



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
INGENIERÍA AMBIENTAL

Evaluación de la contaminación con metales pesados en la bahía de Coronel mediante el análisis de sedimentos

Tesis para optar al título de Ingeniero ambiental

Matías Rodrigo Torres Piérola

Profesor Guía

Dr. Roberto Urrutia Pérez

Profesor o-guía

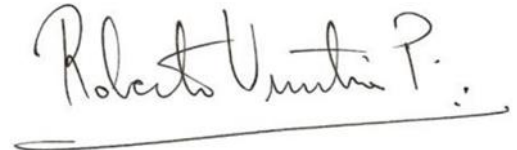
Dr. Alberto Araneda Castillo

Concepción, Chile

julio de 2023.

**“Evaluación de la contaminación con metales pesados en la bahía de Coronel
mediante el análisis de sedimentos.”**

Profesor Guía: Dr. Roberto Urrutia Pérez



Profesor Co-Guía: Dr. Alberto Araneda Castillo



Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias



Profesor Comisión: Dr. Ricardo Barra Ríos



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, julio 2023

Agradecimientos

A mi familia, amigos y compañeros, no queda más que agradecer el cariño y apoyo en este largo proceso y siempre motivarme a lograr mis metas.

Agradecer también a los profesores y los trabajadores de la facultad de Ingeniería Ambiental, por su inmensa disposición y buen trato.

Sin su ayuda seguramente este camino habría sido más difícil.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	4
3. OBJETIVOS	4
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1. METALES PESADOS.....	5
4.2. SEDIMENTOS	6
4.3. EFECTOS EN LA SALUD.....	8
4.4. CONTEXTO CHILENO Y NORMATIVA AMBIENTAL	13
4.5. CORONEL.....	14
5. MATERIALES Y MÉTODOS	16
5.1. ÁREA DE ESTUDIO	16
5.2. OBTENCIÓN DE MUESTRAS	17
5.2.1. ANÁLISIS QUÍMICO	18
5.2.2. ANÁLISIS ESTADISTICO	18
5.3. CALCULO ÍNDICES DE CONTAMINACION.....	18
5.3.1. FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO.....	18
5.3.2. ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN	19
5.3.3. ÍNDICE DE CARGA CONTAMINANTE	21
5.4. CÁLCULO DE VARIABILIDAD ESTACIONAL	21
5.5. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN CORONEL.....	22
5.6. IMPLEMENTACION DE NORMATIVA	22
6. RESULTADOS	22
6.1. CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL SEDIMENTO.....	22
6.1.1. HUMEDAD.....	22
6.1.2. MATERIA ORGÁNICA TOTAL.....	22
6.1.3. GRANULOMETRÍA.....	23
6.1.4. CARBONO ORGÁNICO TOTAL.....	23
6.1.5. POTENCIAL REDOX.....	23

6.1.6.	pH.....	23
6.1.7.	LÍPIDOS.....	24
6.2.	CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTO	25
6.2.1.	ARSÉNICO.....	25
6.2.2.	CADMIO.....	25
6.2.3.	CROMO.....	25
6.2.4.	COBRE.....	26
6.2.5.	PLOMO	26
6.2.6.	MERCURIO	26
6.2.7.	ZINC	26
6.3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
6.3.1.	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	27
6.3.2.	CORRELACIÓN DE PEARSON	28
6.3.3.	ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	28
6.4.	INDICADORES DE CONTAMINACIÓN	29
6.4.1.	FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO.....	29
6.4.2.	ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN	30
6.4.3.	ÍNDICE DE CARGA CONTAMINANTE	32
6.5.	VARIABILIDAD ESTACIONAL.....	32
6.6.	FUENTES DE CONTAMINACIÓN.....	33
6.7.	NORMATIVA AMBIENTAL	36
7.	DISCUSIÓN.....	39
7.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL SEDIMENTO.....	39
7.1.1.	GRANULOMETRÍA.....	39
7.1.2.	MATERIA ORGÁNICA TOTAL (MOT).....	39
7.1.3.	CARBONO ORGÁNICO TOTAL (TOC).....	39
7.1.4.	HUMEDAD.....	40
7.1.5.	pH.....	40
7.1.6.	LÍPIDOS.....	40
7.1.7.	POTENCIAL REDOX.....	40
7.2.	CONCENTRACIÓN DE METALES	41
7.2.1.	ARSÉNICO.....	41
7.2.2.	CADMIO.....	41

7.2.3.	CROMO.....	41
7.2.4.	COBRE.....	41
7.2.5.	PLOMO	42
7.2.6.	MERCURIO	42
7.2.7.	ZINC	42
7.3.	ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN.....	42
7.3.1.	FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO	43
7.3.2.	ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN	44
7.3.3.	ÍNDICE DE CARGA CONTAMINANTE	45
7.4.	VARIABILIDAD ESTACIONAL.....	46
7.5.	DESCARGA DE CONTAMINANTES	46
7.6.	NORMATIVA AMBIENTAL	47
8.	CONCLUSIONES	50
9.	REFERENCIAS	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1:	Ubicación de las estaciones de muestreo en ambas bahías.	17
Tabla N°2:	Clasificación de la contaminación según el factor de enriquecimiento	19
Tabla N°3:	Clasificación del índice de Geoacumulación	20
Tabla N°4:	Clasificación del índice de carga contaminante.	21
Tabla N°5:	Resumen Características fisicoquímicas del sedimento	24
Tabla N°6:	Granulometría del sedimento %.....	Error! Bookmark not defined.
Tabla N°7:	Concentración de metales pesados en sedimentos en mg/Kg	27
Tabla N°8:	Coeficiente de variación (%)	27
Tabla N°9:	Resumen valores de factor de enriquecimiento.	30
Tabla N°10:	Valores del índice de Geoacumulación calculados.	31
Tabla N°11:	Valores del índice de carga contaminante del sedimento.	32
Tabla N°12:	Variabilidad estacional verano – invierno Centro bahía Coronel.....	32
Tabla N°13:	Variabilidad estacional verano – invierno Puerto Coronel.....	33
Tabla N°14:	Normativa Nacional e Internacional sobre sedimentos.	37
Tabla N°15:	Guía de calidad de sedimentos marinos propuesta por Canadá.	38
Tabla N°16:	Pauta de calidad de sedimentos marinos propuesta por Estados Unidos.	38
Tabla N°17:	Pauta de calidad de sedimentos marinos propuesta por Australia y Nueva Zelanda.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Ubicación del punto de muestreo en Coliumo	17
Figura N°2: Ubicación de los puntos de muestreo en Coronel.	18
Figura N°3: Análisis de Pearson.....	28
Figura N°4: Análisis de componentes principales en bahía de Coronel y Coliumo.	29
Figura N°5: Descarga de metales pesados en la bahía de Coronel.	33
Figura N°6: Descarga de metales pesados en aire de Coronel.....	34
Figura N°7: Distribución de la contaminación al agua por tipo de rubro en Coronel (2019).....	35
Figura N°8: Distribución de la contaminación al aire por tipo de rubro en Coronel (2019).....	35

RESUMEN

La bahía de Coronel es una de las zonas costeras más importantes de nuestro país debido a su actividad portuaria y su gran actividad industrial, debido a esto se genera gran cantidad de contaminantes lo que genera preocupación tanto a la población como a la comunidad científica. Uno de estos tipos de contaminantes son los metales pesados y su acumulación en los sedimentos de la bahía, por lo que su estudio es fundamental para la salud de la población y para el medio ambiente. El objetivo de este estudio es determinar el grado de contaminación en los sedimentos de la bahía de Coronel comparado a una zona de control, con poca industrialización como la bahía de Coliumo.

Se realizó un análisis de sedimentos en dos puntos de la bahía de Coronel en febrero y agosto del año 2019, mediante el uso de indicadores de contaminación, como el factor de enriquecimiento y el índice de Geoacumulación, lo que permitió determinar que para el As y Cu si existe un grado de acumulación por sobre el estado natural del sistema, calificando como enriquecimiento moderado. Mediante el índice de carga contaminante se determinó que en el centro de la bahía existe un deterioro progresivo debido a la gran concentración de arsénico en la muestra.

Mediante el análisis de variabilidad estacional se observa una tendencia a aumentar la concentración de metales pesados en periodo de invierno debido al efecto de la corriente de Humboldt en el golfo de Arauco, la influencia del río Biobío en la bahía y el aumento de procesos de erosión.

Las principales industrias que descargan metales pesados a la comuna se determinaron mediante el uso del Registro de Emisiones y Contaminantes (2019), el rubro principal fue la generación de energía eléctrica y en menor medida el sector pesquero.

Finalmente, con la elaboración del anteproyecto de normativas secundarias de calidad para la protección de las aguas y sedimentos del Golfo de Arauco, se incluirá la bahía de coronel por lo que se establecerá los límites permitidos para los metales pesados en la bahía de Coronel, posiblemente se utilice la normativa Australiana, que está siendo utilizada para la bahía de Quintero-Puchuncaví.

Palabras claves: Metales pesados, sedimentos, Coronel, bahía, normativa secundaria, contaminación.

1. INTRODUCCIÓN

En la sociedad actual, el aumento de la industrialización trajo consigo un gran aumento de la explotación del medio ambiente, si bien es necesario para el desarrollo de la sociedad, de forma desmedida causa diversos problemas tanto en el medio ambiente como en la población. Cada actividad antropogénica lleva asociada una descarga de contaminantes en mayor o menor medida y dependiendo de la magnitud de este (Rai *et al.*, 2019).

Entre estos contaminantes, existen los metales pesados que se definen como elementos de la tabla periódica con un peso atómico elevado, se encuentran de forma natural en el medio ambiente, pero las actividades antropogénicas como la minería, la industria textil, la agricultura, entre otras actividades, aumentan la concentración de estos al descargarlos al ambiente y son depositados en su mayoría en cuerpos de agua, principalmente en los sedimentos. (Horowitz, 1985)

Estos metales no pueden ser degradados por el ecosistema, por lo que a medida que son descargados, son acumulados en el sistema y dependiendo de su especiación, moviéndose en la cadena trófica, por lo que esto presenta un problema para la salud de la fauna y la población en general (Makedonski *et al.*, 2017). La exposición ya sea crónica o aguda a estos metales trae consigo diversos problemas de salud, que van desde mareos, jaquecas o diarrea, a desarrollar distintos tipos de cáncer e incluso la muerte dependiendo de la exposición (Zamora-Ledezma *et al.*, 2021).

En general, pocos países tienen políticas propias en donde se regule la concentración de estos metales pesados en el agua o sedimentos, por lo que, si bien el estudio de estos provee información útil en cuanto a desarrollar políticas públicas que regulen las descargas de estos, no es un tema que genere tanta expectativa, ya que los efectos en la salud son generalmente tardíos. (Di Marzio *et al.*, 2019)

Países como Canadá, Estados Unidos, China, Australia y Nueva Zelanda, desarrollaron guías de calidad de sedimentos, en donde proponen concentraciones permitidas para determinado metal en el ambiente y no genere un posible peligro para los organismos. La mayoría de los países que no cuentan con políticas ambientales consolidadas en el tiempo, al contrario, en esta última década, la mayoría empezó a impulsar más estudios y normativa que esté acorde a los niveles de su ecosistema para así no utilizar regulaciones internacionales que fueron creadas para otro tipo de ambiente y organismos (McCready *et al.*, 2006).

En el caso de Chile, no existe una normativa general en cuanto a la concentración de metales pesados en agua y sedimentos marinos, por lo que en general, se

utiliza normativa internacional para la regulación de descarga de contaminantes dependiendo del proceso industrial y cual normativa siga el proyecto (Valdés & Castillo, 2014).

Debido al creciente proceso de industrialización que se dio en la comuna de Coronel y sus sectores aledaños como Lota, principalmente la minería, al no existir normativas ambientales, ya sea por el desconocimiento o falta de fiscalización, se produjo una explotación de los recursos que llevó a un incremento en los desechos industriales de la zona (Ministerio del medio ambiente, 2018). Debido a esto los metales pesados fueron descargados a los cuerpos de agua y al aire, terminando en los sedimentos de la bahía y fueron motivo de interés en investigaciones previas, una de las primeras se dio en el año 1986 por Salamanca, en donde estudió sedimentos superficiales en bahía de San Vicente, bahía de Concepción y el golfo de Arauco, donde se incluye bahía de Coronel, posteriormente en el año 2017, Hidalgo, realiza un estudio geocronológico en los sedimentos de la bahía de coronel para determinar el grado de contaminación histórica de la bahía. Finalmente, en el 2022 Chandía estudia los niveles asociados al mercurio en la bahía producto de las actividades industriales principalmente el caso de las termoeléctricas presentes en el sector.

Los estudios de sedimentos en la bahía proveen información importante sobre los niveles de contaminación históricos en el ecosistema, ya que actúan como sumideros y reservorios de estos contaminantes, entre los cuales se destacan los metales pesados. (Horowitz, 1985)

Este estudio tiene como propósito analizar el grado de contaminación que posee una bahía con un alto grado de industrialización como es el caso de bahía de Coronel, comparada a una con una intervención casi inexistente, como es el caso de bahía de Coliumo. Para esto se tomaron muestras de ambas bahías y utilizando indicadores de contaminación, los cuales fueron el Factor de Enriquecimiento, índice de Geoacumulación e Índice de Carga Contaminante.

Otro factor en el estudio es analizar la variabilidad estacional presente en la bahía de Coronel, para esto se tomaron muestras de sedimentos en verano (febrero 2019) y en invierno (agosto 2019) tomando en cuenta el efecto de la corriente de Humboldt que tiene influencia en todo el golfo de Arauco.

Gracias al Registro de Emisiones y Contaminantes (RETC), es posible tener un catastro de emisiones vertidas al agua y aire en la comuna, para cada metal analizado y la concentración que genera cada tipo de rubro industrial en la comuna, por lo que gracias a esto es posible observar que procesos productivos tienen mayor influencia en cuanto a la contaminación por metales pesados en el sector de bahía de Coronel y sus alrededores.

Finalmente se realiza una investigación sobre nuevas propuestas en elaboración por parte del Ministerio del Medio Ambiente en donde se evalúan medidas a implementar en torno a la problemática ambiental sobre metales pesados y sus próximos proyectos en zonas de sacrificio, principalmente en cuerpos de agua.

En síntesis, este estudio busca contribuir al conocimiento científico sobre la contaminación de metales pesados en sedimentos marinos en la bahía de Coronel, los factores que influyen en la distribución espacial y temporal de estos y proponer medidas aplicables en cuanto a normativa y regulación sobre estas adaptadas al contexto chileno.

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Los metales pesados asociados a los altos niveles de industrialización en la ciudad de Coronel están siendo acumulados en los sedimentos de su bahía?

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la contaminación con metales pesados en los sedimentos de bahía de Coronel, Región del Biobío

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el grado de contaminación de bahía Coronel mediante el uso de indicadores de contaminación, comparado a un sitio de referencia, bahía de Coliumo.
- Analizar la variabilidad estacional de invierno y verano en los sedimentos de la bahía de Coronel
- Identificar fuentes de contaminación de metales pesados en Coronel.
- Proponer recomendaciones para la implementación de la normativa de metales pesados en sedimentos de la bahía de Coronel.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. METALES PESADOS

Los metales pesados se definen como elementos metálicos, que poseen una densidad relativamente más alta que el agua, en donde también se incluyen metaloides y que a bajas concentraciones son potencialmente tóxicos para los organismos (Tchounwou, *et al.*, 2012). Se consideran elementos traza, esto quiere decir, que se encuentran naturalmente en el medio ambiente y son necesarios para el desarrollo y funcionamiento de la vida en la tierra cuando se encuentran en pequeñas cantidades, al aumentar su concentración se vuelven tóxicos y peligrosos para los organismos (Wang, 2018).

Las actividades antropogénicas son las principales fuentes de emisión de metales pesados en el medio ambiente, puntuales o no puntuales, ya sea en cuerpos de agua o en la atmosfera, y en los que destacan principalmente la industria textil, agricultura, industria minera, generación de energía eléctrica, industria pesquera, tratamiento de agua, entre otras (Zamora-Ledezma, *et al.* 2021). Los metales pesados, también se encuentran en el medio ambiente debido a fuentes naturales, como erosión de rocas, suelo, disolución de sales solubles (Parra, *et al.*, 2015), meteorización de rocas, provenientes de polvo atmosférico, precipitación atmosférica (Liu, *et al.*, 2021), erupciones volcánicas (Gupta & Singh, 2011).

El aumento industrial trajo consigo el aumento de emisiones de contaminantes como lo son metales pesados, por lo que, en las pasadas décadas, la comunidad científica empezó a preocuparse por la presencia de metales pesados en la mayoría de los componentes ambientales, ya sea en el agua, afectando al componente acuático (marino y dulce) y el componente terrestre (suelo, sedimentos) (Tapia *et al.*, 2019).

Con el tiempo, se va incrementando la concentración de estos metales, siendo estos tóxicos y superando un nivel de umbral determinado para cada especie. Una de las características fundamentales de los metales pesados es que no pueden ser biodegradados, esto quiere decir, que, si son introducidos al medio, por ejemplo, al medio acuático, estos se distribuyen en toda la columna de agua, se depositan o acumulan en los sedimentos y son consumidos por la biota. Estos pueden clasificarse como potencialmente tóxico (arsénico, cadmio, plomo, mercurio, níquel), probablemente esencial (vanadio, cobalto) y esencial (cobre, zinc, hierro, manganeso, selenio) (Makedonski, *et al.*, 2017).

Uno de los efectos del aumento de la concentración de metales pesados en el sistema es el efecto de la bioacumulación, y se define como “un incremento en

la concentración de un químico en un organismo biológico, en comparación con el medio ambiente. Esta ocurre cuando el organismo absorbe una sustancia toxica a una tasa mayor en la cual, dicha sustancia se pierde” (Zhou, *et al.*, 2008).

Otro efecto relacionado con el aumento de las concentraciones de metales pesados en organismos es el efecto de biomagnificación, que se define como una condición en donde la concentración química en un organismo excede la concentración de su alimento, cuando la principal vía de exposición se produce a partir de la dieta del organismo (Drouillard, 2008).

4.2. SEDIMENTOS

Los metales pesados, una vez descargados al sistema, son transportados por agua o aire, donde en su mayoría termina en cuerpos de agua y se acumulan principalmente en los sedimentos. Los sedimentos se definen como “partículas derivadas de rocas o materiales biológicos que han sido transportados por un fluido o material sólido suspendido o sedimentado en el agua” (Horowitz, 1985).

Estos son de gran importancia, ya que proveen de información espaciotemporal sobre la contaminación en el ecosistema, ya que son un sumidero de contaminantes (metales pesados) sobre todo de zonas fuertemente industrializadas, además, estos se consideran también una fuente de contaminantes ya que a través de procesos físicos (erosión, resuspensión, deposición), biológicos (bioturbación) y químicos (desorción y difusión bentónica) (Kuznetsova & Timerbaev, 2022).

Gracias a esto, los sedimentos se consideran grandiosos indicadores ambientales para dar cuenta del impacto antropogénico en ambientes marinos, sin embargo, también es preciso conocer los niveles naturales o históricos de los contaminantes. Debido a esto, países como Estados Unidos, Canadá, Australia y Sudáfrica, han desarrollado políticas para determinar los niveles naturales o basales de los sistemas marinos (Birch, 2017).

Una vez los metales llegan al sistema acuático, estos se particionan por procesos fisicoquímicos y biológicos tales como adsorción, hidrolisis y coprecipitación, una pequeña parte se encuentra en la columna de agua, pero la mayoría se deposita en el sedimento (Gupta, *et al.*, 2014) (Bantan, *et al.*, 2020) (Liu, *et al.*, 2021).

La partición física es la separación de una muestra de sedimento en varias categorías físicas (tamaño del grano, área superficial, gravedad específica, propiedades magnéticas, mineralogía, etc.). Mientras que la partición química es

la separación de varios metales traza respecto a su interacción con otros materiales en el sedimento (materia orgánica, carbonatos, óxidos de manganeso, sulfitos o silicatos) y al tipo de asociación que existe (adsorción, complejación, sustitución dentro de celosías minerales, etc.). Aunque esta separación química y física es más bien arbitraria. (Horowitz, 1985)

En el sedimento, los metales pesados pueden vincularse a varios compartimientos en diferentes formas, tales como ocluidos en materiales amorfos, absorbidos en superficies arcillosas o en oxidohidroxidos de hierro/manganeso, presentes en celosías de metales secundarios como carbonatos sulfatos u óxidos, acompañado con materia orgánica o celosía de minerales primarios como silicatos (Peng, *et al.*, 2009).

La concentración y distribución de los metales en el sedimento depende principalmente del pH, el tamaño de los granos, la materia orgánica y potencial redox, aunque también en menor medida de factores como temperatura, salinidad, especies metálicas y tiempo de retención. (Bantan, *et al.*, 2020) (Peng, *et al.*, 2009) (Gupta & Singh, 2011) (Horowitz, 1985)

Aun cuando los metales presentan una baja solubilidad en agua y son principalmente absorbidos y acumulados en el sedimento, algunos cambios fisicoquímicos que ocurren en la interfase sedimento-agua pueden provocar que parte de esos metales fijados en el sedimento, se re suspendidos y retornar a la columna de agua por lo que pueden volver a estar disponibles para organismos acuáticos e ingresar a la cadena trófica. Por este motivo, el sedimento también es una fuente de contaminación, pudiendo comportarse como medio transportador. (Zhou, *et al.*, 2007) (Liu, *et al.*, 2021) (Peng, *et al.*, 2009) (Horowitz, 1985)

Los sedimentos pueden ser muy sensibles al monitoreo de la contaminación, al ser un reservorio de metales pesados y otros contaminantes, esto se debe a que la concentración de estos es muchas veces mayor a la concentración de estos en la columna de agua. Por lo que son considerados una herramienta útil para evaluar e identificar el nivel de contaminación de los cuerpos de agua. (Valdés, *et al.*, 2010) (Bantan, *et al.*, 2020) (Gupta & Singh, 2011).

Existen diferentes índices utilizados para calcular el nivel de contaminación de metales pesados en el sedimento, tales como el factor de enriquecimiento (EF), los índices de geoacumulación (Igeo), (Barbieri, 2016), Índice de carga contaminante (PLI) (Mandour, *et al.*, 2021) y la evaluación del riesgo ecológico (Er) (Williams & Antoine, 2020).

Para calcular estos índices es necesario realizar una normalización de la concentración de un metal que se encuentra en la capa superior del suelo o sedimento, respecto a la concentración de un elemento de referencia. Este elemento debe encontrarse en mayor concentración en la capa terrestre, sea estable en ella y su concentración no deba alterarse por acciones antropogénicas. Los elementos comúnmente utilizados son Al, Fe, Mn y Rb, aunque también se puede utilizar el carbono orgánico total y el tamaño del grano. (Barbieri, 2016)

Actualmente, se han desarrollado guías de calidad de sedimentos en varios países, en donde destaca Canadá, Estados Unidos, Nueva Zelanda y Australia, en donde se enfocan la concentración de los metales en el sitio de estudio con los efectos biológicos que se presenten en comunidades de organismos utilizados como control, en donde generalmente son especies bentónicas (Burton 2002).

Existen variados métodos dependiendo del criterio de elaboración de las guías de calidad de sedimentos, las más comunes son las utilizadas por Canadá (TEL y PEL) y Estados Unidos (ERL y ERM), donde los valores ERL y PEL, representan las concentraciones en donde por debajo de este valor, rara vez o nunca se observan efectos tóxicos en los organismos, que se calculan como el percentil 10 o 15 respectivamente, luego están los valores ERL y TEL, que representan las concentraciones por encima de la cual, causan efectos tóxicos usualmente o con frecuencia, utilizando el percentil 50. (Consejo de ministros canadienses de medio ambiente, 1995).

4.3. EFECTOS EN LA SALUD

Metales pesados como el cromo (Cr), cobre (Cu), zinc (Zn), arsénico (As), cadmio (Cd), níquel (Ni) y plomo (Pb), que generalmente son denominados metales y metaloides. El aumento de la concentración de estos metales degrada la calidad de la atmósfera, los cuerpos de agua y los cultivos alimentarios y también se acumula en órganos vitales como el riñón, el hueso y el hígado de los organismos y dependiendo de la dosis, puede representar una amenaza para la salud de los seres humanos. (Wu, *et al.*, 2018).

El arsénico (As), es un metaloide presente naturalmente en la corteza de la tierra en dos formas, orgánico e inorgánico, generalmente encontrado en aguas subterráneas debido a la liberación del suelo a acuíferos, también debido a procesos naturales como fenómenos volcánicos y deterioro de rocas. Aunque también puede provenir de actividades antropogénicas como procesos

industriales, fundición de metales, producción de pesticidas y conservantes de madera (Litter, *et al.*, 2019).

Existen dos vías principales de ingesta de arsénico, una en donde se ingiere arsénico inorgánico al beber agua proveniente de fuentes subterráneas que provoca una intoxicación crónica en los seres vivos, la segunda es ingerir arsénico orgánico proveniente de los peces (Mandal, 2017). La toxicidad del arsénico depende de su forma química, por ejemplo, el arsénico inorgánico es más dañino que el arsénico orgánico. (Chi, *et al.*, 2017).

La enfermedad relacionada a la contaminación crónica por arsénico es llamada arsenicosis que se manifiesta como varios tipos cáncer (piel, pulmón vejiga, hígado riñón y próstata) además de enfermedades neurológicas, gastrointestinales, patologías hematológicas, perinatales, vasculares, y otros efectos como infarto de miocardio, hipertensión, diabetes, aborto, bajo peso al nacer, hiperqueratosis e hiperpigmentación. (Litter, *et al.*, 2019)

En el caso de la intoxicación aguda, los síntomas incluyen malestar abdominal intenso, vomito y diarrea seguidos de colapso circulatorio rápido y finalmente la muerte que puede ocurrir entre menos de una hora a un par de días. (Mandal, 2017)

El mercurio es un metal no esencial extremadamente toxico, se presenta en la naturaleza en tres formas, mercurio elemental (Hg_0); mercurio inorgánico, en forma de sales mercuricas ($HgCl_2$, HgS) y mercuriosas (Hg_2Cl_2); y formas orgánicas, como etilo ($C_2H_5Hg^+$) y metilmercurio (CH_3Hg^+) (de Almeida Rodrigues, *et al.*, 2019).

Este metal se encuentra naturalmente debido a la meteorización, emanaciones volcánicas y desgasificación continental. También de fuentes antropogénicas como minería (principalmente oro) (Gutiérrez-Mosquera, *et al.*, 2021), industria del cloro, fábricas de pintura, actividades metalúrgicas, residuos dentales, quema de carbón mineral y aguas residuales domesticas e industriales. (de Almeida Rodrigues, *et al.*, 2019).

El Hg, al ser liberado a ambientes acuáticos puede unirse a partículas del medio y depositarse en los sedimentos donde se bioacumula y produce MeHg debido a bacterias reductoras de sulfato y hierro. Así, se bioacumula y biomagnifica en toda la cadena trófica. (Gutiérrez-Mosquera, *et al.*, 2021). Esto causa gran preocupación en la comunidad científica ya que el MeHg es la forma más toxica del mercurio (Xie, *et al.*, 2021). El principal alimento que consumen los humanos que contiene mercurio es de origen marino como el pescado y mariscos. (de Almeida Rodrigues, *et al.*, 2019).

Los síntomas clínicos debido a la exposición crónica al mercurio se presentan como parestesia de extremidades y labios, trastornos somatosensoriales,

trastornos reproductivos y ataxia cerebelosa. Mientras que la exposición aguda puede provocar visión borrosa, discapacidad auditiva, alteraciones olfativas y gustativas, marcha atáxica, trastornos psiquiátricos y pueden conducir a la muerte. (de Almeida Rodrigues, *et al.*, 2019).

El plomo es un metal blando y altamente tóxico, debido a su impacto en sistemas biológicos y su alta persistencia en el medio ambiente. (Chakraborty, *et al.*, 2021). La exposición al plomo provocó 853.000 muertes en todo el mundo en 2013 (OMS, 2016). (Kuang, *et al.*, 2020).

Se encuentra en el ambiente por procesos naturales como emisiones volcánicas y erosión de rocas. (Figueroa, 2004). También se encuentra debido a procesos antropogénicos como la combustión de gasolina con plomo, plantas de energía térmica, fundición de minerales (Chakraborty, *et al.*, 2021), además de pinturas y esmaltes a base de plomo y juguetes de cloruro de polivinilo (PVC) (Kuang, *et al.*, 2020).

Debido al transporte atmosférico, se deposita en suelos y se ve arrastrado a los sedimentos marinos de las bahías y reservorios de agua. (Hidalgo, 2017)

El metal puede entrar al cuerpo humano principalmente por la vía respiratoria, vía digestiva y en algunos casos de absorción cutánea (Velásquez, 2005), además de afectar con mayor facilidad a niños menores debido a sus mecanismos de defensa menos desarrollados. (Kuang, *et al.*, 2020).

La exposición crónica al plomo produce una enfermedad llamada saturnismo profesional, también llamada plumbosis, la cual afecta el desempeño físico e intelectual, en niños el daño es mayor debido a que afecta al aprendizaje, el cual puede ser irreversible. Este metal se acumula principalmente en los huesos lentamente, deteriorando el cerebro. También se pueden presentar algunos síntomas como dolor de cabeza, náuseas, hiper irritabilidad, pérdida de apetito y debilitamiento general. En cuanto a la exposición aguda puede causar ataques epilépticos, estado de coma y la muerte. (Figueroa, 2004).

El cadmio es un metal de transición maleable de color blanco azulado e inodoro, es un tóxico inorgánico que afecta negativamente el funcionamiento biológico en plantas, animales y humanos, ocupa la séptima posición según la Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR). Actualmente se sabe que el cadmio imita a otros metales divalentes esenciales que ayudan en varias funciones biológicas, pero hasta el momento no se ha informado de ninguna función biológica conocida en plantas o animales. (Suhani, *et al.*, 2021)

Se genera por acciones antropogénicas, como fundiciones, algunos productos de incineración de materiales que contienen cadmio, quema de combustibles fósiles,

utilización de fertilizantes, descargas de aguas servidas municipales y descarga de lodos (Olavarría, 2017).

El Cd se encuentra naturalmente en la corteza terrestre y también en el océano, en fosforitas, fosfatos marinos y rocas sedimentarias. Principalmente se encuentra en depósitos de zinc como sulfato de cadmio y meteorización de rocas ricas en cadmio (greenockita). Su concentración aumenta naturalmente por actividades volcánicas (sobre todo en las profundidades marinas) e incendios forestales (Suhani, *et al.*, 2021).

La exposición al Cd en humanos ocurre principalmente por inhalación, alimentos y tabaquismo (Suhani, *et al.*, 2021), siendo los alimentos, la principal fuente de ingestión de Cd (cerca al 90%), aunque la absorción en humanos es relativamente baja (3-5%). El principal alimento en la incorporación de Cd en humanos son los vegetales, principalmente el arroz. (Blanc, *et al.*, 2018)

La exposición crónica de Cd puede causar anosmia, lesiones a nivel de tracto respiratorio, estrés respiratorio, enfisema, rinitis crónica, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, destrucción del epitelio olfatorio, enfermedad de itai-itai, bronquitis, deterioro de la función pulmonar, entre otros. (Suhani, *et al.*, 2021)

Mientras que la exposición aguda por inhalación de vapores de óxido de cadmio produce la enfermedad llamada neumonitis aguda con edema pulmonar, que puede ser letal. La ingestión de dosis elevadas de sales solubles de cadmio puede producir gastroenteritis aguda (Olavarría, 2017).

El cromo es un metal traza que se encuentra naturalmente en suelos, rocas y organismos vivos, existe en diferentes estados de oxidación, de -2 a +6, donde el Cr (III) y Cr (VI) son los estados de valencia primarios que se utilizan generalmente en industrias. El Cr (III) es un micronutriente importante en las actividades biológicas que intervienen en el metabolismo insulínico y carbohidratos, mientras que el Cr (IV) es tóxico para animales y humanos, puede causar dermatitis alérgica y muerte celular apoptótica. (Liu, *et al.*, 2015)

Las actividades antropogénicas como la elaboración de pigmentos, baterías, fungicidas, industrias papeleras, utilizado en industrias metalúrgicas para la fabricación de acero inoxidable (Velásquez, 2005), además de la fabricación de ropa, como el cuero y aguas residuales (Zhu, *et al.*, 2020).

La exposición al cromo produce distintos tipos de cáncer y puede atravesar la placenta por lo que es un riesgo para las mujeres embarazadas. La exposición aguda de cromo causa lesiones renales y mutaciones en el tracto gastrointestinal, además de acumularse en el hígado, riñón, glándula tiroidea y médula ósea (Velásquez, 2005). También se ha detectado que tiene efectos dañinos en el

ADN, afecta la actividad enzimática, los niveles de ATP intracelular y consumo de oxígeno (Liu, *et al.*, 2015).

El cobre es un elemento abundante en el medio ambiente y esencial para el metabolismo normal de los organismos vivos, pero tóxico a altas concentraciones. (Olavarría, 2007)

El cobre se encuentra naturalmente en la tierra encontrado junto a minerales, aunque las actividades antropogénicas como la minería, la fundición, el uso de pesticidas o fertilizantes, combustión del carbón, procesamiento de metales, producción de hierro y acero, entre otros, aumentan las concentraciones de este metal en el ambiente (Zhou, *et al.*, 2018).

En seres humanos, la principal vía que tiene el cobre para ingresar a nuestro organismo es la ingesta de alimentos, principalmente vegetales, cereales, carnes y en menor medida pescados. (Zhou, *et al.*, 2017).

En cuanto a la toxicidad del cobre, puede inducir cambios en la actividad celular, la regulación del metabolismo de lípidos, la expresión genética, actividad neuronal, causar resistencia de las células tumorales a fármacos quimioterapéuticos y a la distribución de Cu en los hepatocitos (Zhou, *et al.*, 2018).

El zinc es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre y es considerado uno de los más esenciales para la vida, tanto de organismos animales como plantas (Pajarillo, *et al.*, 2021) (Li, *et al.*, 2021).

Las actividades industriales como la fundición industrial y la minería son la principal fuente del incremento de zinc en las ciudades, además de la agricultura, en donde terrenos que contiene mucho zinc están siendo constantemente monitoreados (Wei, *et al.*, 2020).

La principal fuente de zinc que consume el ser humano son las carnes rojas, aves, mariscos, semillas, nueces, productos lácteos y frijoles (Amin, *et al.*, 2019). Además, el zinc se utiliza en el campo de los implantes médicos, llamados biomateriales que son biodegradables (Qu, *et al.*, 2020).

La exposición al zinc en altas concentraciones puede provocar difusión metabólica, daño oxidativo (Pajarillo, *et al.*, 2021), náuseas, vómitos, letargo, fatiga, dolor epigástrico, (Amin, *et al.*, 2019), puede inhibir especies de Fe, alterando la hematopoyesis y provocar anemia por deficiencia de hierro en el cuerpo (Li, *et al.*, 2021).

4.4. CONTEXTO CHILENO Y NORMATIVA AMBIENTAL

Los inicios sobre la historia ambiental de Chile se remontan a finales de la década de 1930, donde se plantea la necesidad de la protección del medio ambiente con una mirada más enfocada al progreso y beneficios en sí misma. Esto produjo la creación de instituciones públicas enfocadas al estudio y protección de los recursos naturales, entre los que se encontraban la Corporación Nacional Forestal (CONAF), instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN), el Centro de Investigaciones Mineras y Metalúrgicas (CIMM) y el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP). En las décadas de 1950 y 1970 aparecieron las primeras iniciativas con un enfoque para la protección ambiental, entre los que se destacan, el Centro de Investigación del Medio Ambiente (CIPMA), el Instituto de Ecología de Chile y la Unión de Amigos de los Animales, que posteriormente pasaría a llamarse CODEF.

Posteriormente, sucede el golpe militar en 1973 y la fuerte represión contra el libre pensamiento, el tema ambiental era uno de los pocos temas de discusión que se permitían abordar abiertamente y con más libertad, aquí surgen diversos movimientos que si bien eran “neutrales” al régimen, poco a poco se fueron alineando hacia el espectro político que impulsó el plebiscito de 1988, como el Centro de Alternativas de Desarrollo (CEPAUR), la organización el Canelo de Nos, el partido Los Verdes, entre otros. (Toledo, 2020).

Cuando se habla de normativa ambiental chilena, es necesario remontarse al año 1994, donde en el gobierno del presidente Patricio Aylwin se promulga la Ley sobre bases generales del medio ambiente el 1 de marzo de 1994 y posteriormente su publicación el 9 de marzo del mismo año. Con la nueva ley ambiental, se crea la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) que tiene como objetivo la administración y cumplimiento de la normativa ambiental y estar a cargo del Sistema de Evaluación Ambiental. (Ministerio del medio ambiente, 2022).

No fue hasta que Chile muestra su interés en ingresar a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), esta institución junto a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) publican el 2005 la evaluación de desempeño ambiental para todos los países de Latinoamérica y el Caribe, donde se buscaba el Desarrollo Sustentable de dichos países. Las recomendaciones en el caso de Chile fueron desarrollar y fortalecer las instituciones ambientales tanto nacional como regional, los marcos normativos, el cumplimiento de compromisos internacionales y la capacidad de fiscalización. (Toledo, 2020).

Posteriormente, en el año 2010, en el gobierno de la presidenta Michelle Bachelet, se promulga la Ley N° 20417 de Bases Generales del Medio Ambiente que modifica la Ley 19300, en la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, reemplazando a la CONAMA, también se crea la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y posteriormente con la ley N° 20600 los Tribunales Ambientales.

4.5. CORONEL

El desarrollo industrial de Coronel se inicia con la minería del carbón a mediados del siglo XIX, en donde se instaló el mayor complejo minero del país, hasta 1994, marcado en la comuna por el cierre de estas. Con el fin de su principal actividad económica, la comuna se concentró en potenciar diversos rubros, como el energético, pesquero y portuario. En los siguientes años, Coronel fue reconocida por diversas instituciones y centros de investigación por la gran cantidad de industrias y contaminación en la zona, fue nombrada “zona de sacrificio”. En el año 2015, debido a la alta concentración de material particulado fino, el MMA declara la comuna como “Zona Saturada”. (Ferretti, *et al.*, 2022).

En cuanto a las principales actividades industriales en la comuna, se destacan tres; la actividad portuaria, la generación de energía y la industria pesquera.

La actividad portuaria en Coronel es de vital importancia para la región, cuenta con cuatro terminales portuarios principales, Puerto de Coronel, Puerto de Puchoco, Puerto de Jureles y el terminal portuario Oxiquim.

El puerto de Coronel es el que más destaca debido a que es el segundo puerto pesquero-portuario más importante del país en términos de volúmenes movilizados, siendo el puerto de San Vicente el primero y que también se encuentra en la misma región. Este puerto comienza sus actividades el año 1996 comienza sus actividades el año 1996, cuenta con 86 ha y principalmente se enfoca en el transporte de celulosa, posee dos muelles de transferencia de carga general, un terminal de container y un muelle granelero para la descarga de carbón.

La compañía Cabo Foward es dueña de los terminales graneleros Puchoco y Jureles, en donde principalmente se transporta chips, descarga de Clinker para producir cemento y descarga de carbón, además cuenta con áreas para almacenaje principalmente de Clinker.

El Puerto Oxiquim está ubicado en el parque industrial escuadrón y es un puerto privado de uso público, especializado en graneles líquidos y destinado al transporte de sustancias peligrosas. (Municipalidad de Coronel, 2016).

Coronel también destaca por la generación y transmisión de energía eléctrica, donde alberga dos centrales termoeléctricas que producen electricidad para el Sistema Interconectado Central (SIC). La primera es la central Bocamina, de la empresa Enel, cuenta con dos unidades termoeléctricas, ubicada en el sector de Lo Rojas, la primera entró en funcionamiento en el año 1970 y tiene una potencia de 128 MW, el 31 de diciembre del 2020 oficialmente se produjo el cierre de esta unidad. La segunda entró en funcionamiento el 2008 y tiene una potencia de 350 MW, sin embargo, este mismo año, el 31 de septiembre finalmente se produjo su cierre. (Ferreti, *et al.*, 2022).

En el proceso de localización de estos proyectos de generación de energía, al no contar con leyes que lo impedían, se instalaron cerca del área urbana, sin prever los daños a la salud de la población, principalmente la disposición de los residuos industriales sólidos de estas centrales, los llamados “vertederos de cenizas”. La central Bocamina I operó más de 40 años sin ningún método para el tratamiento o disposición de los residuos y sus cenizas, provocando graves problemas a la salud de la población a corto y largo plazo, tales como se describieron anteriormente.

El segundo complejo termoeléctrico es la central Santa María, propiedad de Colbun S.A. ubicada en el sector Fundo Manco, al sur de Coronel, comenzó a operar el 2012, con una potencia de 700MW que sigue en funcionamiento hasta el día de hoy. (Municipalidad de Coronel, 2016)

En cuanto a la actividad pesquera en la comuna, es la principal fuente de trabajo de la población, empieza su industrialización en los años 1980, en donde se destacan las empresas Camanchaca, al norte del puerto y las empresas Food Corp y Bahía Coronel Camanchaca S.A., ubicada en Lo Rojas. (Ferreti, *et al.*, 2022).

Existen cuatro caletas artesanales ubicadas en el borde costero de la comuna, Caleta Maule y Caleta Lo Rojas, que son las más cercanas a la ciudad (Continental). Las otras dos caletas, están en la Isla Santa María, llamadas Puerto Norte y Puerto Sur.

La principal caleta es la ubicada en Lo Rojas, cuenta con áreas de fondeo para embarcaciones menores, sin embargo, como se ubica en pleno puerto, debe compartir vías de navegación, sectores de la playa, áreas de fondeo y muelles con embarcaciones industriales y semi industriales. También un muelle artesanal, para su flota de embarcaciones menores y semi industriales, una explanada de varamiento e instalaciones para la administración de su recinto portuario artesanal. Es una caleta urbana regularizada, con acceso a servicios básicos. (Municipalidad de Coronel, 2016)

La intensa actividad de pesquera artesanal registra un desembarque anual de 417.000 toneladas, un 40% de los desembarques artesanales de la región. La fabricación de harina de pescado del sector industrial, se le atribuye la principal causa de contaminación de la bahía, donde descargan los residuos directamente al mar, generando graves problemas de olores en zonas aledañas al sector, entre los años 2014 y 2016, se registraron un total de 16 denuncias por olores molestos. (Ferreti, *et al.*, 2022).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Coronel está ubicada en la Provincia de Concepción, Región del Biobío, en el lado oriental del Golfo de Arauco (37°03'S;73°10'W). Con límites definidos en el lado norte por Punta Puchoco y Punta Cuervos en el Sur. (Hidalgo, 2017)

La bahía tiene una superficie aproximada de 8,92 km² y la distancia entre ambas puntas es de 4,44 km aproximadamente, es considerada una bahía somera, con una profundidad máxima de 23 m en la zona más externa de la boca, cerca de Punta Cuervos. (Ministerio del medio ambiente, 2016)

Esta bahía está fuertemente industrializada, encontrándose uno de los más importantes complejos pesquero y portuarios del Sur de Chile, donde operan aproximadamente 127 empresas y 32 asociadas al parque industrial de Escuadrón. La industria pesquera destaca con sus tres terminales de carga, el terminal portuario Froward que cuenta con 3 muelles especializados en graneles sólidos, también cuenta con 3 centrales termoeléctricas a carbón, Bocamina 1, Bocamina 2 y la Central Santa María, de Colbún, además de la presencia de emisarios submarinos de Essbio. (Ministerio del Medio Ambiente, 2016)

Tanto el golfo de Arauco como bahía de Coronel presentan un patrón de circulación de corrientes predominantes hacia el norte en verano y con dirección sur en invierno, además de presentar procesos de recirculación al interior del golfo debido a la presencia de la isla Santa María. (Contreras 2017).

5.2. OBTENCIÓN DE MUESTRAS

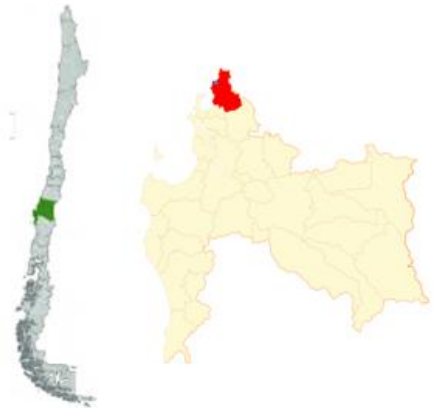
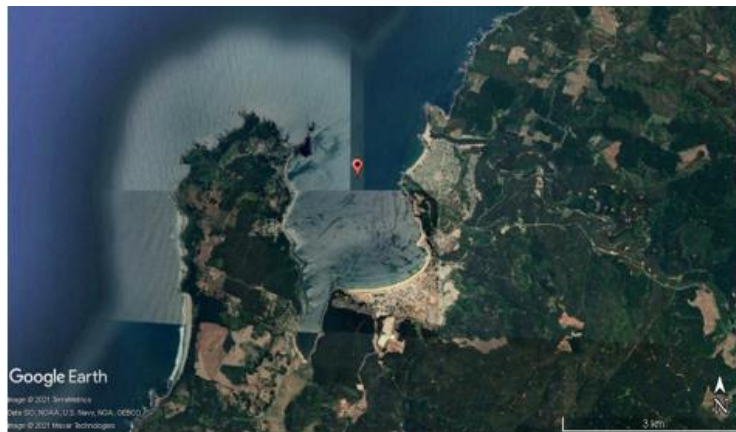
Las muestras fueron obtenidas utilizando un gravity core, se tomaron cuatro muestras de sedimentos en Coronel, dos en el puerto de Coronel (invierno y verano) y otras dos ubicadas en el centro de la bahía (invierno y verano) En cuanto a las muestras de la bahía de Coliumo, se obtuvieron dos en el centro de la bahía (invierno y verano)

La ubicación de los puntos se puede apreciar en la tabla 1.

Tabla N°1: Ubicación de las estaciones de muestreo en ambas bahías.

Estación	Localidad	1- UTM (E)	1- UTM (S)
COLIUMO C2 INVIERNO	Bahía Coliumo	683945	5955130
COLIUMO C2 VERANO	Bahía Coliumo	683945	5955130
MT2 CORONEL INVIERNO	Centro Bahía	662800	5898030
MT2 CORONEL VERANO	Centro Bahía	662800	5898030
MT4 CORONEL INVIERNO	Puerto Coronel	663962	5900353
MT4 CORONEL VERANO	Puerto Coronel	663962	5900353

Fuente: Elaboración propia.



Leyenda


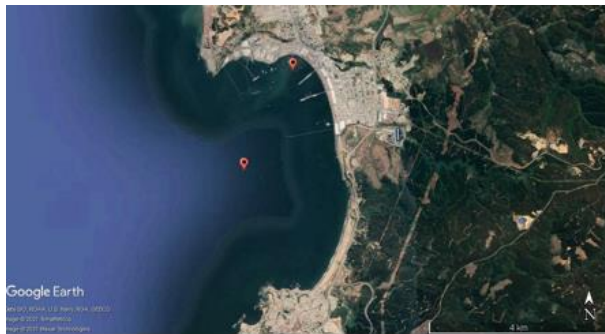
 Punto de muestreo

Figura N°1: Ubicación del punto de muestreo en Coliumo

Fuente: Elaboración propia



Leyenda


 Puntos de muestreo

Figura N°2: Ubicación de los puntos de muestreo en Coronel.

Fuente: Elaboración propia

5.2.1. ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis de metales en agua y organismos se realizará en el laboratorio de química ambiental del Centro EULA-Chile. La metodología que se utilizará, corresponde al Standard Methods apartado 3050 Digestión ácida de sedimentos, lodos y sólidos.

La obtención de las concentraciones de metales se midió utilizando un espectrofotómetro de emisión atómica.

5.2.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realiza análisis del coeficiente de variación en los metales, análisis de correlación de Pearson para analizar las correlaciones entre los metales y el sedimento. Así mismo, se realiza un análisis de componentes principales para analizar cómo se agrupan las características de los sedimentos con los metales en ambas bahías.

5.3. CALCULO ÍNDICES DE CONTAMINACION

5.3.1. FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO

El factor de enriquecimiento permite identificar el grado de riqueza que posee el suelo o sedimento referente a determinado contaminante o metal pesado que se necesite analizar y además, utiliza otro metal como medida de referencia que se encuentre en gran cantidad en la corteza terrestre, generalmente se utiliza Fe o Al. (Barbieri, 2016)

El Factor de enriquecimiento fue normalizado utilizando el zinc (Zn) (Liaghati, *et al.*, 2004) y las concentraciones obtenidas en las muestras de Coliumo fueron

usadas como los valores basales de bahía Coronel, además, en el cálculo del mercurio, se utilizó el promedio de invierno y verano en bahía de Coliumo para calcular los valores basales debido a la baja concentración presentada en invierno.

Los cálculos de los índices de contaminación para la bahía de Coronel utilizando la siguiente fórmula:

$$FE = (C_m / Z_m) / (C_b / Z_b)$$

donde:

C_m : Concentración del metal

C_b : Concentración basal

Z_m : Concentración de Zinc en la muestra

Z_b : Concentración de Zinc basal

(ec. 1)

Tabla N°2: Clasificación de la contaminación según el factor de enriquecimiento

Factor de enriquecimiento	Categoría de contaminación
$EF < 2$	Enriquecimiento deficiente o mínimo
$2 < EF < 5$	Enriquecimiento moderado
$5 < EF < 20$	Enriquecimiento significativo
$20 < EF < 40$	Enriquecimiento muy elevado
$EF > 40$	Enriquecimiento muy elevado

Fuente: (Looi, *et al.*, 2019).

5.3.2. ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN

El índice de Geoacumulación propuesto por permite determinar la contaminación antropogénica de los niveles de concentración basal o natural del suelo. (Williams & Antoine, 2020)

Las concentraciones obtenidas en las muestras de Coliumo fueron usadas como los valores basales para el cálculo de este indicador, además, en el cálculo del mercurio, se utilizó el promedio de invierno y verano en bahía de Coliumo para calcular los valores basales debido a la baja concentración presentada en invierno.

El cálculo del índice de geoacumulación, se realizó utilizando la siguiente fórmula (Muller G, 1981):

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

En donde:

C_n: Concentración de los metales pesados

B_n: Valor background en los sedimentos de la zona estudiada

1.5 = valor utilizado para minimizar el efecto de posibles variaciones de las concentraciones basales, que pudieran producirse debido a efectos geológicos y no a acciones antropogénicas. (Hidalgo, 2017)

(ec. 2)

Tabla N°3: Clasificación del índice de Geoacumulación

Valor de I_{geo}	Clase de I_{geo}	Grado de contaminación
Cercano a 0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado o moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderadamente contaminado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

Fuente: (Juárez, *et al.*, 2005).

5.3.3. ÍNDICE DE CARGA CONTAMINANTE

El índice de carga contaminante (PLI) proporciona una evaluación generalizada del nivel de contaminación del suelo estudiado. (HO & AJ, 2018)

Las concentraciones obtenidas en bahía Coliumo fueron usadas como valores background en bahía de Coronel, además, en el cálculo del mercurio, se utilizó el promedio de invierno y verano en bahía de Coliumo para calcular los valores basales debido a la baja concentración presentada en invierno.

El cálculo para el índice de carga contaminante se realizó utilizando la siguiente formula:

$$Cfi = C \text{ metal pesado} / C \text{ "background"}$$

$$PLI = (CF1 \times CF2 \times \dots \times CFn)^{1/n}$$

(ec. 3)

Tabla N°4: Clasificación del índice de carga contaminante.

Valor	Clasificación
0	Ausencia de contaminantes
0 > PLI > 1	Ausencia de contaminación a moderadamente contaminado
1 > PLI > 2	Moderadamente contaminado
2 > PLI > 3	Moderadamente contaminado a altamente contaminado
3 > PLI > 4	Altamente contaminado
PLI > 5	Extremadamente contaminado

Fuente: (HO & AJ, 2018)

5.4. CÁLCULO DE VARIABILIDAD ESTACIONAL

La variabilidad estacional presente en la muestra se midió calculando la variación presentada en cada punto de muestreo en verano (febrero de 2019) e invierno, (agosto 2019) para la zona de estudio, bahía de Coronel, en los puntos ubicados en el centro de esta y otro cercano al puerto de Coronel.

Estos resultados fueron contrastados con los parámetros fisicoquímicos encontrados en los sedimentos, las fuentes de contaminación en la bahía y las corrientes marinas que ejercen influencia en la bahía de coronel para determinar si existe influencia de alguno de estos en las concentraciones de metales pesados en la bahía.

5.5. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN CORONEL

Se utilizó un catastro de descargas antropogénicas de metales pesados en agua y aire recopilados por el registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC) y se filtraron los descargados en la comuna de Coronel, posteriormente se graficaron las concentraciones de cada metal emitidas en la comuna y el porcentaje emitido por cada industria en agua y aire.

Posteriormente, se analizó si las concentraciones vertidas en aire o agua se ven reflejadas en las concentraciones de metales en las muestras de sedimento.

5.6. IMPLEMENTACION DE NORMATIVA

Se realizó una revisión bibliográfica de las medidas implementadas por otros países en normativa ambiental que regule las concentraciones permitidas en sedimentos marinos en lo que se refiere a metales pesados y su influencia en el medio acuático.

Los países analizados fueron Canadá, Estados Unidos y finalmente se analizó la aplicación de estas normativas en el territorio nacional y como podría aplicarse en el contexto que se tiene en el golfo de Arauco y específicamente en la bahía de Coronel.

6. RESULTADOS

6.1. CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL SEDIMENTO

6.1.1. HUMEDAD

La humedad de la muestra en la bahía de Coliumo es la más baja de la muestra, además, se mantiene relativamente igual en invierno y verano, con un valor de 23.93% y 22.77% respectivamente. En cuanto a la bahía de coronel, las muestras en el centro de la bahía presentan la mayor variación en cuanto a invierno y verano, con un valor del primero de 25.22 % y 49.70% del último. Finalmente, para las muestras tomadas cercanas al puerto, presentaron un valor de 76.93% y 70.62% en invierno y verano respectivamente, los valores más altos obtenidos.

6.1.2. MATERIA ORGÁNICA TOTAL

Con respecto al contenido de materia orgánica total (MOT), las muestras tomadas en Coliumo presentan los valores más bajos, 2.03% y 1.44 % en invierno y verano respectivamente. Este bajo rango se mantiene para la zona del centro de la bahía de coronel solo en invierno, con un valor de 2.23% presentando la mayor variación con respecto a verano, alcanzando un 10.33%. Para la estación ubicada cercana al puerto de coronel, los valores son más elevados, pero se

mantienen relativamente igualados en invierno y verano con valores de 15.89% y 16.63% respectivamente.

6.1.3. GRANULOMETRÍA

En cuanto a la granulometría del sedimento, se presentaron en su mayoría arenas en la bahía de Coliumo superiores al 90%. Mientras que en la bahía de Coronel también presenta un gran porcentaje de arenas en el centro de esta en invierno 97% y en verano 67%, aumentando el porcentaje de limo encontrado de 2.51% a un 32.44% en invierno y verano respectivamente.

Finalmente, en la zona cercana al puerto de la bahía, se encuentra un menor contenido de arena en invierno 46.61% y uno mayor en verano 74.23%, así como también un aumento en el porcentaje de limo, un 52.29% en invierno y un 25.24% en verano.

6.1.4. CARBONO ORGÁNICO TOTAL

El carbono orgánico total (TOC) de la muestra en la bahía de Coliumo presenta los valores más bajos en ambas estaciones con valores de 0.21% y 0.19 % en invierno y verano respectivamente. En cuanto a la bahía de coronel, en el centro, los resultados fueron menores a los encontrados en la estación cercana al puerto, en el primero se obtuvieron valores de 2.82% en invierno y 2.54% en verano, en cambio los valores que se obtuvieron en el puerto son de 6.62% en invierno y 4.93% en verano.

6.1.5. POTENCIAL REDOX

En cuanto al potencial de reducción (Redox), la muestra de la bahía de Coliumo presenta la más elevada en invierno y verano, 326 y 206 (mv) respectivamente. Respecto a los valores obtenidos en la bahía de coronel, en la estación del centro de la bahía se obtuvieron valores menores, llegando a -3 y 63 (mv) para invierno y verano respectivamente. Finalmente, para la estación cercana al puerto se obtuvieron valores negativos en invierno llegando a -207 mv y en verano a -200 mv.

6.1.6. pH

Para el valor del pH en cada punto de muestreo, la bahía de Coliumo presento valores similares, con valores de 7.48 en invierno y 7.82 en verano. Para la estación del centro de la bahía en Coronel, igualmente se observaron valores similares, con 7.41 en invierno y 7.38 en verano. La mayor diferencia se presentó en la muestra cercana al puerto de coronel donde en invierno el pH llegó a 6.96 en invierno y 7.07 en verano.

6.1.7. LÍPIDOS

Referente al nivel de lípidos que presentaron las muestras de sedimentos, en la bahía de Coliumo, presentaron los niveles más bajos en invierno y verano, con 154 y 184 ($\mu\text{g g}^{-1}$) respectivamente. En cuanto a la bahía de coronel, en el centro de la bahía presentaron valores más elevados con 659 ($\mu\text{g g}^{-1}$) en invierno y 887 en verano. Finalmente, para la muestra de sedimento cercana al puerto de coronel, se presentaron los valores más elevados, con 2800 ($\mu\text{g g}^{-1}$) en invierno y 3671 ($\mu\text{g g}^{-1}$) en verano.

Tabla N°5:Resumen Características fisicoquímicas del sedimento

Estación	MOT (%)	TOC (%)	Humedad (%)	pH	Lípidos (mg/kg)	Redox (mV)
Coliumo invierno	2.03	0.21	23.93	7.48	154	326
Coliumo verano	1.44	0.19	22.77	7.82	184	206
Centro bahía Coronel invierno	2.23	2.82	25.22	7.41	659	-3
Centro bahía Coronel verano	10.33	2.54	49.70	7.38	687	63
Puerto coronel invierno	15.89	6.62	76.93	6.96	2800	-207
Puerto coronel verano	16.63	4.93	70.62	7.07	3671	-200

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°6: Granulometría del sedimento %

Estación	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)
Coliumo invierno	0	98.97	0.94
Coliumo verano	0.03	92.61	7.04
Centro bahía Coronel invierno	0.11	97.3	2.51
Centro bahía Coronel verano	0	67.09	32.44
Puerto coronel invierno	0.75	46.61	52.29
Puerto coronel verano	0.1	74.23	25.24

Fuente: Elaboración propia.

6.2. CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTO

6.2.1. ARSÉNICO

El arsénico presenta valores muy bajos en los sedimentos analizados cerca del puerto de Coronel, con valores en invierno y verano menores a los 0.002 mg/Kg mientras que aumenta su concentración en la bahía de Coliumo en verano se obtuvieron valores mayores que en invierno, pasando de 0.665 mg/Kg a 0.135 mg/Kg respectivamente. Finalmente, en el sedimento analizado en el centro de la bahía de coronel presenta un valor demasiado elevado en verano con 6.97 mg/Kg y uno menor en invierno con 1.45 mg/Kg.

6.2.2. CADMIO

Con respecto al cadmio encontrado en las muestras, tanto en la bahía de coronel y Coliumo los valores estuvieron bajo el límite de detección, menores a 0.005 mg/Kg en cada una, independiente de la estación del año.

6.2.3. CROMO

El cromo analizado en el sedimento arrojó valores similares en las muestras de Coliumo, donde también se observan las menores concentraciones tanto en invierno como en verano, con valores de 16.2 mg/Kg y 19.5 mg/Kg respectivamente. En el sedimento de la bahía de coronel, tanto en el centro de la bahía como cerca del puerto se encontraron valores similares, cabe destacar que en invierno se encontraron los valores más altos en todas las muestras, para el centro de la bahía se obtuvieron valores de 37,9 mg/Kg en invierno y 29.8 mg/Kg

en verano. Los valores encontrados cerca del puerto fueron un poco más altos en ambas estaciones, con 40.8 mg/Kg en invierno y 36.3 mg/Kg en verano.

6.2.4. COBRE

El cobre en la muestra de sedimento en la bahía de Coliumo presenta los valores más bajos para ambas estaciones, en invierno presenta un valor de 9.03 mg/Kg y en verano 5.04 mg/Kg. En cuanto a la muestra de sedimento en el centro de la bahía de coronel, presentan valores mayores a los de Coliumo, tanto en invierno como verano, con valores de 48.1 mg/Kg y 33.0 mg/Kg respectivamente. La concentración de cobre aumenta en la muestra de sedimento cerca del puerto de coronel, donde se obtuvieron los valores más altos para dicho metal, en invierno llegó a valores de 71.6 mg/Kg y en verano a valores de 63.4 mg/Kg. Cabe destacar que en invierno todos los valores fueron superiores en comparación a verano.

6.2.5. PLOMO

El plomo, similar al caso del cadmio, tanto en Coliumo como en Coronel, el valor de las muestras fue menor al límite de detección, 0.04 mg/Kg.

6.2.6. MERCURIO

Las concentraciones encontradas en el sedimento de la bahía de Coliumo fueron las más pequeñas, tanto en invierno como en verano, encontrándose valores de 0.0009 mg/Kg en invierno y 0.0356 mg/Kg en verano. Mientras que en la bahía de Coronel las concentraciones de este metal aumentan, llegando a valores de 0.0917 mg/Kg en invierno y 0.1089 mg/Kg en verano. Estas concentraciones vuelven a aumentar en el sedimento cerca del puerto de coronel con valores de 0.1422 mg/Kg en invierno y 0.1267 mg/Kg en verano.

6.2.7. ZINC

En el caso del zinc, las concentraciones encontradas en invierno superaron a las de verano en todas las muestras, además, en la bahía de Coliumo fueron más pequeñas en comparación con las de coronel, en invierno el valor fue de 13.2 mg/Kg y en verano de 8.61 mg/Kg. La muestra de sedimento tomada en el centro de la bahía de Coronel obtuvo el segundo lugar con valores de 26.8 mg/Kg en invierno y 18.3 mg/Kg en verano. Mientras que las mayores concentraciones de este metal se encontraron en el sedimento cercano al puerto, con valores en invierno de 60.9 mg/Kg y 46.9 mg/Kg en verano.

Tabla N°7: Concentración de metales pesados en sedimentos en mg/Kg

Estación	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cobre	Plomo	Mercurio	Zinc
Coliumo invierno	0.135	<0.005	19.5	9.03	<0.04	0.0009	13.2
Coliumo verano	0.665	<0.005	16.2	<5.04	<0.04	0.0356	8.61
Centro bahía Coronel invierno	1.45	<0.005	37.9	48.1	<0.04	0.0917	26.8
Centro bahía Coronel verano	6.97	<0.005	29.8	33.0	<0.04	0.1089	18.3
Puerto coronel invierno	<0.002	<0.005	40.8	71.6	<0.04	0.1422	60.9
Puerto coronel verano	<0.002	<0.005	36.3	63.4	<0.04	0.1267	46.9

Fuente: Elaboración propia.

6.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

6.3.1. COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Los resultados del análisis del coeficiente de variación muestran el grado de dispersión que tienen las concentraciones de cada metal en las zonas de muestreo.

El cobre muestra la mayor dispersión de datos con 25.25%, seguido del zinc con 18.81% y el cromo con 15.32%. Los metales que presentaron una menor dispersión fueron el arsénico, con 2.48% y el mercurio, con 0.05%

Tabla N°8: Coeficiente de variación (%)

As	Cr	Cu	Hg	Zn
2.48	15.32	25.25	0.05	18.81

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. CORRELACIÓN DE PEARSON

En el análisis de correlación de Pearson, se observan valores de correlación positiva bastante elevados entre cada metal a excepción del arsénico. En cuanto a las características fisicoquímicas del sedimento, también se observan correlaciones positivas bastante fuertes entre la materia orgánica total, el carbono orgánico total, la humedad y el porcentaje de lípidos.

En cuanto a las correlaciones negativas, el pH, el potencial redox y la fase textural tipo arena mostraron en su mayoría una correlación negativa con las demás variables.

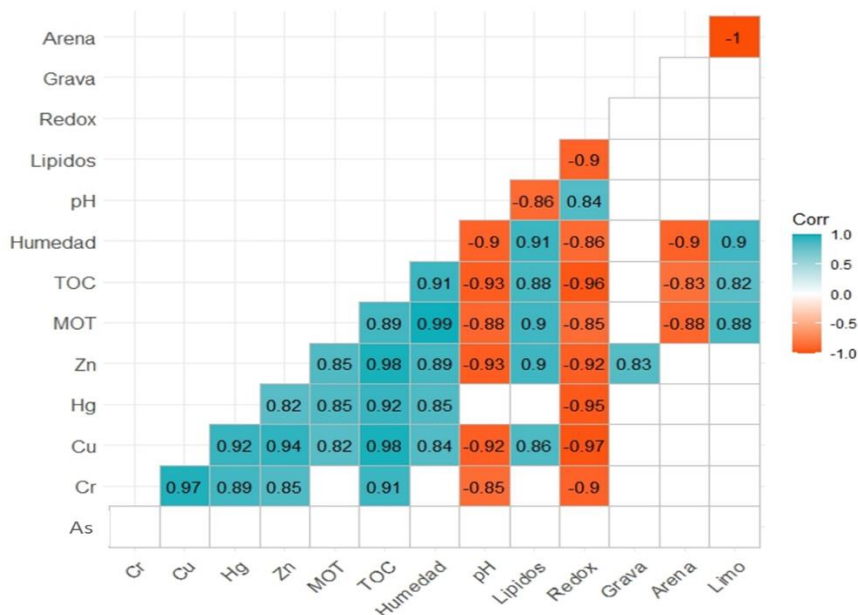


Figura N°3: Análisis de Pearson

Fuente: Elaboración propia.

6.3.3. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El análisis de componentes principales muestra el grado de similitud entre las variables y como contribuyen o agrupan para explicar cómo se conforma la matriz ambiental.

La primera componente principal, explica el 76% de los datos y relaciona Coliumo y el centro de la bahía de coronel mayormente con la fase textural tipo arena y el potencial redox, mientras que para el puerto de Coronel, esta explicado

mayormente por las fases texturales grava y limo, los metales cobre, cromo mercurio y zinc, además de los parámetros fisicoquímicos como los lípidos, el carbono orgánico total y la materia orgánica.

La segunda componente principal, explica 12% de los datos y está relacionada totalmente con la concentración de arsénico.

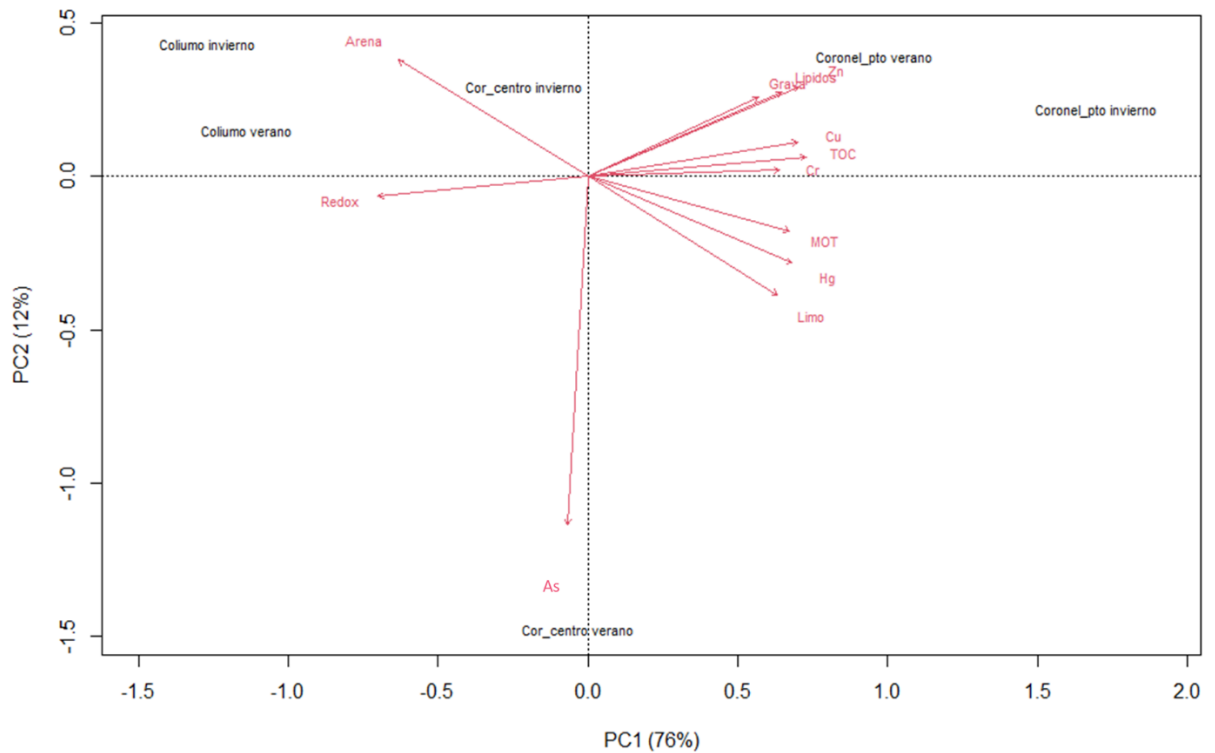


Figura N°4: Análisis de componentes principales en bahía de Coronel y Coliumo.

Fuente: Elaboración propia

6.4. INDICADORES DE CONTAMINACIÓN

6.4.1. FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO

En cuanto al factor de enriquecimiento, el arsénico presenta un enriquecimiento moderado en el centro de la bahía en ambas estaciones, con valores de 5.29 para invierno y 4.93 para verano. En cambio, en la muestra cercana al puerto presenta un enriquecimiento deficiente o mínimo, con valores de 0.003 (mg/kg) para invierno y 0.0005 (mg/kg) en verano.

El cromo presenta valores relativamente bajos en ambos puntos de muestreo en la bahía de Coronel y también un enriquecimiento deficiente. En el centro de la bahía se encuentran valores similares, 0.95 (mg/kg) y 0.86 (mg/kg) en invierno y verano respectivamente, mientras que cercano al puerto, se tienen valores de 0.45 (mg/kg) y 0.41 (mg/kg). Cabe destacar que los valores de enriquecimiento del cromo en el centro de la bahía fueron el doble a los calculados cercano al puerto de Coronel.

Para el cobre, tanto el centro de la bahía presenta un enriquecimiento moderado en invierno y verano, con valores de 2.62 (mg/kg) y 3.08 (mg/kg). En cambio, en la zona cercana al puerto, solo en invierno se presenta un enriquecimiento deficiente con 1.71 (mg/kg) y en verano un enriquecimiento moderado con un valor de 2.31 (mg/kg).

En el caso del mercurio, en invierno se presentaron los mayores valores tanto en el centro de la bahía como en el punto cercano al puerto, con 2.5 (mg/kg) y 1.7 (mg/kg) respectivamente, mientras que en verano los valores fueron menores, sobre todo en el puerto, con un valor de 0.65 (mg/kg) y en el centro de la bahía con 1.44 (mg/kg). Todos los puntos presentan un enriquecimiento deficiente a excepción del punto en el centro de la bahía en invierno que presenta un enriquecimiento moderado.

Tabla N°9: Resumen valores de factor de enriquecimiento.

Localidad	As (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Hg (mg/kg)
Centro Bahía invierno	5.29	0.95	2.62	2.5
Centro Bahía verano	4.93	0.86	3.08	1.44
Puerto Coronel invierno	0.003	0.45	1.71	1.7
Puerto Coronel verano	0.0005	0.41	2.31	0.65

Fuente: Elaboración propia.

6.4.2. ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN

El arsénico presento valores de 2.15 (mg/kg) y 2.1 (mg/kg) en el centro de la bahía para invierno y verano respectivamente, quedando en la categoría de zona moderadamente contaminada, mientras que cercano al puerto, los valores fueron

menores, de 0.003 (mg/kg) en invierno y 0.0006 (mg/kg) en verano, encontrándose en la clasificación de no contaminado o moderadamente contaminado.

El cromo, tanto en el centro de la bahía como cercano al puerto, alcanzó valores bajos, en la primera los valores calculados para invierno fueron de 0.39 (mg/kg) y en verano 0.37 (mg/kg), valores similares a los obtenidos en la zona cercana a la bahía, 0,42 (mg/kg) y 0.45 (mg/kg), para invierno y verano respectivamente.

En cuanto al cobre, en el centro de la bahía, en ambas estaciones se obtuvo valores bastante similares, en invierno 1.07 (mg/kg) y en verano 1.31 (mg/kg), por lo que entran en la clasificación de moderadamente contaminado. En cambio, en la zona cercana al puerto, solo en invierno se obtuvo una clasificación de moderadamente contaminado, en verano se obtuvo un valor de 2.52 (mg/kg), por lo que entra en la clasificación de moderadamente contaminado a fuertemente contaminado.

Los valores calculados para el zinc en el centro de la bahía fueron menores a los cercanos al puerto en ambas estaciones, para el primero los valores fueron de 0.41 (mg/kg) y 0.28 (mg/kg) en invierno y verano respectivamente. Los valores cercanos al puerto de coronel fueron de 0.93 (mg/kg) en invierno y 0.71 (mg/kg) en verano.

Finalmente, el mercurio, en ambos puntos en invierno presenta un índice de Geoacumulación más elevado, con una clasificación de poco contaminado, 1.01 (mg/kg) para el centro de la bahía y 1.56 (mg/kg) para el puerto. En cambio, en verano se presentan valores menores y con una clasificación de no contaminado, con un valor en el centro de la bahía de 0.61 (mg/kg) y 0.71 (mg/kg) en el puerto.

Tabla N°10: Valores del índice de Geoacumulación calculados.

Localidad	As (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Hg (mg/kg)
Centro bahía invierno	2.15	0.39	1.07	0.41	1.01
Centro bahía verano	2.1	0.37	1.31	0.28	0.61
Puerto Coronel invierno	0.003	0.42	1.59	0.93	1.56
Puerto Coronel verano	0.0006	0.45	2.52	0.71	0.71

Fuente: Elaboración propia

6.4.3. ÍNDICE DE CARGA CONTAMINANTE

En cuanto al índice de carga contaminante, los valores presentes en la muestra de sedimento del centro de la bahía fueron más elevados que los del puerto, con valores de 4 en invierno y 3.8 en verano para el centro de la bahía, para el puerto los valores fueron 1.5 en invierno y 1.1 en verano. Es posible observar que la variabilidad estacional presente en el índice de carga contaminante en los dos puntos fue bastante similar de verano a invierno.

Tabla N°11: Valores del índice de carga contaminante del sedimento.

Estación	PLI
Centro bahía invierno	4
Centro bahía verano	3.8
Puerto Coronel invierno	1.5
Puerto Coronel verano	1.1

Fuente: Elaboración propia.

6.5. VARIABILIDAD ESTACIONAL

En cuanto a la variabilidad estacional presente en el centro de la bahía de Coronel, el arsénico disminuyó en mayor cantidad con un 79.2%, seguido de un aumento de zinc 46.4% y el cobre 45.8%, valores bastante similares, seguido del cromo con un aumento de 27.2% y finalmente el mercurio disminuyó un 15.8%.

Tabla N°12: Variabilidad estacional verano – invierno Centro bahía Coronel.

Metal	Verano	Invierno	Variación
Arsénico	6.97	1.45	79.2%
Cromo	29.8	37.9	27.2%
Cobre	33.0	48.1	45.8%
Mercurio	0.1089	0.0917	15.8%
Zinc	18.3	26.8	46.4%

Fuente: Elaboración propia.

En la estación de muestreo cercana al puerto de Coronel, la mayor variación estacional la presenta el zinc con un 29.8%, seguido del cobre con 12.9%, el cromo 12.3% y el mercurio con 12.2%, finalmente para el arsénico no se observaron variaciones ya que la concentración en invierno y verano para este punto fue menor al límite de detección.

Tabla N°13: Variabilidad estacional verano – invierno Puerto Coronel.

Metal	Verano	Invierno	Variación
Arsénico	0.002	0.002	0 %
Cromo	36.3	40.8	12.3%
Cobre	63.4	71.6	12.9%
Mercurio	0.1267	0.1422	12.2%
Zinc	46.9	60.9	29.8%

Fuente: Elaboración propia.

6.6. FUENTES DE CONTAMINACIÓN

En cuanto a la recopilación de las principales descargas industriales al agua en Coronel encontramos el cadmio con 0.28 (ton/año), seguido del plomo 0.25 (ton/año), arsénico 0.24 (ton/año), cromo 0.23 (ton/año), zinc 0.18 (ton/año), cobre 0.068 (ton/año) y finalmente mercurio 0.027 (ton/año).

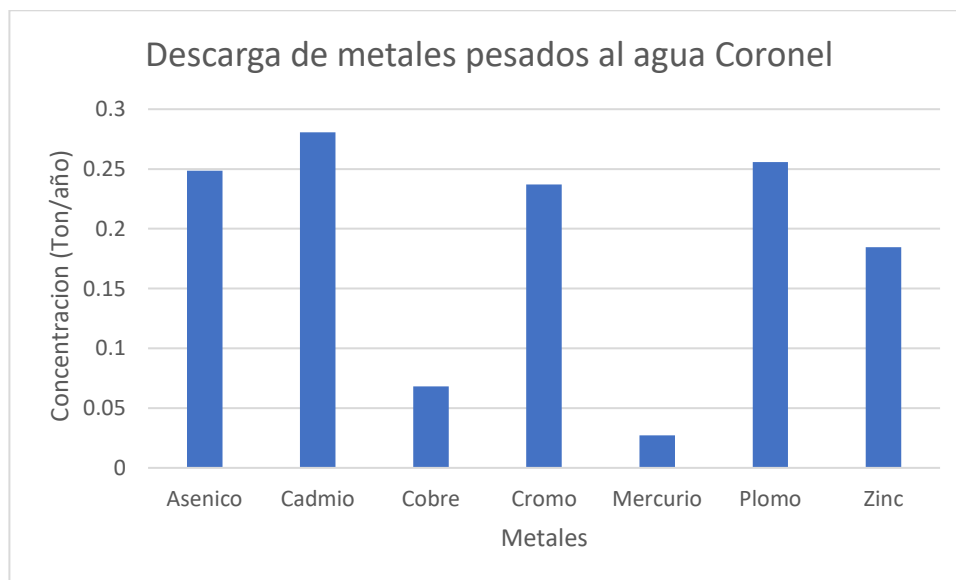


Figura N°5: Descarga de metales pesados en la bahía de Coronel.

Fuente: Elaboración propia

Las descargas industriales en el aire de la ciudad de Coronel, el principal metal descargado es el plomo 0.51 (ton/año), seguido por el arsénico 0.27 (ton/año) y finalmente el mercurio 0.0071 (ton/año).

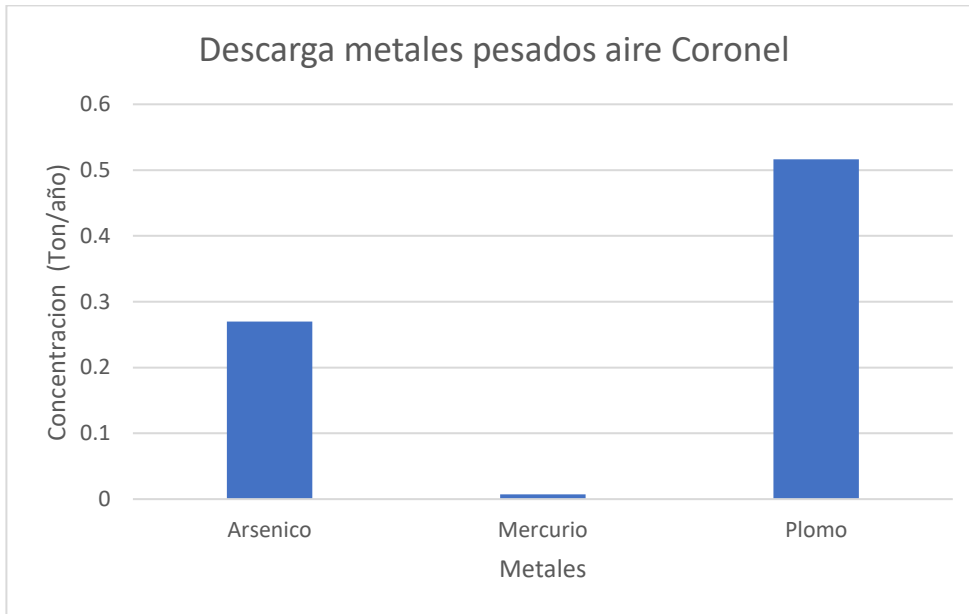


Figura N°6: Descarga de metales pesados en aire de Coronel.

Fuente: Elaboración propia

El tipo de rubro que domina en el total de las descargas de contaminantes en las aguas de Coronel es la de la generación eléctrica 0.96 (ton/año), seguido del tratamiento de aguas con 0.14 (ton/año), la elaboración de productos marinos 0.11 (ton/año) y finalmente la elaboración de papel 0.068 (ton/año). Mientras que, en las descargas al aire, predomina la generación de energía eléctrica 0.42 (ton/año) y en segundo lugar la elaboración de productos marinos con 0.22 (ton/año).

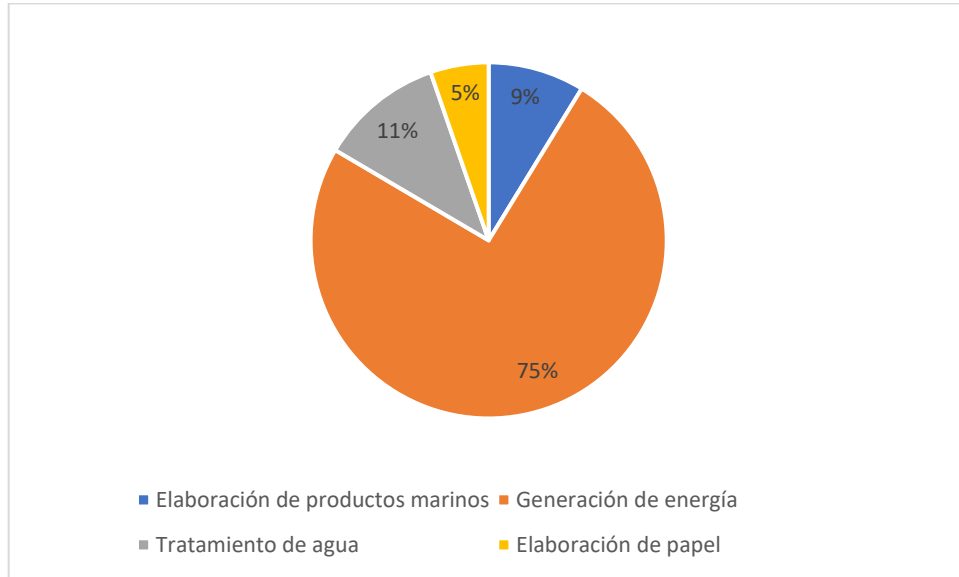


Figura N°7:Distribución de la contaminación al agua por tipo de rubro en Coronel (2019).

Fuente: Elaboración propia

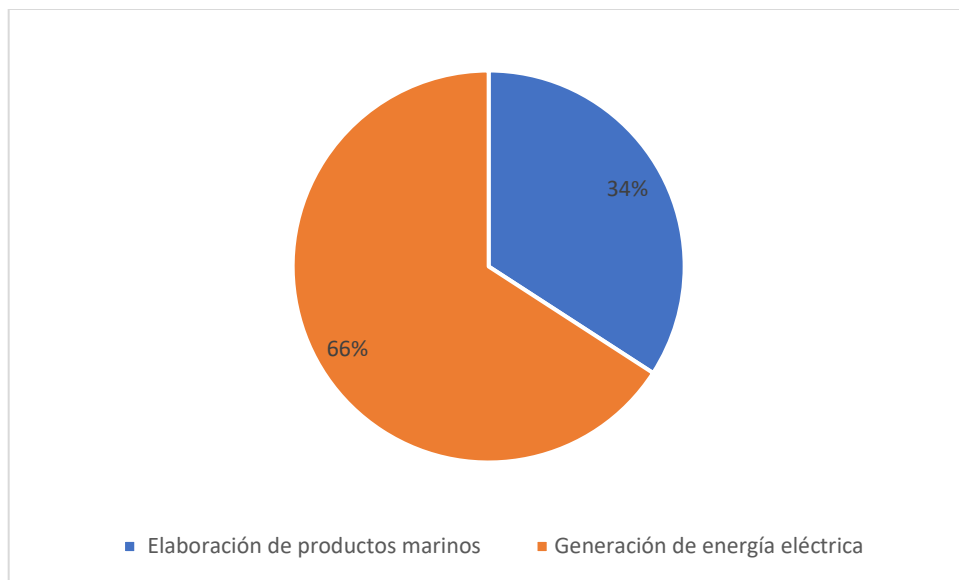


Figura N°8:Distribución de la contaminación al aire por tipo de rubro en Coronel (2019).

Fuente: Elaboración propia

6.7. NORMATIVA AMBIENTAL

En la comparación de la normativa internacional con la normativa chilena encontramos en Canadá la Ley Canadiense para la protección del medio ambiente (CEPA), en Estados Unidos, la Ley Nacional de Políticas Ambientales (NEPA) y en Chile la Ley N° 19300 Bases Generales del Medio Ambiente.

El ente encargado por parte del gobierno en Canadá es el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME), en Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y en Chile el Ministerio de Medio Ambiente.

Los lineamientos en cuanto a normativas y lineamientos en sedimentos, Canadá cuenta con Directrices Canadienses sobre la Calidad de los Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática, Estados Unidos cuenta con las Directrices Nacionales de Calidad de Sedimentos, finalmente, Chile aún no tiene ninguna normativa general propia en cuanto a concentraciones permitidas en cuanto a calidad de sedimentos marinos o de agua dulce.

Cada país cuenta con manuales para el tratamiento de suelos contaminados, Canadá cuenta con el Documento guía de la gestión de los sitios contaminados en Canadá y Protocolo de la derivación de las pautas canadienses de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática. Estados Unidos cuenta con la Guía de remediación de sedimentos para sitios con residuos peligrosos. Chile por su parte cuenta con Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados y la Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes.

En Chile, existen herramientas para fijar concentraciones máximas y mínimas permitidas en cuanto a emisión de contaminantes para la protección de la población y el medio ambiente, llamadas normativas primarias, que buscan proteger la salud de la población y las normativas secundarias, que buscan proteger el medio ambiente, por lo que apoyarse de estas normativas es donde la institucionalidad puede regular y sentar las bases para construir los lineamientos en cuanto a concentración de metales pesados en sedimentos.

Actualmente, el ministerio del medio ambiente realiza la elaboración de un anteproyecto en la zona de Quintero-Puchuncaví para la elaboración de normas secundarias de calidad ambiental, para la protección de las aguas y sedimentos marinos de su bahía. Fue publicado en el Diario oficial con fecha viernes 28 de Agosto del 2020 y aún se encuentra en elaboración. Este proyecto utiliza la

normativa australiana y de Nueva Zelanda para la protección de sedimentos marinos mostrada en la tabla N°17.

Finalmente, en el caso de Coronel, el 08 de febrero de este año, el ministerio del medio ambiente publicó en el Diario Oficial, el inicio del anteproyecto para la elaboración de normas de calidad secundaria de calidad ambiental, para la protección de las aguas y sedimentos del Golfo de Arauco, en donde se encuentra incluida la bahía de Coronel.

Tabla N°14: Normativa Nacional e Internacional sobre sedimentos.

País	Ley general de medio ambiente	Ente encargado	Pauta de calidad de los sedimentos	Guía de tratamiento de suelos contaminados
Canadá	Ley Canadiense para la Protección del Medio Ambiente (CEPA).	Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME).	Directrices Canadienses sobre la Calidad de los Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática.	Documento guía de la gestión de los sitios contaminados en Canadá. Protocolo de la derivación de las pautas canadienses de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática.
Estados Unidos	Ley Nacional de Políticas Ambientales (NEPA).	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).	Directrices Nacionales de Calidad de Sedimentos	Guía de remediación de sedimentos para sitios con residuos peligrosos.
Chile	Ley N° 19300 Bases Generales del Medio Ambiente	Ministerio de Medio Ambiente		Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados. Guía metodológica para la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes.

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°15: Guía de calidad de sedimentos marinos propuesta por Canadá.

Metal	TEL (mg/Kg)	PEL (mg/Kg)
Arsénico	7.24	41.6
Cadmio	0.7	4.2
Cromo	52.3	160
Cobre	18.7	108
Plomo	30.2	112
Zinc	124	271
Mercurio	0.13	0.70

Fuente: Burton (2002)

Tabla N°16: Pauta de calidad de sedimentos marinos propuesta por Estados Unidos.

Metal	ERL (mg/Kg)	ERM (mg/Kg)
Arsénico	8.2	70
Cadmio	1.2	9.6
Cromo	81	370
Cobre	34	270
Plomo	46.7	218
Zinc	150	410
Mercurio	0.15	0.71

Fuente: Burton (2002)

Tabla N°17: Pauta de calidad de sedimentos marinos propuesta por Australia y Nueva Zelanda.

Metal	ERL (mg/Kg)	ERM (mg/Kg)
Arsénico	20	70
Cadmio	1.5	10
Cromo	80	370
Cobre	65	270
Plomo	50	220
Zinc	200	410
Mercurio	0.15	1

Fuente: Burton (2002)

7. DISCUSIÓN

7.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL SEDIMENTO

7.1.1. GRANULOMETRÍA

En la bahía de Coliumo el mayor porcentaje presente en la bahía es de arenas, caso parecido al de bahía de Coronel, que presenta en su mayoría arenas del tipo finas y muy finas, además de encontrarse gran porcentaje de limo, lo que explicaría la mayor cantidad de metales pesados en el sedimento, ya que uno de los principales factores que determina la distribución de metales pesados es el valor granulométrico del sedimento, que tiende a aumentar la capacidad de este de concentrar metales (Horowitz, 1985).

Valores similares se presentaron en la bahía de Coliumo, con gran porcentaje de arenas (Neira y Palma, 2007). En cuanto a bahía de coronel, los valores en cuanto a porcentaje de arenas finas y muy finas son bastante similares a los obtenidos por (Hidalgo, 2017).

7.1.2. MATERIA ORGÁNICA TOTAL (MOT)

El porcentaje de materia orgánica encontrada en Coliumo fue entre 5 y 8 veces más pequeño que la encontrada en Coronel, principalmente en la zona de muestreo ubicada cercana al puerto, estos niveles pueden deberse a actividades como la pesca artesanal e industrial ubicada en la costa, las cuales pueden incrementar los niveles de materia orgánica encontrados en la zona. También está relacionado con los niveles de oxidación que encontramos en el potencial redox son negativos, por lo que se observa un ambiente reducido, elevados valores de lípidos y carbono orgánico total, además de un valor muy elevado de lípidos y altos porcentajes de humedad.

Estos valores son similares a los encontrados en bahías aledañas, como en el caso de la desembocadura del río Itata (Chandia y Salamanca, 2012), en bahía de concepción (Muñoz, *et al.*, 2012) y bahía de Coliumo (Neira y Palma, 2007). Sin embargo, muestra niveles más bajos a los obtenidos en estudios en bahía coronel como los realizados por (Hidalgo, 2017)

7.1.3. CARBONO ORGÁNICO TOTAL (TOC)

El carbono orgánico total presente en la bahía de coronel es mayor en la zona cercana al puerto y menor en el centro de la bahía, esto puede deberse a la gran cantidad de lípidos, humedad y materia orgánica encontrada en la zona, además de estar en un ambiente reducido. Otros factores de los cuales dependen los niveles de carbono orgánico total son el origen de la materia orgánica, la profundidad de la columna de agua, el nivel de oxidación de la columna de agua, tasa de sedimentación, la adsorción a superficies minerales. (Escobar-Briones & García-Villalobos, 2007). Al igual que la materia orgánica, la concentración de

carbono orgánico total depende también del tamaño del sedimento, aumentando su concentración en texturas más finas. (Martorell, 2010).

Valores similares se encuentran en estudios realizados en la bahía como el de (Ministerio del Medio Ambiente, 2016) y (Contreras, *et al.*, 2007)

7.1.4. HUMEDAD

En cuanto al porcentaje de humedad encontrado en los sedimentos, los ubicados en la zona cercana al puerto presentan valores muy altos en comparación a los encontrados en el centro de la bahía, esto puede deberse a la concentración de lípidos encontrados en las muestras que superan por mucho a los valores encontrados en las demás muestras, además de encontrarse en un ambiente bastante más reducido, con mayor porcentaje de materia y carbono orgánico total.

Valores similares se presentan en la bahía de coronel en el estudio realizado por (Hidalgo, 2017) y (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

7.1.5. pH

El pH se encuentra dentro de los rangos normales para el sedimento marino, para la bahía de Coliumo, los niveles son ligeramente superiores, mientras que los del área cercana al puerto en coronel son los menores. Esto puede explicarse debido al efecto de la actividad fotosintética, la respiración celular y las descargas antropogénicas en zonas cercanas a la costa tienden a alejarse de los valores normales. (Martorell, 2010).

Valores similares se encuentran en (Chandía, *et al.*, 2022).

7.1.6. LÍPIDOS

Los niveles presentes de lípidos en la zona del puerto de coronel son los más altos encontrados en la bahía, seguidos por el centro de la bahía y finalmente con menor concentración, los de la bahía de Coliumo. Esta diferencia tan grande de valores en la zona del puerto puede deberse a la gran intervención antrópica que sufre por actividades como la pesca industrial y privada y los desechos que son arrojados al mar, además de derrames de algunas embarcaciones allí presentes (Sánchez, 2007).

7.1.7. POTENCIAL REDOX

Referente al potencial redox, en la bahía de Coliumo se encontraron valores positivos, por lo que es un ambiente oxidado (alto en oxígeno), lo que explica que se encuentren los mayores niveles de pH obtenidos en las muestras. (Martorell, 2010). En la bahía de Coronel, se encuentra el centro de la bahía con valores cercanos a 0 en invierno y positivos en verano, valores totalmente distintos se dan en la zona cercana al puerto, una zona reducida, con deficiencia de oxígeno,

mayor cantidad de materia orgánica y gran cantidad de lípidos debido a la actividad antropogénica y su cercanía a la costa. (Sánchez, 2007).

Valores similares se encuentran en estudios realizados en la bahía de coronel y Coliumo como la de (Chandia, *et al.*, 2022)

7.2. CONCENTRACIÓN DE METALES

7.2.1. ARSÉNICO

El arsénico muestra niveles bajo el promedio propuesto por los lineamientos de calidad de sedientos (ISQG) de Canadá, solo una estación obtuvo un valor casi 6 veces superior al resto, (estación mt2) en verano ubicada específicamente en el centro de la bahía de Coronel. Estos valores son similares a los obtenidos por (Salamanca, *et al.*, 1986). y los obtenidos en sedimentos de bahías ubicadas más al sur como los de (Velásquez, 2005). y (Alarcón, 2003).

7.2.2. CADMIO

En cuanto al cadmio, en todas las muestras la concentración fue menor al límite de detección.

7.2.3. CROMO

El valor más alto registrado para el cromo se obtuvo en la estación del puerto de coronel en invierno, con un valor de 40.8 mg/kg, dicho valor no supera los valores establecidos en los ISQG y no supone un peligro para los organismos. El menor valor registrado se encontró en la estación de Coliumo en verano, con un valor de 16.2 mg/Kg. Estos valores se asemejan a los obtenidos por (Velásquez, 2005) en sedimentos ubicados en la zona sur del país.

7.2.4. COBRE

Los valores obtenidos en las bahías respecto al cobre son bastante variados, solo en Coliumo se encuentra bajo los lineamientos de la ISQG con valores menores que 10 mg/Kg en verano e invierno. En cambio, la bahía de Coronel presentan valores mayores a la ISQG, destacando la estación del puerto, llegando a un máximo de 71.6 mg/Kg en invierno, pero sin llegar a sobrepasar los niveles de efectos probable (PEL). Estos altos valores encontrados en Coronel pueden deberse a las actividades mineras que ocurrieron en la zona a mediados del siglo XIX.

Los valores que están entre los rangos de ISQG y PEL pueden mostrar la ocurrencia ocasional de posibles efectos adversos sobre organismos vivos según

las Directrices Canadienses sobre la Calidad de los Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática.

Los valores obtenidos son similares a los resultados de estudios en la bahía de coronel y sus alrededores, tales como los de (Salamanca, *et al.*, 1986) y (Chandia y Salamanca, 2012). También valores similares para el cobre se encuentran en bahías chilenas, como los de san Vicente (Valdés & Tapia, 2019) en el norte y los de (Alarcón, 2003) y (Velásquez, 2005) en la zona sur.

7.2.5. PLOMO

En cuanto al plomo, al igual que en el caso del cadmio, en todas las muestras la concentración fue menor al límite de detección.

7.2.6. MERCURIO

Las concentraciones de mercurio en la bahía de Coliumo presentó los valores más bajos, mientras que, en la bahía de coronel, solo una estación estuvo por encima de los valores propuestos por el ISQG, aunque por bastante poco, 0.1422 mg/Kg, pero menor a los valores PEL, por lo que pueden mostrar la ocurrencia ocasional de posibles efectos adversos sobre organismos vivos según las Directrices Canadienses sobre la Calidad de los Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática. Estos valores son similares a los obtenidos por otros estudios en la bahía, como los de (Chandia & Salamanca, 2012), (Hidalgo, 2017) y (Salamanca, *et al.*, 1986). La gran brecha en las concentraciones de la bahía Coronel y la bahía de Coliumo puede deberse a la actividad de las termoeléctricas ubicadas en la zona costera.

7.2.7. ZINC

Los valores encontrados para el zinc presentan una gran diferencia en ambas bahías, sin embargo, están bastante lejos de los rangos propuestos por el ISQG, por lo que no presentan un riesgo para las especies marinas. Estos valores son similares a estudios realizados en la bahía y sus alrededores, como los de (Salamanca, *et al.*, 1986), (Valdés & Tapia, 2019) y (Chandia y Salamanca, 2012)

7.3. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN

Los valores en obtenidos en el factor de enriquecimiento pueden variar ligeramente en otros estudios ya que se utilizó Zinc como metal de referencia en lugar de Fe o Al como se realiza normalmente (Liaghati, *et al.*, 2004).

Así mismo, se utilizaron las concentraciones obtenidas en las muestras de Coliumo para usarlas como los valores basales en los cálculos de los índices de contaminación.

7.3.1. FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO

Los valores calculados en la zona centro de la bahía fueron mayores a los calculados en la zona cercana al puerto, esto puede deberse al efecto de la surgencia (Barahona & Gallegos, 2000), efectos provocados por el terremoto del 2010 (Tapia *et al.*, 2019) o diversos efectos climáticos.

Arsénico

Los valores de enriquecimiento del arsénico muestran que existe un enriquecimiento significativo en la bahía producto de las actividades antropogénicas en el centro de la bahía. En cambio, en la zona del puerto, se observa un enriquecimiento deficiente o mínimo, esto se explica debido a que, en la zona del puerto, la concentración de la muestra fue menor al límite de detección por lo que se asumió que el valor de detección sea el usado para calcular el enriquecimiento de la zona.

Estudios realizados en la bahía de Quintero, obtuvieron valores de enriquecimiento similares a los obtenidos en la zona del puerto de Coronel, llegando a un máximo de 1.76, un enriquecimiento deficiente. (Parra, *et al.*, 2015)

Cromo

El cromo presenta un enriquecimiento deficiente o mínimo en todas las muestras, por lo que el metal pudiera provenir de la corteza terrestre o de procesos naturales. (Valdés & Tapia, 2019). Estos valores son similares a los mínimos obtenidos en bahía de Quintero, llegando a valores entre 0.86 de mínima y 2.41 de máxima, de un enriquecimiento deficiente o mínimo a uno moderado en sus concentraciones máximas. (Parra, *et al.*, 2015).

Cobre

En cuanto al cobre, este presenta un enriquecimiento moderado en ambas muestras tanto en invierno como verano, salvo la muestra del puerto en invierno que presenta un enriquecimiento deficiente, valores similares se obtuvieron en estudios de la desembocadura del río Itata, presentando un enriquecimiento deficiente o mínimo (Chandia y Salamanca, 2012). En un estudio más al norte, precisamente en la bahía de Quintero, se obtuvieron valores en un rango muy amplio, el menor presentó un enriquecimiento moderado, mientras que los más altos, presentaron enriquecimientos muy elevados. (Parra, *et al.*, 2015).

Mercurio

Finalmente, en el caso del mercurio, los valores calculados en el puerto de Coronel y en el centro de la bahía, fueron bastante similares en invierno y verano, encontrándose un enriquecimiento deficiente. En el caso del centro de la bahía

en invierno, fue el único punto en donde se encontró un enriquecimiento moderado.

Existen diversos estudios en cuanto al mercurio en la bahía de Coronel, con resultados de factor de enriquecimiento que varían entre enriquecimiento deficiente o mínimo a enriquecimiento moderado. (Hidalgo, 2017). Otro estudio más reciente en la bahía arrojó valores medianamente mayores pero los mínimos y máximos se mantenían en enriquecimiento deficiente o mínimo a enriquecimiento moderado (Chandia, *et al.*, 2022).

7.3.2. ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN

Arsénico

El arsénico presenta índices muy similares para ambas estaciones, pero marcados en ambos puntos de muestra, moderadamente contaminados a fuertemente contaminados en la zona centro de la bahía, mientras que en el puerto se encuentra una zona no contaminada o moderadamente contaminada. Esto se debe a que los valores analizados en la muestra del puerto arrojaron valores menores al límite de detección, por lo que se utilizó dicho valor para el cálculo.

Cromo

En cuanto al cromo, los valores fueron prácticamente iguales en ambos puntos de muestreo tanto en invierno como verano, con un valor Igeo de 1 por lo que es una zona no contaminada a moderadamente contaminada.

Cobre

El cobre muestra valores muy similares en ambas muestras en ambas estaciones, con un valor Igeo de 2, por lo que es una zona no contaminada o moderadamente contaminada. Solo la muestra obtenida en verano ubicada en el puerto de coronel presentó un valor Igeo de 3, por lo que se considera de moderadamente contaminado a fuertemente contaminado.

Valores similares se presentan en varios estudios respecto al cobre, con valores Igeo en el norte con mínimas de -2 y máximas 3.5 (Valdés & Tapia, 2019) de no contaminado a fuertemente contaminado. Mas al sur, en un estudio en la costa de Dichato, los valores Igeo fueron bastante bajos, con valores negativos, por lo

que se considera un sitio no contaminado por este metal (Chandia y Salamanca, 2012).

Mercurio

Los valores calculados para el índice de geoacumulación de mercurio en la bahía de Coronel presentan clasificaciones de poco contaminado a no contaminado, acorde a las concentraciones arrojadas en las muestras de sedimento, que fueron bastante bajas. Estos valores son similares a los que se obtuvieron en estudios similares de metales en la bahía, con mínimas de 0.01 y máximas de 1.23, con una clasificación de no contaminado a moderadamente contaminado. (Hidalgo, 2017). Otro estudio específicamente sobre el mercurio en la bahía se llevó a cabo recientemente, en donde los valores Igeo fueron bastante bajos, clasificándose como suelos o contaminados a moderadamente contaminados en cuanto a mercurio (Chandia, *et al.*, 2022).

Zinc

Los valores Igeo para el zinc fueron bastante similares en ambas zonas de muestreo, valores bastante pequeños por lo que se clasifican como suelos no contaminados o moderadamente contaminados.

Otros estudios en la bahía muestran valores Igeo similares, en el estudio de Hidalgo (2017) obtuvo resultados con suelos no contaminados a suelos moderadamente contaminados. Similar a estos resultados, en Dichato se obtuvieron solo suelos no contaminados (Chandia & Salamanca, 2012).

7.3.3. ÍNDICE DE CARGA CONTAMINANTE

En cuanto al índice de carga contaminante (PLI), se observa una gran diferencia entre el centro de la bahía y la zona cercana al puerto. En la primera, se observa un valor bastante similar para invierno y verano, 4 y 3.8 respectivamente una zona altamente contaminada, mientras que, para la segunda, un valor de 1.03 en invierno y 1.1 en verano, valores bastante similares entre sí, que se clasifican en una zona moderadamente contaminada. Esta diferencia se debe principalmente por la influencia la alta concentración de arsénico encontrado en la muestra del centro de la bahía.

El estudio de Hidalgo (2017) sobre el PLI en Coronel, obtuvo valores entre 0.99 y 2.34 que varían entre una zona con ausencia de contaminación a moderadamente contaminada y una zona moderadamente contaminada a altamente contaminada.

Otro estudio en la costa de Dichato arrojó valores menores a los de bahía de Coronel, con valores PLI de entre 0.36 a 0.78, una zona con ausencia de contaminación a moderadamente contaminada (Chandia & Salamanca, 2012).

7.4. VARIABILIDAD ESTACIONAL

El efecto de la variabilidad estacional en los dos puntos de muestreo es bastante similar, en lo que respecta al punto cercano al puerto de la bahía de Coronel, se observó un patrón en los metales pesados de verano a invierno, en donde las concentraciones aumentaron de una manera bastante moderada con máximas de 29.8% y mínimas de alrededor de 12%. Una de las razones que explican el aumento de las concentraciones de verano a invierno es el efecto de las descargas del río Biobío y su aporte de aproximadamente un 8% del volumen de la bahía (Chandia, *et al.*, 2022), el aumento de procesos de erosión durante el invierno ocasionados por el viento y la lluvia, además de los efectos que tiene la corriente de Humboldt en ambas estaciones, encontrándose un patrón de corrientes hacia el sur en invierno y corrientes con dirección norte en verano (Contreras, 2017).

En el centro de la bahía se ve este efecto similar de verano a invierno, salvo en el caso del arsénico y el mercurio, en donde las concentraciones para estos metales disminuyeron en invierno, en el caso del mercurio la disminución fue bastante despreciable por lo que no requiere mayor explicación, en cambio, para el arsénico puede deberse a distintitos factores, que van desde el tipo de especiación en el que puede encontrarse en la bahía, ya sea orgánico o inorgánico, debido al efecto de la materia orgánica o por efecto de la corriente de Humboldt (Deng, *et al.*, 2014).

7.5. DESCARGA DE CONTAMINANTES

Las descargas de contaminantes en la bahía de Coronel muestran que en las descargas del año estudiado (2019), la mayor presencia de metales pesados se da en descargas acuáticas, siendo la más predominante el cadmio, plomo y arsénico. El rubro que tuvo mayor impacto en dichas descargas fue la generación de energía por parte de las termoeléctricas ubicadas en la zona. Para el cadmio y el plomo, la central de bocamina 1 fue la que más aporte realizó al total anual de las descargas, mientras que para el arsénico fue la central Santa María.

Las descargas al aire en la comuna analizadas fueron de arsénico, plomo y mercurio, siendo este último casi despreciable en comparación a los demás. Para el plomo que es el que en mayor proporción se descarga, se debe a la combustión de aceite usado en los rubros de industrias manufactureras y la generación de energía eléctrica por parte de bocamina 1.

En cuanto a las descargas de arsénico, la principal fuente es la generación de energía eléctrica por parte de las centrales bocamina y Santa María, mientras que, para las descargas de mercurio, además de las centrales de generación eléctrica se encuentra la industria del papel.

Finalmente, en la figura N° 7 y figura N°8 se presentan las proporciones en las que se distribuyen las descargas en agua y aire respectivamente, donde, en ambas el principal rubro que abarca las concentraciones de metales pesados es la de generación eléctrica realizadas por las centrales termoeléctricas ubicadas en la zona, Bocamina y Santa María, seguidas de la elaboración de productos marinos y tratamiento de aguas.

7.6. NORMATIVA AMBIENTAL

La creación de una Ley “general” en cuanto a medio ambiente en estos países respecto a Chile fue bastante distinta, ya que, tanto en Canadá como EE. UU., funcionan con un sistema federal y cada provincia o estado tiene su propia normativa relacionada a temas ambientales. EE. UU. fue el primero de estos tres en crear dicha Ley “general” en 1969, más tarde, en 1999, Canadá crea la llamada Ley Canadiense para la Protección del Medio Ambiente, la cual entra en rigor en el año 2000, siendo una versión más actualizada de la primera, creada en 1988.

En cambio, en 1994, en el gobierno de Patricio Aylwin, se crea la Ley N°19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, para luego en el 2010, con la Ley N°20.417 que modifica la anterior y crea el ministerio de Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y la Superintendencia del Medio Ambiente.

En cuanto a las similitudes, tanto Canadá, como EEUU, crearon en fechas similares sus ministerios de Medio Ambiente y la Agencia de Protección Ambiental respectivamente, la primera fue creada en 1970 y la segunda en 1969, sin embargo, en Chile el proceso fue un poco más largo, ya que antes de la creación del ministerio del Medio Ambiente, existía un ente encargado llamado Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), creada en 1994 pero luego de un informe de la OCDE, ya que dicha institución no tenía peso político, debido a que carecía de independencia, pues estaba sujeta al Ministerio de Secretaria General de la Presidencia.

En las normativas analizadas se observan grandes similitudes a entre Canadá, Estados Unidos y Chile, sin embargo, este último carece de una pauta de calidad de sedimentos en donde se establezca claramente una línea base para todo el territorio nacional, para que así sea posible la creación de normativas que tengan un respaldo científico del estado actual de los sedimentos antes de realizar

cualquier actividad o proyecto que intervenga directa o indirectamente en dichos ambientes. Lo más cercano que tiene Chile son las normas de calidad primaria y secundaria, principalmente la secundaria que tiene como objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza y son de carácter local.

Luego de realizar una investigación sobre las normativas que están en elaboración, se encontró la existencia de un anteproyecto que busca proponer normativas de calidad secundaria para el sector de la bahía en Quintero-Puchuncaví por parte del Ministerio del Medio Ambiente, en donde proponen la norma utilizada en Australia y de Nueva Zelanda de calidad de sedimentos marinos, debido a que se argumenta que existe mayor similitud en el ecosistema de esa zona con la bahía de Quintero-Puchuncaví al encontrarse situadas en el extremo sur de la zona ecuatorial a diferencia de Estados Unidos y Canadá. (Ministerio de medio ambiente ,2021).

Actualmente aún está en fase de elaboración, pero con esto, se establece un precedente en cuanto al establecimiento y aplicación de normativas de calidad de sedimentos marinos y su importancia en el ecosistema chileno.

En febrero de este año, se publica en el Diario Oficial, el inicio de la elaboración de un anteproyecto de normas de calidad secundaria para la protección de las aguas y sedimentos del Golfo de Arauco, región del Biobío. A través de este proyecto, se espera que se incluya la bahía de Coronel como zona de monitoreo y muestreo, para establecer los parámetros permitidos en la bahía y mediante estos, fortalecer la fiscalización e institucionalidad a la hora de regular a las empresas más relacionadas a la contaminación con metales pesados en la bahía y esclarecer algunos casos en donde la población se ha visto afectada al encontrarse grandes niveles de metales pesados en asentamientos aledaños a estas industrias, como por ejemplo el sector de lo Rojas.

Al ya encontrarse en elaboración el anteproyecto de Quintero-Puchuncaví, se espera que se adopten medidas similares en el Golfo de Arauco en cuanto a la estructura y planteamiento de este. Por lo que es posible encontrar recomendaciones para la aplicación de este y su efecto que tendría tanto en el Golfo como en bahía de Coronel.

La primera medida es considerar las descargas al aire por parte del sector industrial, este punto no se considera en Quintero-Puchuncaví y considerando los resultados observados en el objetivo 3 de este estudio, el plomo, arsénico y mercurio son descargados en la bahía en grandes cantidades a lo largo del año, además, según un estudio publicado por Chandia en 2022, el mercurio encontrado en la bahía de Coronel, se debe a efectos de deposición atmosférica.

La segunda medida a considerar es el efecto de las corrientes en el Golfo de Arauco y como puede influir en las descargas de contaminantes, principalmente metales pesados en su distribución. Según un estudio de circulación de corriente en el interior de este, se concluye que la mayoría de los contaminantes liberados en su estudio, no salen del golfo, estos dejan de circular y la mayoría de las partículas liberadas termina en la costa, como es el caso de la bahía de Coronel, en donde sobre el 60% de las partículas colisionan con la costa y no son liberadas al golfo. (Contreras, 2017)

Finalmente, considerar las variaciones estacionales que afectan la concentración de metales pesados en la bahía, en donde en general, se esperan mayores concentraciones en invierno debido a factores como el aumento de procesos erosivos, el efecto que tiene la pluma del Biobío en invierno y su aporte a la bahía de Coronel y el efecto de la Corriente de Humboldt en la bahía en cada estación del año.

8. CONCLUSIONES

El sector costero en Coronel es de gran importancia para su comuna y para la región, en el sector se desarrollan múltiples actividades productivas que generan contaminantes y afecta tanto a la población, como al ecosistema. Las principales actividades productivas que abarcan la mayoría de las descargas tanto en agua como en aire en la comuna provienen de la intensa actividad en la industria de generación de energía, las termoeléctricas, con un 75% de la contaminación de metales pesados en agua y 66% en aire.

Los niveles de arsénico en el centro de la bahía presentan valores bastante elevados, pero no suponen un peligro para la salud de la población ni el medio acuático, el cobre en ambos puntos de muestreo presenta una gran concentración en el sedimento, lo que puede deberse a la gran actividad minera que se dio en las minas de Corone y Lota.

Referente a la variabilidad estacional, se presentó un patrón común en donde los metales pesados aumentan su concentración en invierno debido a la influencia del aumento de procesos de erosión, influencia de la corriente de Humboldt en el Golfo de Arauco y la influencia del río Biobío en la bahía de Coronel.

Finalmente, en este estudio se concluye que la elaboración del anteproyecto que se propone elaborar en el golfo de Arauco sobre normas secundarias de calidad para proteger las aguas y sedimentos era muy necesario para una zona tan intervenida por acciones antropogénicas como es el golfo de Arauco y la bahía de Coronel, teniendo en cuenta la gran importancia que tienen en la economía de la comuna y es el sustento de gran parte de la población de la región. Por esto, al fijar límites permitidos y elaborar planes de monitoreo en la bahía, permite el resguardo de no solo la salud de la población, sino que también del medio ambiente en donde llevan a cabo todas sus actividades.

9. REFERENCIAS

Alarcón, S. (2003). Determinación de elementos traza (Cd, Cu, Ni, Pb, Hg y As) en agua de mar y sedimento de la Bahía de Puerto Montt, año 2002. Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile.

Amin, N., Clark, C. C. T., Taghizadeh, M., & Djafarnejad, S. (2020). Zinc supplements and bone health: The role of the RANKL-RANK axis as a therapeutic target. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 57, 126417. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.126417>

Bantan, R. A., Al-Dubai, T. A., & Al-Zubieri, A. G. (2020). Geo-environmental assessment of heavy metals in the bottom sediments of the Southern Corniche of Jeddah, Saudi Arabia. *Marine Pollution Bulletin*, 161(March), 111721. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111721>

Barahona J. & R. Gallegos (2000) Surgencias en la costa norte de Chile durante las temporadas Niña 1996-1997 y Niño 1997-1998*. *Revista de Geografía Norte Grande*, 27: 53-60.

Barbieri, M. (2016). The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. *Journal of Geology & Geophysics*, 5(1), 1–4. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>

Birch, G. F. (2017). Determination of sediment metal background concentrations and enrichment in marine environments – A critical review. *Science of the Total Environment*, 580, 813–831. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.028>

Blanc, J. M., Molinet, C., Subiabre, R., & Díaz, P. A. (2018). Cadmium determination in Chilean blue mussels *Mytilus chilensis*: Implications for environmental and agronomic interest. *Marine Pollution Bulletin*, 129(2), 913–917. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.048>

Burton, G. A. (2002). Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology*, 3(2), 65–75. <https://doi.org/10.1007/s102010200008>

Ccme. (1995). Protocol for the derivation of canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. *Ccme Epc-98E*, 35. Recuperado de ceqg-rcqe.ccme.ca/download/en/226/

Chakraborty, S., Chakraborty, P., Hathorne, E., Sarkar, A., Linsy, P., Frank, M., & Nath, B. N. (2021). Evidence for increasing anthropogenic Pb concentrations in Indian shelf sediments during the last century. *Science of the Total Environment*, 760, 143833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143833>

- Chandía, C., & Salamanca, M. (2012). Long-term monitoring of heavy metals in Chilean coastal sediments in the eastern South Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 64(10), 2254–2260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.06.030>
- Chandía, C., Salamanca, M., Hernández, A., & Urrutia, R. (2022). Sediment mercury concentration changes as a response to increased industrial activity in Coronel Bay, Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 178(April). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113630>
- Chi, S., Hu, J., Zheng, J., & Dong, F. (2017). Study on the effects of arsenic pollution on the communities of macro-invertebrate in Xieshui River. *Shengtai Xuebao*, 37(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.09.003>
- Contreras, J. (2017). *Circulación del Golfo de Arauco y patrones de dispersión y residencia de contaminantes asociados a emisarios submarinos*. 81.
- Contreras, S., Pantoja, S., Neira, C., & Lange, C. B. (2007). Biogeochemistry of surface sediments off Concepción (~36°S), Chile: El Niño vs. non-El Niño conditions. *Progress in Oceanography*, 75(3), 576–585. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.08.030>
- de Almeida Rodrigues, P., Ferrari, R. G., dos Santos, L. N., & Conte Junior, C. A. (2019). Mercury in aquatic fauna contamination: A systematic review on its dynamics and potential health risks. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 84, 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.02.018>
- Deng, T., Wu, Y., Yu, X., Guo, Y., Chen, Y. W., & Belzile, N. (2014). Seasonal variations of arsenic at the sediment-water interface of Poyang Lake, China. *Applied Geochemistry*, 47, 170–176. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.002>
- Di Marzio, A., Lambertucci, S. A., Fernandez, A. J. G., & Martínez-López, E. (2019). From Mexico to the Beagle Channel: A review of metal and metalloid pollution studies on wildlife species in Latin America. *Environmental Research*, 176(March), 108462. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.029>
- Drouillard, K. G. (2008). Biomagnification. *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*, 441–448. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00377-3>
- Escobar-Briones, F. ., & García-Villalobos, E. (2007). Distribución espacial del carbono orgánico total en el sedimento superficial de la planicie abisal del Golfo de México. *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*, (Wollast 1998), 508.
- Ferretti, C. B. (2022). *Narrativas del acorralamiento . Identidad de Lugar en la Bahía de Coronel a partir de la Narratives of the cornering . Place identity in*

coronel bay from the productive reconversion *Introducción El antropoceno , como era geológica-cultural en curso , no s* (Vol. 1).

- Figueroa, M. (2004). Determinacion de metales trazas (Ni, Pb, Cr, Cu y As) en *Scirpus Californicus*. Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile.
- Gupta, S. K., Chabukdhara, M., Kumar, P., Singh, J., & Bux, F. (2014). Evaluation of ecological risk of metal contamination in river Gomti, India: A biomonitoring approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 110, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.08.008>
- Gupta, S. K., & Singh, J. (2011). Evaluation of mollusc as sensitive indicator of heavy metal pollution in aquatic system: A review. *IIOAB Journal*, 2(1), 49–57.
- Gutiérrez-Mosquera, H., Marrugo-Negrete, J., Díez, S., Morales-Mira, G., Montoya-Jaramillo, L. J., & Jonathan, M. P. (2021). Mercury distribution in different environmental matrices in aquatic systems of abandoned gold mines, Western Colombia: Focus on human health. *Journal of Hazardous Materials*, 404(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124080>
- Hidalgo, M.A., 2017. Evaluación Temporal del Contenido de Metales Pesados en Sedimentos de la Bahía de Coronel, Chile. Universidad de Concepción, Repositorio academico de la Universidad de Concepcion. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/10766>
- HO, N., & AJ, E. (2018). Contamination Indices and Heavy Metal Concentrations in Soils in Okpoko and Environs, Southeastern Nigeria. *Journal of Environmental Science and Public Health*, 02(02), 77–95. <https://doi.org/10.26502/jesph.96120031>
- Horowitz, A.J. 1986. A primer on trace metal-sediment chemistry. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2277.
- Juárez, P., Fuente, J., & Vaca, R. (2005). Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación. *Ciencia ergo sum*, 12(2), 154–161. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/104/10412207.pdf>
- Kuang, W., Chen, Z., Shi, K., Sun, H., Li, H., Huang, L., & Bi, J. (2020). Adverse health effects of lead exposure on physical growth, erythrocyte parameters and school performances for school-aged children in eastern China. *Environment International*, 145, 106130. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106130>
- Kuznetsova, Olga V., & Timerbaev, A. R. (2022). Marine sediment analysis – A review of advanced approaches and practices focused on contaminants. *Analytica Chimica Acta*, 1209, 339640. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.339640>

- Li, X., Zhou, Y., & Zhang, J. (2021). Status and associated human health risk of zinc accumulation in agricultural soils across China. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 867–876. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.017>
- Liaghati, T., Preda, M., & Cox, M. (2004). Heavy metal distribution and controlling factors within coastal plain sediments, Bells Creek catchment, southeast Queensland, Australia. *Environment International*, 29(7), 935–948. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00060-6)
- Litter, M. I., Ingallinella, A. M., Olmos, V., Savio, M., Difeo, G., Botto, L., ... Ahmad, A. (2019). Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation and determination. *Science of the Total Environment*, 676, 756–766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.262>
- Liu, J., Peng, A., Deng, S., Liu, M., Liu, G., & Li, C. (2021). Distribution of heavy metals and radionuclides in the sediments and their environmental impacts in Nansha Sea area, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 166(February), 112192. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112192>
- Liu, M., Liu, Y., Cheng, Z., Liu, J., & Chai, T. (2015). Effects of chromic chloride on chick embryo fibroblast viability. *Toxicology Reports*, 2, 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2015.03.007>
- Looi, L. J., Aris, A. Z., Yusoff, F. M., Isa, N. M., & Haris, H. (2019). Application of enrichment factor, geoaccumulation index, and ecological risk index in assessing the elemental pollution status of surface sediments. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(1), 27–42. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0149-1>
- Makedonski, L., Peycheva, K., & Stancheva, M. (2017). Determination of heavy metals in selected black sea fish species. *Food Control*, 72, 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.08.024>
- Mandal, P. (2017). An insight of environmental contamination of arsenic on animal health. *Emerging Contaminants*, 3(1), 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2017.01.004>
- Mandour, A., El-Sayed, M. K., El-Gamal, A. A., Khadr, A. M., & Elshazly, A. (2021). Temporal distribution of trace metals pollution load index in the Nile Delta coastal surface sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 167(February), 112290. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112290>
- Martorell, J. (2010). BIODISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN DOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS DE LA COSTA SURATLÁNTICA ANDALUZA AFECTADOS POR CONTAMINACIÓN DIFUSA. Tesis doctoral, Universidad de Cádiz. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10498/15776>

- McCready, S., Birch, G. F., Long, E. R., Spyrikis, G., & Greely, C. R. (2006). An evaluation of Australian sediment quality guidelines. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 50(3), 306–315. <https://doi.org/10.1007/s00244-004-0233-7>
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2016). “DIAGNÓSTICO MEDIOAMBIENTAL Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE RIESGO ECOLÓGICO DE LA BAHÍA DE CORONEL”. Recuperado de: <https://sqi.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/07/E7-Evaluacion-Riesgo-Ecologico-Bahia-Coronel.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2018). “Programa de Recuperación Ambiental y Social”. Recuperado de: <https://pras.mma.gob.cl/wpcontent/uploads/2019/11/PRAS-Coronel.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2021). “Anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) para la protección de las aguas y sedimentos de la bahía de Quintero – Puchuncaví”. Recuperado de: https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2022/proyectos/32Presentacion_COA_09-11-21_compressed.pdf
- Muller G. Die Schwermetallbelastung der Sedimenten des Neckars and Seiner Nebenflu sse. *Chemiker-Zeitung* 1981;6:157–64
- Municipalidad de Coronel. (2016). Plan de desarrollo comunal – PLADECO. Recuperado de: https://sitio.gorebiobio.cl/wpcontent/uploads/2019/01/PLADECO_CORONEL.pdf
- Muñoz, P., Dezileau, L., Cardenas, L., Sellanes, J., Lange, C. B., Inostroza, J., ... Salamanca, M. A. (2012). Geochemistry of trace metals in shelf sediments affected by seasonal and permanent low oxygen conditions off central Chile, SE Pacific (~36°S). *Continental Shelf Research*, 33, 51–68. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.11.006>
- Neira, K., & Palma, M. (2007). Estructura de la macrofauna en ambientes oxicos de bahia coliumo, region del bio-bio, Chile central. *Gayana*, 71(2), 156–169. <https://doi.org/10.4067/s0717-65382007000200004>
- Olavarría, Y. A. (2007). *Determinacion de trazas de cadmio en Cholga (Aulacomya ater), Chorito (Mytilus chilensis) y ostra chilena (Ostrae chilensis) en la zona de Chiloe (Hueihue)*. 1–117.
- Pajarillo, E. A. B., Lee, E., & Kang, D. K. (2021). Trace metals and animal health: Interplay of the gut microbiota with iron, manganese, zinc, and copper. *Animal Nutrition*, 7(3), 750–761. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.03.005>
- 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>
- Peng, J. feng, Song, Y. hui, Yuan, P., Cui, X. yu, & Qiu, G. lei. (2009). The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 633–640. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.061>
- Qu, X., Yang, H., Yu, Z., Jia, B., Qiao, H., Zheng, Y., & Dai, K. (2020). Serum zinc levels and multiple health outcomes: Implications for zinc-based biomaterials. *Bioactive Materials*, 5(2), 410–422. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.03.006>
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, 125(February), 365–385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
- RETC (Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes), 2019. Registro de las Emisiones al Aire de Fuentes Puntuales y Emisiones al Agua 2019, Comuna de Coronel, Chile. Ministerio Medio Ambiente Gobierno de Chile <http://datosretc.mma.gob.cl/group>
- Salamanca, M. A., Chuecas, L., & Carrasco, F. (1986). Heavy metal in surface sediments from three embayments of central-south Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 17(12), 567–568. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(86\)90572-2](https://doi.org/10.1016/0025-326X(86)90572-2)
- Sánchez, G. (2007). CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS MARINOS DEL GOLFO DE CÁDIZ E IMPLICACIONES AMBIENTALES. DISTRIBUCIÓN Y COMPOSICIÓN MOLECULAR DE LÍPIDOS Y FORMAS REFRACTARIAS DE LA MATERIA ORGÁNICA. Tesis doctoral, Universidad autónoma de Madrid. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10486/2468>
- Suhani, I., Sahab, S., Srivastava, V., & Singh, R. P. (2021). Impact of cadmium pollution on food safety and human health. *Current Opinion in Toxicology*, 27, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.04.004>
- Tapia, J., Villagra, F., Bertrán, C., Espinoza, J., Focardi, S., Fierro, P., ... Vargas-Chacoff, L. (2019). Effect of the earthquake-tsunami (Chile, 2010) on toxic metal content in the Chilean abalone mollusc *Concholepas concholepas*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169(August 2018), 418–424. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.040>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Molecular, clinical and environmental toxicology Volume 3: Environmental Toxicology. En *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* (Vol. 101). <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4>

- Toledo Grillo, I. A., Barrera Melgarejo, F., & Pavez Asenjo, J. (2020). *Evaluación de la acción del estado por la salud y justicia ambiental en Coronel (Chile)*. 1–203.
- Valdés, J., & Castillo, A. (2014). Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos marinos en el sistema de bahías de Caldera (27° S), Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(3), 497–513. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue3-fulltext-10>
- Valdés, J., Román, D., Guínez, M., Rivera, L., Morales, T., Ávila, J., & Cortés, P. (2010). Erratum: Distribution and temporal variation of trace metal enrichment in surface sediments of San Jorge Bay, Chile (Environmental Monitoring and Assessment DOI: 10.1007/s10661-009-1041-3). *Environmental Monitoring and Assessment*, 167(1–4), 701. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1099-y>
- 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., Vargas, G., Sifeddine, A., Ortlieb, L., & Guínez, 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>
- Velásquez, D. (2005). DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN BIOTA (*Mytilus chilensis*) Y SEDIMENTOS DE LA BAHÍA DE CORRAL, PROVINCIA DE VALDIVIA, X REGIÓN. Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile.
- Wang, X. N., Gu, Y. G., Wang, Z. H., Ke, C. L., & Mo, M. S. (2018). Biological risk assessment of heavy metals in sediments and health risk assessment in bivalve mollusks from Kaozhouyang Bay, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 133(June), 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.059>
- Wei, X., Zhou, Y., Jiang, Y., Tsang, D. C. W., Zhang, C., Liu, J., ... Chen, Y. (2020). Health risks of metal(loid)s in maize (*Zea mays* L.) in an artisanal zinc smelting zone and source fingerprinting by lead isotope. *Science of the Total Environment*, 742, 140321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140321>
- Williams, J. A., & Antoine, J. (2020). Evaluation of the elemental pollution status of Jamaican surface sediments using enrichment factor, geoaccumulation index, ecological risk and potential ecological risk index. *Marine Pollution Bulletin*, 157(October 2019), 111288. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111288>

- Wu, W., Wu, P., Yang, F., Sun, D. ling, Zhang, D. X., & Zhou, Y. K. (2018). Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility. *Science of the Total Environment*, 630, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.183>
- Xie, Q., Wang, Y., Li, S., Zhang, C., Tian, X., Cheng, N., ... Wang, D. (2021). Total mercury and methylmercury in human hair and food: Implications for the exposure and health risk to residents in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Environmental Pollution*, 282, 117041. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117041>
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., & Guerrero, V. H. (2021). Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology and Innovation*, 22, 101504. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>
- Zhou, F., Guo, H., & Liu, L. (2007). Quantitative identification and source apportionment of anthropogenic heavy metals in marine sediment of Hong Kong. *Environmental Geology*, 53(2), 295–305. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0644-7>
- Zhou, J., Liang, J., Hu, Y., Zhang, W., Liu, H., You, L., ... Zhou, J. (2018). Exposure risk of local residents to copper near the largest flash copper smelter in China. *Science of the Total Environment*, 630, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.211>
- Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., & Jiang, G. (2008). Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, 606(2), 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.11.018>
- Zhou, T., Li, Z., Shi, W., Wu, L., & Christie, P. (2017). Copper and zinc concentrations in human hair and popular foodstuffs in China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 23(1), 112–124. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1229117>
- Zhu, R., Yang, C., Li, K., Yu, R., Liu, G., & Peng, B. (2020). A smart high chrome exhaustion and chrome-less tanning system based on chromium (III)-loaded nanoparticles for cleaner leather processing. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123278>