



INFORME FINAL

EVALUACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DEL CONTENIDO DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DE LA BAHÍA DE QUINTERO-PUCHUNCAVÍ

LICITACIÓN ID: 608897-85-LE20

Resolución Exenta N° 845/2020

Ministerio de Medio Ambiente

ABRIL 2021



EQUIPO DE TRABAJO

| | | |
|-----------------------------|---------------------|--|
| Marco Salamanca O. | Jefe de Proyecto | <i>Coordinación general Elaboración de informes</i> |
| Cristian Chandía V. | Investigador | <i>Coordinador Análisis de Datos Elaboración de informes</i> |
| Luis Bermedo C. | Investigador | <i>Análisis de Datos Geocronología y metales</i> |
| Marco Hidalgo G. | Investigador | <i>Análisis de datos Geocronología y metales</i> |
| Aldo Hernández R. | Investigador | <i>Análisis Estadístico Elaboración de informes</i> |
| Claudia Figueroa SM. | Profesional experto | <i>Gestión Administrativa del proyecto</i> |
| Gabriela Franyola V. | Profesional experto | <i>Coordinación del análisis</i> |
| Leonardo Rosenberg | Profesional experto | <i>Coordinación del muestreo</i> |
| Carlos Leal | Profesional experto | <i>Análisis Estadístico Edición de informes</i> |

TABLA DE CONTENIDO

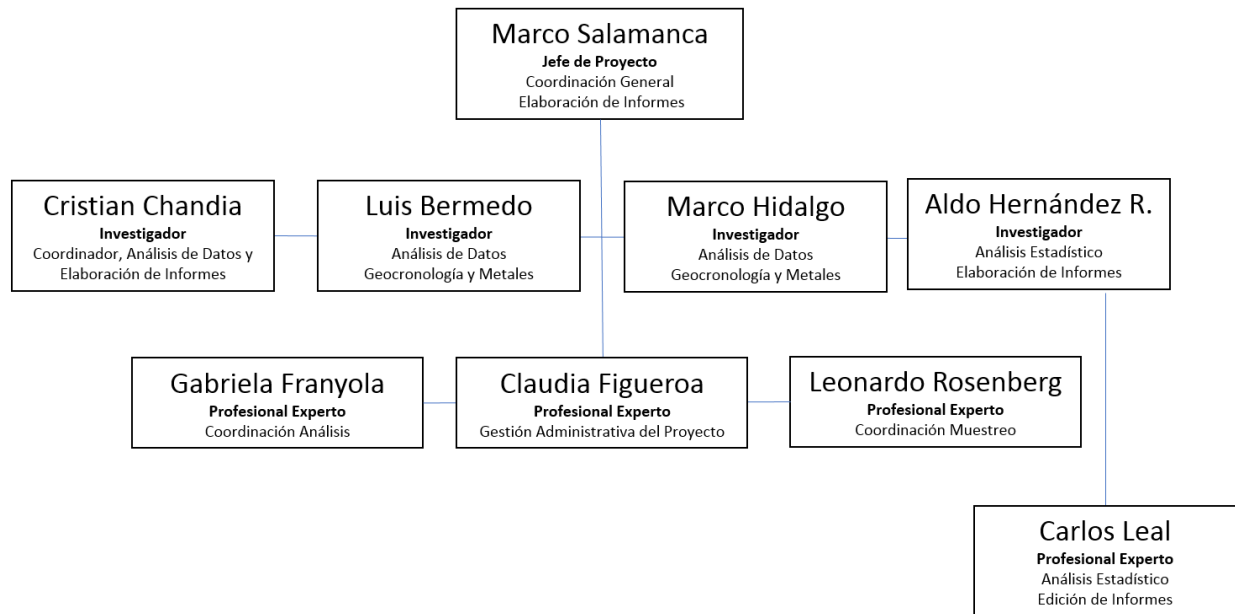
| | |
|---|----|
| 1.- CONSIDERACIONES GENERALES..... | 6 |
| 2. OBJETIVOS | 9 |
| 2.1.- OBJETIVO GENERAL..... | 9 |
| 2.1.1.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 9 |
| 3.- METODOLOGÍA | 10 |
| 3.1.- MUESTREO | 10 |
| 3.2.- PRE-TRATAMIENTO DE MUESTRAS SUPERFICIALES | 12 |
| 3.3.- PRE-TRATAMIENTO DE LOS TESTIGOS | 12 |
| 3.4.- ANÁLISIS DE MUESTRAS | 13 |
| 3.4.1.- METALES TOTALES..... | 13 |
| 3.4.2.- METALES EXTRAÍBLES | 13 |
| 3.4.3.- PORCENTAJE DE HUMEDAD Y DENSIDAD APARENTE | 14 |
| 3.4.4.- MATERIA ORGÁNICA TOTAL (MOT) | 14 |
| 3.4.5.- GRANULOMETRÍA | 15 |
| 3.4.6.- PH Y POTENCIAL RÉDOX (EH) | 15 |
| 3.4.7.- ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD | 15 |
| 3.5.- GEOCROLOGÍA DE LOS TESTIGOS DE SEDIMENTOS | 16 |
| 3.5.1.- DIGESTIÓN Y ANÁLISIS DE ²¹⁰ Pb | 17 |
| 3.5.2.- DETERMINACIÓN DE ²²⁶ Ra..... | 18 |
| 3.6.- INDICADORES DE CALIDAD Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS | 18 |
| 3.6.1.- FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO (FE) | 19 |
| 3.6.2.- ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN (IGEO)..... | 19 |
| 3.6.3.- ÍNDICE DE CARGA CONTAMINANTE (PLI)..... | 20 |
| 3.6.4.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO..... | 21 |
| 3.7.-RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DESDE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS..... | 22 |
| 3.7.1.- CONTRASTE DE NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL Y CRITERIOS DE CALIDAD | 22 |
| 3.7.2.- INDICADORES DE RIESGO ECOLÓGICO | 23 |
| 4.- RESULTADOS..... | 24 |
| 4.1.- OE1. “DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE AL MENOS LOS SIGUIENTES METALES PESADOS Y METALOIDES EN LOS SEDIMENTOS DE LA BAHÍA DE QUINTERO-PUCHUNCAVÍ: ARSÉNICO, CADMIO, COBRE, CROMO, PLOMO, MERCURIO Y NÍQUEL” | 24 |
| 4.1.1.-DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL | 24 |
| 4.1.1.1- PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS | 24 |
| 4.1.1.2- METALES Y METALOIDES | 25 |
| 4.1.2.- DISTRIBUCIÓN VERTICAL | 29 |
| 4.1.2.1.- PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS | 31 |
| 4.1.2.2.- METALES Y METALOIDES | 31 |
| 4.2.- OE2. “ESTABLECER LA GEOCROLOGÍA DE LOS SEDIMENTOS DE LA BAHÍA DE QUINTERO-PUCHUNCAVÍ | 35 |
| 4.2.1.- DISTRIBUCIÓN DE ²¹⁰ Pb Y ²²⁶ Ra | 35 |
| 4.2.2.- GEOCROLOGÍA DE LOS TESTIGOS DE SEDIMENTOS | 36 |
| 4.2.3.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA INDUSTRIALIZACIÓN DE BAHÍA QUINTERO-PUCHUNCAVÍ.. | 40 |



| | |
|--|----|
| 4.3.- OE3. “ANALIZAR SI LAS CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS EN LA BAHÍA DE QUINTERO HAN AUMENTADO SOBRE LOS VALORES LOCALES PREINDUSTRIALES” | 43 |
| 4.3.1.- ÍNDICES DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES | 43 |
| 4.3.1.1.- ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN | 43 |
| 4.3.1.2.- ÍNDICE DE CARGA DE CONTAMINANTES..... | 44 |
| 4.3.2.- ÍNDICES TESTIGOS DE SEDIMENTOS..... | 45 |
| 4.3.2.1.- FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO | 45 |
| 4.3.2.2.- ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN | 48 |
| 4.3.2.3.- ÍNDICE DE CARGA DE CONTAMINANTES..... | 50 |
| 4.3.3.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES | 52 |
| 4.3.4.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE TESTIGOS/TESTIGO..... | 55 |
| 4.3.4.1.- CONTRASTE ENTRE TESTIGO..... | 55 |
| 4.3.4.2.- ANÁLISIS INDEPENDIENTES POR TESTIGO | 58 |
| 4.4.- OE4. “ANALIZAR LA CALIDAD AMBIENTAL DE LOS SEDIMENTOS DE LA BAHÍA DE QUINTERO EN FUNCIÓN DE INDICADORES, ESTÁNDARES Y NORMATIVA AMBIENTAL ASOCIADA A RIESGO ECOLÓGICO” | 67 |
| 4.4.1.- COMPARACIÓN CON GUÍAS DE CALIDAD DE SEDIMENTOS INTERNACIONALES | 67 |
| 4.4.2.- COMPARACIÓN CON REFERENCIAS PARA SEDIMENTOS SUPERFICIALES Y TESTIGOS | 70 |
| 4.4.3.- INDICADORES DE RIESGO ECOLÓGICO..... | 74 |
| 5.- DISCUSIÓN | 78 |
| 6.- CONCLUSIÓN | 84 |
| 7.- REFERENCIAS..... | 85 |
| 8.- ANEXOS | 94 |

Organigrama del equipo de trabajo y funciones

A continuación, se presenta el organigrama general de trabajo, incorporando las principales funciones a desarrollar por cada investigador y profesional experto.



1.- CONSIDERACIONES GENERALES

Chile presenta un extenso territorio marítimo donde más del 60% de la población se encuentra en ciudades costeras próximas a bahías, las que son áreas protegidas naturales, lo que genera las condiciones apropiadas para el aumento poblacional y desarrollo industrial (Aguirre- Martínez *et al.*, 2009; Chandía & Salamanca, 2012).

La protección que ofrecen las bahías ha significado el desarrollo de múltiples actividades industriales, las que tienen su base en el uso directo del borde costero y el mar adyacente (Sigg *et al.*, 1987, Singh *et al.*, 1999), lo que ha llevado a convertirlas en zonas altamente industrializadas con influencia directa de una diversa gama de actividades económicas i.e., producción de energía, pesquera, portuaria, turismo y urbanas (Calderón & Valdés, 2012). Si bien estas actividades están pensadas para el beneficio humano, los residuos y desechos de estas generalmente, contienen una gran diversidad de sustancias que ingresan a la zona costera (Andrade & Gutiérrez, 2003).

Dentro de estos desechos se encuentran los metales pesados, los cuales constituyen un grupo de elementos cuya abundancia en el ambiente marino ha sido muy estudiada, debido a su alta toxicidad y persistencia, entre los cuales destacan el Hg (Mercurio), Cd (Cadmio) y Pb (Plomo) (Chester & Murphy, 1990; Giordano *et al.*, 1992; Rizzo *et al.*, 2010).

Los metales tienen dos tipos de origen, a saber: i) fuentes naturales, como lo son los procesos de lixiviado de rocas y suelos de la corteza terrestre, aportes puntuales de posibles vetas de minerales expuestas, incendios de materia vegetal, aportes por emisiones volcánicas y; ii) origen antropogénico, como resultado de la actividad de la minería, agricultura, procesos industriales y descargas de residuos municipales, actividades todas que aportan metales pesados a los ecosistemas costeros (Rizzo *et al.*, 2010; Tulonen *et al.*, 2006). Las principales vías de ingreso a estos ecosistemas son los aportes de aguas continentales y de la atmósfera, siendo este último aporte el que origina la mayor preocupación dada la alta distribución que pueden alcanzar, pudiendo incluso ser transportadas a zonas muy lejanas de su origen (Paez-Osuma, 1996; Takeda *et al.*, 2000). Por lo tanto, en un cuerpo de agua costero se van a mezclar tanto los aportes locales (naturales y antropogénicos) como aquellos de origen difuso no local (naturales y antropogénicos), los que finalmente pueden quedar registrados en los sedimentos de este ambiente costero y que representan los aportes de sustancias y/o elementos que están

disponibles ambientalmente. Debido a esta mezcla de fuentes difusas, el modelado y la identificación de estas en los sistemas acuáticos marinos es compleja y requiere de modelos y estudios detallados (Novotny, 1995).

Las características de los metales pesados le confieren una elevada capacidad para ligarse/unirse al material particulado que se encuentra suspendido, favoreciendo la incorporación a los sedimentos marino-costeros por depositación (Groot et al., 1976; Brzezinska *et al.*, 1984). Esta condición permite que los sedimentos registren los cambios en el tiempo que ocurren en los aportes de metales columna de agua y permiten, a través del estudio de ellos en la columna de sedimentos, conocer su distribución vertical y los cambios ocurridos en estos ecosistemas (Azevedo, 1988; Pineda, 2009).

Los sedimentos se comportan como colectores naturales que registran los cambios ambientales y los impactos antropogénicos producidos en el tiempo, proporcionando un registro cronológico de los aportes de metales en un área en particular (Corcoran, 2013; Salamanca & Camaño, 1994). Para evaluar los aportes de metales que ocurren en el tiempo en los sistemas costeros, se utilizan trazadores radiogeoquímicos asociados al material sedimentario que proporcionan la escala temporal de estos aportes (Appleby & Oldfield, 1978; Robbins & Edgington, 1975). En este contexto, los trazadores radioactivos naturales, particularmente los de la serie del ^{238}U son útiles, ya que se conoce con exactitud sus modos de producción y decaimiento. Estos radioisótopos se evalúan en los sedimentos a través de sus actividades y vidas medias lo que permite realizar la estimación de la edad de los sedimentos analizados (Azevedo, 1988; Pineda, 2009).

Uno de los radionúclidos utilizados para obtener un registro geocronológico en los sedimentos de escala reciente, es el radioisótopo natural ^{210}Pb de la serie del ^{238}U . (Appleby & Oldfield, 1978; Krishnaswami & Lal, 1978), que tiene una vida media de 22,26 años, lo que permite conocer la edad de sedimentos en una escala temporal de aproximadamente 100 a 150 años, lo cual requiere conocer adicionalmente el contenido de ^{226}Ra que es quien lo produce por decaimiento radioactivo (Krishnaswami & Lal, 1978; Luque Marín, 2003).

La Bahía de Quintero-Puchuncaví ($32^{\circ}46'S$, $71^{\circ}33'W$) se ubica en la provincia de Valparaíso en la zona costera del Pacífico de Chile central. Esta bahía limita por el norte con Punta Ventanas y por el sur con Punta Lile. Se trata de una ensenada poco profunda, de unas 3 millas náuticas de

largo y 1,5 millas náuticas de ancho, con una profundidad máxima registrada de 55-60 m en su boca. La bahía tiene una forma de herradura abierta hacia el noroeste, lo que ofrece poca protección contra los eventos climáticos. (Parra *et al.*, 2015). La extensión de la zona costera de la bahía de Quintero-Puchuncaví presenta múltiples usos y actividades, que van desde caletas de pescadores artesanales con Áreas de Manejo de Extracción de Recursos Bentónicos (AMERB) e industrias de diversa índole, tales como, termoeléctricas, refinerías y generación de productos químicos, regasificadoras, pesqueras y descargas líquidas. Todas estas industrias podrían ser una importante fuente potencial de descarga de metales traza a este ecosistema marino y en particular las industrias de fundición de cobre y energía termoeléctrica que se encuentran dispuestas en el sector norte de la bahía, zona que concentra la generación de residuos al interior de la bahía (CEA, 2020).

Este contexto resulta relevante conocer el rol que pueden jugar los sedimentos costeros de la bahía de Quintero-Puchuncaví para registrar los aportes de diferentes metales y/o metaloides de interés que pueden estar llegando a la bahía desde las diferentes fuentes potenciales, sean estos de origen natural y/o antropogénicos, ya que los sedimentos pueden estar actuando como colectores y reservorios de ellos, de tal forma que la distribución vertical de los diferentes elementos presentes, permita evaluar la variación en el tiempo (*i.e.*, historia) de los aportes, o desde cuando un elemento en particular ha estado presente en la bahía, o bien estimar un valor de referencia natural para los metales o el nivel pre-industrial (“background”) de estos. Esto se puede lograr complementando la edad de los diferentes estratos y la distribución vertical del contenido de metales y/o metaloides en los sedimentos.

2. Objetivos

2.1.- Objetivo general

Realizar una caracterización físico-química, en profundidad, de los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví para estimar la concentración basal (calidad natural), determinar las variaciones temporales y comprender la influencia de la actividad industrial sobre la concentración de metaloides y metales pesados en los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví.

2.1.1.- Objetivos específicos

OE1) Determinar la distribución vertical de al menos los siguientes metales pesados y metaloides en los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví: Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Plomo, Mercurio y Níquel.

OE2) Establecer la Geocronología de los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví.

OE3) Analizar si las concentraciones de metales pesados en los sedimentos en la bahía de Quintero han aumentado sobre los valores locales preindustriales mediante el uso de indicadores, factores o técnicas estadísticas.

OE4) Analizar la calidad ambiental de los sedimentos de la bahía de Quintero en función de indicadores, estándares y normativa ambiental asociada a riesgo ecológico.

3.- METODOLOGÍA

3.1.- Muestreo

Para cumplir con los objetivos, del presente estudio entre el 27 y 29 de noviembre de 2020 se realizó un muestreo consistente en la obtención de 3 testigos de la columna de sedimento y de 12 muestras superficiales (Figura 1 y Tabla 1) en la bahía de Quintero-Puchuncaví por personal de terreno del Laboratorio de Oceanografía Química (LOQ) de la Universidad de Concepción (UDEC), material que se utilizó para establecer la distribución vertical y espacial del Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y Níquel (Ni) de la bahía de Quintero-Puchuncaví. Para esto se contó con el apoyo de una embarcación menor, desde la cual los 3 testigos de sedimento fueron obtenidos mediante buceo SCUBA desde el área central y zona norte y sur de la bahía de Quintero-Puchuncaví utilizando testigos de Plexiglás de 100 cm de longitud y 8 cm de diámetro, después de intentar la obtención de los testigos con un saca-testigo de gravedad (“Gravity Core”), lo cual no funcionó debido a la compactación de los sedimentos de la bahía.

Los testigos se mantuvieron verticalmente en todo momento, evitando perturbarlos, siendo preservados en frío y oscuridad durante su traslado hasta el LOQ-UDEC. Para las muestras superficiales, se utilizó la misma embarcación menor, utilizando una draga Van Veen cubierta con pintura epóxica de 0,1 m² de mordida. Desde cada draga se obtuvo una submuestra con un testigo de plexiglás de 7 cm de diámetro y 15 cm de alto, procurando recolectar los primeros 3 a 5 centímetros del sedimento. Adicionalmente, a todas las muestras superficiales se les realizó mediciones *ex situ* de pH y Potencial Rédox con un Peachímetro HI 9126 pH/ORP Meter. Una vez obtenidas las muestras, estas fueron guardadas en bolsas Whirl Pack® selladas, las que se abrieron al momento de introducir el sedimento procediendo a su identificación registrando, fecha y hora del muestreo. Las muestras de sedimento superficial se mantuvieron en frío y oscuridad durante su traslado al LOQ-UDEC en la ciudad de Concepción.

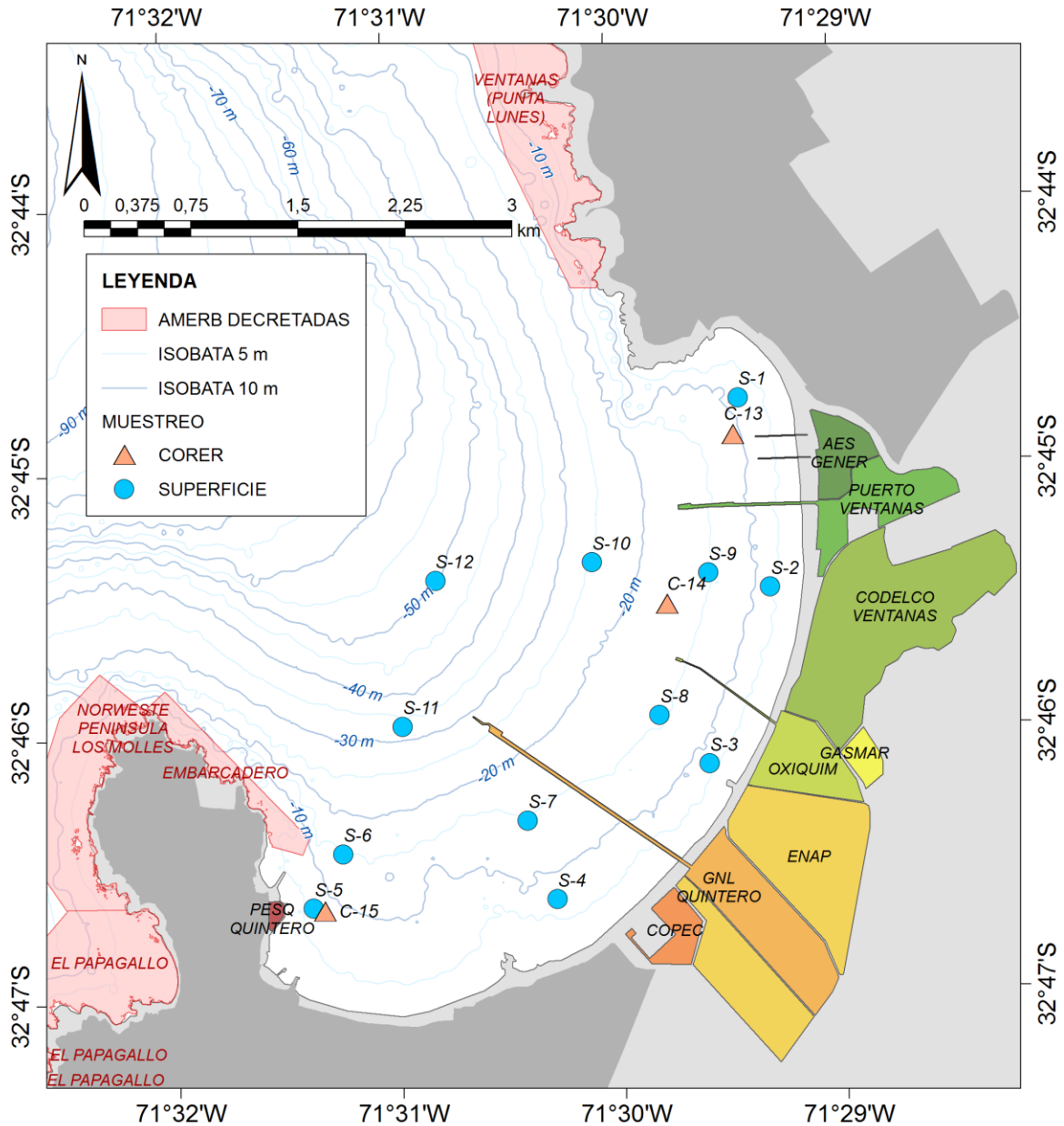


Figura 1. Mapa que muestra la ubicación de los puntos muestreo de los testigos y muestras superficiales de los metales en los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví. Coordenadas geográficas, Datum WGS-84.

Tabla 1. Coordenadas geográficas (Datum WGS-84) de las estaciones de muestreo de sedimentos superficiales y testigos de sedimentos, obtenidos en la bahía de Quintero-Puchuncaví.

| Estación | Tipo | Latitud | Longitud | Método | Fecha |
|----------|-------------|-------------|-------------|--------|------------|
| S-1 | Superficial | -32.745888° | -71.490380° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-2 | Superficial | -32.757880° | -71.488280° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-3 | Superficial | -32.768960° | -71.493130° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-4 | Superficial | -32.777310° | -71.504750° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-5 | Superficial | -32.777550° | -71.522980° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-6 | Superficial | -32.774160° | -71.520710° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-7 | Superficial | -32.772304° | -71.506822° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-8 | Superficial | -32.765840° | -71.496780° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-9 | Superficial | -32.756890° | -71.492910° | Buceo | 27-11-2020 |
| S-10 | Superficial | -32.756090° | -71.501580° | Draga | 28-11-2020 |
| S-11 | Superficial | -32.766194° | -71.516042° | Draga | 28-11-2020 |
| S-12 | Superficial | -32.757030° | -71.513320° | Draga | 28-11-2020 |
| C-13 | Testigo | -32.748200° | -71.490800° | Buceo | 29-11-2020 |
| C-14 | Testigo | -32.758830° | -71.496030° | Buceo | 29-11-2020 |
| C-15 | Testigo | -32.777740° | -71.522140° | Buceo | 29-11-2020 |

3.2.- Pre-Tratamiento de Muestras Superficiales

Una vez obtenidas las muestras de sedimentos, estas fueron trasladadas al LOQ-UDEC, en la ciudad de Concepción, las que fueron secadas hasta peso constante a 35°C de temperatura en una estufa de convección. A todas y cada una de las muestras se les realizó granulometría, contenido de materia orgánica, humedad y metales extraíbles (Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Plomo, Mercurio y Níquel).

3.3.- Pre-Tratamiento de los Testigos

Una vez obtenidos los testigos de sedimentos, y trasladados al laboratorio del LOQ-UDEC, se procedió a cortar las secciones con un extractor y una espátula de teflón en secciones de 1 cm de espesor desde la superficie hasta los 10 cm de profundidad. Luego se continuó cortando secciones de 2 cm de espesor hasta la base del testigo. Todas las secciones fueron transferidas a recipientes previamente pesados y rotulados, registrándose el peso correspondiente de cada muestra para luego secarlas hasta peso constante a 35°C de temperatura en una estufa de

convección. En todas las secciones de cada uno de los testigos, se analizó la granulometría, contenido de materia orgánica, humedad y susceptibilidad magnética. En estas mismas secciones se analizó el contenido de metales totales (Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Plomo Mercurio y Níquel) y elementos radioactivos naturales (^{210}Pb y ^{226}Ra).

3.4.- Análisis de Muestras

3.4.1.- Metales Totales

Las muestras de los testigos para análisis de metales totales (As, Cd Cu, Cr, Pb y Ni) fueron sometidas a una digestión ácida fuerte, utilizándose aproximadamente 1 g de sedimento en vasos de teflón previamente lavados con un detergente no iónico y descontaminados. El ataque total se realizó utilizando una mezcla de ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico (HNO_3 , HCl y HF) sobre una placa calefactora Thermo Scientific Type 2200, manteniendo un control continuo de la temperatura. Las muestras digeridas fueron recuperadas con agua mili-Q y posteriormente analizadas por Espectrometría de Absorción Atómica con Llama (EAA, Thermo Scientific, Modelo ICE 3500 AA System) y por Absorción Atómica Llama con generación de Hidruro (Thermo Scientific, Modelo VP 100 Vapour System) para el análisis de As. El Hg Total se determinó mediante un Analizador Directo de Mercurio (Milestone, DMA-80) por EAA vapor frío (ver detalle en Tabla 2).

3.4.2.- Metales Extraíbles

Las muestras superficiales para análisis de As y Cr fueron sometidas a una digestión ácida con agua regia y peróxido de hidrógeno en un digestor de microondas (ETHOS ONE) y posteriormente analizadas por Espectrometría de Absorción Atómica con Llama (Thermo Scientific, Modelo ICE 3500 AA System). El análisis de As fue realizado mediante Absorción Atómica Llama con generación de Hidruro (Thermo Scientific, Modelo VP 100 Vapour System).

Las muestras para análisis de Cd, Cu, Pb y Ni fueron sometidas a una digestión ácida con ácido nítrico y peróxido de hidrógeno en un digestor de microondas (ETHOS ONE) y posteriormente analizadas por Espectrometría de Absorción Atómica con Llama (EAA, Thermo Scientific, Modelo ICE 3500 AA System) e ICP-MS (Thermo Fisher, Modelo iCAP-Q) (Tabla 2).

Tabla 2. Métodos analíticos para cuantificación de metales y metaloides con los respectivos Límites de Detección (LD), Límites de Cuantificación (LC), metodologías y referencias bibliográficas de los análisis.

| Análisis | Técnica | LD | LC | Unidad | Metidos de Referencia |
|------------------------|-------------|---------|---------|----------------------|--|
| Arsénico extraíble | HGAAS | 0,30 | 1,50 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3051 A. |
| Arsénico total | HGAAS | 0,30 | 1,50 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3052. |
| Cadmio extraíble | ICP-MS | 1,00 | 2,00 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3051 A. |
| Cadmio total | ICP-MS | 1,00 | 2,00 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3052. |
| Cobre extraíble | FAAS | 0,50 | 2,50 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3051 A. |
| Cobre total | FAAS | 0,50 | 2,50 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3052. |
| Cromo extraíble | FAAS | 3,00 | 10,00 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3051 A. |
| Cromo total | FAAS | 3,00 | 10,00 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3052. |
| Mercurio | DMA | 0,00005 | 0,00020 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 7473. |
| Plomo extraíble | FAAS | 1,00 | 5,00 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3051 A. |
| Plomo total | FAAS | 1,00 | 5,00 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3052. |
| Níquel extraíble | ICP-MS | 0,50 | 8,00 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3051 A. |
| Níquel total | ICP-MS | 0,50 | 8,00 | $\mu\text{g g}^{-1}$ | EPA Method 3052. |
| Materia Orgánica Total | Gravimetría | *** | 0,001 | % | Resolución Exenta N° 3612 de 2009, numeral 27, de la Subsecretaría de Pesca. |
| Granulometría | Gravimetría | *** | *** | % | Resolución Exenta N° 3612 de 2009, numeral 26, de la Subsecretaría de Pesca. |

HGAAS: Espectrometría de Absorción Atómica con Generación de Hidruros.

DMA: Analizador Directo de Mercurio.

FAAS: Espectrometría de Absorción Atómica con Llama.

3.4.3.- Porcentaje de Humedad y Densidad Aparente

El contenido de agua se determinó por diferencia de peso expresado en porcentaje de humedad y la densidad aparente como el peso de sólidos seco por unidad de volumen de sedimento húmedo, estimado a partir de las dimensiones de la sección (Hakanson & Jansson, 1983).

3.4.4.- Materia Orgánica Total (MOT)

La materia orgánica se midió por calcinación a 450°C por 4 horas (Hakanson & Jansson, 1983) en una mufla Thermo Scientific Thermolyne. Posteriormente, las muestras calcinadas fueron traspasadas a un desecador por 30 minutos, hasta peso constante.

3.4.5.- Granulometría

Para este análisis se tomó una sub-muestra de peso conocido, las que fueron separadas en fracciones de tamaño, utilizando un agitador con ocho tamices de tamaños entre 4000 μm y < 63 μm , con agitación constante por 10 minutos. Posteriormente, las fracciones separadas y retenidas en cada tamiz fueron pesadas y llevadas a porcentaje. Los resultados se analizaron con el software Gradistat versión 9.1 (Blott & Pye, 2001).

3.4.6.- pH y Potencial Rédox (Eh)

Estas mediciones basadas en el método SM 4500 H/B (Standart Method, 2005) fueron realizadas *ex situ* mediante electrodos de pH de punta cónica con triple unión de teflón y electrodo de potencial rédox con un sistema de referencia Ag/AgCl saturado y sensor de platino utilizando un Peachímetro HI 9126 pH/ORP meter.

3.4.7.- Aseguramiento de la Calidad

Durante las mediciones analíticas el LOQ-UDEC realizó controles de calidad (QC) y aseguramiento de la calidad (QA) en todas las etapas del proceso analítico, utilizando las herramientas estadísticas que se aplican en la evaluación de los datos derivados del control de calidad para establecer la exactitud y precisión de sus mediciones, los que incluyen muestras en duplicado, blancos analíticos y uso de Material de Referencia Certificado (MESS-4 y PACS-3).

3.5.- Geocronología de los Testigos de Sedimentos

Para cumplir con este objetivo se determinó la geocronología de los sedimentos (datación) mediante la utilización del radioisótopo ^{210}Pb . El método se basa en la determinación de la actividad en exceso de ^{210}Pb en los sedimentos, que representa el ^{210}Pb que llega a los sedimentos asociados a las partículas. Este radioisótopo proviene de la serie de desintegración del ^{238}U donde se encuentra el ^{226}Ra ($t_{1/2} = 1602$ años), que se desintegra para generar el gas noble ^{222}Rn ($t_{1/2} = 3.83$ días). El ^{222}Rn difunde a la atmósfera con una tasa constante de aproximadamente $42 \text{ átomos min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, y posteriormente se desintegra a través de varios productos de corta vida media hasta generarse el ^{210}Pb , el que decae mediante la emisión de partículas Alfa. Este ^{210}Pb atmosférico vuelve a la litósfera durante precipitaciones o deposición seca y húmeda, teniendo un tiempo de residencia en la atmósfera de unos 5-10 días (Krishnaswami & Lal, 1978), lo que genera un exceso en los sedimentos. El exceso de ^{210}Pb se determina desde el perfil de ^{210}Pb , considerando aquella parte del perfil donde la actividad no cambia con la profundidad, la cual representa al ^{210}Pb proveniente de su padre ^{226}Ra que se encuentra retenido en la estructura cristalina de los granos de sedimentos (Salamanca & Jara, 2003).

Lo anterior, permite utilizar el exceso de ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) para la geocronología de los sedimentos, considerando el decaimiento radioactivo que se establece a partir de los valores de la actividad del ^{210}Pb en exceso en función de la profundidad. La actividad del ^{210}Pb se determinó por Espectrometría Alfa, mediante un Espectrómetro Alfa marca CANBERRA's modelo Alpha Analyst de acuerdo a la metodología propuesta por Flynn (1968), adaptada a las condiciones del laboratorio.

El ^{210}Pb se detectó a través de su radioisótopo nieta ^{210}Po , usando ^{209}Po ($2,2 \text{ dpm mL}^{-1}$) como trazador de rendimiento, asumiendo equilibrio secular radiactivo entre estos radionucleidos en todo el perfil de sedimentos, lo que permite determinar el tiempo transcurrido en cada estrato de la columna de sedimento desde la depositación inicial.

Para La datación de los sedimentos se utilizó el modelo de Flujo Constante de Suministro (Constant Rate of Supply, CRS), basado en el método de Appleby & Oldfield (1978), donde i denota la profundidad debajo de la interfaz agua-sedimento (cm) y λ es la constante de decaimiento de ^{210}Pb , que establece que:

$$Q(i) = Q(0)e^{-\lambda t}$$

Ecuación 1

Donde:

$Q(i)$: es el inventario en exceso de ^{210}Pb (dpm cm^{-2}) por debajo de la profundidad de los sedimentos i .

$Q(0)$ es el inventario total en exceso de ^{210}Pb (dpm cm^{-2}) para todo el testigo.

λ : es la constante de decaimiento de ^{210}Pb .

t : tiempo transcurrido.

Luego:

$$Q(i) = \sum_{i=0}^n A_{(i)} * \rho_{(i)} * \Delta Z_{(i)}$$

Ecuación 2

y $Q(0)$ está dado por dado como:

$$Q(0) = \sum_{i=0}^n A_{(i)} * \rho_{(i)} * \Delta Z_{(i)}$$

Ecuación 3

Por lo tanto, $A_{(i)}$ es el exceso de ^{210}Pb (dpm g^{-1}) de la muestra en la profundidad del sedimento i , ρ_i es la densidad aparente (g cm^{-3}) de la muestra en la profundidad del sedimento i y $Z_{(i)}$ es la profundidad de la sección i de la muestra en el sedimento.

Con este modelo, la edad (t) en años se calcula utilizando:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{Q(0)}{Q(i)} \right)$$

Ecuación 4

3.5.1.- Digestión y Análisis de ^{210}Pb

El análisis de este radioisótopo en sedimentos se realizó mediante dilución isotópica, siendo necesario realizar una digestión ácida total. Para esto se utilizaron 0,5 g de muestra en una mezcla de HF, HNO_3 y HCl utilizando un trazador interno de ^{209}Po , de acuerdo con la metodología propuesta por Flynn (1968). Una vez realizada la digestión de la muestra se procedió a la depositación en discos de plata en una Multi-Placa calefactora con Agitador Magnético por un tiempo de 2,5 horas. Una vez finalizado este tiempo, las placas fueron etiquetadas y llevadas

a lectura en un Espectrómetro Alfa Modelo 7200-08 por un periodo de 48 horas, donde se registró la actividad de la muestra y del trazador interno.

3.5.2.- Determinación de ^{226}Ra

El radio (^{226}Ra) se determinó mediante centelleo gaseoso, basado en el decaimiento natural del ^{222}Rn . Para ello se realizó la acumulación gaseosa de ^{222}Rn , el cual se encuentra en equilibrio secular con el ^{226}Ra (isotopo padre). Esta acumulación gaseosa proviene de la disolución total de los sedimentos y es almacenada en frascos de lavado de gases de vidrio durante 15 días, tiempo en el cual el ^{222}Rn y el ^{226}Ra alcanzan el equilibrio secular. Transcurrido este tiempo, se procedió a una extracción de ^{222}Rn mediante absorción y desorción del gas en columnas de carbón activado para su posterior transferencia y cuantificación en celdas de Lucas. Este procedimiento fue realizado en el laboratorio de Radioisótopos Naturales del LOQ-UDEC, utilizando el método descrito por Matheiu (1982).

3.6.- Indicadores de calidad y análisis estadísticos

Para evaluar la calidad de los sedimentos respecto del contenido de los metales a analizar, se utilizaron los siguientes índices de calidad geoquímica: Factor de Enriquecimiento (FE), Índice de Geoacumulación (Igeo), Índice de Carga de Contaminante (PLI) y análisis estadísticos que dan cuenta de la significancia estadística de las concentraciones registradas en las muestras obtenidas en los testigos, así como en las muestras superficiales. Para la determinación de los índices y análisis estadísticos se requirió obtener las concentraciones locales preindustriales y/o naturales (*i.e.*, “background”). Este nivel se estableció a partir de la datación de los perfiles de sedimentos y del registro de las concentraciones obtenidas de los testigos, en tanto que, para determinar la variabilidad espacial se analizaron los metales extraíbles (Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Plomo Mercurio y Níquel), cuyos métodos de muestreo, medición y análisis han sido definidos en el OE1.

3.6.1.- Factor de enriquecimiento (FE)

Para el cálculo del Factor de Enriquecimiento, las concentraciones de los metales fueron normalizadas al Aluminio (Al) dado que este elemento se encuentra en una alta abundancia en la corteza terrestre. Este elemento fue analizado mediante Espectrometría de Absorción Atómica con Llama (FAAS) siguiendo el método EPA 3015A para análisis de Al total, con un límite de detección de 4,0 µg/g y un límite de cuantificación de 40,0 µg/g. El FE fue determinado con la utilización de la siguiente fórmula:

$$FE = (C_m / Al_m) / (C_b / Al_b)$$

Donde:

C_m: Concentración del metal.

C_b: Concentración basal o natural local.

Al_m: Concentración de Aluminio en la muestra.

Al_b: Concentración de Aluminio basal o natural.

EL FE establece la siguiente escala de calidades de los sedimentos:

| Factor de Enriquecimiento: | Calidad del sedimento: |
|----------------------------|---|
| FE < 2 | Enriquecimiento deficiente o mínimo. |
| FE de 2 a 5 | Enriquecimiento moderado. |
| FE de 5,1 a 20 | Enriquecimiento significativo. |
| FE de 20,1 a 40 | Enriquecimiento muy elevado. |
| FE más de 40 | Enriquecimiento extremadamente elevado. |

3.6.2.- Índice de Geoacumulación (Igeo)

Para evaluar el posible impacto ambiental en los sedimentos, se utilizó el índice de geoacumulación definido por Müller (1981), el cual se obtiene de la siguiente fórmula:

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

En dónde;

C_n: Concentración de los metales.

B_n: Valor de referencia ("background") en los sedimentos de la zona estudiada.

1,5: valor utilizado con el objetivo de minimizar el efecto de las posibles variaciones en los niveles

base, los cuales se pueden deber a las variaciones litológicas en el sedimento y suelo, y como un factor de corrección de una eventual influencia antropogénica en el cálculo (Buccolieriet al., 2006).

Índice de geoacumulación (Igeo) establece las siguientes categorías de calidad del sedimento:

| Clase de Igeo: | Calidad del sedimento: |
|----------------|---------------------------------------|
| 0 | No contaminado. |
| >0-1 | Poco contaminado. |
| >1-2 | Medianamente contaminado. |
| >2-3 | De mediana a fuertemente contaminado. |
| >3-4 | Fuertemente contaminado. |
| >4-5 | Muy fuertemente contaminado. |
| >5-6 | Extremadamente contaminado. |

3.6.3.- Índice de carga contaminante (PLI)

El grado de contaminación y penetración por metales pesados en los suelos afectados puede determinarse y compararse a partir del denominado Índice de Carga de Contaminantes PLI ("Pollution Load Index") de metales de acuerdo con Tomlinson *et al.* (1980). Este índice se basa en los valores de los Factores de Concentración (CF) de los distintos metales, que se obtienen al dividir la concentración de cada metal con un valor de referencia local preindustrial o natural (*i.e.*, "background") en sedimentos no contaminados.

$$CF = C \text{ Metal} / C \text{ Referencia}$$

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_i * CF_{ii} * CF_{iii} \dots)}$$

n = Numero de Metales Analizados

Este índice proporciona de manera sencilla valores comparativos para conocer el nivel de contaminación de un suelo/sedimento por metales pesados. Los valores de PLI cercanos a 1 indican una carga contaminante parecida al nivel de referencia local (*i.e.*, "background" o baja contaminación), mientras que valores de PLI mayores a 1 indican diferentes grados de contaminación.

Clasificación Índice de carga contaminante:

PLI < 1 ausencia de contaminantes.

PLI = 1 contaminación transitoria.

PLI > 1 contaminado.

PLI > 2, 3,4 deterioro progresivo.

3.6.4.- Análisis estadístico

Los datos generados a partir de los procedimientos descritos previamente fueron sometidos a un análisis estadístico para los parámetros de Tamaño Medio de Grano (TMG), porcentaje de Materia Orgánica Total (MOT) y concentración de los metales Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y As. Dada la diferente naturaleza de las técnicas de muestreo, los análisis estadísticos fueron realizados de forma independiente para las muestras de sedimento superficial y para los testigos. En ambos casos, el análisis de datos incorporó: (i) análisis exploratorio, (ii) matriz de correlaciones y, (iii) análisis multivariado.

El análisis exploratorio consistió en la determinación del número de registros y de los estadígrafos de tendencia central (promedio) y de dispersión (mín, max, desvest, cv%), además, de la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, independientemente para cada parámetro analizado.

La determinación de la existencia de multicolinealidad (interdependencia entre parámetros) fue abordada mediante una matriz de correlaciones múltiples (matrix-plot) utilizando la correlación de Spearman (Spearman, 1904), la cual permite determinar la existencia de relaciones monotónicas (no necesariamente lineales) entre 2 variables.

La técnica de análisis multivariado seleccionada correspondió al Análisis de Componentes Principales (ACP), técnica que permite reducir la dimensionalidad de un set de datos multivariado, a la vez que se retiene la mayor proporción de la variabilidad, mediante la generación de un nuevo set de variables, denominadas componentes principales (Pearson, 1901, Zare-Chahouki, 2011). Las componentes principales son una combinación lineal de las variables originales, que resultan ortogonales o independientes (no correlacionados) entre sí (Jolliffe, 2002,). Una de las ventajas del ACP es que entrega una medida de la varianza que explica cada una de las componentes multivariadas (valores propios) y del grado de correlación o covarianza que existe entre cada una de las variables de entrada y la componente multivariada resultante (Everitt & Hothorn, 2011).

Para el caso de los testigos, la batería de análisis incorporó igualmente las fases de análisis exploratorio, matriz de correlaciones y ACP. En una primera instancia, los análisis fueron ejecutados en orden a determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones detectadas entre los 3 testigo analizados. En una segunda fase, se ejecutaron análisis independientemente por testigo para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre periodos temporales obtenidos a partir de la geocronología. De esta forma, se consideraron 3 estratos: 1) estrato superficial, que incluye las concentraciones observadas entre 2005 y 2020; 2) estrato intermedio, que incluye las concentraciones observadas entre 1950 y 2005 y; 3) estrato de fondo, que incluye las concentraciones observadas previo a 1950.

Todos los análisis estadísticos fueron efectuados en R versión 4.0.3 (R Core Team, 2020) utilizando las librerías *vegan* (Oksanen *et al.*, 2019), *PerformanceAnalytics* (Peterson & Carl, 2018) y *ggbiplot* (Vu, 2011).

3.7.- Recopilación de información desde publicaciones científicas

Se realizó una revisión de la información bibliográfica disponible, consultando las bases de datos de Science Direct, Web of Science, Scopus, Scielo y Google Scholar. A través de esta búsqueda se revisaron publicaciones científicas, informes de proyectos de investigación, tesis de grado y postgrado y toda aquella información que permitió realizar una comparación de los datos de metales en sedimentos de la bahía de Quintero, con los obtenidos en este estudio. Además, se realizaron comparaciones con las concentraciones informadas para otras zonas costeras de Chile y con datos de la corteza terrestre, esquistos (“shale”) del Pacífico Sur y áreas costeras similares a la bahía de Quintero-Puchuncaví.

3.7.1.- Contraste de normativa nacional e internacional y criterios de calidad

Se realizó el contraste con normativa para sedimentos costeros y guías internacionales que permitió establecer el grado de alteración o intervención que presentan los sedimentos de la bahía.

3.7.2.- Indicadores de Riesgo Ecológico

Para evaluar el Potencial Riesgo Ecológico presentado por los metales analizados en la bahía de Quintero-Puchuncaví, se calculó el Ecological Risk (Ri) / Potential Ecological Risk (PERi). Estos índices se utilizan para evaluar el nivel de contaminación por metales pesados en muestras de sedimentos de acuerdo con su toxicidad. Para determinar el Riesgo Ecológico Potencial (PERi), se debe realizar la adición de los riesgos ecológicos calculados para cada metal (Ri) independientemente, los cuales son obtenidos mediante la multiplicación de los factores de toxicidad biológica de cada metal (T_r^i) de acuerdo con Hakanson (1980) y Ke et al. (2017), con los factores de contaminación (C_f^i) obtenidos a partir de la proporción de la concentración del metal sobre el nivel de referencia. Este índice considera la sinergia, toxicidad y sensibilidad de especies expuestas a estos metales en los sedimentos.

$$R_i = (T_r^i * C_f^i)$$

$$PER_i = \sum R_i$$

Donde: $T_r =$ As: 10; Cd: 30; Cr: 2; Cu: 5; Pb: 5; Hg: 40; Zn: 1

$$C_f^i = C_o^i / C_r^i$$

C_o^i = Concentración metal i

C_r^i = Concentración de referencia del metal i

Y su respuesta se clasifica de acuerdo a los siguientes rangos Ri y PERi.

| Clasificación | Riesgo ecológico (Ri). |
|------------------------|---------------------------------|
| $R_i \leq 40$ | Bajo |
| $40 \leq R_i < 80$ | Moderado |
| $80 \leq R_i < 160$ | Considerable |
| $160 \leq R_i < 320$ | Alto |
| $R_i \geq 320$ | Muy Alto |
| Clasificación | Riesgo Potencial (PERi). |
| $PER_i \leq 150$ | Bajo |
| $150 < PER_i \leq 300$ | Moderado |
| $300 < PER_i \leq 600$ | Considerable |
| $PER_i > 600$ | Alto |

4.- RESULTADOS

4.1.- OE1. “Determinar la distribución vertical de al menos los siguientes metales pesados y metaloides en los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví: Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Plomo, Mercurio y Níquel”.

4.1.1.-Distribución horizontal

4.1.1.1- Parámetros físico-químicos

En la Tabla 3 se muestra la estadística básica de las mediciones de pH, Potencial Rédox (Eh) y Materia Orgánica Total (MOT) medidos *ex situ* en los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví, y en la Figura 2 se muestra la distribución horizontal de estos.

Tabla 3. Estadística básica de parámetros fisicoquímicos de los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví.

| | Unidad | Promedio | DS | CV % | Min | Max |
|------------|--------|----------|-------|------|------|-------|
| pH | - | 7,55 | 0,1 | 1,31 | 7,35 | 7,71 |
| Redox (Eh) | mV | 273,6 | 100,1 | 36,6 | 98,1 | 400,4 |
| MOT | % | 1,2 | 0,3 | 26,3 | 0,8 | 1,9 |

DS: Desviación estándar
CV: Coeficiente de variación.

El rango de pH medido en los sedimentos submareales de la bahía de Quintero-Puchuncaví fue estrecho, *i.e.*, 0,36 unidades de diferencia lo que representa un 1,31% de coeficiente de variación, correspondiendo a valores normales de pH encontrados en el ambiente marino. El Potencial de Óxido Reducción (Rédox) presentó valores positivos, indicando ausencia de procesos reductores, con un amplio rango *i.e.*, 302,3 mV de diferencia que representa un 36,6% de coeficiente de variación respecto al promedio. Finalmente, la materia orgánica total, varió entre 0,8% y 1,9%, con un promedio de $1,2 \pm 0,3\%$ de MOT, lo cual fue un contenido bajo para sedimentos costeros.

La distribución horizontal del pH presentó la existencia de un grado de variación menor, ya que los mayores valores relativos (dentro de la escasa variabilidad encontrada) se presentaron en el

sector norte de la bahía, y los menores se encontraron en la zona central y cerca de la costa entre el veril de 5 y 10 m de profundidad. Por otra parte, la distribución horizontal del Potencial de Óxido Reducción (Rédox) de los sedimentos superficiales, presentaron, al igual que el pH, mayores valores absolutos en el sector norte y sur de la bahía, Los menores valores absolutos, se presentaron en el centro de la bahía en la estación más profunda (~50 m), lo que está relacionado con la presencia del grano más fino, no obstante, los valores presentes son alrededor de +100mV.

4.1.1.2- Metales y metaloides

En la Tabla 4 se muestra la estadística básica de las concentraciones de los metales y metaloides evaluados (*i.e.*, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y As) en los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví. y en las Figura 3 y 4, se muestra la distribución horizontal de estos.

Tabla 4. Estadística básica de metales y metaloides presentes en los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví.

| | Unidad | Promedio | DS | CV % | Min | Max |
|----|--------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Cd | µg g ⁻¹ | 0,009 | 0,162 | 172,2 | 0,038 | 0,609 |
| Cu | µg g ⁻¹ | 38,7 | 17,2 | 44,4 | 21,6 | 80,8 |
| Cr | µg g ⁻¹ | 26,6 | 7,2 | 27,0 | 16,7 | 39,4 |
| Hg | µg g ⁻¹ | 0,047 | 0,019 | 40,8 | 0,014 | 0,085 |
| Ni | µg g ⁻¹ | 6,0 | 1,6 | 27,4 | 4,2 | 10,5 |
| Pb | µg g ⁻¹ | 8,7 | 2,1 | 23,8 | 6,3 | 13,6 |
| As | µg g ⁻¹ | 8,5 | 2,0 | 23,5 | 5,9 | 11,8 |

El rango de concentración de Cd medido en los sedimentos submareales de la bahía de Quintero-Puchuncaví fue amplio, *i.e.*, un orden de magnitud de diferencia lo que se refleja en el 172,2% de coeficiente de variación. El Cu presentó un valor promedio de 38,7±17,2 µg g⁻¹ con un rango de concentración entre 21,6 y 80,8 µg g⁻¹, lo que corresponde a una diferencia de 3,7 veces entre el menor valor y la máxima concentración encontrada. La concentración promedio de Cr en estos sedimentos fue de 26,6±7,2 µg g⁻¹ con un rango de concentración entre 16,7 y 39,4 µg g⁻¹, lo que representa una diferencia de 2,4 veces entre el menor valor y la máxima concentración encontrada. El Hg presentó una concentración promedio de 0,047±0,019 µg g⁻¹, con un CV de 41% aproximadamente, lo que representa una diferencia en el rango de concentración de 6 veces (*i.e.*, 0,014 y 0,085 µg g⁻¹) entre la menor concentración y la máxima.

El rango de concentración de Ni encontrado en los sedimentos submareales de la bahía Quintero-Puchuncaví varió entre 4,2 y 10,5 $\mu\text{g g}^{-1}$ es decir fue 2,5 veces entre la menor concentración y la máxima encontrada, con un promedio de $6,0 \pm 1,6 \mu\text{g g}^{-1}$ con un CV de 27,4%. El Pb presentó un valor promedio de $8,7 \pm 2,1 \mu\text{g g}^{-1}$ con un rango de concentración entre 6,3 y 13,6 $\mu\text{g g}^{-1}$, lo que significa una diferencia de 2,2 veces entre el menor valor y la máxima concentración informada para los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví. La concentración promedio de As fue $8,5 \pm 2,0 \mu\text{g g}^{-1}$ con un rango de concentración entre 5,9 y 11,8 $\mu\text{g g}^{-1}$, lo que representa una diferencia de 2 veces entre el menor valor y la máxima concentración encontrada.

La distribución horizontal del Cd (Figura 3) en los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví se presentó homogénea dentro de la bahía, con valores cercanos al rango mínimo, los que aumentan en el sector más profundo, en la boca de la bahía (Estación S-12). Por otra parte, la distribución horizontal de Cu presentó un gradiente norte-sur, donde los menores valores superficiales se presentaron en el sector de Ventana y las mayores en el sur. No se apreció un gradiente Este-Oeste. El Cr presentó una distribución más heterogénea con los menores valores en el sector costero norte de la zona industrial de la bahía, sin embargo, los mayores valores de Cr se presentaron en el sector costero sur del área industrial y en la estación más profunda de la bahía (S-12). El contenido de Hg en los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví, (Figura 4) presentó los mayores valores en las estaciones cercanas a la costa, con los máximos valores frente a las instalaciones de AES Gener, Puerto Ventana y Codelco. El contenido de Ni presente en los sedimentos superficiales de la bahía estuvieron dominados por valores entre 4,0 y 7,0 $\mu\text{g g}^{-1}$, detectándose las concentraciones más altas en la zona exterior de la bahía (S-12). En el caso del Pb, las mayores concentraciones se presentaron en el sector sur de la bahía frente a la ciudad de Quintero. En el resto de la bahía la distribución fue más homogénea, con valores entre 7,0 y 10,0 $\mu\text{g g}^{-1}$. Finalmente, la distribución horizontal de As en los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví, presentó un claro gradiente desde el borde costero, donde se encontraron las mayores concentraciones de este elemento, las que fueron disminuyendo en dirección a la boca y mar afuera (Figura 4).

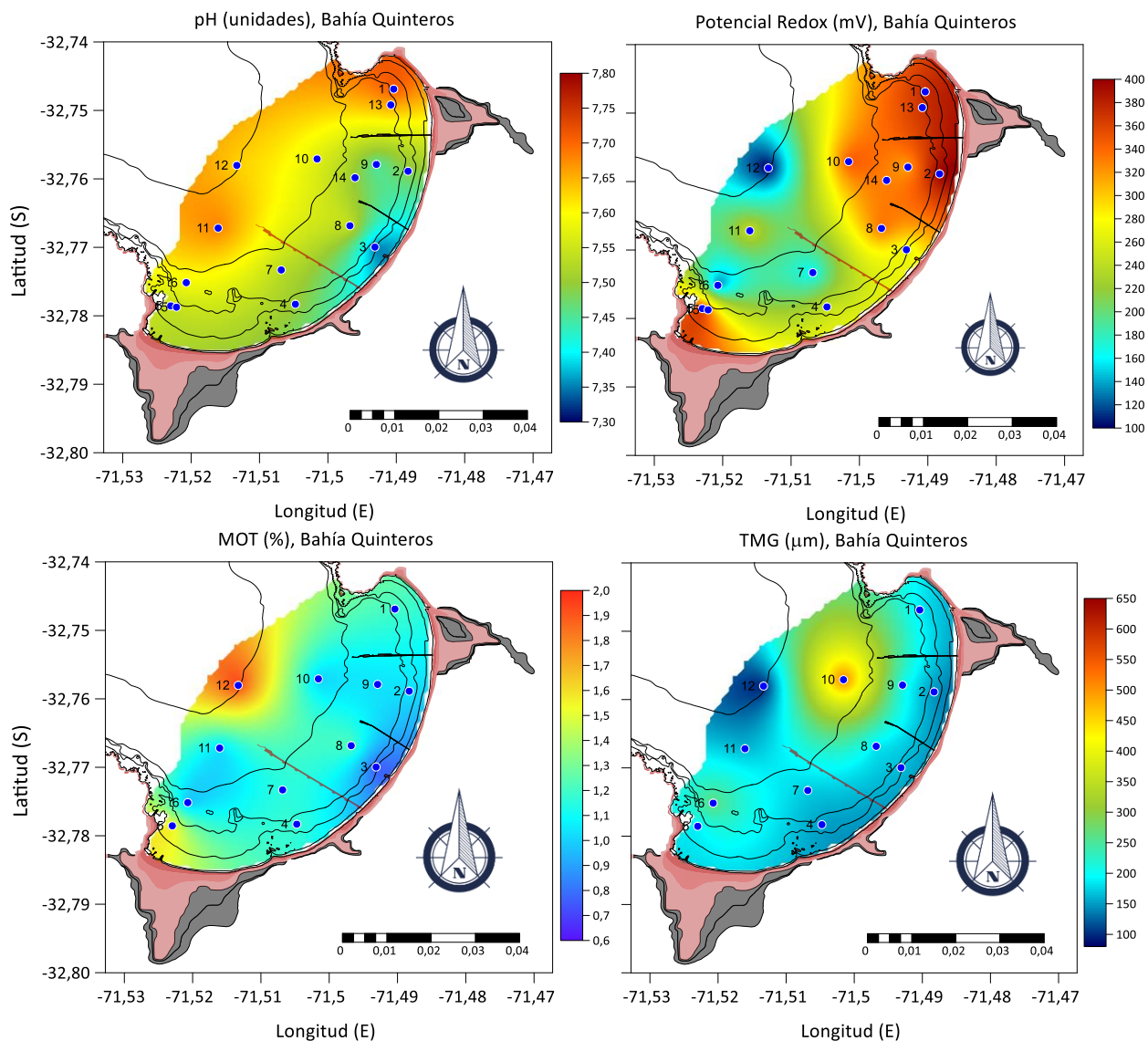


Figura 2. Distribución horizontal de pH, Redox, MOT y TMG (tamaño medio de grano) en sedimentos superficiales de la Bahía Quintero-Puchuncaví.

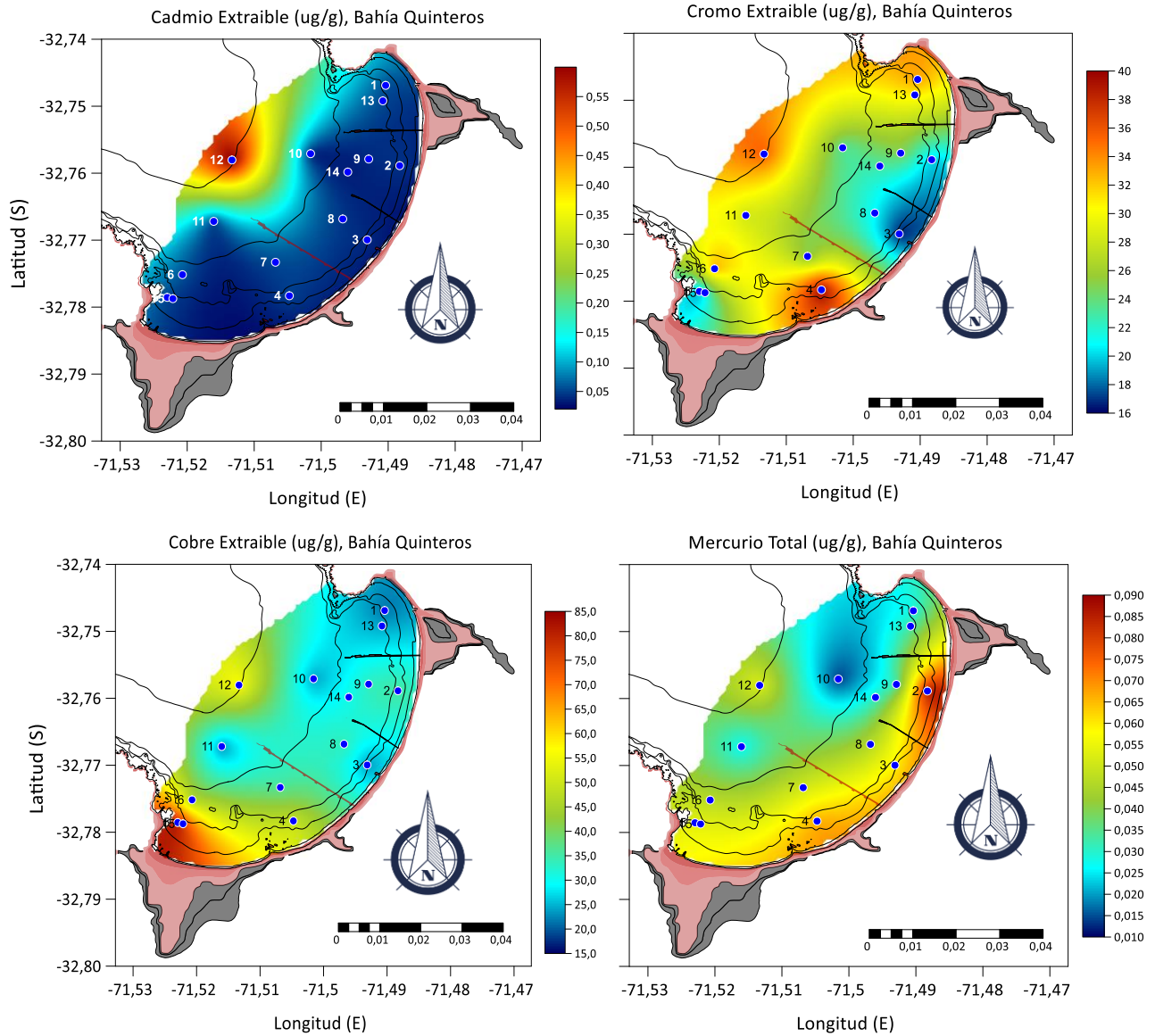


Figura 3. Distribución horizontal de metales y metaloides en sedimentos superficiales de la Bahía Quintero-Puchuncaví.

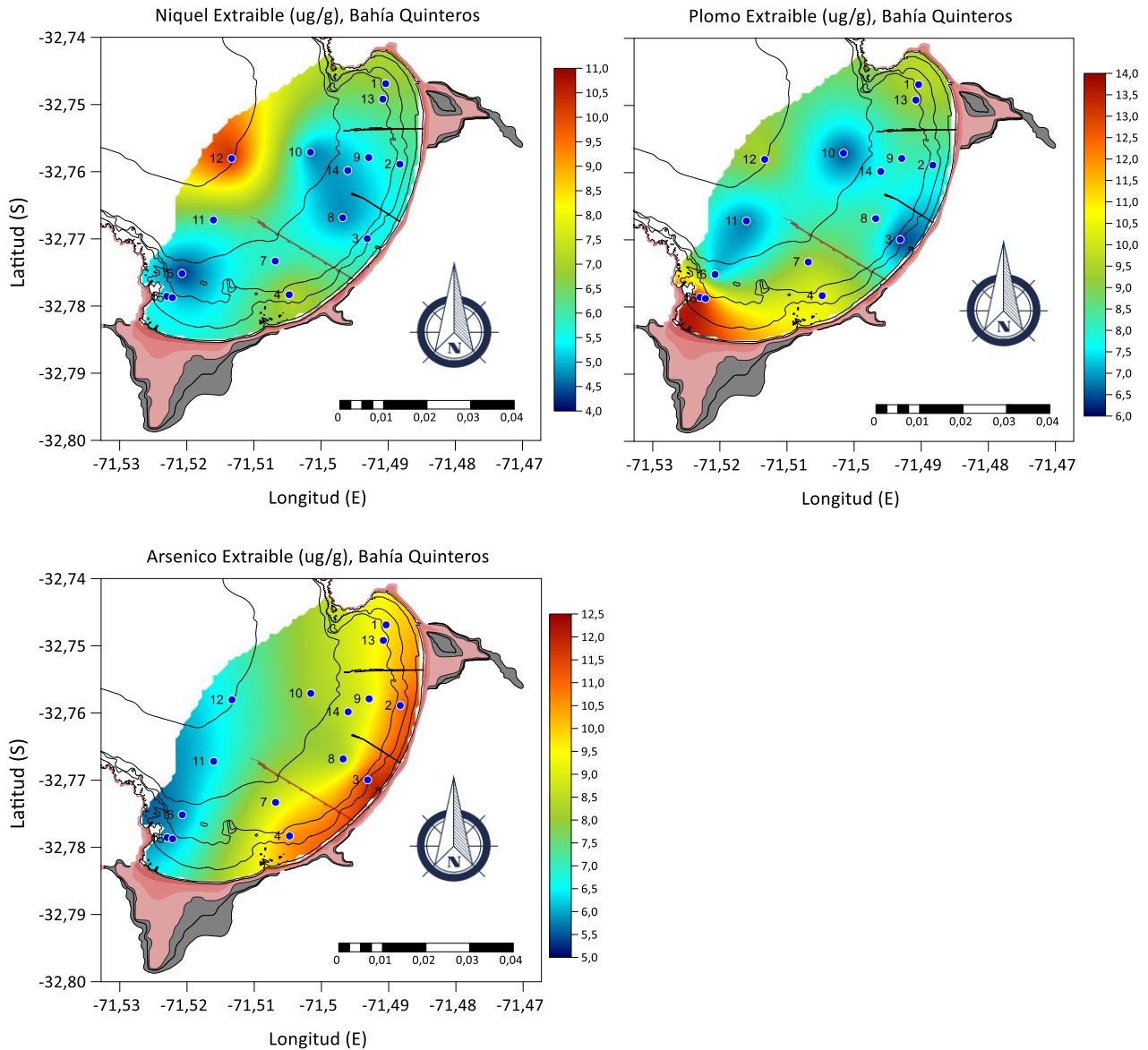


Figura 4. Distribución horizontal de metales y metaloides en sedimentos superficiales de la Bahía Quintero-Puchuncaví.

4.1.2.- Distribución vertical

La distribución vertical de los metales y metaloides considerados en el presente estudio y de sus parámetros físico-químicos asociados, se hace sobre la base de los tres testigos obtenidos en la bahía, cuya ubicación se muestra en la Figura 1. En las 8 de las 33 secciones en las cuales no se cuantificaron las concentraciones de metales, se realizó una interpolación lineal para obtener la distribución continua a lo largo del testigo.

4.1.2.1.- Parámetros físico-químicos

La Figura 5 muestra la estratigrafía de los tres testigos obtenidos (C-13, C-14 y C-15), la distribución vertical del tamaño medio del grano (TMG), la Materia Orgánica Total (MOT), Susceptibilidad Magnética, Densidad Aparente y contenido de agua en la columna de sedimento, respecto a la edad geocronológica, la profundidad y por sección analizada.

En esta figura la estratigrafía muestra que el testigo C-14 presentó una distribución uniforme de granos de arena media a lo largo de toda su longitud. Sin embargo, el testigo C-15 mostró el dominio de arena finas, con una estrecha capa de arenas medias entre los 3 y 4 cm de profundidad. Solo el testigo C-13 presentó mayor variación estratigráfica, ya que presenta alternancia de estratos de arena muy fina en superficie a arenas finas a lo largo de la columna de sedimento. La distribución del tamaño medio del grano (TMG) en los tres testigos estudiados existieron diferencias en el TMG, entre ellos. Así el testigo C-13 fue el que presentó el TMG menor con valores alrededor de 100 μm , correspondientes a arenas finas y el testigo C-14, con un TMG del orden de 400 μm , correspondientes a arenas gruesas y el testigo C-15 con valores de TMG intermedio entre los dos testigos anteriormente mencionados. También en esta figura se aprecia que en toda la columna de sedimentos del testigo C-13 la granulometría está dominada por tamaños entre 125 y 63 μm , con escasa presencia de grano grueso $>1000 \mu\text{m}$ (~2% en peso) y la fracción $<63 \mu\text{m}$, que representa los limos y arcillas, la cual presentó abundancias del orden del 2% y menores, bajo los 5 cm de profundidad.

El contenido de materia orgánica total (MOT) de la columna de sedimentos en los tres testigos obtenidos (Figura 5) presentó valores bajos con una distribución comparable en los testigos C-13 y C-15, con valores entre 1 a 1,5% de MOT a partir de los 5 cm de profundidad. En el testigo C-14, la MOT no mostró cambios con la profundidad, con valores de 0,5% de MOT, a lo largo de toda su longitud. En los testigos analizados no se observaron la presencia de partículas visibles de carbón mineral que puedan contribuir a aumentar el contenido de MOT que se mide por calcinación. Esto es consistente con el dominio del tamaño de 0,125 y 0,063 mm en el testigo C-13, el dominio del tamaño de 0,25 mm en el testigo C-14 y el dominio del tamaño de grano de 0,4 mm en el testigo C-15, tamaños de grano menores a los de carbón mineral maduro depositado a través del tiempo en sedimentos costeros (Cisternas 2021, *com. pers.*)¹.

¹ comunicación personal, Dra. María Eugenia Cisternas, Geóloga, especialista en petrología de carbones.

La distribución vertical de la Susceptibilidad Magnética de sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví (Figura 5), la cual depende de la presencia de minerales ferrosos con propiedades magnéticas de la columna de sedimentos, en los tres testigos recolectados presentó un patrón diferente para cada uno de ellos, siendo notoria la escasa variación vertical del testigo C-14, donde la susceptibilidad magnética, prácticamente no varió con la profundidad. El testigo C-15, presentó una mayor variación vertical, aunque no se observó ninguna tendencia con la profundidad. La mayor dispersión de este parámetro se presentó en el testigo C-13, lo que evidenció una gran variación vertical y una gran dispersión de las mediciones, llegando a valores de hasta 1000 unidades, lo cual fue una diferencia significativa con respecto a la distribución vertical presente en los otros dos testigos.

En la Figura 5 la distribución vertical de la densidad aparente, que es la relación entre el volumen de sedimentos y el material sólido contenido en ese volumen, permitió apreciar que no se observó ninguna tendencia con la profundidad, sino que presentó una variación en un rango estrecho, entre los 1,5 y 2.0 g cm⁻³, a partir de los 5 a 10 cm de profundidad, lo que fue consistente con la variación de la humedad, ya que son parámetros relacionados, por lo que a partir de los 5 cm de profundidad, la humedad en la columna de sedimentos de los testigos C-13 y C-15 fue comparable con alrededor de un 20%, en cambio los sedimentos del testigo C-14 evidenció menores valores de humedad no superando el 15% hasta los 50 cm de profundidad.

4.1.2.2.- Metales y metaloides

En la Figura 6 se presenta la distribución vertical de los siete metales y metaloides evaluados en este estudio, por elemento en cada uno de los tres testigos. En esta figura se ha agregado la edad de los sedimentos obtenida a partir del fechado radiogeocímico del testigo C-13 sobre la base de los radionúclidos naturales ²¹⁰Pb/²²⁶Ra de la serie del ²³⁸U. El cálculo de las edades se discute en los resultados del OE2.

De acuerdo con la distribución vertical de los metales y metaloides estudiados (Figura 6), y considerando la historia de la industrialización de la bahía y las edades radio geoquímicas resultantes en el testigo C-13, fue posible identificar tres estratos en la columna de sedimentos. Un estrato superior entre la superficie y los 10 cm de profundidad, que corresponde aproximadamente al año 2004, donde se observó un aumento de Cu, Hg, Pb y As, periodo que cubre el desarrollo industrial actual de la bahía. Luego fue posible identificar un estrato entre los

10 y 30 cm de profundidad, que correspondería al periodo 2004-1960, que cubre el periodo del inicio del desarrollo industrial de la bahía. Y finalmente, bajo los 30 cm de profundidad un periodo pre-industrial desde el año 1960 hasta la década de los 1850 en la base del testigo C-13. Esto permitió, identificar rangos de concentraciones de los metales y metaloides estudiados correspondiente al periodo pre-industrial (Tabla 5) y que pudieron ser utilizadas como Concentraciones Basales de Referencia (CBR).

Tabla 5. Concentraciones de los metales y metaloides correspondiente al periodo pre-industrial en sedimentos de Bahía Quintero-Puchuncaví.

| Estadígrafo | Cd ($\mu\text{g g}^{-1}$) | Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$) | Cr ($\mu\text{g g}^{-1}$) | Hg ($\mu\text{g g}^{-1}$) | Ni ($\mu\text{g g}^{-1}$) | Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$) | As ($\mu\text{g g}^{-1}$) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Promedio | 0,049 | 34,1 | 28,5 | 0,028 | 3,7 | 13,8 | 6,7 |
| Mediana | 0,048 | 37,8 | 28,2 | 0,034 | 4,3 | 13,6 | 6,4 |
| Mínimo | 0,017 | 17,3 | 17,2 | 0,007 | 1,4 | 12,2 | 2,6 |
| Máximo | 0,08 | 47,7 | 37,9 | 0,041 | 5,0 | 15,5 | 9,9 |

En general, se pueden distinguir dos grupos de metales de acuerdo con el patrón de distribución vertical, i) el primero lo conforman el Cu, Hg, Pb y As que evidenciaron un enriquecimiento superficial a partir de los 10 cm de profundidad aproximadamente y ii) otro grupo conformado por el Cd, Cr y Ni que tuvieron una distribución homogénea con la profundidad. Esto significa que para los metales y metaloides del primer grupo, ha habido aportes por sobre un nivel basal, que de acuerdo con la geocronología calculada para los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchucaví, este se iniciaría en el año 2004-2005 aproximadamente, lo cual es particularmente notorio en los testigos C-13 y C-15.

Se pudo apreciar, además, en estas figuras que el testigo C-14 tiene una distribución vertical diferente al de los testigos 13 y 15 para el caso de Cd, Cu, Cr, Hg y Ni, la cual se presentó homogénea a lo largo de los testigos, con las concentraciones más bajas, lo cual fue coincidente con un tamaño de grano más grueso. En el caso de Pb y As, este testigo mostró un patrón de abundancia vertical comparable a los testigos C-13 y C-15.

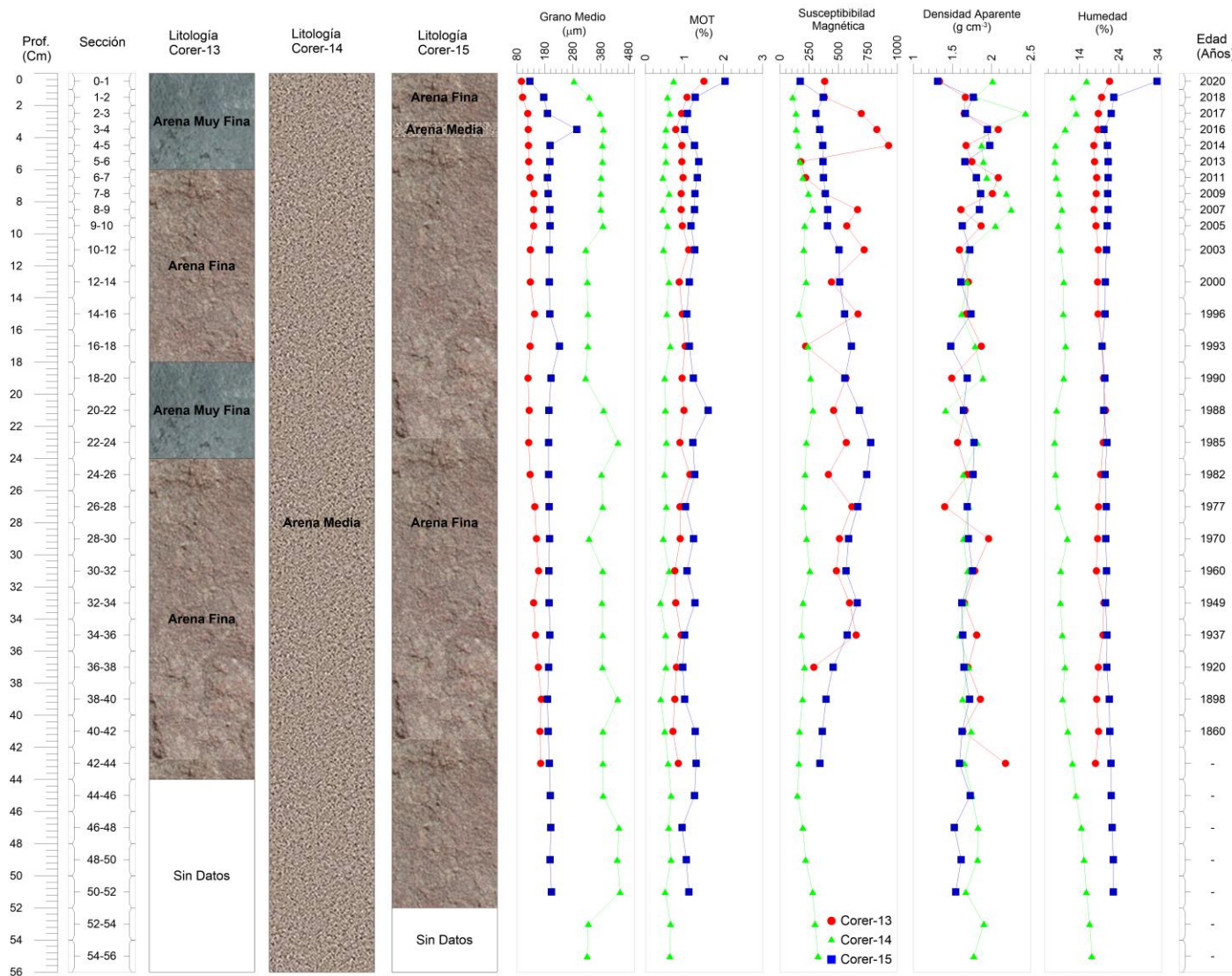


Figura 5. Distribución vertical de la litología, tamaño medio de grano medio, materia orgánica total (MOT), susceptibilidad magnética densidad aparente y humedad de los testigos C-13, C-14 y C-15 de la Bahía Quintero-Puchuncaví.

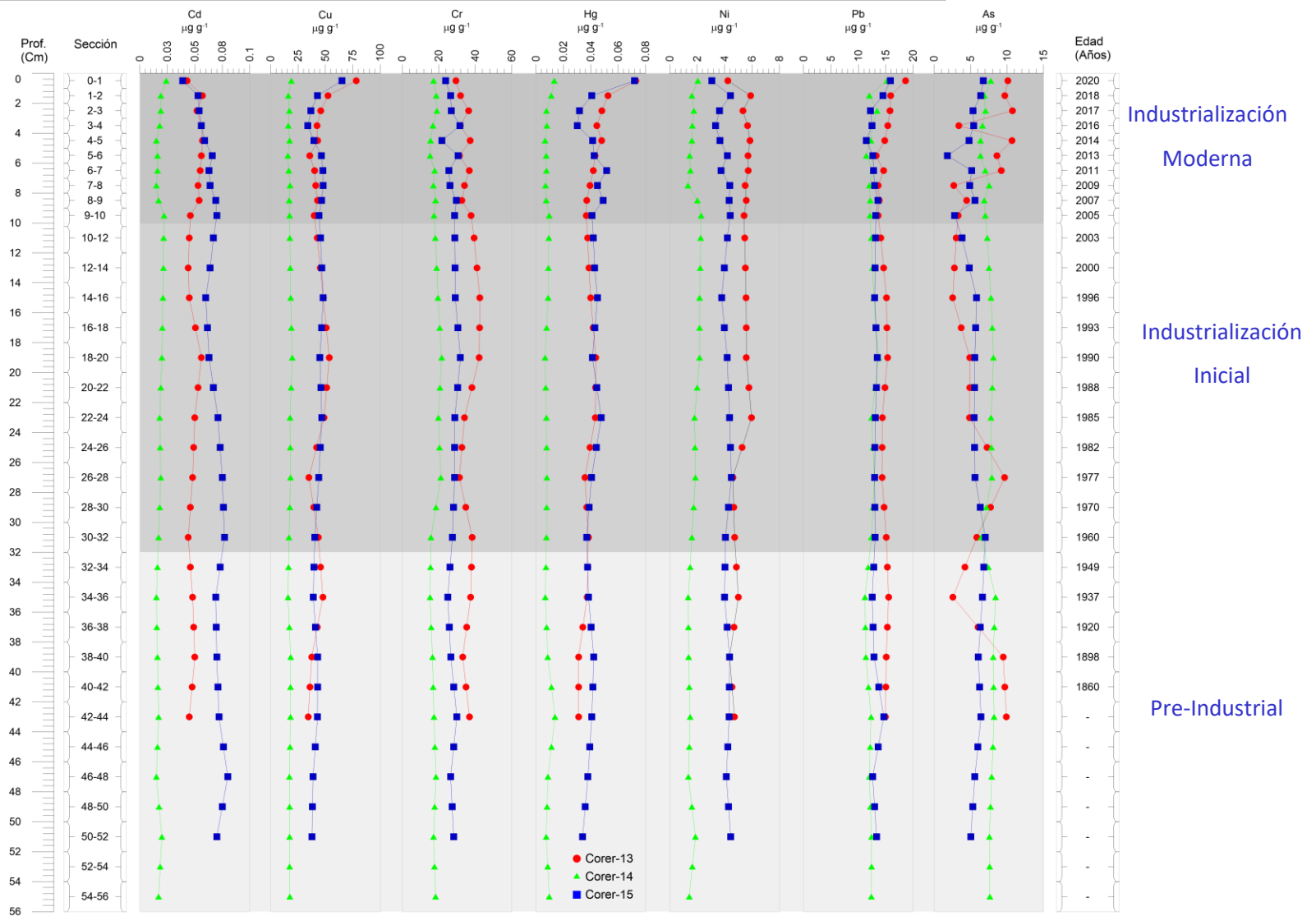


Figura 6. Distribución vertical de los metales y metaloides evaluados en la columna de sedimentos de la Bahía Quintero-Puchuncaví.

4.2.- OE2. “Establecer la Geocronología de los Sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví”. a) Realizar análisis de laboratorio a las muestras recopiladas y b) Sistematizar la información entregada por el laboratorio, analizar y presentar los resultados de distribución vertical de la edad de los sedimentos de la bahía de Quintero.

4.2.1.- Distribución de ^{210}Pb y ^{226}Ra

Los resultados de las mediciones de la actividad de los radioisótopos ^{210}Pb y ^{226}Ra para los diferentes estratos de los testigos colectados en la columna de sedimento de la bahía de Quintero-Puchuncaví se presentan en la Tabla 6 y la distribución vertical de actividad versus profundidad en la Figura 7. En las 8 secciones en las cuales no se cuantificaron las actividades de ^{210}Pb , se realizó una interpolación lineal para obtener la distribución continua a lo largo del testigo.

En la Tabla 6 se aprecia que las actividades de ^{210}Pb para los testigos C-14 y C-15, en general fue baja, variando en un rango estrecho, *i.e.*, entre 0,680 y 0,756 dpm g^{-1} para el testigo C-14 y 0,934 y 0,622 dpm g^{-1} para el testigo C-15. La distribución vertical con la profundidad presentó un comportamiento sin un patrón definido, lo que sugiere un alto grado de mezcla en los sedimentos presentes en estos testigos, lo que fue utilizado como un criterio de exclusión para su posterior tratamiento en la obtención de exceso de ^{210}Pb y, por lo tanto, la geocronología. La actividad de las secciones de ^{226}Ra analizadas para ambos testigos variaron aproximadamente en forma constante, ya que la misma depende únicamente del decaimiento radioactivo de este radionúclido perteneciente a la serie natural del ^{238}U , salvo en superficie donde presentaron sus máximos valores de actividad de ^{226}Ra .

Para el testigo C-13 las actividades del ^{210}Pb permitieron observar una disminución exponencial con la profundidad, lo que de acuerdo con la condición radiactiva de este elemento corresponde al decaimiento del radioisótopo con respecto al tiempo lo que se compara con la base del testigo (Lepane *et al.*, 2007), aunque en ciertas secciones se registraron leves aumentos de la actividad. El decaimiento se observó con mayor claridad en los primeros 10 centímetros del testigo, con cierta variabilidad que podría ser asociable a los procesos de mezcla que están expuestos los sedimentos superficiales ya sea por bioperturbación y/o resuspensión (Núñez, 2010). Posteriormente, bajo este nivel se

evidenció un descenso en la actividad hasta la sección 26-28 del testigo, donde se registró un nuevo incremento en el valor de la actividad de ^{210}Pb , posterior a este máximo, el descenso en la actividad fue gradual hasta el final del testigo con un valor mínimo de actividad de $0,653 \text{ dpm g}^{-1}$ en su última sección. Las seis secciones analizadas para ^{226}Ra presentaron actividades aproximadamente constantes, excepto en superficie donde presentó su máximo valor, por lo que se utiliza el valor promedio de ^{226}Ra para determinar la distribución vertical del exceso en la actividad de ^{210}Pb (Hermanson 1991; Lepane *et al.*, 2007). Con esto se pudo realizar una datación radiogeocronológica lo que permite estimar una tasa de sedimentación (Appleby y Oldfield, 1978).

4.2.2.- Geocronología de los testigos de sedimentos

Para estimar las edades radiogeocronológica de los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví se requirió analizar los perfiles de ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$). Para ello se utilizó el modelo de Tasa de Flujo Constante (Constant Rate of Supply", CRS) que fue originalmente propuesto por Goldberg y Koide (1962) y desarrollado por (Appleby y Oldfield (1978). El modelo CRS considera las siguientes asunciones:

- i) Existe un flujo constante de ^{210}Pb atmosférico hacia el sistema.
- ii) El $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ no presenta movilidad post-depositacional en el sedimento.
- iii) No hay pérdida de ^{210}Pb desde el sedimento hacia la columna de agua, los sedimentos son considerados como un sistema cerrado (Bernal *et al.*,2010).

El modelo CRS asume que el $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ es suministrado al sedimento de forma constante, considerando los efectos en la variación de velocidad de sedimentación y de la compactación del sedimento y variaciones en el tamaño del grano, lo que provee una noción temporal en la tasa de sedimentación. (Appleby y Oldfield, 1978). Consecuentemente, el modelo CRS es apropiado para la obtención de edades en ambientes complejos como lo son estuarios y/o como en este caso, bahías (Neves *et al.*,2014).

La actividad del $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, no mantenido por el decaimiento del padre ^{226}Ra , presentó una tendencia exponencial negativa en el perfil de profundidad (Figura 7, Tabla 8), por lo que resultó adecuado utilizar el ^{210}Pb para la estimación de edades, ya que no hay evidencia de remobilización del $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ luego de su depositación (Sánchez-Cabeza *et al.*,2012).

Tabla 6. Datos Radio geoquímicos en testigos colectados en la Bahía Quintero-Puchuncaví.

| Sección cm | CORER-13 | | CORER-14 | | CORER-15 | |
|---------------|--|--|--|--|--|--|
| | ²¹⁰ Pb dpm g ⁻¹ | ²²⁶ Ra dpm g ⁻¹ | ²¹⁰ Pb dpm g ⁻¹ | ²²⁶ Ra dpm g ⁻¹ | ²¹⁰ Pb dpm g ⁻¹ | ²²⁶ Ra dpm g ⁻¹ |
| 0-1 | 1,042 | *** | 0,700 | *** | 0,780 | *** |
| 1-2 | 0,880 | 0,844 | 0,752 | 0,689 | 0,719 | 0,746 |
| 2-3 | 0,880 | *** | 0,570 | *** | 0,662 | *** |
| 3-4 | 0,846 | *** | 0,697 | *** | 0,882 | *** |
| 4-5 | 0,842 | 0,648 | 0,528 | 0,536 | 0,696 | 0,678 |
| 5-6 | 0,924 | *** | 0,557 | *** | 0,771 | *** |
| 6-7 | 0,909 | *** | 0,504 | *** | 0,808 | *** |
| 7-8 | 0,888 | 0,604 | 0,703 | 0,498 | 0,836 | 0,519 |
| 8-9 | 0,901 | *** | 0,624 | *** | 0,808 | *** |
| 9-10 | 0,856 | *** | 0,502 | *** | 0,693 | *** |
| 10-12 | 0,841 | *** | 0,587 | *** | 0,716 | *** |
| 12-14 | 0,826 | *** | 0,672 | *** | 0,739 | *** |
| 14-16 | 0,812 | *** | 0,756 | *** | 0,761 | *** |
| 16-18 | 0,772 | *** | 0,641 | *** | 0,771 | *** |
| 18-20 | 0,733 | *** | 0,526 | *** | 0,780 | 0,532 |
| 20-22 | 0,739 | 0,577 | 0,607 | *** | 0,780 | *** |
| 22-24 | 0,745 | *** | 0,688 | *** | 0,779 | *** |
| 24-26 | 0,794 | *** | 0,627 | *** | 0,715 | *** |
| 26-28 | 0,842 | *** | 0,567 | *** | 0,651 | *** |
| 28-30 | 0,813 | *** | 0,595 | *** | 0,638 | *** |
| 30-32 | 0,783 | 0,583 | 0,624 | 0,512 | 0,624 | 0,479 |
| 32-34 | 0,762 | *** | 0,624 | *** | 0,779 | *** |
| 34-36 | 0,740 | *** | 0,624 | *** | 0,934 | *** |
| 36-38 | 0,719 | *** | 0,658 | *** | 0,884 | *** |
| 38-40 | 0,697 | *** | 0,692 | *** | 0,834 | *** |
| 40-42 | 0,675 | *** | 0,719 | *** | 0,813 | *** |
| 42-44 | 0,653 | 0,589 | 0,746 | 0,524 | 0,792 | 0,507 |
| 44-46 | | | 0,680 | *** | 0,707 | *** |
| 46-48 | | | 0,615 | *** | 0,622 | *** |
| 48-50 | | | 0,616 | *** | 0,655 | *** |
| 50-52 | | | 0,618 | *** | 0,688 | 0,48 |
| 52-54 | | | 0,626 | *** | | |
| 54-56 | | | 0,633 | 0,508 | | |

***: No Analizado

El cálculo del ²¹⁰Pb_{xs}, que proviene principalmente de la depositación atmosférica directa, utilizado para el fechado y cálculos de tasa de sedimentación, se determinó en el testigo C-13, que es el único de los tres testigos recolectados que presentó decaimiento exponencial

en su distribución vertical. Para ello, se restó de la actividad del ^{210}Pb el aportado por su padre ^{226}Ra , estimado como el promedio de la actividad de ^{226}Ra medido a lo largo del testigo y el último valor de actividad de ^{210}Pb en la base del testigo C-13, donde se hicieron comparables, indicando que se ha alcanzado el equilibrio secular con ^{226}Ra en la columna de sedimento y, por lo tanto, las actividades superiores a este valor de equilibrio se consideran como exceso (Appleby y Oldfield, 1978). Con esto se establece que, en la base del testigo, la actividad del ^{210}Pb proviene solamente del decaimiento del padre ^{226}Ra presente en el mismo sedimento (Sánchez-Cabeza, *et al.*, 2012).

El inventario en exceso del ^{210}Pb se calculó realizando la suma desde la sección más profunda hasta la superficie. De acuerdo con esto, se estimó que las edades de los sedimentos del testigo C-13 alcanzaron una edad máxima en la base del testigo de 160 años. Además, en base al modelo CRS de geocronología contempló una tasa de sedimentación variable en el tiempo, lo que refleja mejor la complejidad de la dinámica del sistema, como son las bahías (Neves *et al.*, 2014). El promedio de la tasa de sedimentación (TS) para este estudio fue de $0,629 \text{ cm año}^{-1}$, el cual resultó ser comparable con valores obtenidos para diversos sistemas acuáticos en el mundo (Tabla 7).

Tabla 7. Tasas de acumulación obtenidas desde referencias locales e internacionales para sedimentos de bahías costeras.

| Localidad | País | TS (cm/año) | Referencia |
|---------------------|---------|-------------|-----------------------------------|
| Bahía Coronel | Chile | 0,2 - 1,8 | Chandia <i>et al.</i> , 2021* |
| Bahía Mejillones | Chile | 0,15 - 0,17 | Vargas <i>et al.</i> , 2004, 2005 |
| Bahía Mejillones | Chile | 0,16 - 0,20 | Caniupan <i>et al.</i> , 2009 |
| Bahía Concepción | Chile | 0,20 - 0,13 | Salamanca y Camaño, 1994 |
| Región de fiordos | Chile | 0,14 - 0,47 | Salamanca y Jara, 2003 |
| Bahía Guanabara | Brasil | 0,86 - 2,2 | Gelen <i>et al.</i> , 2003 |
| Bahía San Francisco | USA | 0,18 - 2,8 | Watson E. B., 2004 |
| Bohai Sea | China | 0,48 - 0,64 | Liang <i>et al.</i> , 2018 |
| Isla Saint Thomas | USA | 0,11 - 0,87 | Gaboury Benoit, 2018 |
| Bahía Guanbara | Brasil | 0,86 - 2,2 | Godoy <i>et al.</i> , 1998 |
| Marenes-Oleron | Francia | 0,26 - 0,95 | Gouleau <i>et al.</i> , 2000 |

*Datos no publicados

El testigo de sedimento al ser datado se debe considerar como una primera aproximación a la evolución temporal que ha experimentado la bahía Quintero los últimos 160 años, y ser utilizado como un registro de los cambios que han ocurrido en los cuerpos de agua que tienen información histórica valiosa sobre las características ambientales en el momento de

su incorporación a la columna de sedimentos y así ser relacionado con las actividades antropogénicas (Appleby y Oldfield, 1978, Binford y Brenner, 1986) en una perspectiva temporal.

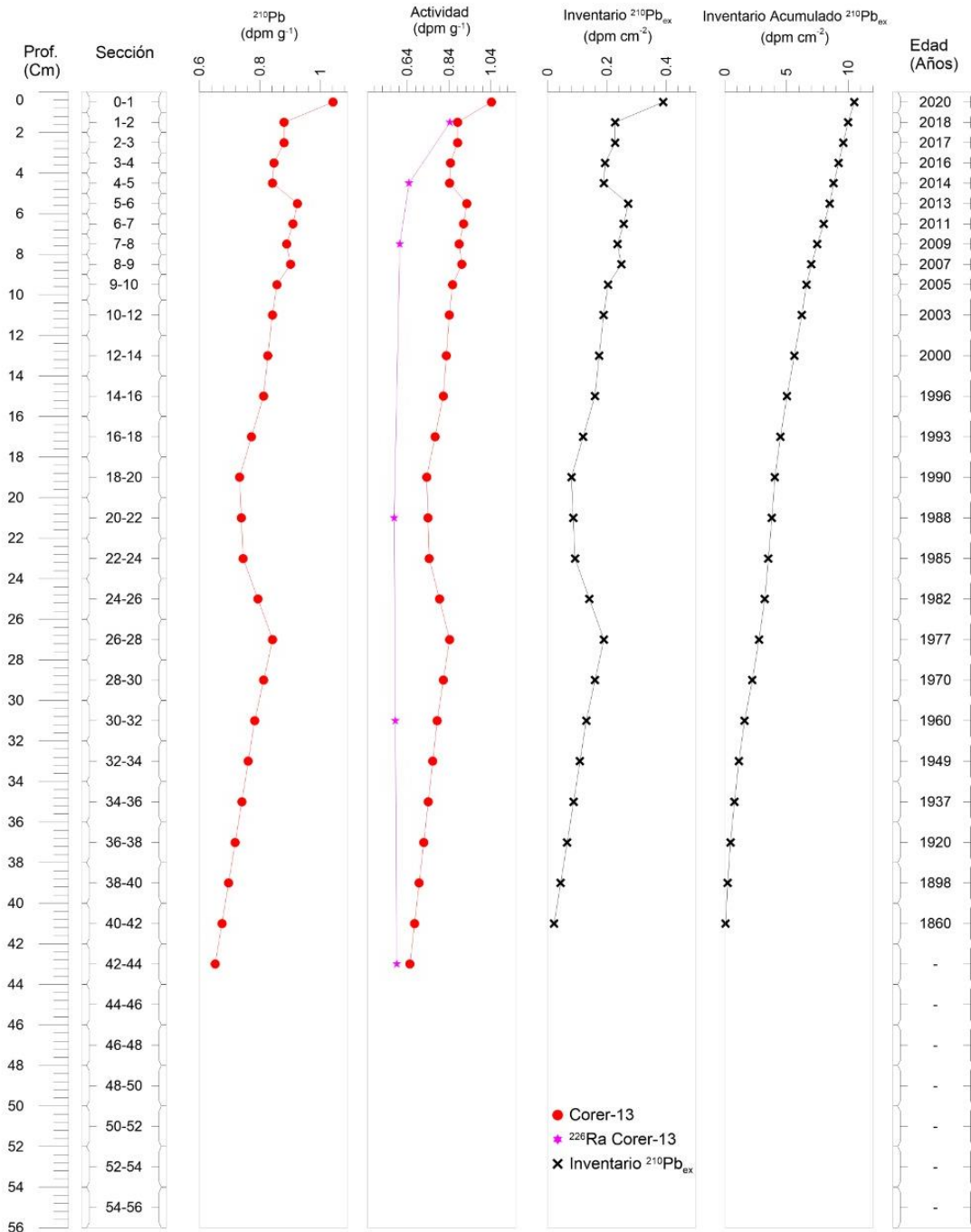


Figura 7. Perfiles de actividad de ^{210}Pb en el testigo C-13, Actividad de ^{210}Pb y ^{226}Ra C13, inventario $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ e Inventario acumulado de $^{210}\text{Pb}_{\text{XS}}$ de C-13, obtenidos en Bahía Quintero-Puchuncaví

Tabla 8. Datos de la geocronología obtenida para el testigo C-13, de acuerdo con el modelo de edad CRS en la Bahía Quintero-Puchuncaví.

| Sección cm | ^{210}Pb dpm g ⁻¹ | $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ dpm cm ⁻² | Inv.Ac $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ dpm cm ⁻² | Edad años | Año |
|---------------|--|---|--|--------------|-----------|
| 0-1 | 1,042 | 0,519 | 10,488 | 0 | 2020 |
| 1-2 | 0,880 | 0,379 | 9,968 | 2 | 2018 |
| 2-3 | 0,880 | 0,375 | 9,589 | 3 | 2017 |
| 3-4 | 0,846 | 0,404 | 9,214 | 4 | 2016 |
| 4-5 | 0,842 | 0,317 | 8,810 | 6 | 2014 |
| 5-6 | 0,924 | 0,475 | 8,493 | 7 | 2013 |
| 6-7 | 0,909 | 0,535 | 8,018 | 9 | 2011 |
| 7-8 | 0,888 | 0,474 | 7,482 | 11 | 2009 |
| 8-9 | 0,901 | 0,400 | 7,008 | 13 | 2007 |
| 9-10 | 0,856 | 0,380 | 6,609 | 15 | 2005 |
| 10-12 | 0,841 | 0,601 | 6,228 | 17 | 2003 |
| 12-14 | 0,826 | 0,592 | 5,628 | 20 | 2000 |
| 14-16 | 0,812 | 0,534 | 5,036 | 24 | 1996 |
| 16-18 | 0,772 | 0,448 | 4,502 | 27 | 1993 |
| 18-20 | 0,733 | 0,239 | 4,054 | 30 | 1990 |
| 20-22 | 0,739 | 0,287 | 3,815 | 32 | 1988 |
| 22-24 | 0,745 | 0,289 | 3,528 | 35 | 1985 |
| 24-26 | 0,794 | 0,476 | 3,238 | 38 | 1982 |
| 26-28 | 0,842 | 0,531 | 2,762 | 43 | 1977 |
| 28-30 | 0,813 | 0,628 | 2,231 | 50 | 1970 |
| 30-32 | 0,783 | 0,466 | 1,604 | 60 | 1960 |
| 32-34 | 0,762 | 0,360 | 1,138 | 71 | 1949 |
| 34-36 | 0,740 | 0,318 | 0,778 | 83 | 1937 |
| 36-38 | 0,719 | 0,224 | 0,460 | 100 | 1920 |
| 38-40 | 0,697 | 0,164 | 0,236 | 122 | 1898 |
| 40-42 | 0,675 | 0,072 | 0,072 | 160 | 1860 |
| 42-43 | 0,653 | --- | --- | ND | ND |

Inv. Ac. $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$: Inventario acumulado, Nd: No determinada; ND: No Detectado.

4.2.3.- Antecedentes históricos de la industrialización de la Bahía Quintero-Puchuncaví

La Bahía Quintero-Puchuncaví tiene una intensa industrialización, formando una zona en la cual se agrupan actividades de distintos rubros en un espacio territorial limitado, destinado exclusivamente a este fin (Barrera, 2015; Buschmann & Jacob, 2009). Este

espacio debe contar con fuentes de energía para el funcionamiento de las empresas, transporte, mano de obra, áreas de servicios públicos (abastecimiento eléctrico y de agua), plantas de tratamiento de desechos por lo cual está sujeto a fiscalización por parte del Estado en materias de emisiones, cuidado del medio ambiente, índices de productividad, entre otros (Barrera, 2015). Todo este desarrollo comenzó a finales de la década de los años 50, del siglo pasado con la instalación de la Fundición Ventanas.

Al observar el perfil de la actividad de ^{210}Pb del testigo C-13 se aprecia que en el centímetro 26 hubo un aumento de la actividad, la que equivale al año 1977, coincidente con la puesta en marcha de la Termoeléctrica Ventanas con una potencia de 220 MW de funcionamiento. Posteriormente, existe un grupo de hitos de importancia temporal que ocurren desde la década del 80 al 90 con el Terminal Marítimo Oxiquim, la instalación de la Planta de Recuperación de ácido sulfúrico (División CODELCO Ventanas). El Puerto de Ventanas pasa a ser Puerto Ventanas S.A. y se amplía su capacidad. Se construye el terminal marítimo GASMAR para distribución de gas licuado, se construyen bodegas para gráneles limpios de Puerto Ventanas S.A. y la empresa MELON construye un domo de aislación (Buschmann & Jacob, 2009). Todos estos hitos de origen industrial (Tabla 9) coincidieron con el aumento en la actividad de ^{210}Pb desde los 19 centímetros de profundidad, lo que según la geocronología calculada equivale al año 1990.

La generación de energía eléctrica en Chile es producida principalmente a partir de centrales hidroeléctricas y de plantas térmicas. Estas últimas utilizan diversos combustibles que pueden originarse desde biomasa (leña, desechos orgánicos), o bien derivados de combustibles fósiles como: petróleo, gas y carbón (Barrera, 2015). Es el caso específico de la bahía de Quintero, donde el rápido crecimiento del parque termoeléctrico en la costa a partir de la segunda mitad de la década del 2000 conlleva al aumento de los combustibles quemados en calderas de plantas térmicas, más precisamente es el caso del carbón, incremento que corresponde a un periodo que va desde el año 2008 a 2013 (Barrera, 2015; CEDEC- SIC, 2000 y 2013), lo que trae como consecuencia un incremento de emisiones a la atmósfera. Este incremento podría estar relacionado directamente los valores de actividad ^{210}Pb en los primeros 10 centímetros del testigo C-13, donde se visualizó un aumento en la sección de los 8 a 9 centímetros y 5 a 6 centímetros de profundidad, que equivalen a los años 2007 y 2013, respectivamente.

Tabla 9. Historia industrial cronológica de la Bahía Quintero-Puchuncaví entre los años 1944 y 2015.

| Año | Hito |
|------|--|
| 1944 | Creación de la comuna de Puchucaví (Ley N°7.866). |
| 1954 | Se instala terminal ENAP en Bahía de Quintero. |
| 1958 | Instalación de Chilectra. |
| 1961 | Inauguración del Parque Industrial Ventanas. |
| 1964 | Puesta en marcha de la fundición ventanas (30 de septiembre). |
| 1964 | Inauguración termoeléctrica a Carbón Ventanas (21 de diciembre) de Chile Gener. |
| 1966 | Puesta en marcha de termoeléctrica ventana Impotencia 120MW. Primera Chimenea de termoeléctrica. |
| 1966 | Inicio de unidad de electro refinamiento de cátodos de cobre en refinería ventanas y planta de metales nobles. |
| 1966 | Se construye puerto ventanas (Chile Gener). |
| 1968 | La chimenea de ENAMI Ventanas se alarga a 70m. |
| 1977 | Puesta en marcha de termoeléctricas ventanas potencia de 220Mw. Funciona a vapor y carboncillo. |
| 1979 | Se inaugura nuevo circuito de refinación-Planta ENAMI. |
| 1980 | Terminal marítimo Oxiquim. |
| 1983 | Puesta en marcha del convertido teniente que reemplaza al antiguo horno de reverbero. |
| 1991 | Instalación Planta de Recuperación de ácido sulfúrico (División CODELCO Ventanas). |
| 1991 | Puerto Ventanas pasa a ser Puerto Ventanas S.A. y se amplía su capacidad. |
| 1991 | ENAMI y GENER proponen red de monitoreo de SO ₂ y MP10. |
| 1992 | Se construye el terminal marítimo GASMAR para distribución de gas licuado. |
| 1994 | Se produce el traspaso del muelle de Chile Gener a Puerto Ventanas. |
| 1995 | Se construye bodega par gránales limpios de Puerto Ventanas S.A. |
| 1996 | Empresa MELON Construye domo de asilamiento. |
| 2000 | Se construye terminal de asfaltos y Combustibles Cordex (almacena y distribuye petróleo y derivados). |
| 2001 | Se construye bodega de almacenamiento de cobre en Puerto ventanas (Contrato con Anglo American). |
| 2004 | COPEC Planta de lubricantes Loncura. |
| 2006 | Se instala Central Termoeléctrica Nueva Ventanas (GENER). |
| 2008 | Se instala Central Termoeléctrica Campiche (empresa eléctrica Campiche). |
| 2009 | Entra en funcionamiento GNL Quintero, terminal marítimo de gasificación de gas licuado (ENAP). |
| 2010 | Entra en funcionamiento la termoeléctrica Nueva Ventanas (Gener). |
| 2011 | Promulgación Norma de Emisiones para Termoeléctricas (D.S. N°13/2011). |
| 2013 | Ampliación Terminal marítimo Quintero Oxiquim S.A. |
| 2014 | Derrame de petróleo ENAP en Bahía de Quintero (38 mil litros). |
| 2015 | Derrame de petróleo desde terminal Marítimo d ENAP. |
| 2015 | Se declara zona satura de MP25 y latente en MP10, D.S N°10/2015. |

Fuente: Buschmann & Jacob, 2009; Espinosa, 2015; Barrer, 2015 y Jiménez & Manosalva, 2015.

4.3.- OE3. “Analizar si las concentraciones de metales pesados en los sedimentos en la bahía de Quintero han aumentado sobre los valores locales preindustriales”.

Establecer mediante análisis estadísticos, uso de indicadores, entre otros, si existe evidencia del incremento de concentraciones de metaloides, metales pesados y otros compuestos en los sedimentos de la bahía de Quintero-Puchuncaví como consecuencia de las diversas actividades industriales y antrópicas históricamente realizadas en el territorio.

Para cumplir con el objetivo de establecer el aumento de las concentraciones de los metales antes del desarrollo industrial de la bahía, se utilizaron índices basados en la abundancia de los metales analizados, respecto a niveles de referencia preindustriales que consideran las variaciones en los aportes producto de fuentes naturales (litogénicas).

4.3.1.- Índices de Sedimentos Superficiales

4.3.1.1.- Índice de Geoacumulación

El análisis del índice de geoacumulación “Igeo” (Tabla 10) fue evaluado para todas las estaciones superficiales, y referido a las concentraciones preindustriales (Tabla 5) obtenidas desde los perfiles de los testigos (C-13, C-14, C-15). Los resultados del Igeo (Tabla 10) indican que algunas estaciones de los sedimentos superficiales (23,8%) presentaron un incremento menor para algunos de los metales, entre ellos el Mercurio en las estaciones S-2, S-3, S-4, S-5, S-7, S-8 y S-12, Cobre en S-5 y S-12, Níquel en S-1, S-2, S-4, S-11 y S-12 y Arsénico en S-2, S-3, y S-4. Solo la estación S-12 presentó un Igeo de 3,06 para el Cadmio clasificándolo como moderadamente contaminado.

Tabla 10. Valores obtenidos para el índice de geoacumulación (Igeo), para los 7 metales extraíbles analizados en los sedimentos superficiales de la Bahía Quintero-Puchuncaví.

| Igeo | Cd | Cu | Cr | Hg | Ni | Pb | As |
|------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|-------------|
| S-1 | -0,39 | -1,24 | -0,36 | -0,54 | 0,27 | -1,10 | -0,06 |
| S-2 | -0,77 | -0,53 | -1,10 | 1,01 | 0,07 | -1,39 | 0,13 |
| S-3 | -0,94 | -1,10 | -1,35 | 0,49 | -0,03 | -1,71 | 0,23 |
| S-4 | -0,58 | -0,07 | -0,11 | 0,64 | 0,36 | -0,99 | 0,07 |
| S-5 | -0,49 | 0,66 | -1,14 | 0,34 | -0,08 | -0,61 | -0,77 |
| S-6 | -0,33 | -0,13 | -0,39 | 0,14 | -0,41 | -1,53 | -0,76 |
| S-7 | -0,46 | -0,49 | -0,76 | 0,27 | 0,05 | -1,14 | -0,17 |
| S-8 | -0,73 | -0,60 | -1,04 | 0,13 | -0,25 | -1,30 | -0,29 |
| S-9 | -0,91 | -0,61 | -0,78 | -0,33 | -0,06 | -1,33 | -0,15 |
| S-10 | -0,94 | -1,07 | -0,87 | -1,57 | -0,25 | -1,69 | -0,29 |
| S-11 | -0,49 | -1,11 | -0,59 | -0,67 | 0,10 | -1,63 | -0,66 |
| S-12 | 3,06 | 0,14 | -0,27 | 0,30 | 0,90 | -1,13 | -0,58 |

4.3.1.2.- Índice de Carga de Contaminantes

El cálculo del índice de carga de contaminantes (PLI) se presenta en la Tabla 11 donde se puede observar que este se presentó solo en 7 estaciones con valores mayores a 1,0, lo que indica que estos sedimentos poseen una carga leve de metales. Solo destaca la Estación S-12 que presentó el mayor valor de PLI (1,91), pero aun dentro de la misma categoría, en tanto que las restantes estaciones fueron consideradas de acuerdo con este índice como no contaminadas o en ausencia de contaminantes.

Tabla 11. Índice de Carga de Contaminantes (PLI; Pollution Load Index), para las 12 estaciones de sedimentos superficiales analizadas en la Bahía Quintero-Puchuncaví.

| Estación | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | S-6 | S-7 | S-8 | S-9 | S-10 | S-11 | S-12 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PLI | 1,07 | 1,16 | 0,97 | 1,40 | 1,22 | 1,07 | 1,15 | 1,00 | 0,99 | 0,77 | 0,91 | 1,91 |

4.3.2.- Índices testigos de Sedimentos

4.3.2.1.- Factor de enriquecimiento

El Factor de Enriquecimiento (FE) para los testigos obtenidos en la Bahía Quintero-Puchuncaví (Tabla 12) es informado por estratos, los cuales fueron determinados utilizando los criterios geoquímicos, históricos y estadísticos anteriormente descritos en el documento. Estos tres estratos de sedimentos corresponden a: i) la capa superior entre la superficie y 10 cm de profundidad en la columna de sedimento y representa el “desarrollo industrial actual de la bahía”; b) un estrato intermedio ubicado entre los 10 y 33 cm de profundidad que se ha identificado como representativo del “inicio del desarrollo industrial” y un estrato de fondo entre los 33 cm y la base del testigo considerado como característico del “periodo pre-industrial o de referencia (“background”) local de la bahía. Considerando la división de la columna de sedimentos de la bahía en tres estratos, los FE calculados se pueden informar como promedio para cada metal en cada estrato. Así, los resultados del FE promedio por estrato para los testigos C-13 y C-15 indican que los sedimentos poseen, en general, para toda la columna sedimentos un enriquecimiento mínimo a leve, con un rango de variación entre 0,7 a 1,6, en tanto que los sedimentos del testigo C-14, en general, presentan sedimentos empobrecidos o con menor contenido de metales que el nivel local de referencia promedio (ver Tabla 5), con un rango de variación entre 0,3 y 1,2 de este FE.

De las secciones del testigo C-13 se puede mencionar que el Hg y As presentan un mayor FE en la sección superior, correspondiente a la industrialización moderna, en tanto que Cu, Cr y Ni presentan mayores FE en la sección intermedia de industrialización inicial y el Cd y Pb presentan FE homogéneos en toda la columna con leves variaciones entre 1,0 a 1,1. Por otra parte, en el testigo C-14 el FE no muestra variación vertical en cuanto al contenido de metales de acuerdo con este índice. Así se puede apreciar que el Cd, Cu, Hg y Pb, no presentan diferencias entre los tres estratos descritos y el Cr y As muestran un FE levemente mayor (i.e., +0,1) en el estrato intermedio equivalente al periodo de industrialización inicial, solo el Ni muestra un FE mayor en el estrato de industrialización moderna.

Los FE estimados para el Cr en el testigo C-15 no presentan variación entre los estratos, mientras que para el Cu y Hg las capas de industrialización inicial y moderna no presentan

diferencias entre ellas, pero son mayores a aquellos estimados en la capa preindustrial. En tanto, en el estrato de industrialización moderna, el Cd, Ni, Pb y As presentan menores FE que las secciones de industrialización inicial y pre-industrial, reflejando una disminución de las concentraciones de estos metales en los últimos años

Tabla 12. Resumen del factor de enriquecimiento (FE) promediado por estrato, para los metales analizados en los tres testigos de sedimentos obtenidos desde la Bahía Quintero-Puchuncaví.

| FE | Testigo C-13 | | | Testigo C-14 | | | Testigo C-15 | | |
|----|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. |
| Cd | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 1,2 | 1,5 | 1,5 |
| Cu | 1,2 | 1,4 | 1,2 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,3 | 1,3 | 1,2 |
| Cr | 1,1 | 1,4 | 1,3 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Hg | 1,6 | 1,5 | 1,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Ni | 1,3 | 1,5 | 1,3 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 1,0 | 1,2 | 1,1 |
| Pb | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 |
| As | 1,2 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 1,1 | 0,7 | 0,9 | 0,8 |

Ind. M.: Industrialización Moderna / Ind. In.: Industrialización Inicial / Pre-Ind.: Pre – Industrial.

La Figura 8 presenta la distribución vertical de los FE calculados en todas las secciones analizadas para los metales y testigos de sedimentos obtenidos en Bahía Quintero-Puchuncaví. A partir de estos perfiles se puede observar que los FE calculados para el testigo C-14 se encuentran, en general, bajo el nivel 1,0, es decir, no presentan enriquecimiento respecto de las concentraciones locales basales, con excepción del As, metal que presentó bajo los 10 cm un FE levemente mayor, pero que no superó el valor de 1,34 a los 43 cm de profundidad. Por otra parte, los testigos C-13 y C-14 muestran una distribución vertical de los FE similar entre ellos, con máximos en superficie (0 a 4 cm) para el Cu y Hg con valores entre 1,5 a 2,1, mientras que los FE calculados para el resto de los metales varió entre 0,6 y 1,5, con la excepción del As, el cual en los dos testigos presenta un patrón de distribución vertical altamente variable, con valores que en general caen dentro de la categoría de sedimentos empobrecidos (i.e., FE <1), de acuerdo a la escala de clasificación del FE.

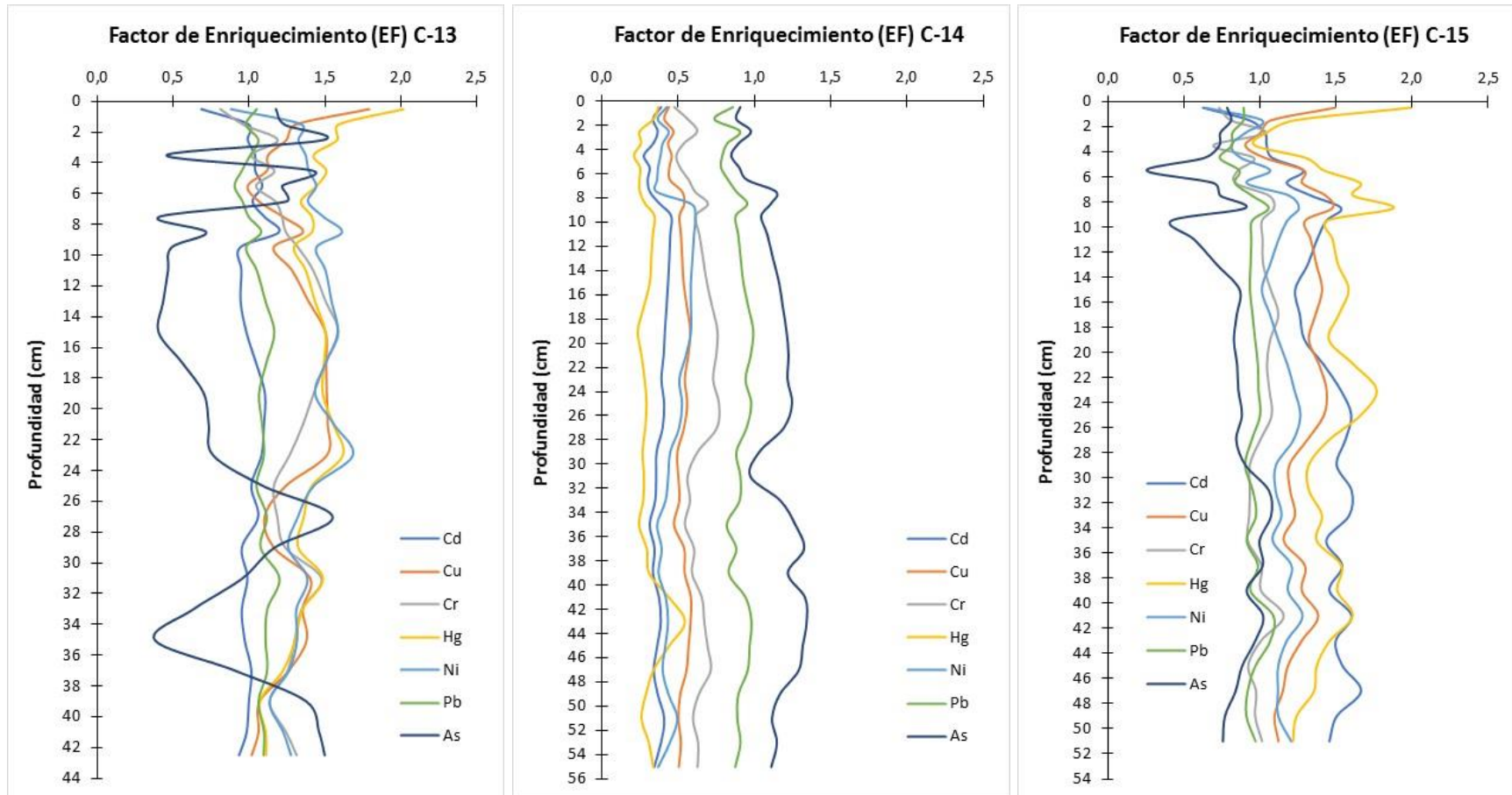


Figura 8. Perfiles de los factores de enriquecimiento (EF) calculados para los metales y testigos de sedimentos recolectados en Bahía Quintero-Puchuncaví.

4.3.2.2.- Índice de Geoacumulación

Los resultados obtenidos a partir del cálculo del índice de geoacumulación (Igeo), en general, presentan el mismo patrón que el observado con los FE, donde solo se apreció que este índice para el caso del Hg en el estrato superior (Periodo de Industrialización Moderna) de los testigos C-13 y C-15, presentaron los mayores registros de Igeo (i.e., 0,22 y 0,02) y el Cd presentó el mayor valor en el estrato basal pre-industrial con un Igeo de 0,03. Estos tres valores que representan el 4,8% de los Igeo calculados permite clasificar estos sedimentos como levemente contaminados de acuerdo con las categorías establecidas por este índice (ver punto 3.6.2). Los restantes resultados, fueron todos ellos negativos y que corresponden al 95,2% de los datos calculados, indican que los sedimentos se encuentran en la categoría de No Contaminados de acuerdo con la escala de clasificación de este índice.

Tabla 13. Resumen de los resultados obtenidos del índice de Geoacumulación (Igeo), para los metales y estratos analizados en los tres testigos de sedimentos obtenidos desde la Bahía Quintero-Puchuncaví.

| Igeo | Testigo C-13 | | | Testigo C-14 | | | Testigo C-15 | | |
|------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. |
| Cd | -0,45 | -0,61 | -0,62 | -1,96 | -2,12 | -2,01 | -0,29 | -0,03 | 0,03 |
| Cu | -0,13 | -0,18 | -0,34 | -1,55 | -1,55 | -1,56 | -0,18 | -0,26 | -0,37 |
| Cr | -0,35 | -0,18 | -0,25 | -1,24 | -1,26 | -1,27 | -0,61 | -0,63 | -0,61 |
| Hg | 0,22 | -0,09 | -0,33 | -2,35 | -2,32 | -2,34 | 0,02 | -0,05 | -0,18 |
| Ni | -0,04 | -0,08 | -0,26 | -1,60 | -1,84 | -1,79 | -0,51 | -0,40 | -0,39 |
| Pb | -0,43 | -0,50 | -0,45 | -0,71 | -0,78 | -0,75 | -0,66 | -0,68 | -0,63 |
| As | -0,26 | -1,08 | -0,69 | -0,49 | -0,37 | -0,40 | -1,08 | -0,72 | -0,84 |

Ind. M.: Industrialización Moderna / Ind. In.: Industrialización Inicial / Pre-Ind.: Pre – Industrial.

Los perfiles verticales del Índice de Geoacumulación (Figura 9), muestran que la distribución vertical de este índice en los testigos C-13 y C-15 presentan un patrón comparable entre ellos, donde la mayoría de los Igeo se clasifican en la categoría de sedimentos No Contaminados (Igeo <0), solo en el caso del Cu y Cd en el testigo C-13 y el Cu y Hg en el testigo C-15 presentan valores positivos en superficie (0 a 4 cm), lo que informa de una condición de Contaminación Leve. El testigo C-14 presenta todos los Igeo dentro de la categoría de No Contaminados, dado que para todos los metales los Igeo fueron negativos.

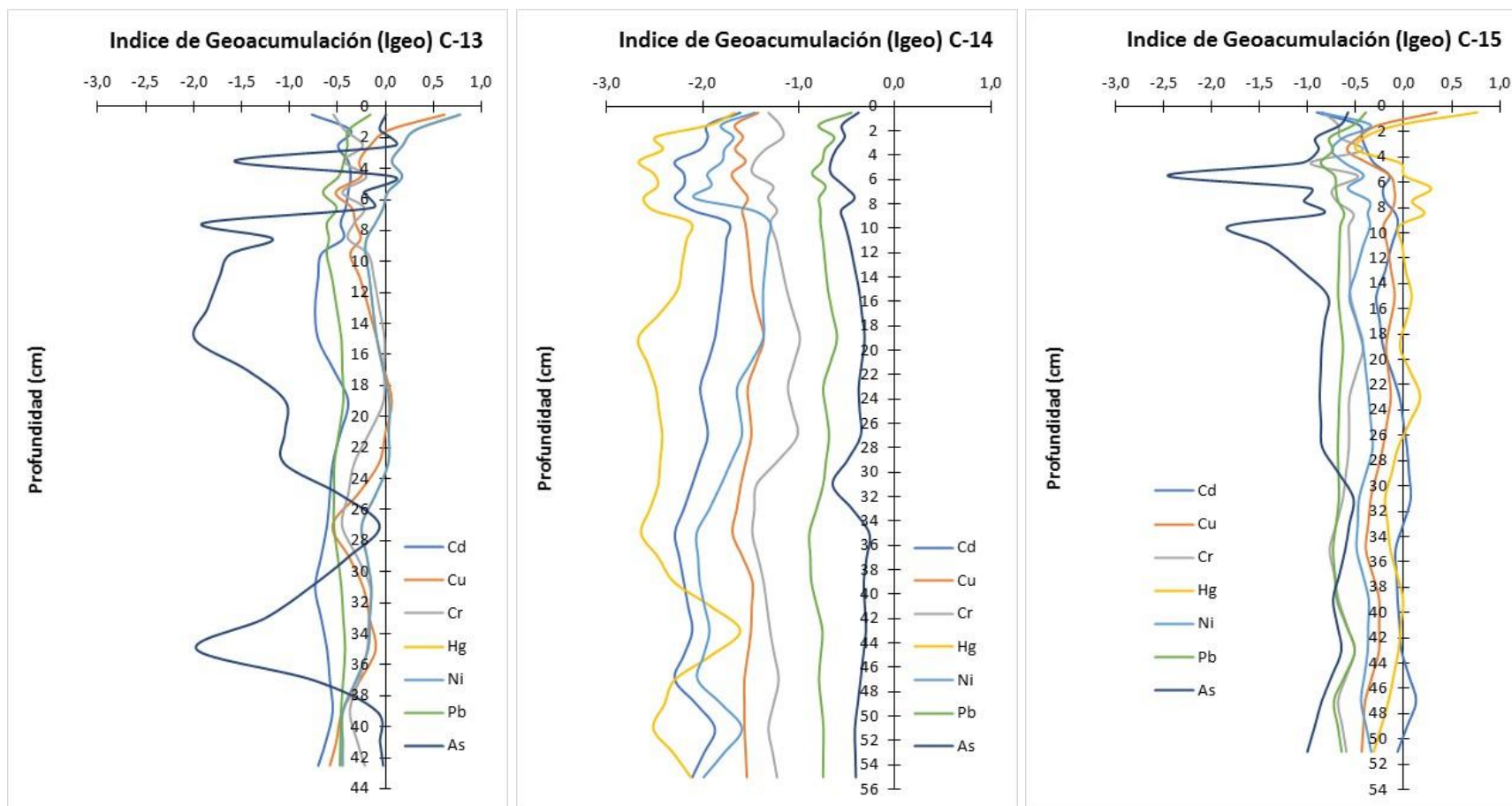


Figura 9. Perfiles verticales de los Índices de Geoacumulación (Igeo) calculados para los metales en los testigos C-13, C-14 y C-15 obtenidos en la Bahía Quintero Puchuncaví

4.3.2.3.- Índice de Carga de Contaminantes (PLI)

El Índice de Carga de Contaminantes (PLI; Pollution Load Index) pondera la concentración de cada metal analizado en una muestra, lo cual permite expresar como un valor único, la carga de contaminantes y su posible impacto. En la Tabla 14 se presentan los valores promedio por estrato para cada uno de los testigos analizados. El PLI del testigo C-13 muestra que la mayor carga de metales está asociada al estrato correspondiente al periodo de industrialización moderna (PLI 1,21), seguido de la sección de industrialización inicial (PLI 1,12) y luego por la sección preindustrial (PLI 1,10). Para el testigo C-14 la carga de metales basado en el PLI es la más baja de los tres testigos analizados, testigo que presenta el mismo patrón de distribución vertical informado para el testigo C-13, donde la mayor carga se establece para la sección de industrialización moderna (PLI 0,61) y la menor carga para la sección preindustrial (PLI 0,59). El PLI informado para el testigo C-15 muestra una tendencia distinta a la informada para los testigos C-13 y C-14, donde la mayor carga de metales se registra en la sección de industrialización inicial (PLI 1,12), seguida por la sección preindustrial (PLI 1,11) y con la menor carga de metales la sección de industrialización moderna (PLI 1,08).

Tabla 14. Índice de Carga de Contaminantes (PLI; Pollution Load Index), para los metales y estratos analizados en los tres testigos de sedimentos obtenidos desde la Bahía Quintero-Puchuncaví.

| PLI | Testigo C-13 | | | Testigo C-14 | | | Testigo C-15 | | |
|-----|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. |
| | 1,21 | 1,12 | 1,10 | 0,61 | 0,58 | 0,59 | 1,08 | 1,12 | 1,11 |

Ind. M.: Industrialización Moderna / Ind. In.: Industrialización Inicial / Pre-Ind.: Pre – Industrial.

En términos generales, los perfiles verticales de PLI mostrados en la Figura 10 permiten señalar que en el testigo C-14 estos sedimentos presentan una condición de ausencia de contaminación para los metales estudiados, mientras que los sedimentos de los testigos C-13 y C-15 presentan valores de este índice permite clasificarlos como sedimentos con una condición de transitoriamente contaminados sobre la base de los siete metales estudiados, con mayores cargas asociadas a la capa superficial de C-13 (0 a 10 cm) y C-14 (0 a 2 cm).

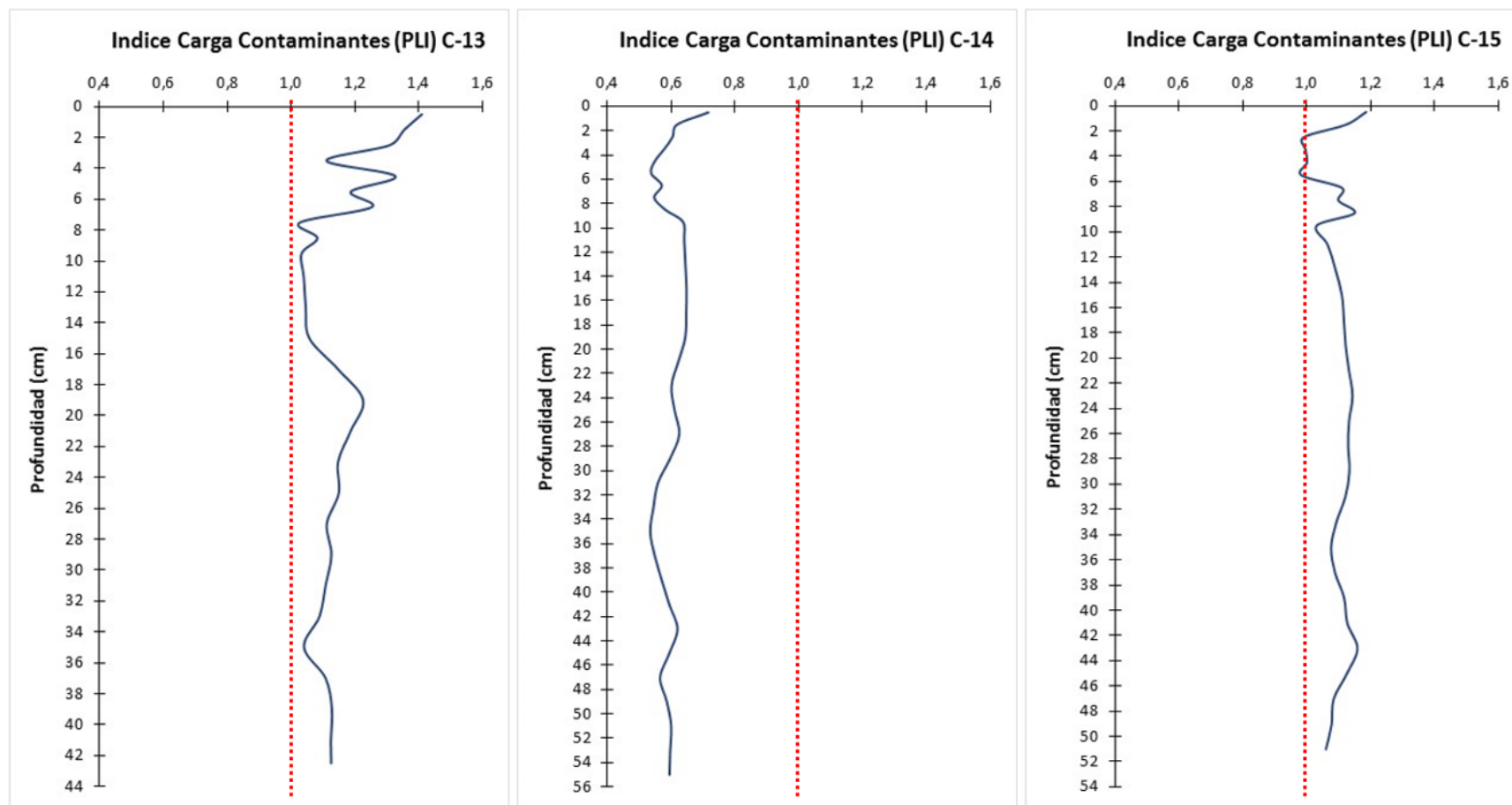


Figura 10. Perfiles obtenidos para el Índice de Carga de Contaminantes (PLI) calculados sobre la base de los metales analizados en los testigos C-13, C-14 y C-15 obtenidos en la Bahía Quintero-Puchuncaví. La línea roja corresponde a límite entre categoría no contaminado a transitoriamente contaminado.

4.3.3.- Análisis estadístico de sedimentos superficiales

En la Tabla 15 se entrega la estadística básica para los parámetros medidos en sedimentos superficiales. A partir de esta información se desprende que el tamaño promedio de grano osciló entre un mínimo de 76 μm y un máximo de 408 μm . El porcentaje de materia orgánica (MOT) en los sedimentos superficiales fue inferior al 2% y dentro de los metales, Cu y Cr fueron los que mostraron las mayores concentraciones ($>17 \mu\text{g/g}$), mientras que el Hg mostró las concentraciones más bajas ($<0,09 \mu\text{g/g}$). La mayor proporción de los parámetros analizados (56%) no presentó distribución normal (valor- $p < 0,05$).

Tabla 15. Resumen de estadística descriptiva de los parámetros analizados en sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví. Nobs: Número de observaciones, Min: Mínimo; Máx: Máximo; Desvest: Desviación estándar, CV%: Coeficiente de variación; Shapiro-Wilk: Prueba de normalidad de Shapiro Wilk, valor-p: Probabilidad asociada a la prueba de normalidad.

| Label | Nobs | Min | Máx | Prom | Desvest | CV% | Shapiro-Wilk | valor-p |
|-------|------|-------|--------|--------|---------|------|--------------|---------|
| TMG | 12 | 76,10 | 408,20 | 161,88 | 83,90 | 52% | 0,6775 | 0,0005 |
| MOT | 12 | 0,76 | 1,94 | 1,18 | 0,31 | 26% | 0,8447 | 0,0316 |
| As | 12 | 5,91 | 11,81 | 8,55 | 2,01 | 24% | 0,9408 | 0,5080 |
| Cd | 12 | 0,04 | 0,61 | 0,09 | 0,16 | 172% | 0,3662 | 0,0000 |
| Cu | 12 | 21,60 | 80,81 | 38,74 | 17,20 | 44% | 0,8601 | 0,0490 |
| Cr | 12 | 16,71 | 39,44 | 26,59 | 7,19 | 27% | 0,9499 | 0,6348 |
| Hg | 12 | 0,01 | 0,09 | 0,05 | 0,02 | 41% | 0,9767 | 0,9669 |
| Ni | 12 | 4,23 | 10,51 | 6,02 | 1,65 | 27% | 0,8084 | 0,0117 |
| Pb | 12 | 6,33 | 13,57 | 8,66 | 2,06 | 24% | 0,9066 | 0,1929 |

La matriz de correlaciones de Spearman (Figura 11) muestra, en general, bajas correlaciones entre los parámetros medidos en los sedimentos superficiales, observándose que las correlaciones más altas se originaron entre MOT, Cu, Cd, Ni y Pb. Adicionalmente, destacan también correlaciones significativas entre Cu, Hg y Pb y entre Ni, Cd y Cr.

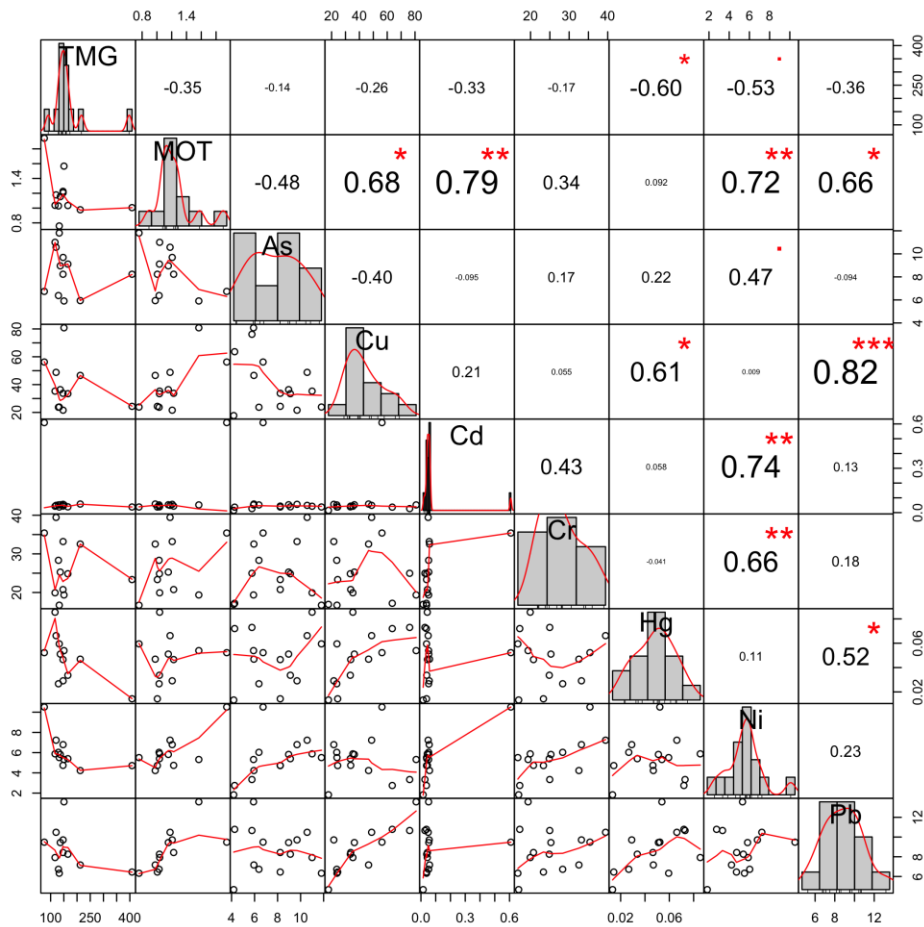


Figura 11. Matriz de correlaciones de Spearman para los parámetros medidos en sedimentos superficiales de la bahía Quintero-Puchuncaví, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

El ACP para sedimentos superficiales (Figura 12) revela que las dos primeras componentes principales alcanzaron a explicar el 60% de la variabilidad de la base de datos, observándose que la estación S-12 se segregó del resto de los puntos de muestreo a lo largo de la primera componente principal, debido a los mayores niveles de MOT, Ni, Pb, Cu, Cd y Cr. Por otro lado, la estación S-10 presentó los mayores tamaños medio de grano (TMG) y las estaciones S-2 y S-3 presentaron mayores concentraciones de As y Hg.

Estos resultados indican que a nivel de sedimentos superficiales se aprecia una clara diferenciación entre las concentraciones observadas en las diferentes estaciones de muestreo, con S-12, que fue la más profunda, mostrando las concentraciones más altas para la mayoría de

los parámetros analizados, y con un menor tamaño de grano ($\sim 76 \mu\text{m}$). Similarmente S-3 y S-2 mostraron tamaños de grano finos a medios ($< 135 \mu\text{m}$) y las concentraciones más altas de As y Hg. La estación de muestreo S-10 mostró, en general, bajas concentraciones para la mayoría de los parámetros analizados, con un tamaño medio de grano que superó los $400 \mu\text{m}$.

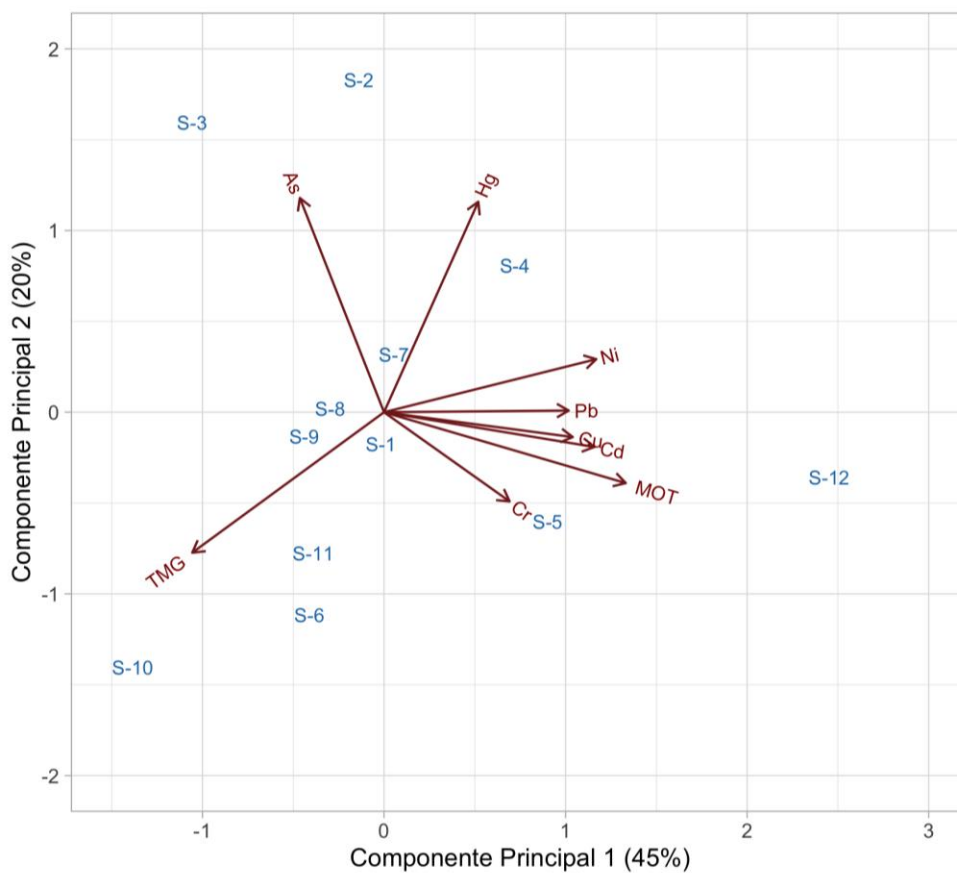


Figura 12. Biplot resultado de ACP efectuado para parámetros medidos en sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví.

4.3.4.- Análisis estadístico de testigos/testigo

4.3.4.1.- Contraste entre testigo

En la Tabla 16 se entrega la estadística básica para los parámetros analizados en los 3 testigos analizados en la bahía de Quintero-Puchuncaví. La observación de este resultado reveló que el tamaño promedio de grano en testigo osciló entre un mínimo de 54 μm y un máximo de 412 μm . El porcentaje de materia orgánica (MOT) superó levemente al 2% como valor máximo registrado, mientras que, dentro de los metales, tanto el Cu como el Cr mostraron las concentraciones más altas ($>15 \mu\text{g/g}$), mientras que el Hg mostró las menores concentraciones ($<0,07 \mu\text{g/g}$). Con excepción del As, los parámetros analizados no mostraron distribución normal.

Tabla 16. Resumen de estadística descriptiva de los parámetros analizados en 3 testigo dispuestos en la bahía de Quintero-Puchuncaví. Nobs: Número de observaciones, Min: Mínimo; Máx: Máximo; Desvest: Desviación estándar, CV%: Coeficiente de variación; Shapiro-Wilk: Prueba de normalidad de Shapiro Wilk, valor-p: Probabilidad asociada a la prueba de normalidad.

| Label | Nobs | Min | Máx | Prom | Desvest | CV% | Shapiro-Wilk | valor-p |
|-------|------|-------|--------|--------|---------|-----|--------------|---------|
| TMG | 91 | 53,67 | 412,53 | 252,20 | 102,38 | 41% | 0,9026 | 0,0000 |
| MOT | 91 | 0,39 | 2,04 | 0,89 | 0,32 | 36% | 0,9468 | 0,0010 |
| As | 91 | 1,83 | 10,75 | 6,50 | 1,95 | 30% | 0,9829 | 0,2789 |
| Cd | 91 | 0,02 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 49% | 0,8805 | 0,0000 |
| Cu | 91 | 15,77 | 78,13 | 34,43 | 14,01 | 41% | 0,8567 | 0,0000 |
| Cr | 91 | 15,27 | 42,51 | 26,71 | 7,80 | 29% | 0,9412 | 0,0005 |
| Hg | 91 | 0,01 | 0,07 | 0,03 | 0,02 | 58% | 0,8437 | 0,0000 |
| Ni | 91 | 1,33 | 5,97 | 3,59 | 1,53 | 43% | 0,8864 | 0,0000 |
| Pb | 91 | 11,20 | 18,60 | 13,40 | 1,32 | 10% | 0,9332 | 0,0002 |

El análisis de multicolinealidad (Figura 13) muestra altas correlaciones para los parámetros analizados, siendo el As y el TMG los únicos que mostraron correlaciones negativas con los demás parámetros. Sólo en el caso de Pb y As la correlación estimada no mostró significancia estadística.

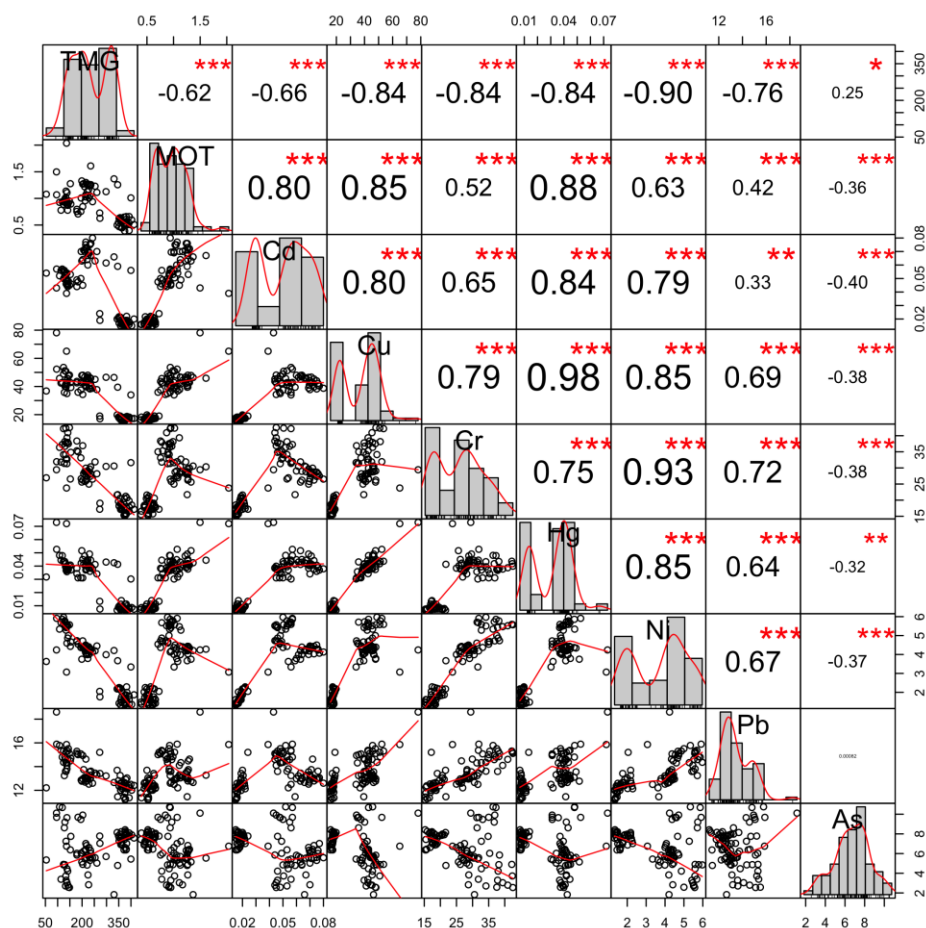


Figura 13. Matriz de correlaciones de Spearman para los parámetros medidos en 3 testigo dispuestos en la bahía de Quintero-Puchucaví, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

El resultado del ACP para los 3 testigo analizados (Figura 14) revela que las dos primeras componentes principales explicaron el 84% de la variabilidad de la base de datos, observándose que el testigo 14 se segregó a lo largo de la primera componente principal, debido a los mayores tamaños de grano y concentraciones de As. Por otro lado, los testigos 13 y 15 mostraron mayores concentraciones de MOT, Cd, Cu, Hg, Ni, Cr y Pb, observándose una mayor dispersión en el caso de C-13. La diferenciación que se produce entre los 3 testigos resultó estadísticamente significativa (PERMANOVA $p < 0,05$) y explica un 78% de la variabilidad de la ordenación multivariada.

Estos resultados revelan una alta diferenciación entre los 3 testigo muestreados, con el testigo 14 (ubicado a 20 m de profundidad y cercano a S-10) mostrando mayores tamaños de grano (>270 μm) y mayores concentraciones de As, mientras que los testigos 13 y 15 (ubicados al extremo norte y sur de la bahía, respectivamente) mostraron un tamaño de grano más fino (<203 μm en el caso del testigo 13) y mayores concentraciones para la mayoría de los parámetros analizados.

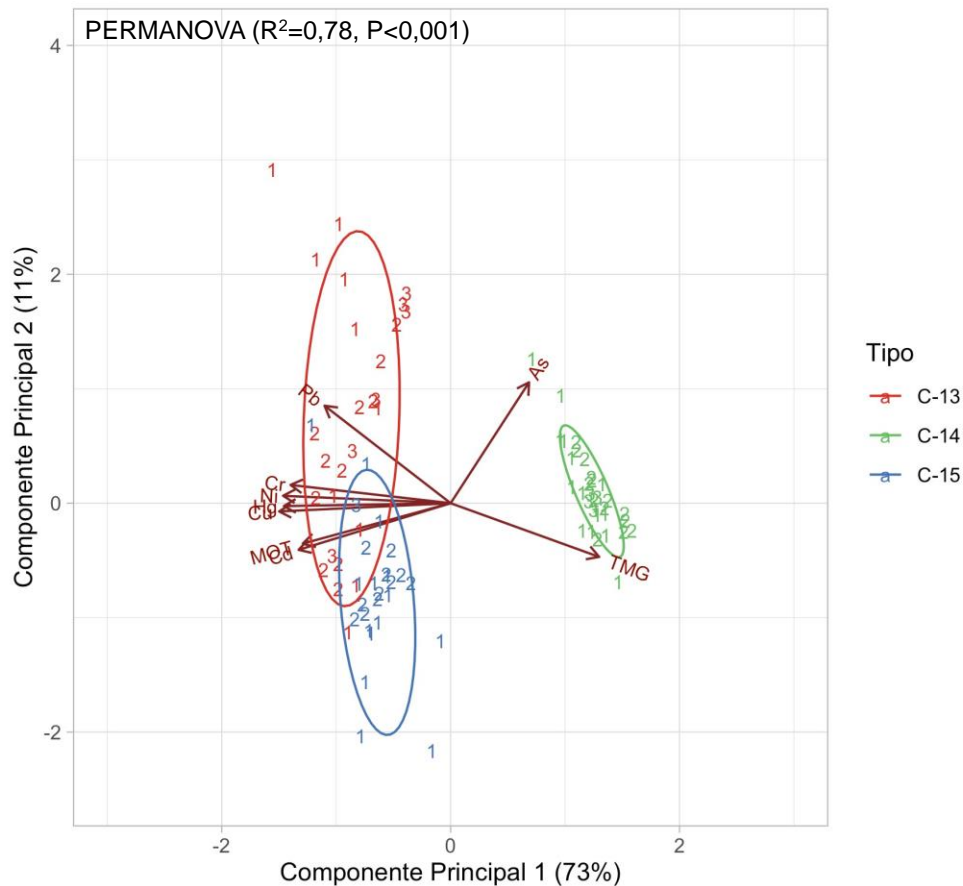


Figura 14. Biplot resultado de ACP efectuado para parámetros medidos en 3 testigo (C-13, C-14 y C-15) analizados en la bahía de Quintero-Puchucaví. Las elipses representan el rango de dispersión con un 95% de confianza para los puntajes agrupados por testigo. El PERMANOVA indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas ($p<0,05$) para las concentraciones detectadas en los diferentes testigos.

4.3.4.2.- Análisis independientes por testigo

En la Tabla 17 se presenta la estadística básica de los parámetros analizados en el testigo C-13. El tamaño promedio de grano en este testigo osciló entre un mínimo de 95 μm y un máximo de 203 μm . El porcentaje de materia orgánica (MOT) resultó inferior al 2%, mientras que el Cu y Cr mostraron las concentraciones más altas ($>42 \mu\text{g/g}$), en tanto que el que Hg mostró las menores concentraciones ($<0,07 \mu\text{g/g}$). Con excepción de Cd y Cr, los parámetros analizados no mostraron distribución normal.

Tabla 17. Resumen de estadística descriptiva de los parámetros analizados en el testigo C-13 en la bahía de Quintero-Puchucaví. Nobs: Número de observaciones, Min: Mínimo; Máx: Máximo; Desvest: Desviación estándar, CV%: Coeficiente de variación; Shapiro-Wilk: Prueba de normalidad de Shapiro Wilk, valor-p: Probabilidad asociada a la prueba de normalidad.

| Label | Nobs | Min | Máx | Prom | Desvest | CV% | Shapiro-Wilk | valor-p |
|-------|------|-------|--------|--------|---------|-----|--------------|---------|
| TMG | 27 | 95,27 | 202,65 | 140,11 | 27,23 | 19% | 0,9228 | 0,0460 |
| MOT | 27 | 0,71 | 1,50 | 0,93 | 0,15 | 17% | 0,8428 | 0,0008 |
| As | 27 | 2,55 | 10,75 | 6,37 | 2,97 | 47% | 0,8801 | 0,0048 |
| Cd | 27 | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 9% | 0,9279 | 0,0616 |
| Cu | 27 | 34,31 | 78,13 | 44,62 | 8,55 | 19% | 0,7976 | 0,0001 |
| Cr | 27 | 29,44 | 42,51 | 36,01 | 3,61 | 10% | 0,9654 | 0,4860 |
| Hg | 27 | 0,03 | 0,07 | 0,04 | 0,01 | 20% | 0,7915 | 0,0001 |
| Ni | 27 | 4,24 | 5,97 | 5,26 | 0,52 | 10% | 0,9071 | 0,0195 |
| Pb | 27 | 13,24 | 18,60 | 14,90 | 1,00 | 7% | 0,8501 | 0,0012 |

El análisis de multicolinealidad (Figura 15) muestra, en general, bajas correlaciones entre los parámetros analizados, destacando correlaciones estadísticamente significativas entre MOT, Cu, Hg y Pb y entre Cd y Ni. El TMG presentó correlaciones negativas con la mayoría de los parámetros, mientras que As mostró una correlación negativa con Cr.

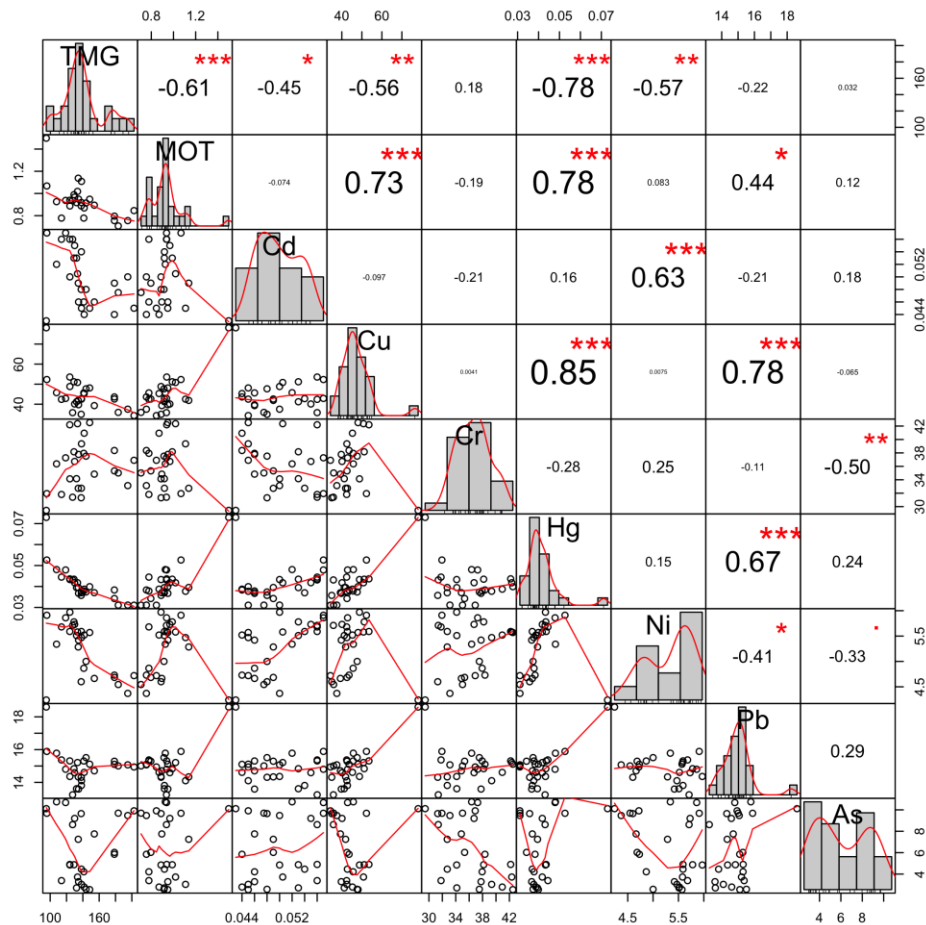


Figura 15. Matriz de correlaciones de Spearman para los parámetros medidos en el testigo C-13 de la bahía de Quintero-Puchucaví, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

El resultado del ACP para el testigo C-13 (Figura 16) muestra que las dos primeras componentes principales explicaron el 65% de la variabilidad de la base de datos, observándose una clara diferenciación entre los 3 estratos analizados, con mayores concentraciones de Ni, Cd, Cu, Hg y MOT en el estrato superficial y mayores TMG en el estrato de fondo. La diferenciación que se produce entre los 3 niveles analizados resultó estadísticamente significativa (PERMANOVA $p < 0,05$) lo que explica un 25% de la variabilidad de la ordenación multivariada.

Estos resultados permitieron inferir una diferenciación estadísticamente significativa entre los 3 niveles analizados para el testigo C-13, con niveles de Ni, Cd, Cu, Hg y MOT estadísticamente más altos en el estrato de superficie.

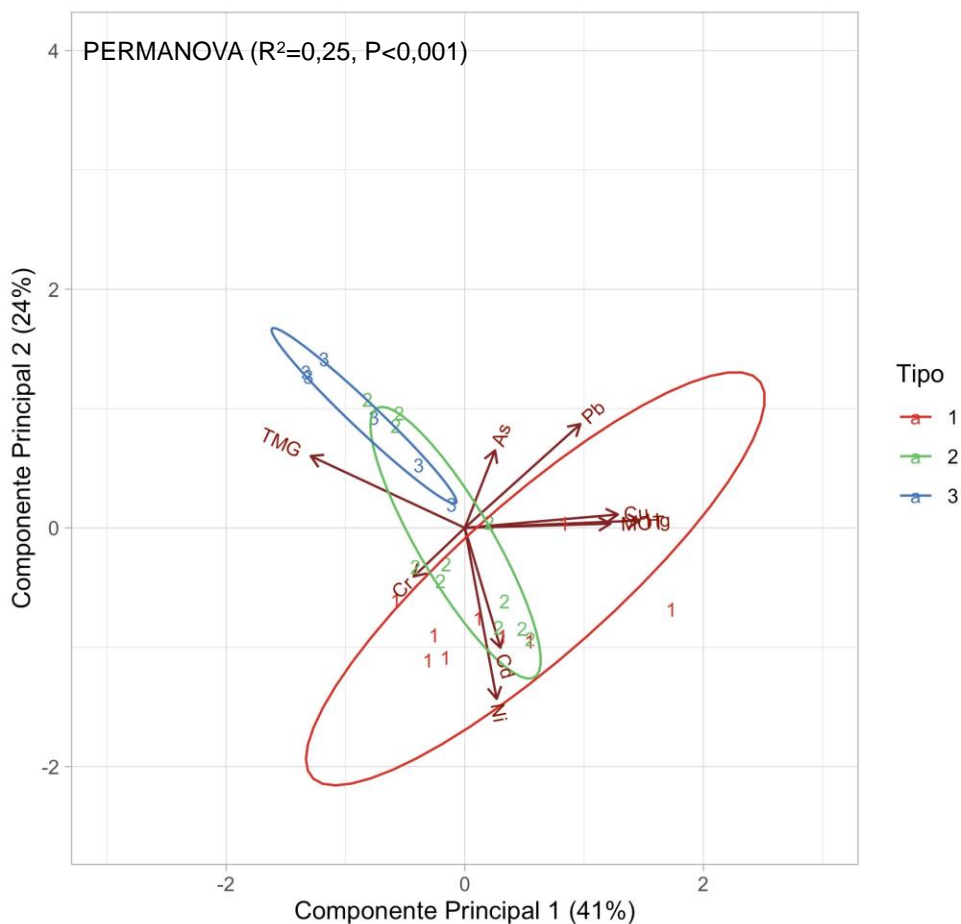


Figura 16. Biplot resultado de ACP efectuado para parámetros medidos en el Testigo 13 (C-13) en la bahía de Quintero-Puchucaví. Las elipses representan el rango de dispersión con un 95% de confianza para los puntajes agrupados por estrato de profundidad (1=periodo 2005-2020; 2=periodo 1950-2005; 3=previo a 1950). El PERMANOVA indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas ($p<0,05$) para las concentraciones detectadas en los diferentes estratos.

En la Tabla 18 se entrega la estadística básica para los parámetros analizados en el testigo 14. El tamaño promedio de grano en este testigo osciló entre un mínimo de 272 μm y un máximo de 412 μm . El porcentaje de materia orgánica (MOT) resultó inferior al 0,8%, mientras que el Cu y Cr mostraron las concentraciones más altas ($>15 \mu\text{g/g}$) y el Hg mostró las menores concentraciones ($<0,01 \mu\text{g/g}$). El 50% de los parámetros analizados en este testigo no mostró distribución normal.

Tabla 18. Resumen de estadística descriptiva de los parámetros analizados en el testigo 14 en la bahía de Quintero-Puchuncaví. Nobs: Número de observaciones, Min: Mínimo; Máx: Máximo; Desvest: Desviación estándar, CV%: Coeficiente de variación; Shapiro-Wilk: Prueba de normalidad de Shapiro Wilk, valor-p: Probabilidad asociada a la prueba de normalidad.

| Label | Nobs | Min | Máx | Prom | Desvest | CV% | Shapiro-Wilk | valor-p |
|-------|------|--------|--------|--------|---------|-----|--------------|---------|
| TMG | 33 | 272,19 | 412,53 | 366,44 | 28,86 | 8% | 0,7929 | 0,0000 |
| MOT | 33 | 0,39 | 0,73 | 0,55 | 0,08 | 14% | 0,9847 | 0,9121 |
| As | 33 | 6,37 | 8,42 | 7,53 | 0,58 | 8% | 0,9345 | 0,0471 |
| Cd | 33 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 13% | 0,9429 | 0,0826 |
| Cu | 33 | 15,77 | 19,80 | 17,50 | 0,92 | 5% | 0,9788 | 0,7481 |
| Cr | 33 | 15,27 | 21,60 | 17,98 | 1,73 | 10% | 0,9634 | 0,3206 |
| Hg | 33 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 21% | 0,8206 | 0,0001 |
| Ni | 33 | 1,33 | 2,29 | 1,73 | 0,31 | 18% | 0,9115 | 0,0107 |
| Pb | 33 | 11,20 | 15,20 | 12,42 | 0,76 | 6% | 0,8882 | 0,0027 |

El análisis de multicolinealidad (Figura 17) muestra, en general, mayores correlaciones entre Cd, Cu, Cr y Pb, mientras que el TMG muestra correlaciones negativas con MOT, Cd y Pb y la MOT muestra correlaciones positivas con Hg y Pb.

El resultado del ACP reveló que las 2 primeras componentes principales explicaron un 61% de la variabilidad contenida en la base de datos (Figura 18) y permitió observar que las 3 elipses tienden a solaparse, lo que da cuenta de una baja diferenciación entre los 3 estratos definidos para este testigo. Aunque la diferenciación que se produce entre los 3 niveles analizados resultó ser estadísticamente significativa (PERMANOVA $p < 0,05$) explicando solo un 13% de la variabilidad de la ordenación multivariada.

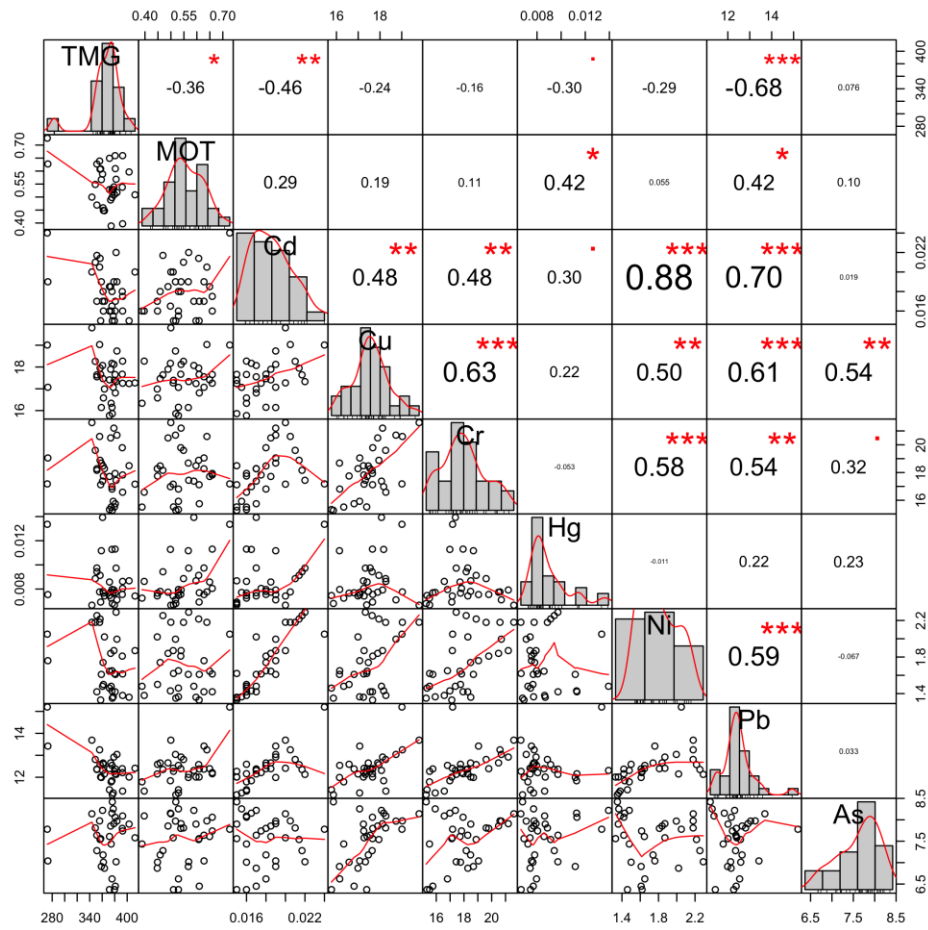


Figura 17. Matriz de correlaciones de Spearman para los parámetros medidos en el testigo C-14 de la bahía de Quintero-Puchuncaví, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

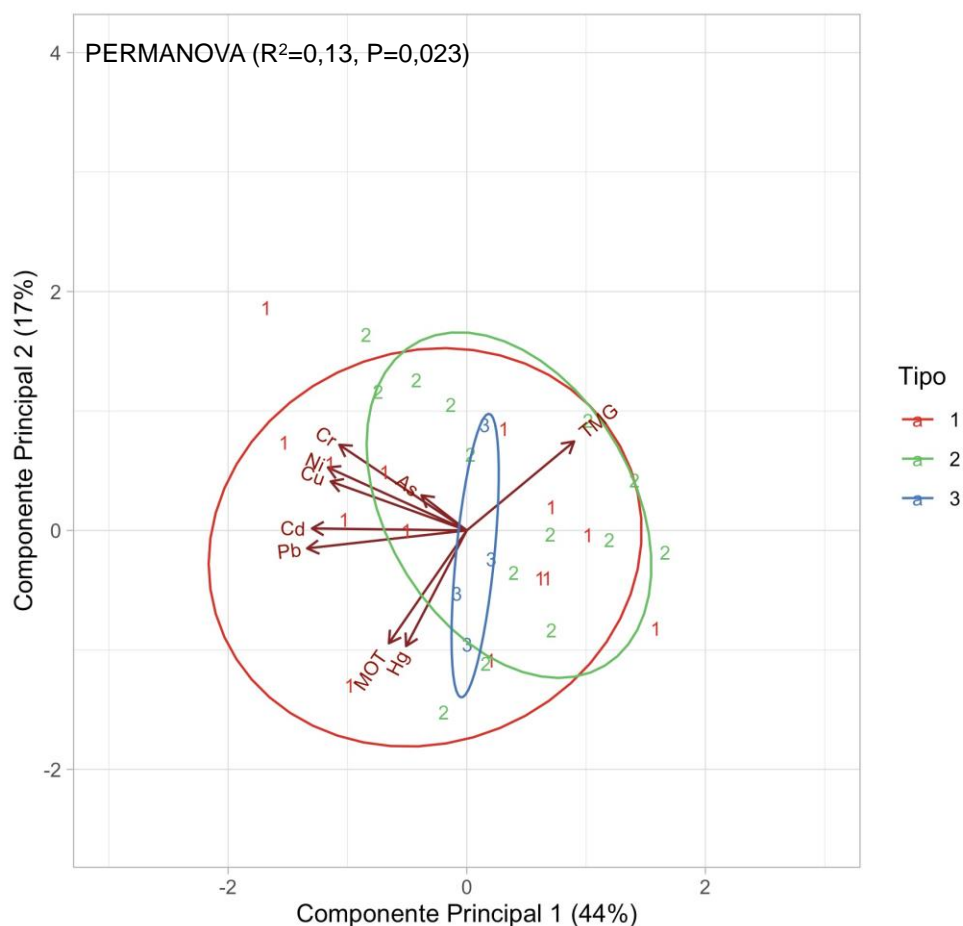


Figura 18. Biplot resultado de ACP efectuado para parámetros medidos en el Testigo C-14 en la bahía de Quintero-Puchuncaví. Las elipses representan el rango de dispersión con un 95% de confianza para los puntajes agrupados por estrato de profundidad (1=periodo 2005-2020; 2=periodo 1950-2005; 3=previo a 1950). El PERMANOVA indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas ($p<0,05$) para las concentraciones detectadas en los diferentes estratos.

En la Tabla 19 se entrega la estadística básica de los parámetros analizados en el testigo C-15. En este caso, el tamaño promedio de grano en este testigo osciló entre un mínimo de $54 \mu\text{m}$ y un máximo de $400 \mu\text{m}$. El porcentaje de materia orgánica (MOT) alcanzó un máximo del 2%, con Cu y Cr mostrando las concentraciones más altas ($>21 \mu\text{g/g}$) y el Hg mostrando las concentraciones más bajas ($<0,07 \mu\text{g/g}$). Con excepción del Cr, el resto de los parámetros analizados en este testigo no mostró distribución normal.

Tabla 19. Resumen de estadística descriptiva de los parámetros analizados en el testigo 15 en la bahía de Quintero-Puchuncaví. Nobs: Número de observaciones, Min: Mínimo; Máx: Máximo; Desvest: Desviación estándar, CV%: Coeficiente de variación; Shapiro-Wilk: Prueba de normalidad de Shapiro Wilk, valor-p: Probabilidad asociada a la prueba de normalidad.

| Label | Nobs | Min | Max | Prom | Desvest | CV% | Shapiro-Wilk | valor-p |
|-------|------|-------|--------|--------|---------|-----|--------------|---------|
| TMG | 31 | 53,67 | 399,76 | 228,22 | 60,48 | 26% | 0,8610 | 0,0009 |
| MOT | 31 | 0,94 | 2,04 | 1,21 | 0,21 | 17% | 0,7996 | 0,0001 |
| As | 31 | 1,83 | 7,02 | 5,51 | 1,10 | 20% | 0,8563 | 0,0007 |
| Cd | 31 | 0,04 | 0,08 | 0,07 | 0,01 | 13% | 0,9196 | 0,0230 |
| Cu | 31 | 34,01 | 65,07 | 43,57 | 5,43 | 12% | 0,8389 | 0,0003 |
| Cr | 31 | 21,71 | 31,88 | 27,90 | 2,23 | 8% | 0,9701 | 0,5216 |
| Hg | 31 | 0,03 | 0,07 | 0,04 | 0,01 | 17% | 0,7860 | 0,0000 |
| Ni | 31 | 3,07 | 4,50 | 4,12 | 0,34 | 8% | 0,8516 | 0,0005 |
| Pb | 31 | 11,46 | 15,86 | 13,15 | 0,78 | 6% | 0,8574 | 0,0007 |

El análisis de multicolinealidad (Figura 19) muestra, en general, bajas correlaciones entre los parámetros analizados, destacando correlaciones estadísticamente significativas entre MOT, Cu, Hg y Pb y entre Cd y Ni. En este caso, los parámetros TMG y As no mostraron correlaciones significativas con los demás parámetros incluidos en el análisis.

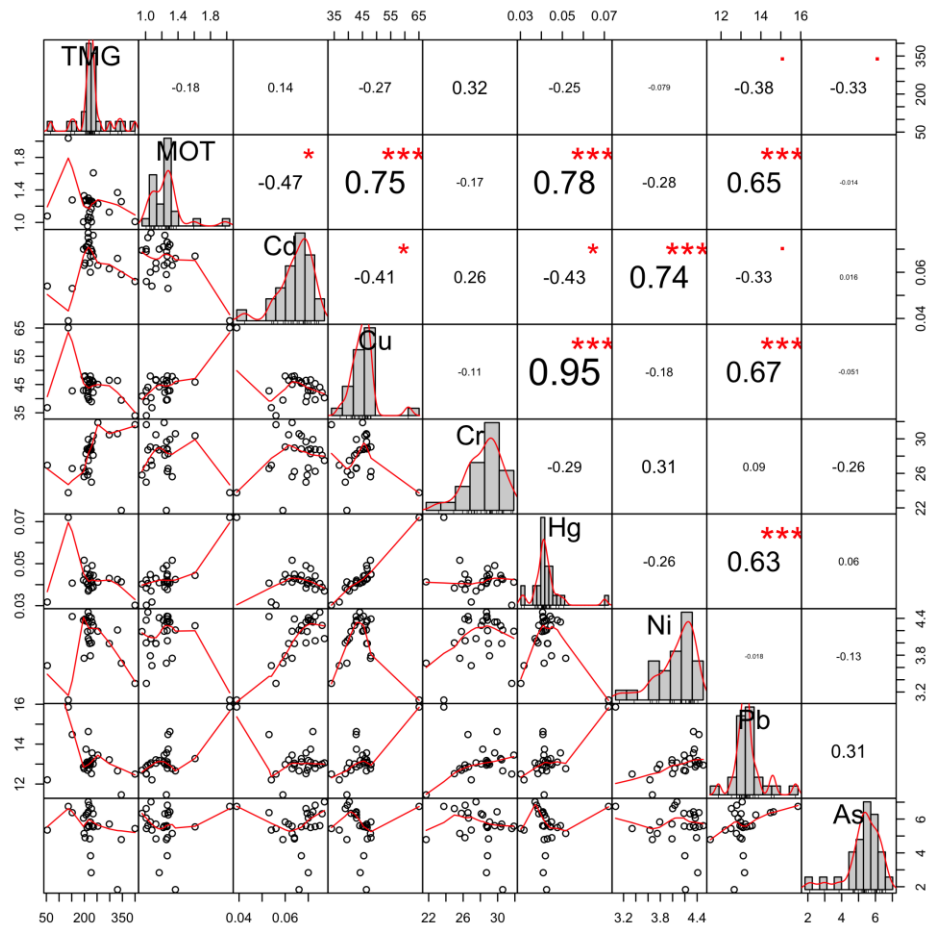


Figura 19. Matriz de correlaciones de Spearman para los parámetros medidos en el testigo C-15 de la bahía de Quintero-Puchuncaví, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

El resultado del ACP reveló que las 2 primeras componentes principales explicaron un 60% de la variabilidad contenida en la base de datos (Figura 20) y permitió observar que, similar a lo observado en el caso del testigo 14, las 3 elipses tienden a solaparse, mostrando una baja diferenciación entre los 3 estratos definidos para este testigo, con un mayor TMG y mayores concentraciones de Cd, Ni y Cr en el estrato de fondo y con mayores concentraciones de Hg, MOT, Cu y Pb en el estrato superficial. En este caso, la diferenciación que se produce entre los 3 niveles analizados resultó ser estadísticamente significativa (PERMANOVA $p < 0,05$) y explica un 15% de la variabilidad de la ordenación multivariada.

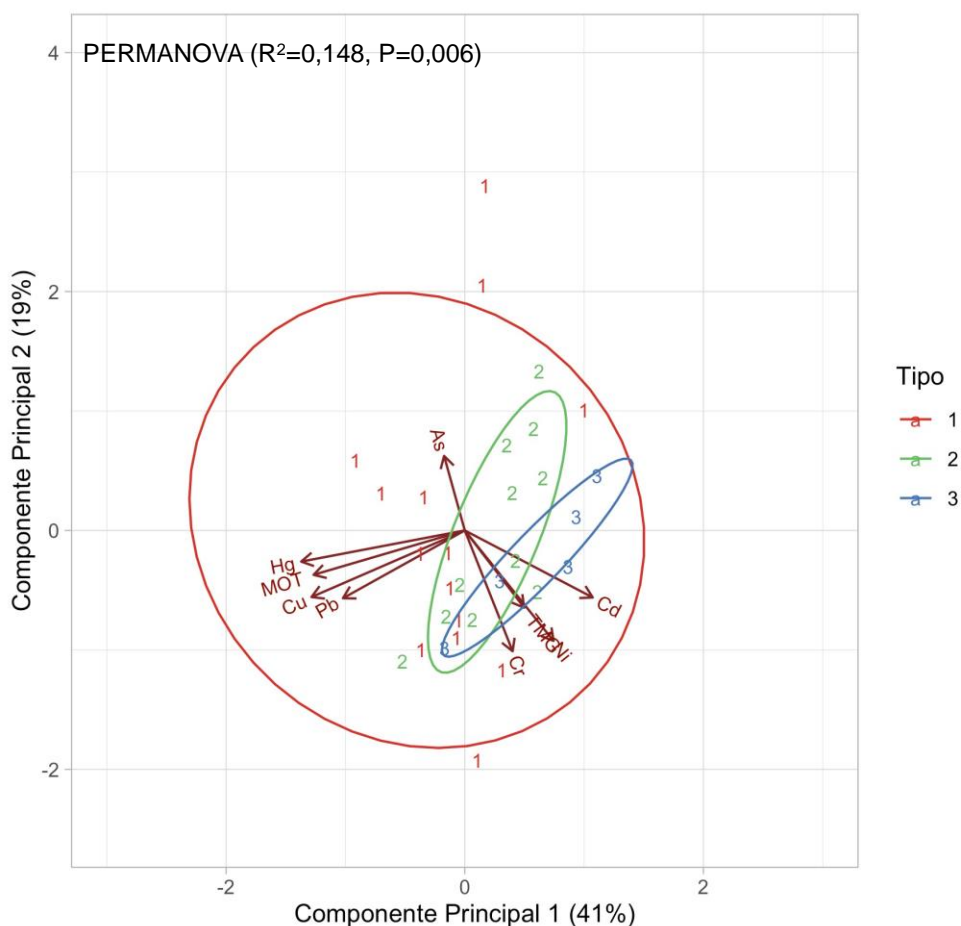


Figura 20. Biplot resultado de ACP efectuado para parámetros medidos en el testigo C-15 en la bahía de Quintero-Puchuncaví. Las elipses representan el rango de dispersión con un 95% de confianza para los puntajes agrupados por estrato de profundidad (1=periodo 2005-2020; 2=periodo 1950-2005; 3=previo a 1950). El PERMANOVA indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para las concentraciones detectadas en los diferentes estratos.

4.4.- OE4. “Analizar la calidad ambiental de los sedimentos de la bahía de Quintero en función de indicadores, estándares y normativa ambiental asociada a riesgo ecológico”.

La comparación con estándares y normativas internacionales es una de las herramientas más importantes para la adecuada gestión de los sedimentos marinos (Komnitsas *et al.*, 2015). El fundamento principal de esta comparación está basado en la hipótesis de que existe un nivel umbral de concentración en la que ciertos productos y/o elementos químicos presentes en los sedimentos podrían causar un daño a la vida acuática. Dentro de las normativas más conocidas encontramos la Canadian Sediment Quality Guidelines de 1993, Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality (ANZECC) del año 2000, y Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Marine Sediment del año 2001. El desarrollo de estas guías llevó a crear una clasificación de rangos para identificar el nivel de efecto umbral para representar aquella concentración en la cual no hay un efecto adverso de los sedimentos sobre la fauna bentónica que los habita y un nivel de concentración sobre el umbral en el cual existe una alta probabilidad de que ocurran efectos adversos sobre la fauna bentónica.

4.4.1.- Comparación con guías de calidad de sedimentos internacionales

En la Tabla 20 se resumen los resultados de metales pesados obtenidos de los análisis de muestras de sedimentos marinos de la bahía de Quintero-Puchuncaví, comparados con las guías de calidad de sedimentos marinos internacionales. En general cuando se compararon los valores promedio se observó que la mayoría de los metales analizados, tanto en las muestras superficiales como los niveles de referencia se encuentran dentro de la clasificación de nivel de bajo efecto (Lowest effect level, ISQG-Low e ISQG). Al considerar el valor máximo del rango de los metales en los sedimentos analizados ninguno de estos valores superó la clasificación de efecto probable severo (Severe effect level, ISQG-High y PEL). Por lo que se podría indicar que en la zona de estudio ninguno de los valores reportados representa un riesgo para las comunidades bentónicas presentes en el área. En el caso del As, Cr, Cu y Cd el valor máximo del rango de datos superó los valores de nivel de bajo efecto, pero se mantienen bajo el umbral de efecto probable. Sólo en el caso del Cu esta clasificación se debería tomar con precaución debido a que el valor máximo ($80,81 \mu\text{g g}^{-1}$) se encuentra muy cercano a un nivel de efecto severo para las guías Canadian Sediment Quality Guidelines 1993 y Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Marine Sediment 2001.



Al realizar una comparación de los niveles de referencia local con los datos de sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchuncaví, varios de los metales (Cd, Cu y Hg) considerados como tóxicos a altas concentraciones superaron los niveles basales para el área estudiada. Sin embargo, estos valores no significan un riesgo para las comunidades bentónicas locales al comparar con estándares internacionales, pero reflejan un llamado a continuar con estudios más detallados en el área, debido a un enriquecimiento en los sedimentos superficiales que puede tener relación con las actividades antrópicas que se desarrollan en la bahía.

Tabla 20. Concentraciones promedio de metales analizados en los sedimentos marinos de la bahía de Quintero-Puchucaví comparados con los criterios establecidos en las SQG (Sediment Quality Guidelines) internacionales. Los valores en paréntesis representan el rango de datos.

| Clasificación | <i>Metales en $\mu\text{g g}^{-1}$</i> | | | | | | | Referencia |
|------------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| | <i>Cd</i> | <i>Cu</i> | <i>Cr</i> | <i>Hg</i> | <i>Ni</i> | <i>Pb</i> | <i>As</i> | |
| Lowest effect level (LEL) | 0,6 | 16 | 26 | 0,2 | 16 | 31 | 6 | Canadian Sediment Quality Guidelines 1993 |
| Severe effect level (SEL) | 10 | 110 | 110 | 2 | 75 | 250 | 33 | |
| ISQG-Low | 1,5 | 65 | 80 | 0,15 | 21 | 50 | 20 | ANZECC 2000 Assessment levels for Soil, Sediment and Water, 2010 |
| ISQG-High | 10 | 270 | 370 | 1 | 52 | 220 | 70 | |
| <i>ISQGs</i> | 0,7 | 18,7 | 52,3 | 0,13 | - | 30,2 | 7,24 | Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Marine Sediment 2001 |
| <i>Probable effect level (PEL)</i> | 4,21 | 108 | 160 | 0,7 | - | 112 | 41,6 | |
| Sedimentos superficiales | 0,09 (0,04-0,61) LEL | 38,74 (21,60-80,81) LEL | 26,59 (16,71-39,44) LEL | 0,05 (0,01-0,09) LEL | 6,02 (4,23-10,51) LEL | 8,66 (6,33-13,57) LEL | 8,55 (5,91-11,81) LEL | Datos obtenidos en este estudio |
| Clasificación ⁽¹⁾ | ISQ-LOW <i>ISQGs</i> | ISQ-LOW <i>ISQGs</i> | ISQ-LOW <i>ISQGs</i> | ISQ-LOW <i>ISQGs</i> | ISQ-LOW <i>ISQGs</i> | ISQ-LOW <i>ISQGs</i> | ISQ-LOW <i>ISQGs</i> | - |
| Nivel background | 0,049 (0,17-0,080) | 34,1 (17,3-47,7) | 28,5 (17,2-37,9) | 0,028 (0,007-0,041) | 3,7 (1,4-5,0) | 13,8 (12,2-15,5) | 6,7 (2,6-9,9) | Datos obtenidos en este estudio |

(1) La clasificación se realiza considerando el valor máximo de concentración del metal en los sedimentos superficiales de la bahía de Quintero-Puchucaví.

ISQGs: *Interim marine Sediment Quality Guidelines*

4.4.2.- Comparación con referencias para sedimentos superficiales y testigos

En las Tablas 21 y 22 se presenta una revisión bibliográfica de estudios de metales pesados a lo largo de la costa chilena. Adicionalmente, son incluidos los valores de la corteza terrestre, esquistos del Pacífico Sur y concentraciones de metales en bahías del mundo.

A partir de la información que existe para testigos de sedimento en territorio chileno se lograron comparar 6 estudios realizados en la bahía de Mejillones, Caleta Coloso, bahía de Quintero-Puchucaví y bahía Coronel (Tabla 21). En general, los valores de la bahía de Quintero-Puchucaví reportados en este estudio se encuentran en los rangos encontrados en otras bahías chilenas. Al evaluar los valores máximos encontrados en la bahía de Quintero-Puchucaví, se observa que esta bahía tiene un bajo enriquecimiento de metales comparado con otras zonas con una evidente intervención antrópica (*i.e.*, bahía Concepción y bahía Coronel). El Cr presenta valores comparables al estudio realizado por Encina (2014), superando levemente el valor máximo reportado en un 12.6%. En cuanto al Ni se observa que el rango de valores encontrados es inferior a lo reportado en otras bahías como la de Mejillones (Valdés, 2004). El Cu, Cd y Pb presenta valores inferiores a lo reportado por Salamanca & Camaño (1994) en la bahía Concepción y Caleta Coloso en Antofagasta. En cuanto al Hg, este se mantiene en un rango bajo cuando lo comparamos con los estudios realizados por Salamanca & Camaño (1994) e Hidalgo (2017).

En la Tabla 22 se presentan diferentes estudios sobre concentraciones de metales en sedimentos marinos superficiales de Chile y el mundo. En términos generales, las concentraciones reportadas para la bahía de Quintero-Puchucaví en este estudio se caracterizan por estar dentro del rango reportado para la mayoría de las bahías chilenas y del mundo. En cuanto a los valores característicos para fangos costeros (Near-shore Mud) reportados por Chester & Jickells (2012), estos son incluso mayores a los encontrados en la bahía de Quintero lo que está determinado principalmente por las características litológicas del área (presencia de arenas y ausencia de fracciones de fangos).

Tabla 21. Concentración de metales ($\mu\text{g g}^{-1}$) en testigos de sedimentos de la bahía de Quintero-Puchucaví, comparados con estudios realizados en Chile.

| Localidad | Cr | Ni | Cu | Cd | Pb | Hg | As | Referencia |
|---------------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--|
| Bahía Mejillones | - | 30,2 | 53,5 | 20,5 | - | - | - | (Valdés, 2004), citado en Guíñez (2015) como valores preindustriales |
| Bahía Mejillones | - | 18,8-72,7 | - | 19-60,1 | - | - | - | (Valdés, 2004) |
| Caleta Coloso A, Antofagasta | - | - | 43-154 | - | - | - | - | (Salamanca & Camaño, 1994) |
| Caleta Coloso B, Antofagasta | - | - | 46-116 | - | - | - | - | (Salamanca & Camaño, 1994) |
| Bahía Quintero- Puchuncaví | 21,27-33,12 | 5,12-7,24 | 23,03-39,63 | 0,43-1,38 | 5,58-11,04 | - | 2,90-4,14 | (Encina, 2014) |
| Bahía Concepción | - | - | 18,7-273,3* | 1,04-13,44* | 18,7-124,7* | 0,07-0,94* | - | (Salamanca & Camaño, 1994) |
| Bahía Coronel | - | - | - | 0,74-6,71 | 5,94-15,87 | 0,113-0,265 | - | (Hidalgo, 2017) |
| Bahía Quintero- Puchuncaví | 17,2-37,9 | 1,4-5,0 | 17,3-47,7 | 0,017-0,080 | 12,2-15,5 | 0,007-0,041 | 2,6-9,9 | Datos obtenidos en este estudio |

*valores expresados en peso ceniza.

Tabla 22. Concentración de metales ($\mu\text{g g}^{-1}$) en sedimentos de superficiales en estudios realizados en Chile y Valores referenciales de la corteza terrestre, esquistos del Pacífico Sur y concentraciones de metales en bahías del mundo.

| Localidad | Cr | Ni | Cu | Cd | Pb | Hg | As | Referencia |
|------------------------------------|---------------|----------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------|--|
| Bahía Quintero-Puchuncaví | 16,7-39,4 | 1,8-10,5 | 17,73-80,81 | 0,015-0,609 | 4,7-13,6 | 0,013-0,085 | 4,2-11,8 | Este estudio |
| Promedio esquistos | 90 | 50 | 45,0 | 0,3 | 20,0 | 0,18 | 13,0 | (Mackenzie, 2005) |
| Corteza Terrestre | 69 | 55,0 | 39,0 | 0,1 | 17,0 | 0,08 | 1,6 | (Mackenzie, 2005) |
| Fangos costeros | 60 | 35 | 56 | - | 22 | - | 5 | (Chester & Jickells, 2012) |
| Andalién | - | - | - | <0,04-1,00 | - | <0,01-4,49 | - | (Universidad de Concepción, 1987) |
| Bahía Concepción | | 8-23,7 | 31,5-41,0 | 0,24-6,27 | 26,4-40,1 | 0,01-4,97 | 16,5 | (SERPLAC, 1980); (Carrera et al., 1993); (Salamanca et al., 1988) |
| Bahía Inglesa | | 11,2-28,7 | - | 2,7-4,2 | | | | (Castillo et al., 2019) |
| Bahía Laguna Verde | - | - | 136,6 | - | 10,6 | 0,2 | - | (Pavez et al., 2018) (Valdés, 2012); (Valdés et al., 2005); (Valdés & Sifeddine, 2009); (Valdés, 2004) |
| Bahía Mejillones | - | 2-86,67 | 10,02-110,42 | 2,38-38,00 | 8,77-28,58 | - | - | (Castillo et al., 2019) |
| Bahía Mejillones sur | - | 5,1-50,8 | - | 1,4-49,9 | - | - | - | (Castillo et al., 2019) |
| Bahía Quintero-Puchuncaví | 27-80 | 8-17 | 41-1476 | - | 17-36 | - | 9-20 | (Parra et al., 2015) |
| Bahía San Antonio, Golfo de México | - | 12,1 | 4,2 | 0,2 | 10 | - | - | (Trefry & Presley, 1976) |
| Bahía San Francisco, California | 100-150 | 73,3-116 | - | - | - | - | - | (Hornberger et al., 1999) |
| Bahía San Jorge | - | - | 79,8-774,1 | - | 14,9-94,2 | 0,59 | - | (Calderón & Valdés, 2012); (Valdés et al., 2010) |
| Bahía San Jorge, Coloso | - | - | 109,6-507,9 | - | 11,6-105,1 | 0,259-0,799 | - | (Valdés et al., 2010) |
| Bahía San Jorge, La Chimba | - | - | 379-841,8 | - | 9,69-73,2 | 0,373-1,21 | - | (Valdés et al., 2010) |
| Bahía San Jorge, Puerto | - | - | 520,2-3166,6 | - | 38,6-421 | 0,226-1,069 | - | (Valdés et al., 2010) |
| Bahía San Vicente | 64,24 - 92,96 | 29,53 - 104,49 | 17,19- 81,73 | 1,33 - 5,9 | 9,00 - 55,13 | 0,38 | 5,8 | (Ahumada, 1992); (Salamanca et al., 1988); (Ahumada & Vargas, 2005) |
| Bahía Xiamen, China | 3,13-134,3 | 27,2-64,8 | 29,3-97,2 | 0,129-1,010 | 44,9-59,8 | - | - | (Zhang et al., 2007) |
| Desembocadura Río Bio -Bio | - | - | - | <0,1 | - | 0,23-0,44 | - | (Universidad de Concepción, 1988) |
| Caleta Burca | - | - | - | <0,1 | - | 0,1-0,58 | - | (Universidad de Concepción, 1987) |
| Bahía Caldera | | 10-58,3 | 65 - 596 | 2,9-16,7 | 33,1 | 0,33 - 2,08 | 9,8 - 52,6 | (Castillo et al., 2019); |



LABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y OCEANOGRÁFICAS
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

| Localidad | Cr | Ni | Cu | Cd | Pb | Hg | As | Referencia |
|------------------------|------|---------------|---------------|-------------|-------------|------------|------------|--|
| Bahía Calderilla | - | 23,0 | 64,1 | - | 28,8 | - | - | (Bore et al., 1987); (Valdés & Castillo, 2014) |
| Bahía Coliumo | - | - | 29,13 | <0,4-0,47 | 16,62 | <0,01 | - | (Valdés & Castillo, 2014) (Aguirre-Martínez et al., 2009); (Universidad de Concepción, 1987) |
| Coquimbo | - | - | 11,42-21,99 | - | - | 0,83-1,12 | 3,46-10,36 | (Bore et al., 1987) |
| Costa del Bio Bío | - | 12,19 - 38,47 | 13,57 - 28,03 | 0,08- 1,25 | 2,9 - 9,04 | - | - | (Chandía & Salamanca, 2012) |
| Costas Norte de Chile | - | 9,68-39,69 | 52,1-421,4 | 10,46-29,72 | 16,3-182,3 | - | 7,05-26,56 | (Valdés & Tapia, 2019) |
| Fiordos Pacífico Sur | 50,1 | 22,4 | 24,5 | 0,36 | 20,8 | - | - | (Ahumada et al., 2008) (SERPLAC, 1980); |
| Golfo de Arauco | - | 17,5 | 23,61 | 0,24-6,27 | 14,68 | 0,25-0,40 | 5,8 | (Gonzalez et al., 2002); (Salamanca et al., 1988) |
| Inglesa | - | 21,6 | 64,5 | - | 39,7 | - | - | (Valdés & Castillo, 2014) |
| Iquique | - | - | 12,3-514,33 | 20,03 | 370 | 0,036-2,03 | 6,5-17,8 | (Aguirre-Martínez et al., 2009); (Bore et al., 1987) |
| Isla de los Reyes | - | - | - | <0,04-0,23 | - | 0,084 | - | (Universidad de Concepción, 1987) |
| Lenga | - | - | - | <0,1 | - | 0,56-0,65 | - | (Universidad de Concepción, 1988) |
| Lirquén | - | - | - | <0,1 | - | 3,21 | - | (Universidad de Concepción, 1987) |
| Mar interior de Chiloé | - | 18-36 | 12-49 | 0,06-0,21 | 8-10 | - | - | (Silva et al., 2009) |
| Patache | - | - | 68,33 | 0,93 | 3,97 | - | - | (Aguirre-Martínez et al., 2009) |
| Península de Cavanca | - | - | 13,60 | - | - | 2,03 | - | (Bore et al., 1987) |
| Marisma Rocuant | - | - | - | <0,01-3,1 | - | 0,02-15,6 | - | (Universidad de Concepción, 1987) |
| Bahía Salada | - | 27,1 | 53,1 | - | 54,5 | - | - | (Valdés & Castillo, 2014) (SERPLAC, 1980); |
| Bahía San Vicente | - | - | 27,73-109,80 | <0,1-3,1 | 17,35-68,07 | 0,082-0,38 | - | (Aguirre-Martínez et al., 2009); (Universidad de Concepción, 1988) |
| Talcahuano | - | - | 512,10 | 2,70 | 50,50 | - | - | (Aguirre-Martínez et al., 2009) |
| Tomé | - | - | - | <0,01-0,54 | - | 0,27-4,97 | - | (Universidad de Concepción, 1987) |
| Valparaíso | - | - | 35,1-125,9 | 0,57-9,51 | 10,8-80,5 | - | - | (Universidad de Valparaíso, 1987) |
| Yellow sea, China | - | 8,43-31,1 | 5,93-25,7 | 0-8,21 | 4,80-21,9 | - | - | (Jiang et al., 2014) |

4.4.3.- Indicadores de Riesgo Ecológico

El índice de Riesgo Ecológico (“Ecological Risk”, Ri) calculado sobre la base de los factores de respuesta biológica utilizados por Hakanson (1980), permite evaluar el nivel de contaminación por metales en una muestra de sedimentos de acuerdo con su riesgo ecológico individual, utilizando para ello los factores de respuesta toxica (T_i) para cada metal analizado en este estudio. Los resultados del Ri son presentados en la Tabla 23, en la cual se puede observar que, de acuerdo con la clasificación definida por este índice, todas las concentraciones encontradas en los diferentes metales en la bahía presentaron un índice de riesgo (Ri) bajo, ya que todos los valores promedio por capa están bajo 40, solo el Hg de la capa superficial (“industrialización moderna”) del testigo C-13 y C-15, presentó valores de RI mayores a 40 en los primeros cm del testigo, los cuales de acuerdo con este índice corresponden a una clasificación de riesgo moderado.

Tabla 23. Índice de riesgo ecológico (Ri), para los metales y estratos analizados en los tres testigos de sedimentos obtenidos en la bahía de Quintero-Puchuncaví.

| Ri | Testigo C-13 | | | Testigo C-14 | | | Testigo C-15 | | |
|----|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. |
| Cd | 33 | 30 | 29 | 12 | 10 | 11 | 37 | 44 | 46 |
| Cu | 7 | 7 | 6 | 3 | 3 | 3 | 7 | 6 | 6 |
| Cr | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Hg | 66 | 56 | 48 | 12 | 12 | 12 | 62 | 58 | 53 |
| Ni | 7 | 7 | 6 | 3 | 2 | 2 | 5 | 6 | 6 |
| Pb | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| As | 11 | 8 | 10 | 11 | 12 | 11 | 7 | 9 | 8 |

Ind. M.: Industrialización Moderna / Ind. In.: Industrialización Inicial / Pre-Ind.: Pre – Industrial

Complementariamente, se calculó el índice PERi para establecer el Riesgo Ecológico Potencial presente en las muestras de los sedimentos analizados (Tabla 24). En general, se observa que todos los valores promedio obtenidos para los diferentes estratos de los 3 testigos evaluados presentaron un PERi menor a 150, lo que corresponde, según este índice, a un riesgo potencial bajo. Solo la sección de superficie (0 – 1 cm) del corer 13 presentó un valor PERi de 170 lo que indica un riesgo potencial moderado en ese estrato de este testigo.

Tabla 24. Índice de Riesgo Ecológico Potencial (PERi), para los tres testigos de sedimentos obtenidos en la Bahía Quintero-Puchucaví.

| PERi | Testigo C-13 | | | Testigo C-14 | | | Testigo C-15 | | |
|----------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. | Ind. M. | Ind. In. | Pre-Ind. |
| Promedio | 131 | 116 | 108 | 45 | 45 | 45 | 125 | 130 | 129 |
| Mínimo | 106 | 107 | 106 | 38 | 41 | 44 | 101 | 124 | 117 |
| Máximo | 170 | 127 | 109 | 57 | 53 | 46 | 157 | 139 | 131 |

Ind. M.: Industrialización Moderna / Ind. In.: Industrialización Inicial / Pre-Ind.: Pre – Industrial

La Figura 21 presenta la distribución vertical del indicador de Riesgo Ecológico (ERi) en los testigos de sedimentos estudiados. En los testigos C-13 y C-15 se observa un patrón de distribución similar entre ambos, donde los mayores valores de ERi se encontraron en As y Hg, los demás metales presentaron un ERi bajo 20. El As presentó valores en el límite de la clase que permite considerar a este metal dentro de la categoría de riesgo ecológico bajo de acuerdo con este índice. En tanto que el Hg presenta los mayores valores de ERi, lo que permite clasificar a este metal como de riesgo moderado bajo entre los 2 cm y la base de los testigos C-13 y C-15. Solo el estrato de superficie (0 a 1 cm) se puede clasificar de acuerdo con este índice con un riesgo ecológico considerable.

Los perfiles verticales de Riesgo Ecológico Potencial (PERi) son presentados en la Figura 22. Estos perfiles muestran una distribución vertical comparable en los testigos C-13 y C-15, en los cuales se observa un incremento en los primeros centímetros con un cambio de categoría en el estrato 0 a 1 cm que, de acuerdo a este índice, pasan de un riesgo ecológico potencial bajo a uno moderado. Por otra parte, se observa que todo el testigo C-14 presenta valores menores a 60, por lo que es considerado por la clasificación PERi como de riesgo ecológico potencial bajo, es decir con valores menores a 150.

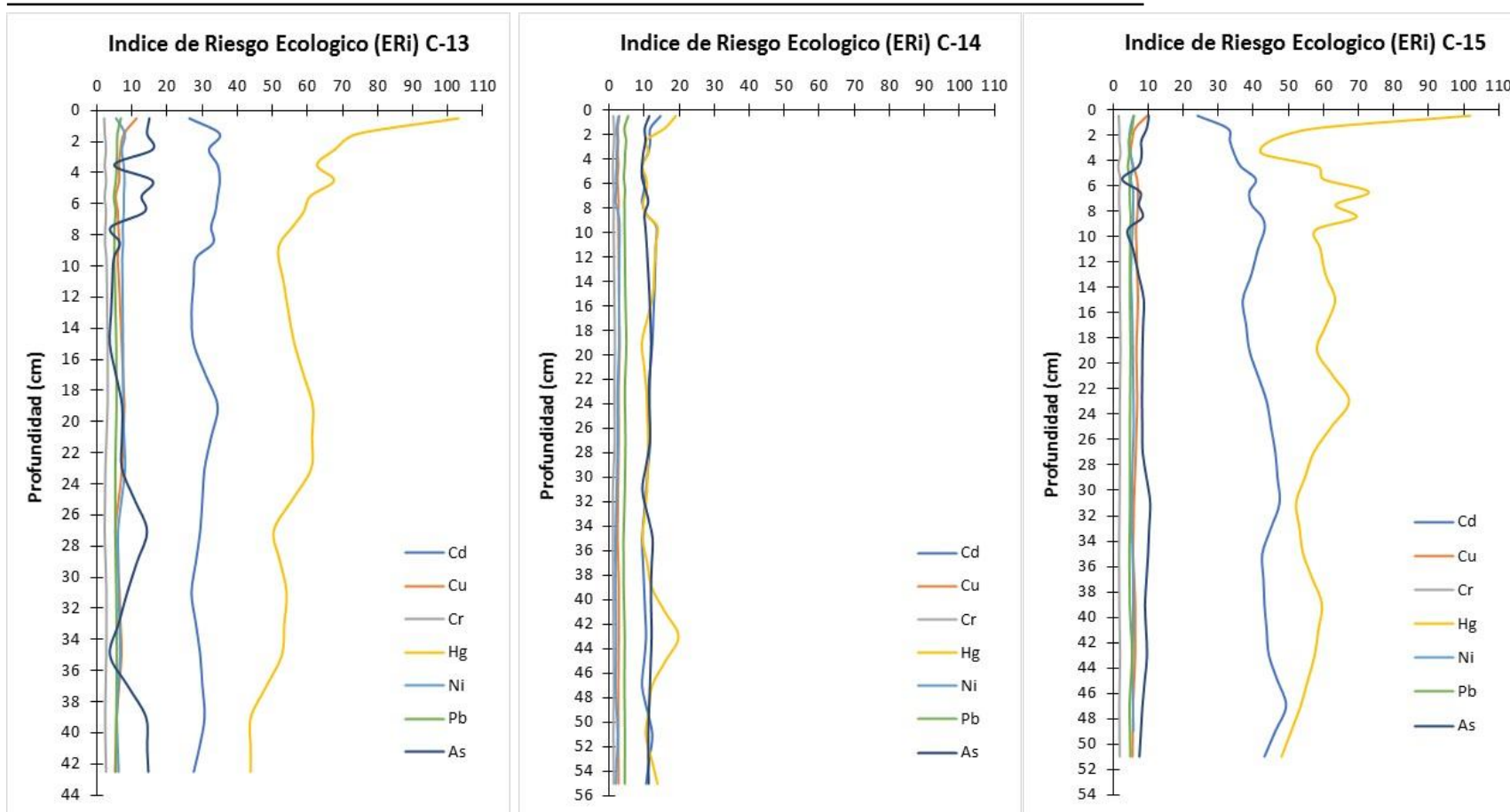


Figura 21. Perfiles obtenidos para el Índice de Riesgo Ecológico (ERi) calculados sobre la base de los metales analizados en los testigos C-13, C-14 y C-15 recolectados en Bahía Quintero-Puchuncaví.

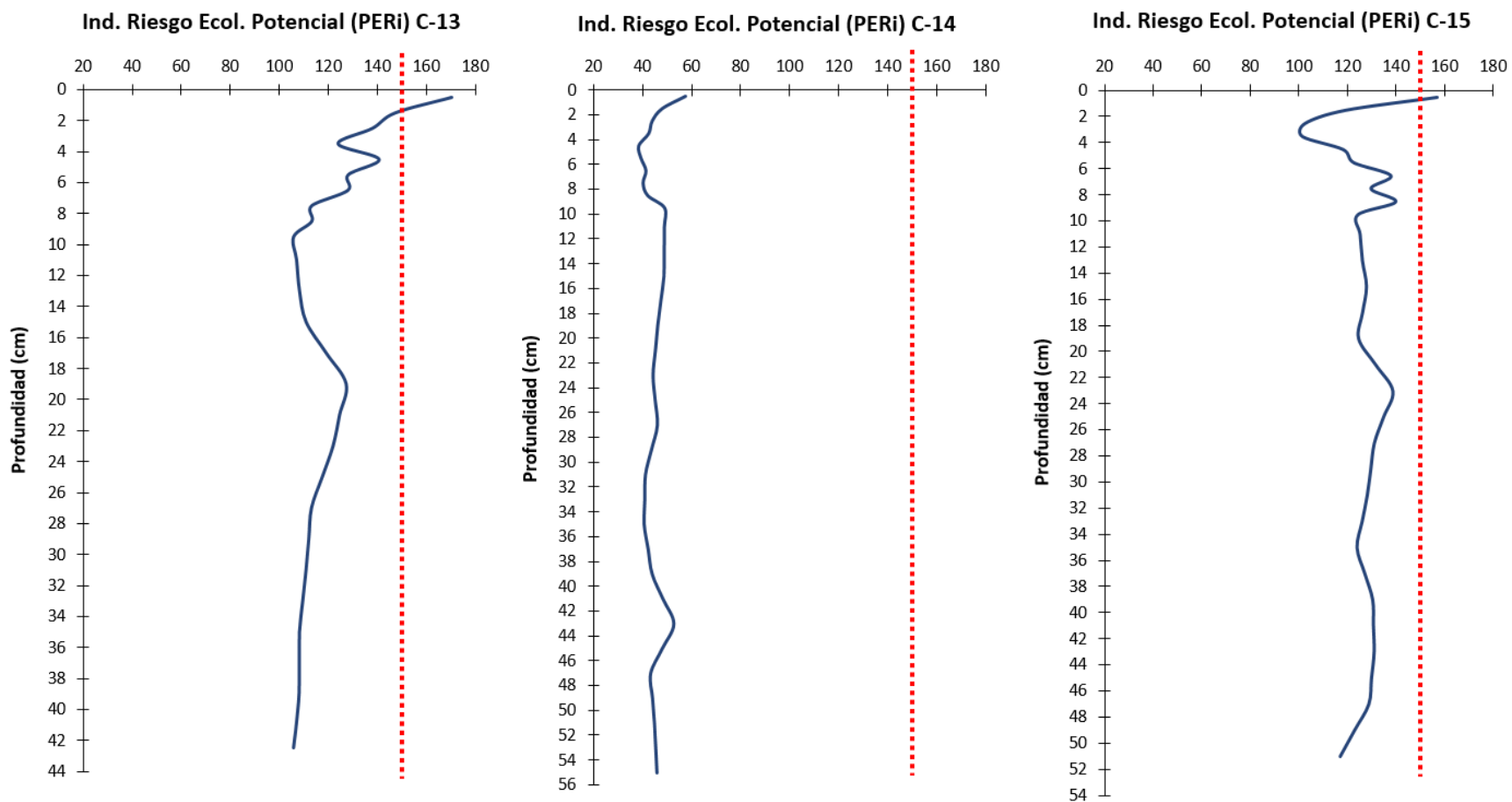


Figura 22. Perfiles obtenidos para Índice de Riesgo Ecológico Potencial (PERi) calculados sobre la base de los metales analizados en los testigos C-13, C-14 y C-15 recolectados en Bahía Quintero-Puchuncaví. La línea roja corresponde a límite entre la categoría de Riesgo Ecológico Potencial Bajo y Moderado.

5.- DISCUSIÓN

Las distribuciones de ^{210}Pb para los testigos de la Bahía Quintero-Puchucaví presentaron un máximo de actividad específica en superficie en el testigo C-13 de $1,042 \text{ dpm g}^{-1}$ y un mínimo de $0,653 \text{ dpm g}^{-1}$. Este perfil presenta la mayor variabilidad en los primeros 10 centímetros, lo cual supone un proceso de mezcla de los sedimentos superficiales ya sea por bio-perturbación y/o resuspensión de los sedimentos (Núñez, 2010). El testigo C-13 es el único de los tres testigos en el cual se observó un decaimiento exponencial con respecto a la profundidad, decaimiento esperable para el radioisótopo natural ^{210}Pb (Lepane, 2007). En los estratos de fondo, es decir bajos los 42 centímetros de profundidad la actividad fue de $0,653 \text{ dpm g}^{-1}$, actividad comparable con el promedio registrado para ^{226}Ra ($0,641 \text{ dpm g}^{-1}$), lo cual permitió determinar la distribución vertical de la actividad del ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$), el cual corresponde al ^{210}Pb que precipita de la atmósfera (Hermanson *et al.*, 1991; Lepane V, 2007). Basado en esta información se pudo utilizar el modelo de edad de flujo constante (Appleby y Oldfield, 1978) y estimar una tasa de sedimentación en el testigo C-13, el cual fue utilizado como referencia para estimar las edades de los testigos C-14 y C-15

El modelo de flujo constante (“CRS”) aplicado al testigo C-13 para el fechamiento geocronológico, estableció en la base del testigo una edad equivalente al año 1860, y una tasa de sedimentación en el tiempo, la cual varió entre $0,26$ a $0,92 \text{ cm año}^{-1}$. Los resultados reflejan la complejidad y dinámica que presentan los sistemas de bahías (Neves *et al.*, 2014). Esto se corresponde al comparar la tasa de sedimentación promedio del testigo C-13 ($0,629 \text{ cm año}^{-1}$), con otras bahías de las costas de Chile (Chandia *et al.*, 2021; Vargas *et al.*, 2004 y 2005; Caniupan *et al.*, 2009), las cuales están dentro de los mismos rangos establecidos para el testigo C-13 de la Bahía Quintero-Puchucaví.

Los resultados de los índices calculados (Igeo y PLI) para los sedimentos superficiales indicaron que existen algunos metales como el Hg, Cu, Ni y As con mayores concentraciones en las estaciones superficiales más costera (S-1 a S-5), que por sus características y origen podrían estar ligadas a las actividades industriales que operan en el área adyacentes a estas estaciones. En la estación más profunda (S-12) ubicada en el límite externo de la bahía con una profundidad de 50 m, se obtuvieron los valores más altos para los índices de Igeo y PLI, esto probablemente como resultado de la población de sedimentos finos que domina en esta estación, lo que favorece la retención de metales y de mayores contenidos de materia orgánica, lo que explica la condición

informada por estos índices en S-12. En tanto que, las estaciones superficiales S-6 a S-11 ubicada entre los 15 a 30 m de profundidad presentaron los menores índices de Igeo y PLI lo que de acuerdo con estos índices corresponden a sedimentos no contaminados para los metales analizados.

Los índices calculados para los testigos (C-13, C-14 y C-15), indican en general que, el Hg y Cu presentaron los mayores contenidos en el estrato superior “desarrollo industrial actual de la bahía” e intermedio “inicio del desarrollo industrial”, donde tanto el FE como el Igeo presentaron valores que son considerados leves a moderados. Los resultados de estos índices, que están basados fundamentalmente en las concentraciones de los metales presente en los sedimentos, son coincidentes con el índice de riesgo ecológico potencial PLI obtenido en estos mismos testigos, donde los resultados indicaron que no existe un grado de contaminación de los metales analizados en este estudio.

En general los índices calculados para establecer la calidad de los sedimentos superficiales y testigos, basados en los metales analizados, permitieron establecer que en superficie, las estaciones S-2, S-3, S-4 y S-5 presentan las mayores concentraciones de Hg y Cu, así como los mayores índices, principalmente asociados a las estaciones ubicadas en la zona adyacente a las operaciones industriales de Codelco Ventanas, Oxiquim y Aes Gener. El testigo C-13, ubicado en la zona circundante a las operaciones de AES Gener, mostró los índices más alto de FE para Hg y Cu, el Igeo más alto para Hg, lo que sugiere que dado a esos registros corresponden a la capa superior del testigo del periodo denominado “industrialización moderna”, es decir, aportes recientes en los aproximadamente últimos 15 años, y dada la naturaleza de los elementos estos podrían tener su origen en las actividades industriales asociadas al borde costero de la zona norte de la Bahía Quintero-Puchucaví, y aportes difusos locales y/o regionales..

Los resultados del análisis estadístico realizado para sedimentos superficiales permitieron observar una diferenciación entre las concentraciones medidas en las diferentes estaciones de muestreo, con S-12 (estación ubicada al centro de la bahía y a 50 m de profundidad) mostrando las concentraciones más altas para la mayoría de los parámetros analizados, lo que coincide con un menor tamaño de grano ($\sim 76 \mu\text{m}$). Las estaciones S-3 y S-2, ubicadas en la zona costera y al centro de la bahía, mostraron tamaños de grano finos a medios ($< 135 \mu\text{m}$) y las concentraciones más altas de As y Hg. Por otra parte, S-10, ubicada a 30 m hacia el norte de la bahía, mostró

bajas concentraciones para la mayoría de los parámetros analizados, con un tamaño medio de grano que superó los 400 μm .

Para el caso de los testigos, el contraste entre las concentraciones observadas para los 3 testigos analizados reveló una alta diferenciación, con el testigo C-14 (ubicado a 20 m de profundidad y cercano a S-10) mostrando mayores tamaños de grano ($>270 \mu\text{m}$) y mayores concentraciones de As, mientras que los testigos C-13 y C-15 (ubicados al extremo norte y sur de la bahía, respectivamente) mostraron, en general, un tamaño de grano más fino, pero mayores concentraciones para la mayoría de los parámetros analizados, destacando una amplia variabilidad en los resultados observados para el testigo C-13.

El contraste de concentraciones entre los niveles de profundidad definidos para cada testigo (superficie=periodo 2005-2020; medio=periodo 1950-2005; fondo=previo a 1950) permitió observar que, en el caso del testigo C-13, se distinguió una clara diferenciación entre estratos, con niveles de Ni, Cd, Cu, Hg y MOT estadísticamente más altos en el estrato de superficie. El testigo C-14 fue el que mostró la menor diferenciación, con una clara sobreposición en las concentraciones medidas en los 3 estratos definidos, mientras que en el caso del testigo C-15, se observó una diferenciación que resultó estadísticamente significativa, pero que no fue tan evidente como la observada en el testigo C-13, con mayores concentraciones de Cd, Ni y Cr en el estrato de fondo y mayores concentraciones de Hg, MOT, Cu y Pb en el estrato superficial.

En general, las pruebas estadísticas efectuadas permitieron indicar que en la zona ubicada frente a Codelco Ventanas y Oxiquim se observan los mayores tamaños medios de grano, tanto a nivel de estaciones superficiales (S-10) como para testigos (testigo 14). En esta zona, además, del mayor TMG se observó las mayores concentraciones de As y el testigo mostró la menor estructuración vertical, lo que podría dar indicios de la presencia de un ambiente altamente dinámico. El testigo C-13, ubicado frente a AES Gener, mostró la mayor estructuración vertical, con mayores concentraciones de Ni, Cd, Cu, Hg y MOT en el estrato de superficie, mientras que el testigo C-15 mostró resultados similares al testigo C-13, aunque con una menor diferenciación entre estratos. Estos dos testigos fueron recolectados en ambientes más protegidos, lo que podría explicar la existencia de una mayor estructura vertical, lo que podría estar asociado a la existencia de procesos de depositación que revelarían la presencia de aportes antrópicos, los que se hacen especialmente evidentes en el estrato de superficie (años 2005 a 2020).

Los indicadores de riesgo ecológico (Ri) y del Riesgo Ecológico Potencial (PERi) mostraron en general que existen riesgos bajos a moderados para los metales analizados en los sedimentos de la Bahía Quintero-Puchucaví. Esto basado en las determinaciones del Ri, las cuales indican un riesgo bajo para todos los metales. Solo el Hg obtenido desde la capa superficial (“industrialización moderna”) del testigo C-13 y C-15, presentó valores de RI de mayores a 40 en los primeros cm del testigo, lo que permitió establecer de acuerdo con este índice un riesgo moderado.

El índice PERi obtenido a partir de los promedios por estratos en los 3 testigos, permitió establecer un riesgo ecológico potencial bajo, solo la sección de superficie (0 – 1 cm) del corer C-13 presentó un valor PERi de 170 lo que indica un riesgo potencial moderado en este estrato.

Los resultados obtenidos en la distribución horizontal de los metales en el interior de la Bahía Quintero-Puchucaví no pueden ser comparados con el estudio de Parra et al., (2015), quien muestreó sedimentos superficiales en algunos puntos equivalentes con el presente estudio, dado que estos autores trabajaron con la fracción menor a $< 63 \mu\text{m}$ de tamaño de grano, lo que no permite la comparación directa, menos aun con los bajos niveles que esta fracción representa en los sedimentos muestreados en el presente estudio ($\sim 2\%$), los que se detectan principalmente en la estación más profunda, mientras que en el resto de los sedimentos superficiales al interior de la bahía, el dominio del tamaño medio de grano estuvo representado por la fracción de 125 y 250 μm , correspondientes a arenas finas y medias.

Los resultados obtenidos cuando se comparan con aquellos del estudio realizado en el año 2014 titulado “Levantamiento de información sobre sedimentos para llevar a cabo un proceso de evaluación de riesgo ecológico en la bahía de Quintero, región de Valparaíso” por la Universidad Católica de Temuco (UCT) a solicitud del Ministerio del Medio Ambiente, que evaluó el riesgo ecológico de la columna de sedimentos submareales en la boca de la bahía, se observa que no coincide espacialmente con el área evaluada en este estudio, a lo que se agrega que los testigos analizados por la UCT fueron más cortos, alcanzando una longitud máxima de 13 cm (en la estación A), y que, además, fueron recolectados a mayor profundidad (rango 72 a 85 m de profundidad), es decir, los ambientes sedimentarios no son completamente comparables. Sin embargo, existen coincidencias interesantes a presentar. Primero, ambos estudios encontraron dominio de arenas finas en la columna de sedimentos, aunque en este estudio hay un punto (testigo C-14) donde el dominio correspondió a arenas medias.

Por otra parte, el contenido de MOT en la columna de sedimentos, al igual que en este estudio fue bajo, con un valor promedio de $3,11 \pm 0,37\%$, que, aunque es mayor que el rango encontrado en el presente estudio que varió entre 0,5 y 2,0%, se puede explicar por el dominio granulométrico de las arenas en ambos estudios. Al igual que en el presente estudio, no se hace mención a la presencia de carbón en los sedimentos analizados.

En relación con el contenido de metales y metaloides evaluados, en la Tabla 24 se presenta una comparación de los rangos máximos y mínimos obtenidos y con los informados por el estudio de la UCT (2014). Lo primero que resalta es que, en general, los valores son comparables dentro del mismo orden de magnitud de las concentraciones.

Tabla 25. Cuadro comparativo de concentraciones presentes en la columna de sedimentos submareales de Bahía Quintero-Puchucaví. Concentraciones expresadas en $\mu\text{g g}^{-1}$.

| Elemento | Máximo | | Mínimo | |
|----------|--------|------|--------|------|
| | (1) | (2) | (1) | (2) |
| Cd | 0,08 | 1,77 | 0,02 | 0,94 |
| Cu | 47,7 | 85,2 | 17,3 | 29,3 |
| Cr | 37,9 | 31,7 | 17,2 | 19,9 |
| Hg | 0,04 | - | 0,02 | - |
| Ni | 5,0 | 7,1 | 1,4 | 5,9 |
| Pb | 15,5 | 13,7 | 12,2 | 9,0 |
| As | 9,9 | 4,9 | 2,6 | 3,4 |

(1): Este estudio.

(2): Estudio Universidad Católica de Temuco.

Se puede apreciar que los niveles de Cd obtenidos en el presente estudio fueron menores a los informados por la UCT por aproximadamente un orden de magnitud. También el contenido de Cu fue mayor en el estudio de la UCT y aunque en promedio es un 76,2% mayor, el orden de magnitud de las concentraciones es comparable en ambos estudios. El Hg no se compara porque en el estudio de la UCT se informa bajo el límite de detección del método.

En relación con la variación temporal de los metales en los sedimentos evaluados en ambos estudios, la comparación sugiere la presencia de a los menos dos horizontes, ya que la base de los testigos del estudio de la UCT se establece en el año 1960, desde donde se observa algunos aumentos en los niveles de los metales. En el presente estudio, el año 1960 se establece como el inicio de la industrialización, donde la señal antropogénica no resulta tan evidente, sino que los

aumentos de concentración de los metales y metaloides evaluados ocurren en el periodo de la industrialización moderna, que nuestro estudio lo sitúa en el año 2004. No obstante, lo anterior, ambos estudios detectan un aumento de los niveles de concentración sobre un año en particular en el caso del estudio de la UCT y sobre un nivel de referencia preindustrial utilizado en el presente estudio como Concentraciones Basales de Referencia (CBR). Lo anterior confirma, la identificación de los dos grupos de metales informados de acuerdo con el patrón de distribución vertical *i.e.*, i). los metales Cu, Hg, Pb y As mostraron un enriquecimiento superficial a partir de los 10 cm de profundidad aproximadamente, lo que indica que han existido aportes de metales por sobre un nivel basal de referencia, y que de acuerdo con la geocronología calculada para los sedimentos de la Bahía Quintero-Puchucaví, este se iniciaría en el año 2004-2005 aproximadamente, y ii) los metales Cd, Cr y Ni que tienen una distribución homogénea con la profundidad, no mostraron variaciones verticales, indicando la ausencia de aportes por fuentes distintas de las naturales. Finalmente, hay que destacar que el testigo C-14 presentó una distribución vertical diferente a aquella de los testigos C-13 y C-15 para el caso de Cd, Cu, Cr, Hg y Ni, la cual se mostró homogénea a lo largo de todo el testigo, con concentraciones más bajas, lo cual es coincidente con un tamaño de grano más grueso. En el caso de Pb y As, este testigo presentó un patrón de abundancia vertical comparable a los testigos C-13 y C-15.

6.- CONCLUSIONES

1.- La distribución horizontal de los metales y parámetros físico-químicos en sedimentos superficiales, muestra una distribución heterogénea, donde se destacan los máximos de Hg en S-2, Cd, Ni y MOT en S-12, Pb en S-5 y As en S-2 y S-3, coincidentes con las zonas de mayor industrialización en la zona costera de la Bahía Quintero-Puchuncaví.

2.- El cálculo de los índices de FE, Igeo, PLI y Ri indican, en general, que los sedimentos de los 3 testigos presentan una condición de No Contaminado y solo en algunos casos restringidos a los primeros centímetros de los testigos se establece el grado de contaminación de “Contaminación Leve” a “Contaminación Moderada” por los metales Hg, Cu, Cd y Ni.

3.- De acuerdo con el Igeo calculado en los sedimentos superficiales se presentan levemente aumentados para el Hg y As en S-2, S-3, S-4, y para Cu y Hg en la S-5 nivel que los clasifica como “No Contaminado”, solo el Cd en S-12 se clasifica como “Moderadamente Contaminado”. El PLI establece que S-2, S-4, S-5, S-7 y S-12 se categorizan como “Ligeramente Contaminadas”, en tanto que el Ri varía entre la categoría “Moderado” en S-2 y “Considerable” en S-12.

4.- Basado en la geocronología con ^{210}Pb y ^{226}Ra del Corer 13, se establecieron 3 horizontes geoquímicos y temporales, los cuales coinciden con la etapa Pre-Industrial (1860-1948), Industrialización inicial (1959 – 2003) e Industrialización Moderna (2005 – 2020).

5.- De acuerdo al modelo de datación geocronológica, se proponen como valores “Pre-Industriales” o de “Referencia Local” para la Bahía Quintero-Puchuncaví, expresados en $\mu\text{g g}^{-1}$: Cd (0,017 a 0,08), Cu (17,3 a 47,7), Cr (17,2 a 37,9), Hg (0,007 a 0,041), Ni (1,4 a 5,0), Pb (12,2 a 15,5) y As (2,6 a 9,9).

6.- Asociado a la capa superficial (Industrialización Moderna), principalmente del testigo C-13, se observan incrementos de Cu (75%), Hg (81%), Pb (6%) y As (4%), respecto al valor de referencia preindustrial, normalizados al Aluminio.

7.- Referencias

- Aguirre S-Martínez G., A. Rudolph, R. Ahumada, R. Loyola & Medina V., (2009). Toxicidad no específica en sedimentos portuarios, una aproximación al contenido de contaminantes crítico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. Volumen 44 – (3): 725-735 pp.
- Ahumada R., (1992). Patrones de distribución espacial de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb, en sedimentos superficiales de Bahía San Vicente, Chile. *Rev. Biol. Mar. Valparaíso*, 27(2), 265–282.
- Ahumada, R., & Vargas, J., (2005). Trace metals: Inputs, sedimentation and accumulation in San Vicente Bay, Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 100(1–3), 11–22. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-7056-5>.
- Ahumada, R., Rudolph, A., & Mudge, S., (2008). Trace metals in sediments of Southeast Pacific Fjords, north region (42.5° to 46.5°S). *Journal of Environmental Monitoring*, 10(2), 231–238. <https://doi.org/10.1039/b716139p>.
- Andrade, H. y S. Gutiérrez, (2003). Sédiments marins côtiers superficiels du Chili: situation actuelle. 2nd International Symposium on Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, Management Strategy Performance. Quebec City, Canada. Hélène Tremblay, Jacques Locat, Rosa Galvez-Cloutier (Eds.).
- Appleby PG. & Oldfield F., (1978). The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment. *Catena*, 5(1), 1-8.
- Azevedo H. L., (1988). Study of heavy metal pollution in the tributary rivers of the Jacarepagua Lagoon, Río de Janeiro State, Brazil, through sediment analysis. En: Seeliger, U., De Lacerda, L. D., Patchineelam, S. R. (ed.). *Metals in Coastal, Environments of Latin American*. Springer-Verlag. 297 pp.
- Binford M.W. & Brenner M., (1986). Dilution of ²¹⁰Pb by organic sedimentation in lakes of different trophic states, and application to studies of sediment-water interactions. *Limnol. Oceanogr.*, 31: 584-595.
- Blott, Simon & Pye, Kenneth., (2001). GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*. 26. 1237 - 1248. [10.1002/esp.261](https://doi.org/10.1002/esp.261).
- Bore, D., Robotham, Trucco, R., Fernández, M., & Inda, J. (1987). Evaluación preliminar de la presencia de metales pesados en recursos pesqueros de importancia comercial de la III Región Chile. (p. 26). Instituto de Fomento pesquero de Chile.
- Brzezińska, A., A. Trzońska, W. Żmikowska, L. Wódkiewicz, (1984). Trace metals in

suspended matter and surficial bottom sediments from the southern Baltic Oceanology, 18 (1984), pp. 59-77.

- Buccolieri, A., Buccolieri, G., Cardellicchio, N., et al., (2006). Heavy Metals in Marine Sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy). *Marine Chemistry*, 99: 227–235.
- Caniupán, M, T.Villaseñor, S.Pantoja, C. Lange, G. Vargas, P. Muñoz & M. Salamanca. 2009. Sedimentos laminados de la Bahía Mejillones como registro de cambios temporales en la productividad fitoplanctónica de los últimos ~200 años. *Revista Chilena de Historia Natural* 82: 83-96.
- 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://doi.org/10.4067/s0718-19572012000100011>.
- Carrera, M., Rodríguez, V., Ahumada, R., & Valenta, P. (1993). Metales trazas en la columna de agua y sedimentos blandos en bahía de concepción, Chile. Determinación mediante voltametría de redisolución. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 28(1), 151–163.
- Castillo, A., Valdés, J., Sifeddine, A., Vega, S. E., Díaz-Ochoa, J., & Marambio, Y. (2019). Evaluation of redox-sensitive metals in marine surface sediments influenced by the oxygen minimum zone of the Humboldt Current System, Northern Chile. *International Journal of Sediment Research*, 34(2), 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.08.005>.
- Cayuela, L., (2011). Análisis Multivariante. Área de Biodiversidad y Conservación, Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España.
- CCME. (2001). Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Marine Sediment 2001. https://www.elaw.org/system/files/sediment_summary_table.pdf . Marzo 2021.
- Centro de Despacho Económico y de Carga del Sistema Interconectado Central (CEDEC-SIC): (2006). Estadísticas de operación 1996- 2005.
- Centro de Ecología Aplicada, 2020, página 218.
- Centro Económico de Despacho de Carga del Sistema Interconectado Central (CEDEC-SIC): (2000) Estadísticas de operación 1990-1999.
- Centro Económico de Despacho de Carga del Sistema Interconectado Central (CEDEC-SIC): (2009) Estadísticas de operación 1999- 2008-178.
- Corcoran, Margaret B. (2013). Variations in Sedimentation Rate and Sediment Focusing in Lake Michigan Using Radionuclide Profiles. (Master of Science in Earth and Environmental Sciences), University of Illinois at Chicago, Chicago, Illinois.

- Chandía C. & M. Salamanca, (2012). Long-term monitoring of heavy metals in Chilean coastal sediments in the eastern South Pacific Ocean, 2012. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 64, Issue 10, October 2012, Pages 2254-2260.
- Chester, R. & K. Murphy, (1990). Metals in the marine atmosphere. In: *Heavy Metals in the Marine Environment*. Furnes, R. & P. Rainbow. (Eds.). CRC Press. Inc New York. 225.
- Chester, R., & Jickells, T. (2012). *Marine Geochemistry*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118349083> .
- DEC. (2010). Assessment levels for Soil, Sediment and Water. <https://www.der.wa.gov.au/images/documents/your-environment/contaminated-sites/guidelines/2009641 - assessment levels for soil sediment and water - web.pdf> marzo 2021.
- Encina, F. (2014). Levantamiento de información sobre sedimentos para llevar a cabo un proceso de evaluación de riesgo ecológico en la Bahía de Quintero, región de Valparaíso (p. 65). Universidad Católica de Temuco.
- EPA Method 3051 A. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Revision 1. February 2007.
- EPA Method 3051. Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry. Revision 0. February 2007.
- EPA Method 3052. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Revision 0. December 1996.
- Everitt B. & T. Hothorn, (2011). *An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R*. Springer New York. ISBN 978-1-4419-9649-7.
- Flynn, WW. (1968). The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Analytica chimica acta*, 43, 221-227.
- Gelen A., Díaz O., Simón M. J., Herrera E., Soto J., Gómez J., Ródenas C., Beltrán J., Ramírez M., (2003). 210Pb dating of sediments from Havana Bay. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 256: 561-654.
- Giordano, P., L. Musmeci, L. Ciaralli, P. Vernillo, J. Chirico, N. Piccioni & S. Costatini, (1992). Total content and sequential extractions of Hg, Cd and Pb in coastal sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 24:350-357.
- Goldberg ED., (1963). *Radioactive dating*. International Atomic Energy Agency. Vienna. STI/PUB/68:121-131.
- Gonzalez, F., Schalscha, E., Becerra, J., & Silva, M. (2002). Mercury in a marine trophic chain.

Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 68(3), 448–454.
<https://doi.org/10.1007/s001280275>.

- Gouleau, D., Jouanneau, J.M., Weber, O., Sauriau, P.G., (2000). Short- and long-term sedimentation on Montportail-Brouage intertidal mudflat, Marennes-OleHron Bay (France). *Continental Shelf Research* 20, 1513–1530.
- Groot, A. J. de, Salomans, W. & Allersma, E., (1976). Processes affecting heavy metals in estuarine sediments. In: *Estuarine chemistry*. Ed. by J. D. Burton & P. S. Liss. Academic Press, London, 131-157.
- Guiñez, M., Valdés, J., & Castillo, A. (2015). Contenido de metales en sedimentos y en *Emerita* analoga (Stimpson, 1857), en bahía Mejillones del Sur, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 43(1), 94–106. <https://doi.org/10.3856/vol43-issue1-fulltext-9>.
- Hakanson, L., (1980). An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – A Sedimentological Approach. *Water Research*, 14 (8), 975–1001. doi: 10.1016 / 0043-1354 (80) 90143-8.
- Håkanson, Lars & Jansson, Mats., (2002). *Principles of Lake Sedimentology*. 10.1007/978-3-642-69274-1.
- Hidalgo, M. (2017). Evaluación temporal del contenido de metales pesados en sedimentos de la Bahía de Coronel, Chile. In Universidad de Concepción. Universidad de Concepción.
- Hidalgo N, (2017). Evaluación temporal del contenido de metales pesados en sedimentos de la Bahía de Coronel, Chile. Seminario de Título para obtener el título de Biólogo Marino de la Universidad de Concepción.
- HOLON-MMA, (2019). Análisis Crítico de los Informes de Seguimiento Ambiental y de los Planes de Vigilancia Ambiental de los Establecimientos que Descargan Residuos Líquidos a la Bahía De Quintero, Región De Valparaíso.
- Hornberger, M. I., Luoma, S. N., Van Geen, A., Fuller, C., & Anima, R. (1999). Historical trends of metals in the sediments of San Francisco Bay, California. *Marine Chemistry*, 64(1–2), 39–55. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(98\)80083-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(98)80083-2).
- Jiang, X., Teng, A., Xu, W., & Liu, X. (2014). Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in the Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 83(1), 366–375. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.020>.
- Jolliffe, I. T., (2002). *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistics. New York: Springer-Verlag. doi:10.1007/b98835. ISBN 978-0-387-95442-4.
- Juan Pablo Bernal, Laura E. Beramendi Orosco, Karina C. Lugo-Ibarra, Luis Walter Daesslé,

(2010) Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 62, num.3, 2010: 305-323. <http://www.sedin.org/PDFS/CC-03A.pdf> .

- Komnitsas, K., Pylotis, 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>.
- Krishnaswami, S, & Lal, D., (1978). Radionuclide limnology Lakes (pp. 153-177): Springer.
- Krishnaswamy, S, Lal, D, Martin, JM, & Meybeck, M. (1971). Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1), 407-414.
- Larsen, K., (2015). GAM: the predictive modeling silver bullet. Multithreaded. San Francisco, USA: Stitch Fix.
- Lepane, viia et al., 2007. Sedimentary Record of Metals in Lake Rouge Linjarv, Southern Estonia. *Estonian Journal of Sciences* 56(4):221-32.
- Luque Marín, José Antonio. (2003). Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6.000 años, El: Universitat de Barcelona.
- Mackenzie, F. T. (2005). Sediments, Diagenesis, And Sedimentary Rocks, Volume 7. In *Treatise on Geochemistry*, First Edition (p. 446). Elsevier.
- Mathieu G.G., Biscaye P.E., Lupton R.A. and Hammond D.E., (1988). System for measurement of ^{222}Rn at low levels in natural waters. *Health Phys.* 5, 989–992.
- Müller, G. (1981) Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflusse Eine Bestandsaufnahme. *Chemical Zeitung*, 105, 157-164.
- Neves P., Ferreira P., Bicego M., Figueira R., (2014). Radioanalytical assessment of sedimentation rates in Guajara Bay (Amazon Estuary, N Brazil):a study with unsupported ^{210}Pb and ^{137}Cs modeling. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*,299(1):407-414.
- Novotny V. (1995) Diffuse Sources of Pollution by Toxic Metals and Impact on Receiving Waters. In: Förstner U., Salomons W., Mader P. (eds) *Heavy Metals*. Environmental Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79316-5_3
- Oksanen J., F.G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGlenn, P.R. Minchin, R. B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M. Henry, H. Stevens, E. Szoecs & H. Wagner (2019). vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-5. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Páez-Osuna, F., (1996). Fuentes de metales en la zona costera marina, p. 297-308. In: A.V.

Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benítez, D. ZáratS-Lomelí. Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico, y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie científica, 5: 666 pp.

- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Querol, X., & Paipa, C. (2015). Distribution and pollution assessment of trace elements in marine sediments in the Quintero Bay (Chile). *Marine Pollution Bulletin*, 99(1–2), 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.066>.

- Pavez, J., Silva, N., Cornejo-D'ottone, M., & Rivera, C. (2018). Laguna verde bay's sediments origin and its heavy metals content (Al, Fe, Cu, Mn, Pb, and Hg), Valparaíso, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 46(5), 1116–1122. <https://doi.org/10.3856/vol46-issue5-fulltext-24> .

- Persaud D., Jaagumagi, R., & Hayton, A. (1993). GUIDELINES FOR THE PROTECTION AND MANAGEMENT OF AQUATIC SEDIMENT QUALITY IN ONTARIO Ministry of Environment and Energy.

https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/15797/OME_guidelines_aquatsed_qual_prot93.pdf?sequence=1&isAllowed=y marzo 2021.

- Pearson, K., (1901). On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2:11, 559-572, DOI: 10.1080/14786440109462720.

- Peterson B.G. & P. Carl., (2018). Performance Analytics: Econometric Tools for Performance and Risk Analysis. R package versión 1.5.2. <https://CRAN.R-project.org/package=PerformanceAnalytics>.

- Pineda V., (2009). Granulometría y geoquímica de los sedimentos marinos en el área comprendida entre el Seno Reloncaví y el Golfo Corcovado. Chile. *Crucero CIMAR 10 fiordos. Ciencia y tecnología del mar*. 32(1): 27-47pp.

- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- Resolución 3612 Exenta., (2009). Aprueba resolución que fija las metodologías para elaborar la Caracterización Preliminar de Sitio (CPS) y I Información Ambiental (INFA). Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción; Subsecretaría de Pesca.

- Rizzo A., R. Daga, M. Arcagni¹, S. Pérez, D. Bubach, R. Sánchez, S. Ribeiro Guevara & Arribére M., (2010). Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos de lagos andinos de Patagonia Norte. *Ecología austral*, vol.20, n.2 pp. 155-171.

- Robbins, John A, & Edgington, David N. (1975). Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(3), 285-304.

- Salamanca M. & A. Camaño., (1994). Historia de la contaminación por metales traza en dos áreas costeras del norte y centro-sur de Chile. *Gayana Oceanológica*, 2, 31-48.
- Salamanca M.A., A. Camaño, B. Jara & T. Rodríguez, (2000). Cu, Pb and Zn distribution in nearshore waters in San Jorge Bay, northern Chile distribución de Cu, Pb y Zn en aguas costeras de Bahía San Jorge en el norte de Chile. *Gayana (Concepción)*, 64(2).
- Salamanca M.A., B. Jara & T. Rodríguez, T., (2004). Niveles de Cu, Pb y Zn en agua y *Perumytilus purpuratus* en Bahía San Jorge, norte de Chile. *Gayana (Concepción)*, 68(1), 53-62.
- Salamanca M.A., L. Chuecas & F. Carrasco., (1988). Heavy metal content and distribution in surface sediments from three areas of Chilean coast. *Gayana. Miscelánea*, 9(1-4), 3-16.
- Salamanca S., C Chandía, A. Hernández, F. Vargas., (2019). First long-term record of halogenated organic compounds (AOX, EOX, and T PCDD/F) and trace elements (Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Ni, and Zn) in marine biota of the coastal zone of southcentral Chile. *Marine Pollution Bulletin* 146:442–453.
- Salamanca S., C. Chandía, A. Hernández., (2016). Impact of forest fires on the concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofurans in coastal waters of central Chile. *Science of The Total Environment*. Volume 573: 1397-1405.
- Salamanca, M. & B. Jara., (2003). Distribución y acumulación de plomo (Pb y ²¹⁰Pb) en sedimentos de los fiordos de la XI Región, Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 26(2): 61-71.
- Sanchez-Cabeza & Ruiz-Fernández, (2012). ²¹⁰Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochim. Cosmochim. Acta* 82: 183–200.
- SERPLAC. (1980). Evaluación del grado de contaminación del litoral de la VIII Región de Chile. *Convenio Universidad de concepción/SERPLAC VIII Región* (p. 254).
- Sigg, L.; Sturm, M.; Kistler, D., (1987). Vertical transport of heavy metals by settling particles in Lake Zurich. *Limnol. Oceanogr.* 1987, 32, 112–130.
- Silva, N., Haro, J., & Prego, R., (2009). Metals background and enrichment in the Chiloé Interior Sea sediments (Chile). Is there any segregation between fjords, channels and sounds? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82(3), 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.02.005>
- Singh, A.K., Hasnain, S.I. and Banerjee, D.K., (1999). Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River—a tributary of the lower Ganga, India. *Environ. Geo.*,39(1), 90–98.
- Spearman, C., (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 15(1):72-99. doi:10.2307/1412159.
- Takeda, K. K., Maremoto, T., Minamikawa, H., Sakugawa & Fujiwara, K., (2000). Three-year

determination of trace metal and the lead isotope ratio in rain and snow depositions collected in Higashi-Hiroshima, Japon. *Atmospheric environment* 34(2000): 4525-4535pp.

- Tomlinson, D., Wilson, J., Harris, C. and Jeffrey, D., (1980). Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer. Meeresun.*, 33(1-4), 566-575.
- Trefry, J. H., & Presley, B. J. (1976). Heavy metals in sediments from San Antonio Bay and the northwest Gulf of Mexico. *Environmental Geology*, 1(5), 283–294. <https://doi.org/10.1007/BF02676717>.
- Tulonen, Tiina, Pihlström, Mikael, Arvola, Lauri, & Rask, Martti. (2006). Concentrations of heavy metals in food web components of small, boreal lakes. *Boreal environment research*, 11(3), 185-194.
- Universidad de Concepción. (1987). Programa de Vigilancia de Contaminantes en Bahía de Concepción, VIII Región, Chile. (p. 76).
- Universidad de Concepción. (1988). Programa de vigilancia de contaminantes en Bahía Concepción, VIII Región, Chile (p. 148). Universidad de Concepción.
- Universidad de Valparaíso. (1987). Estudio Básico para evaluar la presencia de metales pesados en agua, sedimentos y organismos en la V Región de Chile (p. 41). Universidad de Valparaíso.
- Valdés, J. (2004). Evaluación de metales redox-sensitivos como proxies de paleoxigenación en un ambiente marino hipóxico del norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(1), 121–138. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2004000100010>.
- Valdés, J. (2012). Heavy metal distribution and enrichment in sediments of Mejillones Bay (23° S), Chile: A spatial and temporal approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9), 5283–5294. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2339-5>.
- Valdés, J., & Castillo, A. (2014). Assessment of environmental quality of marine sediments in the bay system Caldera (27° S), Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(3), 497–513. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue3-fulltext-10>.
- Valdés, J., & Sifeddine, A. (2009). Composición elemental y contenido de metales en sedimentos marinos de la bahía Mejillones del Sur, Chile: Evaluación ambiental de la zona costera. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 37(2), 131–141. <https://doi.org/10.3856/vol37-issue2-fulltext-2>.
- Valdés, J., & Tapia, J. S. (2019). Spatial monitoring of metals and As in coastal sediments of northern Chile: An evaluation of background values for the analysis of local environmental

conditions. Marine Pollution Bulletin, 145(January), 624–640.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.036>.

• Valdés, J., Román, D., Guiñez, M., Rivera, L., Morales, T., Ávila, J., & Cortés, P. (2010). Distribution and temporal variation of trace metal enrichment in surface sediments of San Jorge Bay, Chile. Environmental Monitoring and Assessment, 167(1–4), 185–197.
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-1041-3>.

• Valdés, J., Vargas, G., Sifeddine, A., Ortlieb, L., & Guiñez, M. (2005). Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23°S), Northern Chile: Geochemical and statistical approach. Marine Pollution Bulletin, 50(12), 1558–1568.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.06.024>.

• Vu V.Q. (2011). ggbiplot: A ggplot2 based biplot. R package version 0.55.
<http://github.com/vqv/ggbiplot>.

• Watson, E.B., 2004. Changing elevation, accretion, and tidal marsh plant assemblages in a South San Francisco Bay tidal marsh. Estuaries and Coasts 27 (4), 684–698

• Wood, S. N., 2016. Just another Gibbs additive modeller: interfacing JAGS and mgcv. Journal of Statistical Software, 75(7), 1–15.

• ZarS-Chahouki, M. A. 2011. Multivariate Analysis Techniques in Environmental Science. In: Earth and Environmental Sciences. Imran Ahmad Dar (Ed.) ISBN: 978-953-307-468-9. doi:10.5772/26516.

• Zhang, L., Ye, X., Feng, H., Jing, Y., Ouyang, T., Yu, X., Liang, R., Gao, C., & Chen, W. (2007). Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China. Marine Pollution Bulletin, 54(7), 974–982. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.02.010> .

8.- ANEXOS

8.1.- Antecedentes del muestreo

- Las muestras superficiales de sedimento marino fueron extraídas mediante buceo y utilización de draga. La toma de muestras de testigos de sedimentos marinos se extrajo mediante buceo SCUBA. En todas las muestras de sedimentos superficiales se midió pH, temperatura *In Situ* y potencial rédox con Peachímetro Thermo en punto de Muestreo.

| Identificación | Matriz | Cantidad | Tipo de muestreo | Fecha |
|----------------|------------------|----------|------------------|------------|
| 1 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 2 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 3 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 4 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 5 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 6 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 7 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 8 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 9 | Sedimento Marino | 3 | Buceo | 27-11-2020 |
| 10 | Sedimento Marino | 3 | Draga | 28-11-2020 |
| 11 | Sedimento Marino | 3 | Draga | 28-11-2020 |
| 12 | Sedimento Marino | 3 | Draga | 28-11-2020 |
| 13 | Sedimento Marino | 2 | Buceo | 29-11-2020 |
| 14 | Sedimento Marino | 2 | Buceo | 29-11-2020 |
| 15 | Sedimento Marino | 2 | Buceo | 29-11-2020 |

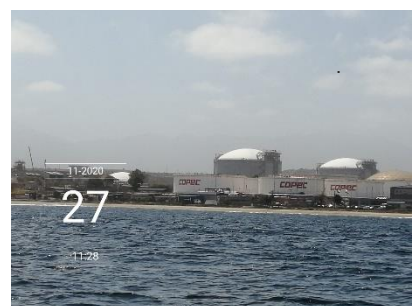
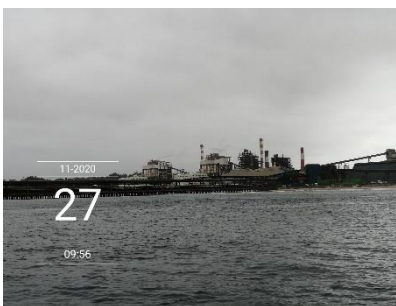
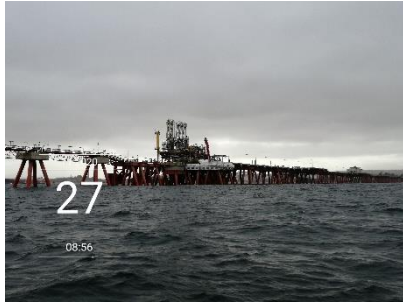
8.2.- Ubicación de los puntos de muestreo, estaciones propuestas en amarillo y estaciones efectivas en azul.



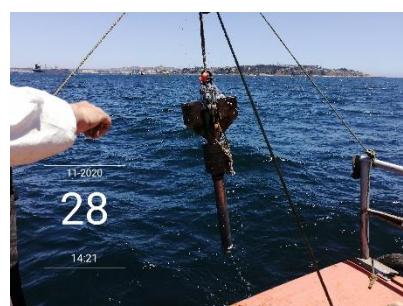
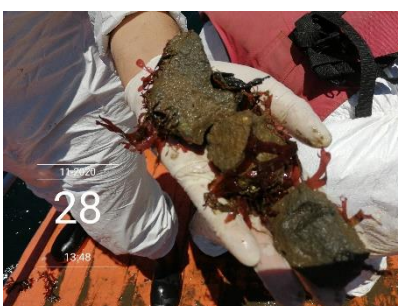
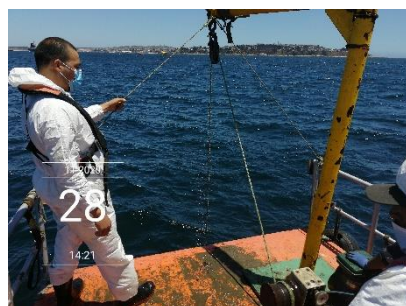
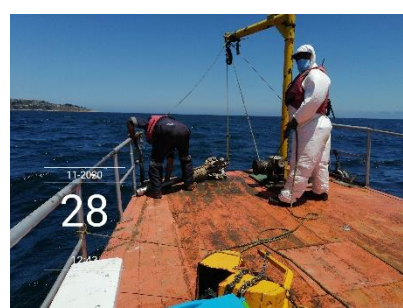
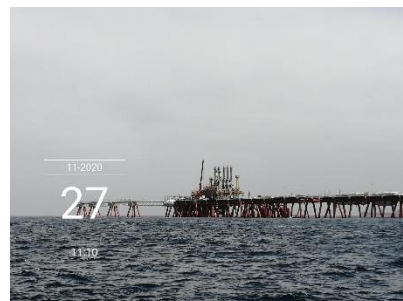
Figura 18. Imagen de puntos de muestreo propuestos (amarillo) y efectivamente tomados (azul).
Extraída desde Google Earth.

8.3.- Fotografías de las actividades de muestreo realizadas en la bahía de Quintero-Puchucaví.

8.3.1.- Muestreo del 27.11.2020.



8.3.2.- Muestreo del 28.11.2020.



8.3.3.- Muestreo del 29.11.2020.



8.4.1.- Datos Sedimentos Superficiales

| Estación | Metales Extraíbles ($\mu\text{g g}^{-1}$) | | | | | | | pH | Temp (°C) | Eh (mV) | Granulometría (μm) | | | | | | | MOT (%) | |
|-------------|---|------|------|-------|------|------|------|------|-----------|---------|---------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|------|
| | Cd | Cu | Cr | Hg | Ni | Pb | As | | | | 4000 | 2000 | 1000 | 500 | 250 | 125 | 63 | | 32 |
| S-1 | 0,056 | 21,6 | 33,2 | 0,029 | 6,8 | 9,7 | 9,7 | 7,71 | 12,7 | 374,2 | 0,13 | 1,13 | 0,63 | 0,94 | 3,83 | 64,86 | 27,56 | 0,90 | 1,21 |
| S-2 | 0,043 | 35,3 | 19,9 | 0,085 | 5,9 | 7,9 | 11,0 | 7,49 | 12,4 | 400,4 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,16 | 2,62 | 77,08 | 19,91 | 0,17 | 1,04 |
| S-3 | 0,038 | 23,9 | 16,7 | 0,059 | 5,5 | 6,3 | 11,8 | 7,35 | 13,1 | 266,8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,30 | 10,45 | 78,63 | 10,56 | 0,02 | 0,76 |
| S-4 | 0,049 | 48,8 | 39,4 | 0,066 | 7,2 | 10,5 | 10,6 | 7,5 | 13 | 245,5 | 0,00 | 0,45 | 0,91 | 0,78 | 1,85 | 54,83 | 39,91 | 1,26 | 1,18 |
| S-5 | 0,052 | 80,8 | 19,4 | 0,054 | 5,3 | 13,6 | 5,9 | 7,54 | 13,4 | 362,8 | 0,00 | 0,10 | 0,71 | 3,70 | 13,48 | 61,33 | 19,37 | 1,20 | 1,57 |
| S-6 | 0,058 | 46,6 | 32,5 | 0,047 | 4,2 | 7,2 | 5,9 | 7,59 | 12,1 | 131,2 | 0,00 | 1,15 | 2,75 | 7,80 | 19,74 | 49,34 | 17,96 | 1,17 | 0,98 |
| S-7 | 0,053 | 36,4 | 25,3 | 0,051 | 5,8 | 9,4 | 9,0 | 7,53 | 12,5 | 161,8 | 0,00 | 0,37 | 1,48 | 1,35 | 3,25 | 65,80 | 26,83 | 0,89 | 1,15 |
| S-8 | 0,044 | 33,7 | 20,8 | 0,047 | 4,7 | 8,4 | 8,2 | 7,54 | 12,1 | 335,4 | 0,00 | 0,19 | 1,01 | 2,57 | 4,86 | 81,60 | 9,55 | 0,20 | 1,23 |
| S-9 | 0,039 | 33,5 | 24,9 | 0,034 | 5,4 | 8,3 | 9,1 | 7,45 | 12,1 | 316,8 | 0,00 | 0,00 | 0,23 | 3,28 | 30,66 | 46,40 | 18,61 | 0,79 | 1,03 |
| S-10 | 0,038 | 24,4 | 23,3 | 0,014 | 4,7 | 6,5 | 8,2 | 7,57 | 13,2 | 345,8 | 0,00 | 0,51 | 12,71 | 35,25 | 27,57 | 17,40 | 6,10 | 0,43 | 1,01 |
| S-11 | 0,052 | 23,7 | 28,3 | 0,027 | 6,0 | 6,7 | 6,4 | 7,68 | 13,2 | 244,6 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,71 | 17,39 | 49,53 | 31,28 | 0,98 | 1,03 |
| S-12 | 0,609 | 56,2 | 35,4 | 0,052 | 10,5 | 9,5 | 6,7 | 7,63 | 13,1 | 98,1 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,27 | 2,31 | 15,05 | 74,45 | 7,77 | 1,94 |



8.4.2.- Data Testigos de Sedimentos C-13

| Estrato | Humedad (%) | D. Apar. (g cm ⁻³) | MOT (%) | Sus. Mag | Metales Totales (µg g ⁻¹) | | | | | | | | Granulometría (µm) | | | | | | | |
|--------------|-------------|--------------------------------|---------|----------|---------------------------------------|-------|------|------|-------|-----|------|------|--------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| | | | | | Al | Cd | Cu | Cr | Hg | Ni | Pb | As | 4000 | 2000 | 1000 | 500 | 250 | 125 | 63 | 32 |
| C-13 (0-1) | 21,6 | 1,3 | 1,50 | 382 | 92356 | 0,043 | 78,1 | 29,4 | 0,073 | 4,2 | 18,6 | 10,1 | 0,00 | 0,22 | 0,12 | 0,21 | 3,21 | 33,27 | 61,00 | 1,96 |
| C-13 (1-2) | 19,6 | 1,7 | 1,07 | 380 | 84428 | 0,057 | 52,3 | 31,9 | 0,053 | 5,9 | 15,9 | 9,7 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 2,70 | 44,77 | 51,49 | 0,85 |
| C-13 (2-3) | 18,8 | 1,6 | 0,93 | 694 | 77526 | 0,052 | 45,8 | 36,4 | 0,048 | 5,3 | 15,8 | 10,8 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,09 | 3,66 | 60,40 | 35,11 | 0,62 |
| C-13 (3-4) | 18,7 | 2,1 | 0,78 | 827 | 79555 | 0,056 | 42,4 | 31,8 | 0,044 | 5,7 | 15,4 | 3,4 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,27 | 7,72 | 56,26 | 34,99 | 0,59 |
| C-13 (4-5) | 17,6 | 1,7 | 0,94 | 925 | 80942 | 0,057 | 42,9 | 37,3 | 0,048 | 5,9 | 14,8 | 10,7 | 0,00 | 0,02 | 0,14 | 0,63 | 9,03 | 56,34 | 33,12 | 0,56 |
| C-13 (5-6) | 17,8 | 1,7 | 0,94 | 179 | 76145 | 0,056 | 35,8 | 31,4 | 0,043 | 5,7 | 13,2 | 8,6 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 2,38 | 11,83 | 50,63 | 34,42 | 0,53 |
| C-13 (6-7) | 18,4 | 2,1 | 0,97 | 220 | 79365 | 0,055 | 40,1 | 36,7 | 0,042 | 5,7 | 14,6 | 9,2 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 1,15 | 13,13 | 58,65 | 26,27 | 0,58 |
| C-13 (7-8) | 18,2 | 2,0 | 0,92 | 383 | 71117 | 0,053 | 41,2 | 34,2 | 0,039 | 5,5 | 13,6 | 2,7 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 1,81 | 16,06 | 48,29 | 32,95 | 0,57 |
| C-13(8-9) | 17,7 | 1,6 | 0,92 | 663 | 66716 | 0,054 | 42,8 | 32,7 | 0,037 | 5,6 | 13,8 | 4,5 | 0,00 | 0,08 | 0,38 | 3,27 | 13,80 | 48,91 | 32,69 | 0,64 |
| C-13 (9-10) | 18,2 | 1,9 | 0,95 | 569 | 72249 | 0,046 | 39,7 | 37,8 | 0,037 | 5,4 | 13,6 | 3,3 | 0,00 | 0,04 | 0,32 | 2,28 | 14,50 | 50,38 | 31,59 | 0,58 |
| C-13 (10-12) | 18,7 | 1,6 | 1,11 | 608 | 69960 | 0,045 | 42,5 | 39,4 | 0,038 | 5,5 | 14,1 | 3,0 | 0,00 | 0,05 | 0,43 | 2,31 | 11,77 | 62,07 | 22,56 | 0,73 |
| C-13 (12-14) | 18,6 | 1,7 | 0,87 | 518 | 68814 | 0,044 | 45,3 | 40,9 | 0,039 | 5,5 | 14,6 | 2,8 | 0,00 | 0,09 | 0,56 | 2,70 | 11,69 | 61,76 | 22,47 | 0,62 |
| C-13 (14-16) | 18,7 | 1,7 | 0,95 | 498 | 67670 | 0,045 | 48,1 | 42,5 | 0,040 | 5,6 | 15,1 | 2,6 | 0,00 | 0,07 | 0,69 | 4,95 | 12,83 | 51,85 | 28,88 | 0,55 |
| C-13 (16-18) | 19,7 | 1,9 | 1,02 | 341 | 71291 | 0,051 | 50,8 | 42,4 | 0,042 | 5,6 | 15,2 | 3,7 | 0,00 | 0,00 | 0,45 | 2,02 | 9,14 | 65,45 | 22,23 | 0,67 |
| C-13 (18-20) | 20,1 | 1,5 | 0,94 | 442.5 | 74913 | 0,056 | 53,6 | 42,2 | 0,044 | 5,6 | 15,3 | 4,9 | 0,12 | 0,11 | 0,18 | 0,82 | 9,36 | 51,05 | 37,44 | 0,80 |
| C-13 (20-22) | 20,6 | 1,7 | 0,99 | 407 | 71291 | 0,053 | 51,2 | 38,2 | 0,043 | 5,8 | 14,8 | 4,9 | 0,07 | 0,22 | 0,12 | 0,82 | 8,52 | 62,11 | 27,60 | 0,50 |
| C-13 (22-24) | 20,0 | 1,6 | 0,89 | 643 | 68257 | 0,050 | 48,8 | 34,1 | 0,043 | 6,0 | 14,4 | 4,9 | 0,00 | 0,00 | 0,31 | 1,22 | 10,00 | 55,55 | 32,23 | 0,67 |
| C-13 (24-26) | 19,4 | 1,7 | 1,14 | 413 | 71291 | 0,049 | 41,9 | 32,7 | 0,040 | 5,3 | 14,3 | 7,3 | 0,00 | 0,00 | 0,34 | 1,64 | 12,23 | 61,93 | 23,18 | 0,56 |
| C-13 (26-28) | 18,8 | 1,4 | 0,89 | 419 | 66903 | 0,048 | 35,0 | 31,3 | 0,036 | 4,6 | 14,3 | 9,7 | 0,00 | 0,00 | 0,29 | 1,90 | 17,69 | 50,18 | 29,24 | 0,58 |
| C-13 (28-30) | 18,6 | 2,0 | 0,89 | 530 | 71291 | 0,046 | 39,3 | 34,8 | 0,037 | 4,7 | 14,7 | 7,8 | 0,00 | 0,04 | 0,54 | 4,62 | 17,09 | 53,71 | 23,37 | 0,50 |
| C-13 (30-32) | 18,3 | 1,8 | 0,76 | 533 | 65718 | 0,044 | 43,6 | 38,4 | 0,038 | 4,7 | 15,1 | 5,9 | 0,00 | 0,04 | 1,34 | 9,02 | 17,94 | 47,72 | 23,31 | 0,56 |
| C-13 (32-34) | 20,2 | 1,7 | 0,78 | 530 | 71291 | 0,046 | 45,6 | 37,9 | 0,038 | 4,9 | 15,3 | 4,2 | 0,00 | 0,09 | 0,56 | 3,69 | 12,38 | 52,05 | 30,36 | 0,73 |
| C-13 (34-36) | 19,9 | 1,8 | 0,91 | 555 | 73024 | 0,048 | 47,7 | 37,5 | 0,037 | 5,0 | 15,5 | 2,6 | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 3,14 | 13,07 | 62,84 | 19,92 | 0,47 |
| C-13 (36-38) | 18,8 | 1,7 | 0,80 | 527 | 71291 | 0,049 | 42,6 | 35,3 | 0,034 | 4,7 | 15,3 | 6,0 | 0,00 | 0,00 | 1,33 | 9,60 | 17,36 | 46,77 | 24,32 | 0,47 |
| C-13 (38-40) | 18,3 | 1,9 | 0,76 | 530 | 73942 | 0,050 | 37,5 | 33,1 | 0,031 | 4,4 | 15,1 | 9,5 | 0,00 | 0,00 | 2,24 | 10,25 | 17,96 | 53,02 | 16,00 | 0,33 |
| C-13 (40-42) | 18,8 | 1,6 | 0,71 | 349 | 71291 | 0,048 | 35,9 | 35,0 | 0,031 | 4,5 | 15,0 | 9,7 | 0,00 | 0,00 | 1,48 | 8,16 | 21,33 | 50,27 | 18,20 | 0,35 |
| C-13 (42-43) | 18,0 | 2,2 | 0,85 | 290 | 71118 | 0,045 | 34,3 | 36,9 | 0,031 | 4,7 | 14,9 | 9,9 | 0,00 | 0,00 | 2,55 | 12,37 | 17,88 | 46,06 | 20,37 | 0,46 |

8.4.3.- Data Testigos de Sedimentos C-14

| Estrato | Humedad (%) | D. Apar. (g cm ⁻³) | MOT (%) | Sus. Mag | Metales Totales (µg g ⁻¹) | | | | | | | Granulometría (µm) | | | | | | | |
|--------------|-------------|--------------------------------|---------|----------|---------------------------------------|------|------|-------|------|-------|------|--------------------|------|------|-------|-------|-------|------|------|
| | | | | | Cd | Cu | Cr | Hg | Ni | Pb | As | 4000 | 2000 | 1000 | 500 | 250 | 125 | 63 | 32 |
| C-14 (0-1) | 15,7 | 2,0 | 0,73 | 165 | 0,024 | 19,0 | 17,2 | 0,013 | 2,1 | 15,2 | 7,8 | 0,00 | 0,04 | 1,10 | 25,86 | 34,92 | 32,15 | 5,76 | 0,11 |
| C-14 (1-2) | 12,2 | 1,8 | 0,57 | 109 | 0,019 | 16,1 | 18,7 | 0,011 | 1,6 | 12,0 | 6,9 | 0,00 | 0,22 | 2,68 | 42,57 | 38,37 | 13,88 | 2,13 | 0,03 |
| C-14 (2-3) | 13,1 | 2,4 | 0,63 | 139 | 0,019 | 17,1 | 19,1 | 0,008 | 1,8 | 13,4 | 7,0 | 0,00 | 0,00 | 1,82 | 40,44 | 44,76 | 11,76 | 1,11 | 0,04 |
| C-14 (3-4) | 10,3 | 1,9 | 0,53 | 141 | 0,018 | 16,2 | 16,8 | 0,008 | 1,7 | 12,5 | 6,6 | 0,00 | 0,34 | 2,84 | 45,43 | 40,08 | 9,79 | 1,33 | 0,02 |
| C-14 (4-5) | 7,8 | 1,9 | 0,51 | 155 | 0,015 | 17,4 | 15,5 | 0,007 | 1,6 | 12,3 | 6,4 | 0,00 | 0,45 | 4,33 | 43,76 | 36,56 | 12,64 | 2,04 | 0,04 |
| C-14 (5-6) | 7,6 | 1,9 | 0,53 | 171 | 0,016 | 15,8 | 15,3 | 0,007 | 1,5 | 11,4 | 6,4 | 0,00 | 0,17 | 3,36 | 45,02 | 37,31 | 12,11 | 1,77 | 0,02 |
| C-14 (6-7) | 8,0 | 1,9 | 0,45 | 195 | 0,016 | 16,6 | 17,8 | 0,008 | 1,5 | 12,6 | 7,0 | 0,00 | 0,16 | 3,28 | 41,44 | 41,00 | 12,08 | 1,78 | 0,11 |
| C-14 (7-8) | 8,7 | 2,2 | 0,61 | 244 | 0,015 | 17,7 | 17,1 | 0,007 | 1,3 | 12,0 | 7,6 | 0,00 | 0,00 | 2,84 | 42,76 | 39,09 | 13,21 | 1,79 | 0,02 |
| C-14 (8-9) | 9,5 | 2,2 | 0,45 | 280 | 0,017 | 17,0 | 18,3 | 0,007 | 2,0 | 12,2 | 6,9 | 0,00 | 0,27 | 3,62 | 40,81 | 40,20 | 12,94 | 1,96 | 0,03 |
| C-14 (9-10) | 8,5 | 2,0 | 0,57 | 213 | 0,022 | 17,3 | 17,4 | 0,010 | 2,3 | 12,1 | 7,0 | 0,00 | 0,41 | 4,51 | 44,48 | 35,79 | 12,75 | 1,94 | 0,10 |
| C-14 (10-12) | 9,1 | 1,7 | 0,47 | 205 | 0,022 | 17,6 | 18,2 | 0,009 | 2,3 | 12,4 | 7,3 | 0,00 | 0,49 | 3,29 | 37,71 | 38,87 | 17,30 | 2,18 | 0,03 |
| C-14 (12-14) | 10,0 | 1,7 | 0,61 | 224 | 0,021 | 18,0 | 18,9 | 0,009 | 2,2 | 12,6 | 7,5 | 0,00 | 0,37 | 3,17 | 40,22 | 37,89 | 16,29 | 1,93 | 0,03 |
| C-14 (14-16) | 9,8 | 1,6 | 0,55 | 164 | 0,021 | 18,3 | 19,6 | 0,009 | 2,2 | 12,8 | 7,8 | 0,00 | 0,07 | 2,55 | 40,59 | 39,62 | 14,92 | 2,09 | 0,06 |
| C-14 (16-18) | 10,4 | 1,8 | 0,64 | 240 | 0,021 | 19,0 | 20,6 | 0,008 | 2,2 | 13,3 | 8,0 | 0,00 | 0,30 | 3,10 | 40,36 | 38,58 | 15,52 | 1,95 | 0,04 |
| C-14 (18-20) | 9,9 | 1,9 | 0,50 | 262 | 0,020 | 19,8 | 21,6 | 0,007 | 2,2 | 13,7 | 8,1 | 0,00 | 0,24 | 2,66 | 38,18 | 39,29 | 17,38 | 2,20 | 0,01 |
| C-14 (20-22) | 8,1 | 1,4 | 0,52 | 281 | 0,019 | 18,7 | 20,7 | 0,007 | 2,0 | 13,0 | 8,0 | 0,00 | 0,30 | 4,48 | 45,01 | 37,02 | 11,29 | 1,59 | 0,02 |
| C-14 (22-24) | 7,6 | 1,8 | 0,54 | 225 | 0,018 | 17,7 | 19,8 | 0,008 | 1,8 | 12,4 | 7,8 | 0,00 | 0,34 | 4,74 | 46,80 | 35,88 | 10,73 | 1,43 | 0,02 |
| C-14 (24-26) | 7,9 | 1,6 | 0,49 | 216 | 0,019 | 17,9 | 20,5 | 0,008 | 1,8 | 12,7 | 7,9 | 0,00 | 0,57 | 3,94 | 42,11 | 37,78 | 13,26 | 1,91 | 0,06 |
| C-14 (26-28) | 8,4 | 1,7 | 0,54 | 206 | 0,019 | 18,1 | 21,2 | 0,008 | 1,9 | 12,9 | 7,9 | 0,00 | 0,42 | 3,91 | 44,56 | 36,90 | 12,01 | 1,95 | 0,05 |
| C-14 (28-30) | 10,9 | 1,6 | 0,46 | 227 | 0,018 | 17,5 | 18,5 | 0,008 | 1,7 | 12,7 | 7,2 | 0,00 | 0,17 | 3,63 | 41,52 | 37,79 | 14,56 | 2,06 | 0,06 |
| C-14 (30-32) | 9,1 | 1,7 | 0,61 | 256 | 0,017 | 16,8 | 15,8 | 0,008 | 1,6 | 12,4 | 6,5 | 0,00 | 0,66 | 4,02 | 43,58 | 37,25 | 12,47 | 1,57 | 0,02 |
| C-14 (32-34) | 9,1 | 1,7 | 0,39 | 198 | 0,016 | 16,3 | 15,5 | 0,007 | 1,5 | 11,8 | 7,4 | 0,00 | 0,42 | 3,76 | 43,49 | 37,47 | 12,89 | 1,80 | 0,07 |
| C-14 (34-36) | 9,6 | 1,6 | 0,52 | 185 | 0,015 | 15,9 | 15,3 | 0,007 | 1,4 | 11,2 | 8,4 | 0,00 | 0,27 | 4,11 | 43,97 | 37,43 | 12,14 | 1,76 | 0,06 |
| C-14 (36-38) | 10,2 | 1,7 | 0,53 | 209 | 0,016 | 17,1 | 15,9 | 0,008 | 1,4 | 11,3 | 8,3 | 0,00 | 0,47 | 4,01 | 43,34 | 37,97 | 12,43 | 1,57 | 0,04 |
| C-14 (38-40) | 9,7 | 1,6 | 0,40 | 193 | 0,016 | 18,3 | 16,6 | 0,009 | 1,4 | 11,4 | 8,1 | 0,00 | 0,44 | 4,91 | 46,65 | 34,32 | 11,68 | 1,77 | 0,07 |
| C-14 (40-42) | 10,9 | 1,7 | 0,50 | 168 | 0,017 | 18,2 | 17,0 | 0,011 | 1,4 | 11,8 | 8,2 | 0,00 | 0,48 | 4,24 | 42,30 | 37,46 | 13,91 | 1,50 | 0,04 |
| C-14 (42-44) | 12,2 | 1,7 | 0,59 | 162 | 0,017 | 18,1 | 17,4 | 0,014 | 1,5 | 12,3 | 8,2 | 0,00 | 0,52 | 4,49 | 44,11 | 36,20 | 12,98 | 1,55 | 0,03 |
| C-14 (44-46) | 13,0 | 1,7 | 0,66 | 150 | 0,016 | 17,7 | 17,9 | 0,011 | 1,4 | 12,2 | 8,1 | 0,00 | 0,08 | 4,72 | 44,79 | 36,60 | 12,43 | 1,27 | 0,02 |
| C-14 (46-48) | 14,4 | 1,8 | 0,60 | 196 | 0,015 | 17,2 | 18,5 | 0,009 | 1,4 | 12,0 | 7,9 | 0,00 | 0,32 | 6,10 | 47,61 | 32,83 | 11,76 | 1,29 | 0,02 |
| C-14 (48-50) | 15,1 | 1,8 | 0,66 | 221 | 0,018 | 17,3 | 17,8 | 0,008 | 1,6 | 12,2 | 7,7 | 0,00 | 0,32 | 5,45 | 46,29 | 33,24 | 13,21 | 1,34 | 0,02 |
| C-14 (50-52) | 15,7 | 1,7 | 0,51 | 280 | 0,020 | 17,3 | 17,2 | 0,007 | 1,9 | 12,4 | 7,6 | 0,00 | 0,39 | 6,63 | 48,79 | 32,08 | 10,81 | 1,21 | 0,02 |
| C-14 (52-54) | 16,6 | 1,9 | 0,65 | 301 | 0,019 | 17,4 | 17,7 | 0,009 | 1,6 | 12,4 | 7,6 | 0,00 | 0,45 | 5,17 | 39,54 | 36,74 | 16,22 | 1,84 | 0,03 |
| C-14 (54-56) | 17,1 | 1,8 | 0,63 | 326 | 0,017 | 17,6 | 18,3 | 0,010 | 1,42 | 12,37 | 7,64 | 0,00 | 0,19 | 3,37 | 38,66 | 39,88 | 15,94 | 1,65 | 0,02 |

8.4.4.- Data Testigos de Sedimentos C-15

| Estrato | Humedad (%) | D. Apar. (g cm ⁻³) | MOT (%) | Sus. Mag | Metales Totales (µg g ⁻¹) | | | | | | | Granulometría (µm) | | | | | | | |
|--------------|-------------|--------------------------------|---------|----------|---------------------------------------|------|------|-------|-----|------|-----|--------------------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | | | | | Cd | Cu | Cr | Hg | Ni | Pb | As | 4000 | 2000 | 1000 | 500 | 250 | 125 | 63 | 32 |
| C-15 (0-1) | 33,7 | 1,3 | 2,0 | 174 | 0,039 | 65,1 | 23,8 | 0,072 | 3,1 | 15,9 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 0,6 | 1,7 | 13,5 | 58,6 | 22,7 | 2,7 |
| C-15 (1-2) | 22,7 | 1,8 | 1,3 | 369 | 0,053 | 42,8 | 26,6 | 0,041 | 4,4 | 14,5 | 6,4 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 2,3 | 19,1 | 65,4 | 11,7 | 0,7 |
| C-15 (2-3) | 22,1 | 1,7 | 1,1 | 309 | 0,054 | 36,8 | 26,9 | 0,032 | 3,6 | 12,2 | 5,4 | 0,0 | 0,2 | 2,2 | 5,4 | 26,6 | 55,7 | 8,8 | 0,6 |
| C-15 (3-4) | 20,2 | 1,9 | 1,0 | 341 | 0,056 | 34,0 | 31,6 | 0,030 | 3,3 | 12,5 | 5,4 | 1,3 | 3,4 | 8,9 | 12,4 | 32,6 | 36,2 | 4,7 | 0,3 |
| C-15 (4-5) | 21,1 | 2,0 | 1,3 | 367 | 0,059 | 39,5 | 21,7 | 0,041 | 3,7 | 11,5 | 4,8 | 2,3 | 2,5 | 3,8 | 6,5 | 27,2 | 47,6 | 8,8 | 0,8 |
| C-15 (5-6) | 21,3 | 1,7 | 1,4 | 369 | 0,066 | 46,4 | 30,6 | 0,042 | 4,2 | 12,7 | 1,8 | 2,4 | 1,5 | 3,3 | 7,5 | 26,8 | 48,6 | 8,6 | 0,8 |
| C-15 (6-7) | 21,2 | 1,8 | 1,3 | 373 | 0,063 | 47,8 | 25,6 | 0,052 | 3,8 | 12,8 | 5,2 | 0,0 | 0,3 | 2,1 | 6,3 | 27,4 | 51,5 | 10,8 | 1,1 |
| C-15 (7-8) | 21,2 | 1,9 | 1,3 | 389 | 0,064 | 48,0 | 26,2 | 0,045 | 4,4 | 13,0 | 4,9 | 0,0 | 0,2 | 2,4 | 6,7 | 28,3 | 51,8 | 9,2 | 0,9 |
| C-15 (8-9) | 21,3 | 1,8 | 1,3 | 409 | 0,069 | 46,5 | 29,7 | 0,049 | 4,3 | 13,6 | 5,6 | 0,0 | 0,7 | 3,5 | 7,6 | 31,3 | 48,9 | 7,5 | 0,5 |
| C-15 (9-10) | 21,0 | 1,6 | 1,2 | 406 | 0,070 | 44,2 | 28,7 | 0,041 | 4,4 | 13,2 | 2,8 | 0,0 | 0,3 | 3,3 | 9,3 | 30,8 | 48,4 | 7,4 | 0,5 |
| C-15 (10-12) | 20,9 | 1,7 | 1,3 | 504 | 0,067 | 45,5 | 28,8 | 0,042 | 4,2 | 13,1 | 3,8 | 0,0 | 0,6 | 2,9 | 8,3 | 30,3 | 48,4 | 8,6 | 0,7 |
| C-15 (12-14) | 20,5 | 1,6 | 1,1 | 510 | 0,064 | 46,7 | 28,9 | 0,043 | 4,0 | 13,0 | 4,8 | 0,0 | 0,5 | 2,7 | 8,7 | 29,1 | 50,6 | 7,6 | 0,6 |
| C-15 (14-16) | 20,5 | 1,7 | 1,1 | 552 | 0,060 | 48,0 | 29,1 | 0,045 | 3,8 | 13,0 | 5,8 | 0,0 | 0,5 | 2,5 | 9,1 | 31,6 | 47,1 | 8,5 | 0,6 |
| C-15 (16-18) | 19,7 | 1,5 | 1,1 | 610 | 0,062 | 46,5 | 30,5 | 0,043 | 4,0 | 13,2 | 5,7 | 0,2 | 3,0 | 4,9 | 9,5 | 29,3 | 45,3 | 7,2 | 0,5 |
| C-15 (18-20) | 20,4 | 1,7 | 1,2 | 555 | 0,063 | 45,1 | 31,9 | 0,041 | 4,2 | 13,5 | 5,6 | 0,0 | 1,2 | 3,9 | 9,8 | 32,3 | 44,7 | 7,6 | 0,5 |
| C-15 (20-22) | 20,1 | 1,6 | 1,6 | 678 | 0,067 | 45,9 | 30,4 | 0,044 | 4,3 | 13,3 | 5,5 | 0,2 | 0,8 | 3,9 | 6,4 | 28,4 | 51,3 | 8,1 | 0,6 |
| C-15 (22-24) | 21,0 | 1,8 | 1,2 | 774 | 0,071 | 46,7 | 28,8 | 0,048 | 4,4 | 13,1 | 5,5 | 0,0 | 0,5 | 2,2 | 7,6 | 27,9 | 52,9 | 8,1 | 0,6 |
| C-15 (24-26) | 20,5 | 1,8 | 1,3 | 739 | 0,073 | 45,3 | 28,8 | 0,044 | 4,4 | 13,0 | 5,6 | 0,1 | 0,6 | 2,5 | 7,2 | 29,0 | 50,4 | 9,6 | 0,5 |
| C-15 (26-28) | 20,8 | 1,7 | 1,0 | 665 | 0,075 | 44,0 | 28,7 | 0,041 | 4,5 | 13,0 | 5,6 | 0,0 | 0,3 | 2,4 | 8,8 | 29,2 | 50,6 | 8,1 | 0,5 |
| C-15 (28-30) | 20,7 | 1,7 | 1,2 | 586 | 0,076 | 42,2 | 28,1 | 0,039 | 4,3 | 13,0 | 6,3 | 0,1 | 0,6 | 3,5 | 8,3 | 30,0 | 47,9 | 9,0 | 0,4 |
| C-15 (30-32) | 20,9 | 1,8 | 1,1 | 564 | 0,077 | 40,3 | 27,5 | 0,037 | 4,1 | 13,1 | 7,0 | 0,0 | 0,5 | 2,5 | 7,9 | 28,4 | 51,9 | 8,2 | 0,4 |
| C-15 (32-34) | 20,6 | 1,6 | 1,3 | 661 | 0,073 | 39,6 | 26,2 | 0,038 | 4,0 | 12,8 | 6,8 | 0,1 | 0,3 | 2,2 | 8,1 | 31,1 | 49,0 | 8,6 | 0,4 |
| C-15 (34-36) | 21,0 | 1,6 | 1,0 | 574 | 0,069 | 38,9 | 25,0 | 0,038 | 4,0 | 12,5 | 6,6 | 0,0 | 0,6 | 2,7 | 9,0 | 31,0 | 48,8 | 7,4 | 0,4 |
| C-15 (36-38) | 20,9 | 1,6 | 1,0 | 453 | 0,070 | 40,9 | 25,8 | 0,040 | 4,2 | 12,7 | 6,3 | 0,0 | 0,6 | 1,9 | 7,5 | 29,3 | 51,0 | 9,3 | 0,4 |
| C-15 (38-40) | 21,5 | 1,7 | 1,0 | 395 | 0,070 | 42,9 | 26,6 | 0,042 | 4,4 | 12,9 | 6,1 | 0,0 | 0,4 | 1,9 | 5,2 | 28,2 | 53,8 | 9,9 | 0,5 |
| C-15 (40-42) | 21,7 | 1,6 | 1,3 | 362 | 0,071 | 42,9 | 28,3 | 0,041 | 4,4 | 13,7 | 6,2 | 0,1 | 0,2 | 1,8 | 7,6 | 28,0 | 51,9 | 9,5 | 0,5 |
| C-15 (44-46) | 22,0 | 1,6 | 1,3 | 342 | 0,072 | 42,8 | 29,9 | 0,041 | 4,3 | 14,6 | 6,4 | 0,0 | 0,3 | 2,4 | 8,9 | 29,7 | 50,0 | 8,1 | 0,5 |
| C-15 (46-44) | 22,1 | 1,7 | 1,3 | - | 0,076 | 40,8 | 28,2 | 0,039 | 4,2 | 13,6 | 6,0 | 0,0 | 0,6 | 3,5 | 9,3 | 32,0 | 46,4 | 7,6 | 0,4 |
| C-15 (44-46) | 22,3 | 1,5 | 0,9 | - | 0,080 | 38,7 | 26,5 | 0,038 | 4,1 | 12,6 | 5,6 | 0,0 | 0,9 | 3,7 | 8,7 | 34,0 | 44,4 | 7,4 | 0,6 |
| C-15 (48-50) | 22,6 | 1,6 | 1,0 | - | 0,075 | 38,3 | 27,4 | 0,036 | 4,3 | 13,0 | 5,3 | 0,1 | 0,5 | 2,8 | 8,9 | 32,0 | 47,5 | 7,6 | 0,3 |
| C-15 (50-52) | 22,6 | 1,5 | 1,1 | - | 0,070 | 37,8 | 28,2 | 0,034 | 4,5 | 13,3 | 5,0 | 0,2 | 1,0 | 4,1 | 9,3 | 33,7 | 45,2 | 6,0 | 0,2 |



8.4.5.- Certificados de Análisis de Laboratorio. (vínculo de certificados LOQ-UDEC, formato PDF).