecológicos sobre la estructura de las comunidades biológicas benthicas. Estos resultados sugieren que los GCSs pueden ser usados como muy buenos predictores de contaminación y con una significancia ecológica específica para cada elemento traza con variaciones estacionales (Birch *et al.*, 2020). Sin embargo, los GCSs no establecen las causas donde se presentan mezclas de elementos trazas (Luo *et al.*, 2010). Los GCSs deben usarse solo en una forma de “tamizaje” para uso a nivel mundial y como una herramienta de gestión para la detección, identificación y priorización de contaminantes como los elementos trazas.

Los sedimentos marinos deben evaluarse de una manera “integrada” en los que se analicen múltiples componentes (p. ej., hábitat, hidrodinámica, biota bentónica residente, toxicidad y química analítica) mediante el uso

By comparing the Cd, Cu, Ni, and Hg of the surface marine sediments of Mejillones Bay, San Jorge Bay (Chile), and the Shalateen area (Red Sea, Egypt) with those present in the surface marine sediment of Callao Bay, Cd and Cu were observed to be lower, and Pb and Zn were higher (Guíñez *et al.*, 2005; Valdés *et al.*, 2011). Similarly, in the trace elements concentrations in surface marine sediments of the Shalateen area Co and St were lower, and Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, and Zn were higher (Nour *et al.*, 2019).

The samples extracted from muddy sediments (BC<sub>2</sub> and BC<sub>3</sub>) contain the highest concentrations of most trace sediments. These results suggest that the sediment grain size significantly impacts the distribution of trace elements. These trace elements are mainly found in muddy sediments (loam and clay), which are fine-grain fractions and, due to their greater surface area, absorb more trace elements (Gargouri *et al.*, 2018).

Two important attributes define the “environmental health” of sediments in an aquatic ecosystem (Birch *et al.*, 2020). One of them is “sediment quality”, which is the sediments’ ability to maintain a healthy benthic community, and it is measured by means of an ecological risk assessment (Luo *et al.*, 2010). In this study, As, Cd, Cu, Hg, and Pb are occasionally associated with ecological risks to marine benthic organisms, except for As, which was associated with toxic effects in Spring.

In Autumn and Winter, Zn was associated with occasional risks, and, in Spring, Summer, and its annual mean, they could be associated with ecological risks to the structure of biological benthic communities. These results suggest that GCSs may be used as very good predictors of pollution and have a very specific ecological significance for each trace element, with seasonal variations (Birch *et al.*, 2020). However, GCSs do not establish the causes where mixtures of trace elements occur (Luo *et al.*, 2010). GCSs should be only employed in the form of “sieving” for use at a global level and as a management tool for the detection, identification, and prioritization of pollutants such as trace elements.

Marine sediments should be analyzed in an integrated and systemic way, in which multiple components are analyzed (*e.g.*, habitat, hydrodynamics, resident benthic biota, toxicity, and analytical chemistry) (Luo *et al.*, 2010). Birch *et al.* (2020) evaluated the ecological risk due to trace elements in ten ports and estuaries around the world using GCSs, and they found that the sediments of the River

de un enfoque sistémico (Luo *et al.*, 2010). Birch *et al.* (2020) evaluaron el riesgo ecológico por elementos trazas en 10 puertos y estuarios del mundo usando el GCSs y encontraron que los sedimentos del río Derwent (Australia) se clasificaron como de alto riesgo ecológico para biota bentónica, seguidos por los estuarios de Sydney (Australia) y Santander (España) con riesgo moderado, siendo el Zn, Cd y Pb, los elementos trazas de mayor importancia ecológica. En el caso del Zn en el presente estudio se observó que, en primavera, verano y en su media anual estarían asociados a riesgos ecológicos sobre las comunidades biológicas bénticas. Se ha observado a concentraciones que se encuentran habitualmente en los sedimentos costeros que en el poliqueto bentónico *Alitta virens*, la supervivencia se redujo a medida que aumentó la concentración de Zn, pero el crecimiento no fue significativamente diferente en exposición crónica en nueve meses de evaluación. De igual forma se vieron cambios significativos en el comportamiento alimentario y en el aumento en la concentración de proteínas similares a la metalotioneína a niveles medios y altos de Zn (Watson *et al.*, 2021).

El segundo atributo de la salud ambiental de los sedimentos que son extremadamente complejos, el “enriquecimiento” antropogénico es la magnitud del cambio inducido por el hombre en el medio acuático marino y mide la salida del sistema de su estado original (Birch *et al.*, 2020). El enriquecimiento no implica efecto ecológico ni toxicidad. Los índices de enriquecimiento se pueden utilizar para estimar eficazmente el grado de contaminación por elementos trazas y permiten distinguir las posibles fuentes de elementos trazas (Zhu *et al.*, 2020). Estos dos atributos de la salud ambiental se basan en diferentes metodologías y criterios, requieren diferentes tipos de datos y no tienen ninguna relación entre sí.

La media anual de las concentraciones de As, Cd, y Pb en el sedimento marino superficial de la bahía del Callao fue catalogada en base a cuatro índices de “enriquecimiento” antropogénico como  ${}_mCd$ ,  $RI$ ,  $PI_{Avg}$  y  $PI_{nemerow}$  como altamente contaminado, y se observó durante la primavera una mayor contaminación. Estos sedimentos se ven gravemente afectados por diversas actividades antrópicas cercanas a la bahía del Callao como industrias de fundición de elementos trazas (fuente de As y Pb), actividades agropecuarias (fuente de Pb), actividades portuarias marinas (fuente de Cd y Pb), minería que es transportada por los ríos cercanos (fuente de As y Pb), reservorios de petróleo (fuente de As y Pb), industrias de pinturas y cerámicas (fuente de Cd y Pb) deposición atmosférica (fuente de Cd y Pb), crecimiento poblacional,

Derwent (Australia) were classified as constituting a high ecological risk for benthic biota, followed by the estuaries of Sydney (Australia) and Santander (Spain), with moderate risk, with Zn, Cs, and Pb being the trace elements of greatest ecological importance. In the case of Zn, this study showed that, in Spring, Summer, and its annual mean could be associated with ecological risks to biological benthic communities. It has been observed at concentration usually found in coastal sediments that the benthic polychaete *Alitta virens* survival decreased as the Zn concentration increased. Similarly, significant changes were observed in feeding behavior and the increase in the concentration of proteins similar to metallothionein at medium and high Zn levels (Watson *et al.*, 2021).

Another environmental health attribute of extremely complex sediments, anthropogenic “enrichment”, is the magnitude of the changes induced by humans in the marine aquatic medium, and it measures the output of the system in its original state (Birch *et al.*, 2020). Enrichment does not imply any ecological effects or toxicity. Enrichment indices may be used to effectively estimate the level of pollution by trace elements, and they allow distinguishing the possible sources of trace elements (Zhu *et al.*, 2020). These two environmental health attributes are based on different methodologies and criteria, require different types of data, and have no relationship with each other.

The annual means of the As, Cd, and Pb concentrations in the surface marine sediment of Callao Bay was catalogued as highly contaminated based on four anthropogenic “enrichment” indices such as  ${}_mCd$ ,  $RI$ ,  $PI_{Avg}$  and  $PI_{nemerow}$ , and greater pollution was observed during Spring. These sediments are severely affected by diverse anthropic activities near Callao Bay, such as trace elements smelting industries (sources of As and Pb), agricultural activities (source of Pb), marine port activities (source of Cd and Pb), mining transported by nearby rivers (source of Cd and Pb), petroleum reservoirs (source of As and Pb), paint and ceramics industries (source of Cd and Pb), atmospheric deposition (source of Cd and Pb), population growth, urban expansion, and solid waste dumps (source of Pb), which could be potential sources of trace elements (Zhu *et al.*, 2020). The hydrodynamic conditions of Callao Bay, the activities performed on land, and especially seasonal variations exert an influence on trace elements in marine sediments (Worakhunpiset, 2018). Therefore, it is essential to continue monitoring pollution by trace elements in emerging countries such as Peru, with developing economies and high

expansión urbana y vertederos de residuos sólidos (fuente de Pb), que podrían ser fuentes potenciales de elementos trazas (Zhu *et al.*, 2020). Las condiciones hidrodinámicas de la bahía del Callao, las actividades realizadas en tierra y especialmente las variaciones estacionales, influyen en la distribución de los elementos trazas en el sedimento marino (Worakhunpiset, 2018). Por lo tanto, es fundamental continuar monitoreando la contaminación por elementos trazas en países emergentes como el Perú, con economías en desarrollo y altas tasas demográficas, debido a que las presiones antropogénicas podrían afectar el estado de salud de los sedimentos de estos ecosistemas marinos (Truchet *et al.*, 2021).

## CONCLUSIONES

Las concentraciones medias anuales y medias de las temporadas evaluadas (otoño, invierno, primavera y verano) de As, Cd, Cu, Hg y Pb, excedieron los valores establecidos en los ECA canadiense y australiano-neozelandés. Además, el As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn podrían estar asociados a efectos tóxicos sobre la biota del sedimento marino superficial. Asimismo, las muestras extraídas de suelo fangoso (BC<sub>2</sub> y BC<sub>3</sub>) contienen las mayores concentraciones de la mayoría de elementos trazas en el sedimento; donde As, Cd, Cu, Hg, Ag, Pb y Zn exceden los valores máximos permitidos en ambos ECA analizados.

As, Cd y Pb fueron los elementos más enriquecidos y a su vez más contaminantes del sedimento marino superficial de la bahía del Callao. Además, según la media anual de las concentraciones de los elementos trazas analizados, este sedimento se encuentra altamente contaminado ( ${}_mCd = 4,12$ ,  $RI = 1393,77$ ,  $PI_{Avg} = 2,31$ ,  $PI_{nemerow} = 6,05$ ) y durante la primavera se observa la mayor contaminación ( ${}_mCd = 5,44$ ,  $RI = 1793,94$ ,  $PI_{Avg} = 3,14$ ,  $PI_{nemerow} = 9,03$ ).

## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue auspiciado por el Programa Nacional de Innovación para la competitividad y Productividad (Innovate Perú), bajo el contrato 376-PNICP-PIAP-2014.

demographic rates, given that anthropogenic pressures could affect the health of these marine ecosystems' sediments (Truchet *et al.*, 2021).

## CONCLUSIONS

The mean annual concentrations and those of the evaluated seasons (Autumn, Winter, Spring, and Summer) regarding As, Cd, Cu, Hg, and Pb exceeded the values established in the Canadian and Australian-New Zealander ECAs. Moreover, As, Cd, Cu, Hg, Pb, and Zn could be associated with toxic effects on the biota of surface marine sediments. In the same way, the samples extracted from muddy soil (BC<sub>2</sub> and BC<sub>3</sub>) contain the highest concentrations for most trace elements in the sediment, where As, Cd, Cu, Hg, Ag, Pb, and Zn exceed the maximum allowed values of both analyzed ECAs.

As, Cd, and Pb were the most enriched elements, as well as the most polluting, in the surface marine sediments of Callao Bay. Furthermore, according to the annual means of the concentrations of the analyzed trace elements, this sediment is highly polluted ( ${}_mCd = 4.12$ ,  $RI = 1393.77$ ,  $PI_{Avg} = 2.31$ ,  $PI_{nemerow} = 6.05$ ), and, during spring, the highest pollution level is observed ( ${}_mCd = 5.44$ ,  $RI = 1793.94$ ,  $PI_{Avg} = 3.14$ ,  $PI_{nemerow} = 9.03$ ).

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was sponsored by the National Innovation Program for Competitiveness and Productivity (Innovate Peru), under contract 376-PNICP-PIAP-2014.





## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Abraham, G.M.S. and R.J. Parker. 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environ. Monit. Assess.*, 136: 227–238. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>
- ANZECC–ARMCANZ (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand). 2000. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1, The guidelines. ANZECC/ARMCANZ, Cap. 7 p.
- APHA, AWWA, WEF. 2018. Standard methods for examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington. 1360 p.
- Bhattacharya, A., J. Routh, G. Jacks, P. Bhattacharya and M. Mörth. 2006. Environmental assessment of abandoned mine tailings in Adak, Västerbotten District (Northern Sweden). *Appl. Geochem.*, 21: 1760–1780. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.06.011>
- Birch, G. F., J.H. Lee, E. Tanner, J. Fortune, N. Munksgaard, J. Whitehead, C. Coughanowr, J. Agius, J. Chrispijn, U. Taylor, F. Wells, J. Bellas, V. Besada, L. Viñas, A. Soares-Gomes, R.C. Cordeiro, W. Machado, R.E. Santelli, M. Vaughan, M. Cameron, P. Brooks, T. Crowe, M. Ponti, L. Airoidi, R. Guerra, A. Puente, A.G. Gómez, G.J. Zhou, K.M.Y. Leung and P. Steinberg. 2020. Sediment metal enrichment and ecological risk assessment of ten ports and estuaries in the World Harbours Project. *Mar. Pollut. Bull.*, 155: 111129. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111129>
- Braga-Castro, I., J. Iannacone, S. Santos and G. Fillmann. 2018. TBT is still a matter of concern in Peru. *Chemosphere*, 205: 253-259. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.097>
- Caeiro, S., M.H. Costa, T.B. Ramos, F. Fernandes, N. Silveira, A. Coimbra, G. Medeiros and M. Painho. 2005. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach. *Ecol. Ind.*, 5: 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.02.001>
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 2011. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, MB, Canada.
- Chen, H., Z. Chen, X. Ou and J. Chen. 2020. Calculation of toxicity coefficient of potential ecological risk assessment of rare earth elements. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 104: 582–587. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02840-x>
- Cheng, J.L., Z. Shi and Z.Y. Wei. 2007. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China. *J. Environ. Sci.*, 19: 50–54. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(07\)60008-4](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(07)60008-4)
- Chui, H.B., B.T. Miramira, P.L. Olivera y J.H. Jacay. 2009. Determinación de elementos potencialmente tóxicos en sedimentos del río Chillón mediante la técnica de fluorescencia de rayos X. *Rev. Per. Quím. Ing. Quím.*, 12: 9-14.
- Correa, D., J. Tam, J. Pasapera, M. Saavedra y A. Ingunza. 2008. Modelado de la circulación marina y descargas hipotéticas en la bahía del Callao, Perú. *Inf. Inst. Mar Perú*, 35: 181–192.
- Diop, C., D. Dewaelé, F. Cazier, A. Diouf and B. Ouddane. 2015. Assessment of trace metals contamination level, bioavailability and toxicity in sediments from Dakar coast and Saint Louis estuary in Senegal, West Africa. *Chemosphere*, 138: 980–987. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.041>
- Enrique-Romero, S., A. Guabloche, E. Tuesta, J. Iannacone and I. Braga-Castro. 2019. Imposex responses in *Thaisella chocolata* and *Xanthochorus buxeus* from Callao harbor, Peru. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 26: 100510. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100510>
- Gargouri, D., M. Gzam, A. Kharroubi and Y. Jedoui. 2018. Use of sediment quality indicators for heavy metals contamination and ecological risk assessment in urbanized coastal zones. *Environ. Earth Sci.*, 77: 381. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7567-3>
- Gilbert de Brito, J., I.E. Arrieche-Luna, M. León-Rodríguez e I. López de Rojas. 2015. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencia. *Inst. Nal. Invest. Agríc., Yaracuy*. 215 p.
- GRC (Gobierno Regional del Callao). 2011. Plan de desarrollo concertado 2011-2021. Gobierno Regional del Callao. Callao. 189 p.
- GRC (Gobierno Regional del Callao). 2013. Estudio oceanográfico de la bahía del Callao–Ventanilla y zonas de influencia–2013. Gobierno Regional del Callao. 297 p.
- Guíñez, M., J. Valdés y A. Castillo. 2015. Contenido de metales en sedimentos y en *Emerita analoga* (Stimpson, 1857), en bahía Mejillones del Sur, Chile. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 43: 94–106. <https://doi.org/10.3856/vol43-issue1-fulltext-9>
- Guzmán, M. 1996. Trazas de metales en sedimentos superficiales de la bahía del Callao-Ventanilla durante 1994. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú*, 37, 3-20.
- Hasan, A. B., S. Kabir, A.H.M. Selim-Reza, M. Nazim-Zaman, A. Ahsan and M. Rashid. 2013. Enrichment factor and geo-accumulation index of trace metals in sediments of the ship breaking area of Sitakund Upazilla (Bhatiary-Kumira), Chittagong, Bangladesh. *J. Geochem. Explor.*, 125: 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.12.002>
- Herrera, V., C. Carrasco, P. Araneda, V. Varas and C. Rojo. 2019. Ecological potential risk by arsenic in the Loas's river mouth, north of Chile. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 35: 609–622. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.03.08>
- Karadede, A.H. and E. Ünlü. 2007. Heavy metal concentrations in water, sediment, fish and some benthic organisms from Tigris River, Turkey. *Environ. Monit. Assess.*, 131: 323–337. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9478-0>

- Komar, D., B. Lambaša, T. Dolenc, M. Dolenc, P. Vrhovnik and N. Rogan-Šmuc. 2013. Potentially toxic elements content in the surficial marine sediment (peloid) from Makirina bay (central Adriatic). *E3S Web Conf.*, 1: 1–4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130116006>
- Kükreer, S., A.E. Erginal, Ş. Kılıç, B. Özender, T. Akarsu and E. Öztura. 2020. Ecological risk assessment of surface sediments of Çardak Lagoon along a human disturbance gradient. *Environ. Monit. Assess.*, 192: 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08336-9>
- Loaiza, E. y A. Galloso. 2010. Actividad minera artesanal en la cuenca del río Chillón (Minería de Yangas–Canta) Región Lima. *Bol. Inst. Geol. Min. Metal.*, Ser. E, 9: 1–48.
- Luo, W., Y. Lu, T. Wang, W. Hu, W. Jiao, J.E. Naile, J.S. Khim and J.P. Giesy. 2010. Ecological risk assessment of arsenic and metals in sediments of coastal areas of northern Bohai and Yellow Seas, China. *Ambio*, 39: 367–375. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0077-5>
- Marín, A., V.H. Gonzales, B. Lapo, E. Molina y M. Lemus. 2016. Niveles de mercurio en sedimentos de la zona costera de El Oro, Ecuador. *Gayana*, 80: 147–153. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382016000200147>
- Nkansah, M.A., G. Darko, M. Dodd, F. Opoku, B.T. Essuman, J. Antwi-Boasiako and J.B. Kowalska. 2017. Assessment of pollution levels, potential ecological risk and human health risk of heavy metals/metalloids in dust around fuel filling stations from the Kumasi Metropolis, Ghana. *Cogent Environ. Sci.*, 3: 1–19. <https://doi.org/10.1080/23311843.2017.1412153>
- Nour, H.E., A.S. El-Sorogy, M. Abd El-Wahab, E.S. Nouh, M. Mohamaden and K. Al-Kahtany. 2019. Contamination and ecological risk assessment of heavy metals pollution from the Shalateen coastal sediments, Red Sea, Egypt. *Mar. Pollut. Bull.*, 144: 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.056>
- Olatunde, P., L. Philipps, A. Juliano and T. Imhansoeleva. 2015. Geochemical and statistical approach to assessing trace metal accumulations in Lagos Lagoon sediments, southwestern, Nigeria. *J. Geogr. Environ Earth. Sci. Int.*, 3: 1–16. <https://doi.org/10.9734/JGEESI/2015/20333>
- Qingjie, G., D. Jun, X. Yunchuan, W. Qingfei and Y. Liqiang. 2008. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *J. China Univ. Geosci.*, 19: 230–241. [https://doi.org/10.1016/S1002-0705\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0705(08)60042-4)
- Sáez, G., J. Chero, C. Cruces, D. Minaya, C. Rodríguez, B. Suyo, S. Romero, A. Guabloche, E. Tuesta, L. Alvariano and J. Iannacone. 2018. Hematological parameters and blood biochemical in ten species of marine fish captured by artisanal fishery in Callao Bay, Peru. *Rev. Inv. Vet. Perú*, 29: 1161–1177. <https://doi.org/10.15381/rivep.v29i4.15204>
- Sakan, S. M., D.S. Dordević, D.D. Manojlović and P.S. Predrag. 2009. Assessment of heavy metal pollutant accumulation in the Tisza River sediments. *J. Environ. Manag.*, 90: 3382–3390. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.05.013>
- Shirani, M., K.N. Afzali, S. Jahan, V. Strezov and M. Soleimani-Sardo. 2020. Pollution and contamination assessment of heavy metals in the sediments of Jazmurian in southeast Iran. *Sci. Rep.*, 10: 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61838-x>
- Solis, J., E. Fernández, F. Velazco y W. Carhuapoma. 2011. Características geoquímicas de sedimentos del perfil Callao. *Bol. Inst. Mar Perú*, 26: 25–31.
- Suárez-Alemán, A., T. Serebrisky y O. Ponce De León. 2019. Competitividad portuaria en América Latina y el Caribe, Un análisis de la regulación, gobernanza, y competencia en el sector portuario de la región. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D.C. 44 p.
- Truchet, D.M., N.S. Buzzi, C.L. Negro, M.C. Mora and J.E. Marcovecchio. 2021. Integrative assessment of the ecological risk of heavy metals in a South American estuary under human pressures. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 208: 111498. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111498>
- Valdés, J., D. Román, L. Rivera, J. Ávila and P. Cortés. 2011. Metal contents in coastal waters of San Jorge Bay, Antofagasta, northern Chile: A base line for establishing seawater quality guidelines. *Environ. Monit. Assess.*, 183: 231–242. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1917-x>
- Velaochaga, G., C. Paulino, H. Xu y E. Alburqueque. 2018. Monitoreo de las aguas residuales vertidas en la bahía del Callao utilizando imágenes Landsat (1985–2015). *Bol. Inst. Mar Perú*, 33: 5–12.
- Velazco, F. 2011. Sedimentos marinos superficiales en la bahía del Callao, Perú. 1997. *Bol. Inst. Mar. Perú*, 26: 75–82.
- Wang, N., A. Wang, L. Kong and M. He. 2018. Calculation and application of Sb toxicity coefficient for potential ecological risk assessment. *Sci. Total Environ.*, 610–611: 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.268>
- Watson, J.G., J.M. Pinia, J. Richir and L.A. Michie. 2021. Detecting the effects of chronic metal exposure on benthic systems: Importance of biomarker and endpoint selection. *Aquat. Toxicol.*, 230: 105674. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105674>
- Worakhunpiset, S. 2018. Trace elements in marine sediment and organisms in the Gulf of Thailand. *Int J Environ. Res. Public Health.*, 15: 810. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040810>
- Zhu, A., J. Liu, S. Qiao and H. Zhang. 2020. Distribution and assessment of heavy metals in surface sediments from the Bohai Sea of China. *Mar. Pollut. Bull.*, 153: 110901. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110901>