



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LAS CARACTERÍSTICAS
DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN LA ZONA COSTERA ENTRE
CORONEL Y LOTA, REGIÓN DEL BIOBÍO. CHILE

Por

CONSTANZA VALENTINA ORTIZ MONTERO

MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO PROFESIONAL DE BIÓLOGO MARINO

Profesor patrocinante: RODRIGO VEAS FLORES

Supervisora: CYNTHIA FUENTES QUIAN

Concepción, Chile

2026

CONSTANCIA

Esta Memoria de Título corresponde a una Habilitación Profesional ejecutada bajo la modalidad vía *profesionalizante* durante un semestre académico, enfocada a la resolución del problema principal aquí expuesto en tiempo parcial. Se destinó parte de la formación con labores adicionales en la Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental (ETFA), las cuales se consignan en Ecogestión Ambiental Ltda. Las funciones realizadas en el centro de práctica se desarrollaron bajo la supervisión de Cynthia Fuentes Quian, contando con el patrocinio de Rodrigo Veas Flores por parte de la UCSC.

*"Pon en manos del Señor todas tus obras, y tus
proyectos se cumplirán." Proverbios 16:3*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi profesor patrocinante, Dr. Rodrigo Veas Flores por el constante apoyo, la paciencia y el tiempo durante el desarrollo de esta Memoria de Título. Sus enseñanzas y sugerencias fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, agradezco a mi supervisora Cynthia Fuentes Quian por siempre estar dispuesta a resolver mis dudas, por orientarme en cada una de las labores realizadas. Le agradezco profundamente la confianza que me brindó durante este proceso. Asimismo, agradezco a todo el equipo de trabajo de Ecogestión Ambiental, por el aprendizaje y por hacer de esta experiencia una instancia de crecimiento personal y profesional.

A las profesoras revisoras María Cristina Krautz y Paulina Medina, por sus observaciones y sugerencias, las cuales me ayudaron a mejorar sustancialmente esta Memoria de Título.

A Marti Anderson por su generosidad y hacer posible el acceso al software utilizado en esta Memoria de Título.

A mi pareja Claudio García, por ser un pilar fundamental en mi vida. Gracias por el apoyo incondicional, por motivarme a seguir adelante incluso en los días difíciles. Tu compañía hizo este proceso más llevadero y me recordó siempre que no estaba sola. Este logro también es nuestro.

A mis padres, Cristina y Marcos, por su amor incondicional y por estar siempre a mi lado en cada etapa de mi vida. Gracias por preocuparse por mi bienestar en cada momento, por sus oraciones y brindarme todo lo necesario para poder continuar. Por esos pequeños gestos de amor que significaron tanto para mí, como ir a dejarme a la universidad y pasar a buscarme en los días de lluvia. Los amo, sin ustedes este logro no habría sido posible.

A mi abuelo, que, aunque no pueda estar presente para compartir esta alegría, su recuerdo y cariño me acompañaron durante este camino y fueron gran parte de la motivación para poder continuar.

Por último, a Dios, por estar presente en cada paso de este camino, por ser mi guía y mi fortaleza, por darme salud, por sostenerme en cada momento y por darme la valentía para afrontar los desafíos y bendecirme con las personas que me rodean.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen.....	vi
Abstract	vii
Introducción	1
Problemática	6
Objetivos.....	7
Objetivo General	7
Objetivos Específicos	7
Métodos	8
Actividades realizadas en la práctica profesional.....	8
Datos sedimentológicos.....	8
Análisis de datos	11
Resultados	14
Control de calidad de los datos obtenidos de los monitoreos PVA.....	14
Distribución espacial de la granulometría, MOT y condiciones redox de los sedimentos superficiales de la zona costera entre Coronel y Lota	14
Variabilidad estacional a lo largo del periodo de estudio.....	22
Variabilidad interanual.....	31
Discusión	38
Patrones espacio-temporales de los parámetros sedimentarios.....	38
Diferencias estacionales entre verano e invierno.....	40
Variaciones interanuales	42
Conclusiones	44
Referencias bibliográficas	46
Instrumentos legales y reglamentarios.....	51
Anexo 1: Resúmenes estadísticos.....	52
Anexo 2: Actividades realizadas en la Práctica profesional	58
Anexo 3: Entidades participantes en los Plan de Vigilancia Ambiental (PVA)	61

RESUMEN

La dinámica sedimentaria costera está determinada por la interacción entre procesos naturales (oleaje, corrientes, vientos y aportes fluviales) y actividades antrópicas desarrolladas en el borde costero. Estos factores influyen en la granulometría, la acumulación de materia orgánica total (MOT) y las condiciones óxido-reducción (redox) del sedimento. En la zona costera entre Coronel y Lota, los Programas de Vigilancia Ambiental (PVA) han generado información semestral durante distintos años; sin embargo, estos antecedentes se encuentran dispersos, dificultando una evaluación integrada de la variabilidad sedimentaria. Esta memoria analizó la variabilidad espacio-temporal de los sedimentos superficiales entre 2020-2025, considerando parámetros granulométricos, MOT, pH, temperatura y potencial redox. Se recopiló información de PVA disponibles en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) para cinco zonas de monitoreo: Coronel Norte, Coronel Sur, Puerto Coronel, Lota y Quihua. Tras la depuración de datos, se obtuvo una matriz con 246 observaciones y siete parámetros, analizados mediante PCoA, nMDS, PERMANOVA y PERMDISP. Los resultados mostraron diferencias significativas entre zonas, estaciones y años; sin embargo, las diferencias espaciales estuvieron acompañadas por heterogeneidad en la dispersión multivariada. Lota presentó los mayores porcentajes de limo-arcilla, mientras que Quihua registró los mayores contenidos de MOT. La relación entre sedimentos finos, MOT y redox varió entre zonas, evidenciando que la textura sedimentaria no explica por sí sola las condiciones biogeoquímicas del sedimento. En verano se registraron mayores contenidos de MOT y potenciales redox más negativos, mientras que en invierno mostró condiciones más oxidadas. Entre 2021 y 2022 se observaron mayores contenidos de MOT y proporciones de sedimentos finos, mientras que desde 2023 se observó una disminución de la MOT y una tendencia hacia condiciones menos reductoras. Este cambio coincidió temporalmente con el evento El Niño 2023-2024, por lo que su posible influencia debe considerarse una hipótesis. En conjunto, la integración de información de distintos PVA permitió identificar patrones espaciales, estacionales e interanuales, aportando antecedentes para futuros programas de monitoreo.

Palabras clave: Análisis multivariado, ENSO, Golfo de Arauco, monitoreo ambiental, Sistema de la Corriente de Humboldt, surgencia costera.

ABSTRACT

The dynamics of coastal sediments are determined by the interaction between natural processes, such as waves, currents, winds, and riverine inputs, and anthropogenic activities occurring along the coastline. These factors influence sediment grain size distribution, total organic matter (TOM) accumulation, and sediment redox conditions. In the coastal zone between Coronel and Lota, Environmental Monitoring Programs (EMPs) have generated semiannual data over several years; however, these records remain dispersed, hindering an integrated assessment of sediment variability. This study analyzed the spatial and temporal variability of surface sediment characteristics during the period 2020-2025, considering grain-size, total organic matter (TOM), pH, temperature, and redox potential. Data were compiled from Environmental Monitoring Programs available through the National Environmental Compliance Information System (SNIFA), covering five monitoring sites: Coronel Norte, Puerto Coronel, Quihua, Coronel Sur, and Lota. Following data screening a dataset consisting of 246 observations and seven parameters was obtained and analyzed using multivariate ordination techniques (PCoA and nMDS), PERMANOVA, and PERMDISP. The results revealed significant spatial differences, seasons, and monitoring years; however, differences among zones were accompanied by heterogeneity in multivariate dispersion. Lota exhibited the highest percentages of silt-clay sediments, whereas Quihua showed the highest TOM contents. The relationship between fine sediments, TOM, and redox conditions varied among sites, indicating that sediment texture alone does not explain sediment biogeochemical conditions. Summer was characterized by higher TOM contents and more negative redox potentials, whereas winter exhibited relatively more oxidizing conditions. At the interannual scale, 2021 and 2022 were associated with higher TOM contents and greater proportions of fine sediments, while from 2023 onward TOM decreased and sediment conditions became less reducing. This shift coincided with the 2023-2024 El Niño event; therefore, its possible influence should be regarded as a hypothesis. Overall, integrating information from multiple EMPs allowed the identification of spatial, seasonal, and interannual patterns, providing information for the interpretation of future monitoring programs.

Keywords: coastal upwelling, ENSO, environmental monitoring, Gulf of Arauco, Humboldt Current System, multivariate analysis.

INTRODUCCIÓN

Las bahías se clasifican como sistemas de aguas costeras semicerrados con características hidrodinámicas que están determinadas por la interacción entre el intercambio de agua con el océano abierto (Quispe, 2007). Bajo este contexto, los factores que modifican la circulación de estos sistemas dependen del viento, las mareas, las corrientes y aportes fluviales (De La Lanza Espino et al., 2013). Además, la evolución de las bahías está estrechamente asociada a la dinámica oceánica y fluvial (Ortiz Pérez & De La Lanza Espino, 2006) determinando la distribución espacial de los parámetros sedimentarios (granulometría, materia orgánica y condiciones redox) (González et al., 2010). Por otra parte, las bahías han experimentado cambios en los sedimentos por causas naturales y por actividades antrópicas (eutrofización, contaminación por metales, etc.) a través de los años (De La Lanza Espino et al., 2013). Por lo tanto, el estudio de la dinámica sedimentaria en términos espacio-temporales permite comprender los procesos que han modulado estos sistemas (Jiménez-Arias et al., 2016).

Los sedimentos marinos constituyen un componente fundamental de los ecosistemas acuáticos, ya que proporcionan sustrato y soporte para numerosos organismos, además de actuar como el depósito final de compuestos generados en las aguas superficiales y aquellos introducidos al mar por procesos naturales y antrópicos (Lara Acosta et al., 2026; Valdés & Castillo, 2014). En este sentido, los sedimentos funcionan como sumideros de procesos asociados a la columna de agua y a la trama trófica marina (Lara Acosta et al., 2026; Valdés & Castillo, 2014). Asimismo, la caracterización física y química de los sedimentos permite comprender propiedades clave del ecosistema y procesos costeros, tales como la estructura de las comunidades bentónicas y la distribución de contaminantes.

El Golfo de Arauco, ubicado en la costa centro-sur de Chile, corresponde a un sistema semicerrado que forma parte del Sistema de la Corriente de Humboldt (Vergara et al., 2024). En esta zona, la dinámica de vientos presenta variaciones estacionales, esto implica que en primavera-verano ocurre la surgencia costera, donde las aguas contienen una elevada concentración de nutrientes, elevada salinidad y bajos niveles de oxígeno disuelto y temperatura. A su vez, en otoño-invierno hay un aumento de precipitaciones y de las descargas de agua dulce provenientes del río Biobío, en dirección al sur del Golfo de Arauco (Vergara et al., 2024). En términos sedimentarios, predominan arenas gruesas en el borde costero, mientras que los sedimentos finos se concentran en sectores más protegidos, especialmente hacia las zonas centro-norte (Alarcón, 1970). Este patrón es consistente con

lo observado en otros sistemas costeros donde la energía hidrodinámica controla la distribución del tamaño del grano (Amjadian et al., 2023).

En ambientes costeros, la dinámica sedimentaria está estrechamente vinculada a las condiciones energéticas del sistema. En zonas de alta energía, expuestas al oleaje, predominan sedimentos gruesos, mientras que los sedimentos finos tienden a acumularse en áreas de baja energía o protegidas (Lara Acosta et al., 2026). Estos procesos pueden verse modificados tanto por factores naturales, como corrientes, vientos y oleaje, como por actividades antrópicas, incluyendo estructuras costeras y descargas de aguas residuales, lo que influye directamente en la distribución del sedimento y de la materia orgánica total (Cupul-Magana et al., 2006; Lara Acosta et al., 2026). Este patrón responde a la capacidad de transporte de los agentes hidrodinámicos, donde el tamaño de grano actúa como un indicador directo de las condiciones de energía del ambiente de sedimentación (Sahu, 1964). Además, la interacción entre corrientes y profundidad del agua influye significativamente en la distribución granulométrica, siendo factores determinantes en el tamaño medio de grano y el grado de selección de los sedimentos (Amjadian et al., 2023).

La granulometría de los sedimentos permite interpretar la dinámica del ambiente sedimentario y evaluar procesos de transporte y depositación. Las partículas del sedimento marino se clasifican en grava, arena, limo y arcilla, siendo el tamaño de grano un descriptor clave de la textura y de las condiciones del sistema (Seibold & Berger, 2017). El análisis de la distribución granulométrica, junto con parámetros estadísticos como selección, asimetría y curtosis, proporciona información detallada sobre los mecanismos de transporte y los ambientes de depositación (Blott & Pye, 2001; Folk & Ward, 1957). En zonas costeras urbanizadas, estos procesos pueden alterarse, generando cambios en la distribución granulométrica y en el contenido de materia orgánica (Lara Acosta et al., 2026).

La materia orgánica total (MOT) en los sedimentos corresponde a un conjunto de compuestos ricos en carbono, nitrógeno y fósforo, derivados principalmente de la producción primaria y de la descomposición microbiana (Burdige, 2007; Kristensen et al., 1995). El contenido de materia orgánica en los sedimentos está asociado a varios factores, como la textura del sedimento, la tasa de sedimentación y la relación entre las velocidades de transporte y descomposición de la materia orgánica (Pineda, 2009). Diversos estudios han demostrado que la granulometría del sedimento tiene relación con la acumulación de materia orgánica. Esto se debe a que los sedimentos finos (limo y arcilla) presentan mayor capacidad de retención debido a su mayor área superficial, lo que favorece

la acumulación y permanencia de compuestos orgánicos (Hernández, 2001; Lara Acosta et al., 2026). Asimismo, los sedimentos finos tienden a concentrar contaminantes y nutrientes debido a su mayor capacidad de adsorción, lo que los convierte en indicadores sensibles de impacto ambiental (Ferrans et al., 2019). Además, altos contenidos de MOT suelen asociarse a sedimentos finos (Hernández, 2001).

La degradación de la materia orgánica en los sedimentos está estrechamente relacionada con el consumo de oxígeno, lo que genera cambios en el estado redox. En este contexto, variaciones en el contenido de materia orgánica o en la concentración de oxígeno disuelto pueden modificar las condiciones redox de los sedimentos superficiales (Morford & Emerson, 1999). Además, la biodegradabilidad y el contenido total de materia orgánica en el sedimento son factores determinantes en los procesos biogeoquímicos, ya que regulan la tasa de consumo de oxígeno y la dinámica de nutrientes (Burdige, 2007; Kristensen et al., 1995). De este modo, las condiciones redox resultan de la interacción entre la disponibilidad de oxígeno en el agua de fondo, y en los procesos de degradación orgánica en el sedimento (Morford et al., 2001).

En bahías costeras con influencia antrópica, estos procesos pueden intensificarse. Actividades como el tráfico marítimo, la pesca, la actividad portuaria, los procesos industriales y el dragado pueden modificar la dinámica sedimentaria y favorecer el enriquecimiento orgánico localizado (Lara Acosta et al., 2026). Además, la urbanización e industrialización de las zonas costeras pueden generar problemas asociados a la erosión y cambios en la estructura del sedimento (Araruna Júnior et al., 2014). Adicionalmente, estas actividades pueden generar resuspensión de sedimentos, aumento de la turbidez y alteraciones en la morfodinámica del fondo marino (Amjadian et al., 2023; Gill, 2005).

Dentro de este sistema, la zona costera de Coronel se ubica en el sector oriental del Golfo de Arauco, en la Región del Biobío. Este sistema costero presenta condiciones heterogéneas determinadas por la batimetría, morfología costera, exposición al viento y aportes fluviales (Faúndez-Báez et al., 2001). Asimismo, es influenciado de manera constante por la presencia de la descarga del río Biobío en invierno, modificando los patrones de circulación costera y la estructura vertical de la columna de agua, junto con una elevada disponibilidad de recursos hidrobiológicos, modificando la variabilidad espacio-temporal del sedimento y de la columna de agua. La actividad antrópica de tipo industrial está localizada en el litoral de esta zona, tales como seis procesadoras de recursos pesqueros, dos termoeléctricas, una fábrica de alimentos y dos plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

(Hernández et al., 2024; Vergara et al., 2024). Por otro lado, la Bahía Lota recibe las descargas de dos empresas procesadoras de recursos pesqueros (Hernández et al., 2024). Estas actividades antropogénicas han ido incrementando, dando lugar a descargas de compuestos orgánicos, provocando que la columna de agua y los sedimentos superficiales se vean afectados (Salamanca et al., 2024). Todo esto convierte esta zonas en un sistema relevante para estudios de procesos sedimentarios en ambientes antropizados (Bravo Ferretti et al., 2022).

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), el objetivo de los Programas de Vigilancia Ambiental (PVA) es “monitorear el estado de un cuerpo de agua que recibe efluentes industriales y sus eventuales impactos sobre el ecosistema”. En este contexto, los PVA tienen la función de realizar un seguimiento que permita evaluar las variables ambientales relevantes que han sido objeto de evaluación ambiental y aportar antecedentes para evaluar el cumplimiento establecido según la Resolución de Calificación Ambiental (RCA). Lo anterior, se relaciona con lo establecido en la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley N° 19.300), cuyo artículo 12 letra f) establece que los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) deben considerar el seguimiento de las variables ambientales relevantes que dan origen al EIA, en el marco de los proyectos o actividades sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Asimismo, el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA), establecido en el D.S. N° 40, señala en su artículo 105 que el Plan de Seguimiento de las Variables Ambientales debe considerar los contenidos específicos y antecedentes para el seguimiento de las variables ambientales durante la ejecución de los proyectos o actividades evaluadas. Por lo tanto, los PVA generan información que permite evaluar la variabilidad de determinados parámetros y aportar antecedentes para el seguimiento de las condiciones establecidas en la RCA. Estos PVA han proporcionado información mediante monitoreos semestrales en áreas adyacentes a la Bahía Coronel y Bahía Lota (Coronel Norte: RCA N°102/2005, Puerto Coronel RCA N°276/2007, Coronel Sur: RCA N°103/2005, Lota: RCA N°54/1997 y Quihua: RCA N° 417/2016) permitiendo evaluar cambios en parámetros fisicoquímicos del sedimento, aunque aún se requiere integrar estos componentes para comprender su variabilidad espacio-temporal. Esto permite obtener antecedentes de registros correspondientes a diferentes estaciones del año, lo que contribuye a identificar posibles variaciones asociadas a factores estacionales y a las características propias de cada zona de estudio.

En función de lo anterior, esta Memoria de Título tiene por objetivo caracterizar, analizar y evaluar la distribución espacial y temporal de la granulometría, materia orgánica total, pH y

condiciones redox de los sedimentos superficiales marinos de la zona costera entre Coronel y Lota mediante datos de informes de Programas de Vigilancia Ambiental (PVA).

PROBLEMÁTICA

La zona costera entre Coronel y Lota corresponde a un sistema influenciado tanto por procesos oceanográficos regionales como por actividades humanas desarrolladas en su borde costero. Entre los principales forzantes naturales destacan la surgencia estacional característica del Sistema de la Corriente de Humboldt, la variabilidad de los aportes continentales asociados al río Biobío y los cambios estacionales en la productividad primaria marina. Estos procesos pueden modificar la estructura de la columna de agua, la disponibilidad de oxígeno disuelto, la sedimentación de materia orgánica y las características físicas y químicas de los sedimentos superficiales. Adicionalmente, la bahía presenta una intensa actividad industrial, portuaria y pesquera, configurando un sistema ambientalmente complejo donde convergen múltiples factores que influyen sobre la dinámica sedimentaria.

Los Programas de Vigilancia Ambiental (PVA) desarrollados en la Bahía Coronel, Bahía Lota y zonas adyacentes, han generado una importante cantidad de información mediante monitoreos semestrales de parámetros sedimentarios e hidrográficos. Sin embargo, estos antecedentes se encuentran dispersos entre distintos programas y años de monitoreo, dificultando una evaluación integrada de los patrones espaciales y temporales de los sedimentos superficiales. En particular, aún existe escasa información respecto de cómo varían la granulometría, la materia orgánica total (MOT) y las condiciones óxido-reducción (redox) entre zonas de monitoreo, estaciones del año y períodos de monitoreo en esta zona.

Considerando que la materia orgánica sedimentaria puede estar influenciada tanto por procesos de acumulación física como por procesos biológicos asociados a la alta productividad característica de las zonas, incluyendo floraciones estacionales de fitoplancton favorecidas por la surgencia costera, resulta necesario integrar la información disponible para comprender la variabilidad espacio-temporal de los sedimentos superficiales. En este contexto, la presente Memoria utiliza información proveniente de los Programas de Vigilancia Ambiental disponibles en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), correspondientes a cinco zonas de monitoreo ubicados en la costa entre Coronel y Lota (Coronel Norte, Puerto Coronel, Quihua, Coronel Sur y Lota), abarcando el período 2020-2025, con el propósito de caracterizar y evaluar la variabilidad espacial y temporal de las características sedimentarias superficiales de esta zonas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar la variabilidad espacio-temporal de las características sedimentarias superficiales de la zona costera entre Coronel y Lota, a partir de la información recopilada de Programas de Vigilancia Ambiental (PVA), utilizando parámetros granulométricos, materia orgánica total (MOT), pH y potencial óxido-reducción (redox), durante el período 2020-2025.

Objetivos Específicos

- O1: Caracterizar la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios superficiales de la zona costera entre Coronel y Lota mediante análisis de ordenación.
- O2: Evaluar la existencia de diferencias en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios entre las zonas de monitoreo.
- O3: Evaluar la existencia de diferencias en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios entre las estaciones de verano e invierno.
- O4: Evaluar la existencia de variaciones interanuales en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios durante el período 2020-2025.

MÉTODOS

La presente Memoria de Título se desarrolló bajo la modalidad de práctica profesional en desde marzo hasta julio del año 2026.

Actividades realizadas en la práctica profesional

Durante la práctica profesional se llevaron a cabo procedimientos de análisis fisicoquímicos de muestras de sedimentos marinos. Estos análisis fueron desarrollados en el Laboratorio Físico de Sedimentos de la empresa Ecogestión Ambiental Ltda, ubicada en la comuna de Chiguayante, Región del Biobío, correspondiente a una entidad acreditada como Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental (ETFA) por la Superintendencia del Medio Ambiente.

Las actividades incluyeron la determinación de parámetros clave para la caracterización de sedimentos marinos, tales como, la materia orgánica total (MOT), contenido de humedad, granulometría y carbono orgánico total (COT) (Anexo 2). Para ello, se aplicaron metodologías estandarizadas de laboratorio que permitieron evaluar la composición, textura y contenido orgánico de los sedimentos, contribuyendo a la generación de información relevante para el monitoreo ambiental y la evaluación de la calidad del medio marino.

Datos sedimentológicos

Para llevar a cabo la Memoria de Título desarrollada en tiempo parcial, se recopilieron datos procedentes de cinco Programas de Vigilancia Ambiental (PVA) disponibles en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), correspondiente a monitoreos semestrales realizados entre los años 2020 y 2025 en zona litoral entre Coronel y Lota. Los PVA considerados en esta memoria se asocian a distintas actividades y zonas de muestreo: Coronel Norte, Coronel Sur y Lota. Asociados a emisarios submarinos de aguas servidas de la Empresa de Servicios Sanitarios del Biobío (ESSBIO S.A.); Puerto Coronel Correspondiente a la actividad portuaria; Colbún: Complejo Termoeléctrico Santa María; e Isla Quihua (en adelante, Quihua) correspondiente al ducto pesquero de la empresa Isla Quihua. Ecogestión Ambiental Ltda participó en la mayoría de las campañas de monitoreo consideradas en esta memoria (Tabla 6, Anexo 3). Posteriormente, se seleccionaron y filtraron los datos de parámetros medidos en el sedimento que estaban presentes en los informes y

certificados (granulometría, MOT, condiciones redox, pH del sedimento, temperatura de sedimento) y en columna de agua (oxígeno disuelto, salinidad y temperatura).

Previo al análisis de datos, se realizó un procedimiento de control de calidad de la información recopilada desde los informes de Programas de Vigilancia Ambiental (PVA) disponibles en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA). El objetivo de este procedimiento fue asegurar la consistencia, comparabilidad y trazabilidad de los datos sedimentarios e hidrográficos utilizados en el estudio. Se revisó cada informe PVA para verificar: zonas de muestreo; fecha de campaña; estación del año correspondiente; coordenadas geográficas; profundidad de muestreo; metodología analítica utilizada; unidades de medida reportadas. Se verificó además que cada registro correspondiera efectivamente a estaciones ubicadas en la zona de estudio y al período de estudio comprendido entre 2020 y 2025.

Los datos provenientes de distintos informes fueron integrados en una base de datos única. Para ello se estandarizaron: nombres de estaciones; nombres de parámetros; formato de fechas; número de decimales; unidades de medida. Se evaluó la coherencia de los registros mediante la identificación de: valores duplicados; errores de digitación; inconsistencias en fechas o estaciones; registros asignados incorrectamente a las zonas de muestreo; cambios evidentes de nomenclatura entre campañas. Los registros inconsistentes fueron contrastados con los informes originales para su corrección o exclusión. Después de estos procedimientos, se cuantificó la frecuencia de valores faltantes para cada parámetro y campaña de monitoreo. Los datos ausentes fueron registrados como valores faltantes (NaN) y no fueron reemplazados mediante imputación. La inclusión de cada muestra en los análisis posteriores dependió de la disponibilidad de los parámetros requeridos para cada procedimiento estadístico. Producto de este procedimiento quedó fuera del análisis la PVA de Colbún y el parámetro humedad del sedimento. Se inspeccionó la distribución de cada parámetro mediante estadísticos descriptivos y gráficos exploratorios (diagramas de caja y gráficos de dispersión). Los valores extremos fueron revisados individualmente para determinar si correspondían a: errores de transcripción; errores analíticos; observaciones ambientalmente plausibles. Sólo se eliminaron aquellos registros cuya inconsistencia pudo ser corroborada mediante la revisión de los informes PVA. Para las campañas que disponían de tablas de porcentaje o masa de sedimento por fracciones de tamaño (ϕ), se verificó que la suma de los porcentajes correspondiera aproximadamente al 100%. Cuando fue posible, los parámetros granulométricos fueron recalculados a partir de la distribución original de tamaños de grano utilizando el programa GRADISTAT v8.0 (Blott & Pye, 2001), por el

método de los Folk y Ward, con el fin de asegurar criterios homogéneos de cálculo entre campañas y laboratorios.

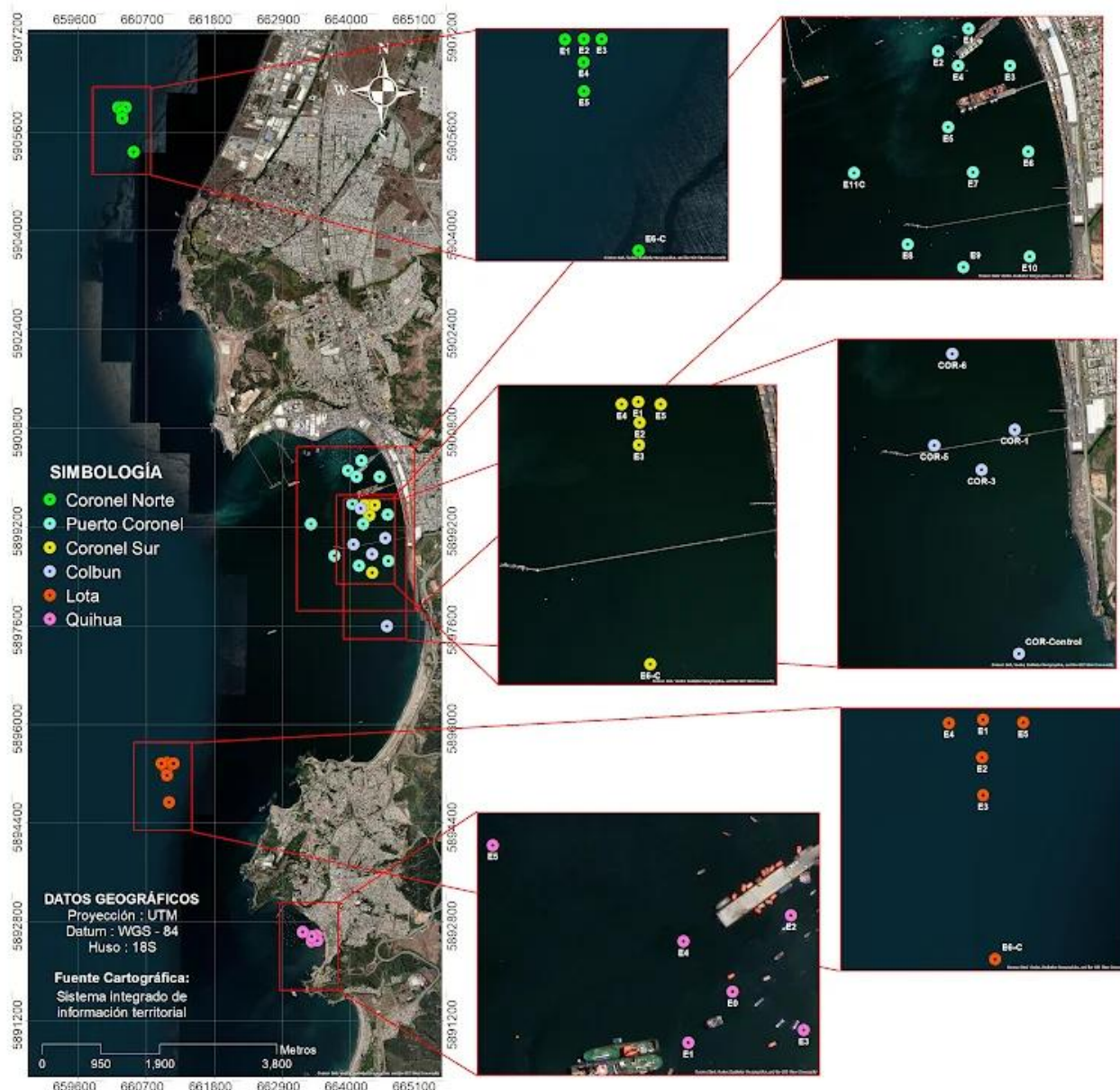


FIGURA 1.

Ubicación geográfica de las zonas de muestreo en áreas marinas adyacentes entre Coronel y Lota. Los puntos en cada zona corresponden a las estaciones de monitoreo del área de estudio.

Análisis de datos

Objetivo 1: Para caracterizar la estructura multivariada de los sedimentos superficiales, se construyó una matriz de datos sedimentarios a partir de los parámetros medidos y calculados para cada zonas, campaña y sitio de muestreo. Esta matriz incluyó parámetros granulométricos (porcentaje de grava, arena y limo-arcilla, pH y temperatura del sedimento, tamaño medio de grano y sorting), además de materia orgánica total (MOT) y potencial óxido-reducción (redox), según la disponibilidad de datos en los informes de Programas de Vigilancia Ambiental recopilados para el período 2020-2025.

Previo al análisis, se revisó la base de datos para detectar valores faltantes (NaN), errores de digitación y diferencias de unidades entre campañas. Los parámetros fueron normalizados, debido a que presentan distintas unidades y escalas de medición. Posteriormente, se construyó una matriz de distancia euclidiana utilizando los parámetros de los sedimentos ya normalizadas. La estructura multivariada fue explorada mediante un análisis de coordenadas principales (PCoA), con el objetivo de representar gráficamente los principales gradientes de variación sedimentaria entre muestras. Sobre la ordenación se proyectaron vectores de correlación de Pearson de los parámetros sedimentarios, lo que permitió identificar qué parámetros contribuyen en mayor medida a la separación entre muestras. La interpretación se realizó considerando la dirección y longitud de los vectores, así como la agrupación o dispersión de las muestras en el espacio multivariado.

Objetivo 2: Para evaluar diferencias espaciales entre zonas de monitoreo, se utilizó la matriz sedimentaria normalizada descrita previamente. Las muestras fueron agrupadas de acuerdo con las zonas de procedencia: Coronel Norte, Puerto Coronel, Quihua, Coronel Sur y Lota, según la clasificación definida para los Programas de Vigilancia Ambiental obtenidos. Las diferencias en la estructura multivariada entre zonas de muestreo se evaluaron mediante un análisis permutacional de varianza multivariado (PERMANOVA), utilizando como matriz de entrada la distancia euclidiana calculada a partir de los parámetros sedimentarios normalizados. El factor principal fue la zona de muestreo. En caso de detectarse diferencias significativas entre las zonas de estudio, se realizaron comparaciones pareadas a posteriori para identificar qué zonas presentaron diferencias entre sí. Complementariamente, se utilizó el PCoA para visualizar la separación espacial entre zonas de muestreo y se relacionaron dichos patrones con los parámetros sedimentarios responsables de los gradientes observados.

Objetivo 3: Para evaluar la variabilidad estacional, cada muestra fue clasificada según la estación del año correspondiente a la campaña de monitoreo: verano o invierno. Esta clasificación permitió analizar si la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios presentó diferencias asociadas a la estacionalidad. Se aplicó un PERMANOVA utilizando la matriz de distancia euclidiana de los parámetros sedimentarios normalizados, y se consideró como factor principal la estación del año. Este análisis permitió determinar si las muestras de verano e invierno difieren significativamente en su composición sedimentaria multivariada. Los resultados fueron complementados mediante un PCoA, en el cual las muestras fueron diferenciadas gráficamente según estación del año. Además, se incorporaron gráficos de burbujas para parámetros clave, como limo-arcilla, MOT y redox, con el fin de visualizar si los cambios estacionales se asociaron principalmente a variaciones en textura sedimentaria, acumulación de materia orgánica o condiciones redox.

Objetivo 4: Para evaluar la variabilidad interanual, las muestras fueron agrupadas según el año de monitoreo, considerando el período comprendido entre 2020 y 2025. Este análisis permitió explorar si la estructura multivariada de los sedimentos superficiales presentó cambios entre años, independientemente de las diferencias espaciales y estacionales. Se aplicó un PERMANOVA utilizando la matriz de distancia euclidiana construida a partir de los parámetros sedimentarios normalizados, considerando como factor principal el año de muestreo. En caso de contar con suficiente número de observaciones por año, se realizaron comparaciones pareadas a posteriori para identificar entre qué años se presentan las mayores diferencias. La variación interanual fue representada gráficamente mediante PCoA, diferenciando las muestras por año. Esta representación permitió identificar posibles trayectorias temporales, agrupamientos o años atípicos en la estructura sedimentaria. La interpretación se realizó considerando también la posible influencia de las zonas de monitoreo y la estación del año, dado que los cambios interanuales podían estar modulados por la heterogeneidad espacial de la zona de estudio y por la variabilidad estacional del sistema.

De manera complementaria, se aplicó un PERMANOVA de tres vías para evaluar los efectos de la zona de monitoreo, la estación del año y el año de muestreo, así como sus interacciones, sobre la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios. Debido al carácter desbalanceado de la base de datos y a la presencia de combinaciones sin observaciones, los resultados fueron interpretados con cautela. Previamente, se evaluó la homogeneidad de la dispersión multivariada mediante PERMDISP.

Todos los análisis estadísticos realizados fueron utilizando el software PRIMER v8 con PERMANOVA+ (Anderson, 2026).

RESULTADOS

Control de calidad de los datos obtenidos de los monitoreos PVA

La base de datos original, construida a partir de los informes PVA de SNIFA, consistió en cinco zonas de monitoreo, con un total de 491 observaciones y 13 parámetros. Posteriormente, se filtró la base de datos, eliminando los valores faltantes (missing values; NaN), y luego los parámetros de la columna de agua. Este procedimiento llevó a que la zona de Colbún fuese excluida de los análisis multivariados debido a la alta proporción de datos faltantes que impedía su incorporación sin introducir sesgos derivados de imputación. Finalmente, la matriz quedó reducida a 246 observaciones y 7 parámetros (limo-arcilla, grado de selección (sorting), tamaño medio del grano (media), materia orgánica total (MOT), temperatura, redox y pH de sedimento) durante el período 2020 a 2025, para las 5 zonas de monitoreo. Una vez filtrados los datos, estos fueron normalizados y con ellos, estimada una matriz de distancia euclidiana, la cual fue la base para realizar los análisis multivariados. Cabe destacar que debido a que los porcentajes de grava, arena y limo-arcilla suman 100%, y que, además, la composición textural fue dominada por arenas y limos-arcilla, es que para los análisis multivariados se utilizó solo el porcentaje de limo-arcilla como indicador textural.

Distribución espacial de la granulometría, MOT y condiciones redox de los sedimentos superficiales de la zona costera entre Coronel y Lota

En términos generales asociados a los parámetros sedimentarios, el porcentaje de limo-arcilla, el contenido de MOT, potencial redox, media (en escala ϕ) y el grado de selección (sorting), presentaron diferencias entre las zonas de monitoreo. Coronel Norte (CN) presentó sedimentos finos (limo-arcilla), con un promedio de 61%, un porcentaje de MOT entre 0,43% y 9,9%, y un potencial redox promedio de 12,9 mV, una media promedio de 4,33 ϕ y selección (sorting) promedio de 1,92 ϕ . Coronel Sur (CS) presentó un promedio de 44% de limo-arcilla y contenidos de MOT superiores a los de CN (2,2%-13,8%) y un potencial redox promedio más reductor (-79,9 mV), una media promedio de 3,8 ϕ y grado de selección (sorting) promedio de 2,2 ϕ . Además, esta zona de monitoreo mostró el mayor rango de potencial redox (-253,4 a 563,7 mV). Lota (L) presentó un mayor porcentaje promedio de limo-arcilla (78%), con valores de MOT entre 5,6 y 14,0%, mayor potencial redox promedio (29,7 mV), una media promedio de 5,3 ϕ y grado de selección (sorting) promedio de 1,7 ϕ .

Puerto Coronel presentó un valor promedio de 61% de limo-arcilla, porcentajes de MOT entre 3,3 y 28,0%, un potencial redox promedio de -59,7 mV y una media promedio de 4,7 ϕ y grado de selección (sorting) promedio de 2,0 ϕ . Por último, Quihua presentó el menor porcentaje promedio de limo-arcilla (25%), valores de MOT entre 2,5% y 47,2%, valores promedios de potencial redox negativos (-57,5 mV), una media promedio de 3,6 ϕ y el menor valor promedio de grado de selección (sorting) (1,5 ϕ), mostrando condiciones sedimentarias diferentes respecto de las demás zonas de muestreo (Tabla 1, Anexo 1).

A continuación, se entregan los resultados asociados a los objetivos 1 y 2. El análisis de coordenadas principales (PCoA) basado en la totalidad de los datos previamente filtrados, muestra algunos agrupamientos entre las zonas de muestreo (Figura 2). El eje PCO1 explica un 32,2% y el eje PCO2 explica un 19,4% de variación total, en su conjunto, un 51,6%. Se observa que Quihua (Q) tiende a segregarse del resto, dado que sus observaciones están dispersas principalmente hacia los valores negativos del eje PCO1. Por el contrario, se muestra un agrupamiento de las zonas de estudio de Puerto Coronel (PC), Lota (L) y Coronel Norte (CN), principalmente hacia los valores positivos del eje PCO1. En el caso de Coronel Sur (CS), la mayoría de las zonas se ubican hacia los valores negativos del eje PCO2. Los vectores que proyectan correlaciones de Pearson muestran que un alto porcentaje de limo-arcilla, una mayor media (en escala ϕ) y el grado de selección (sorting) se correlacionan entre sí, y además con el eje PCO1, indicando que sus valores aumentan en dirección a los valores positivos de dicho eje. Hacia el lado positivo del eje PCO2, se dirigen los vectores de redox y pH de sedimento, mientras que en lado negativo del PCO2, y positivos del PCO1 aumentan los vectores de MOT y temperatura (Figura 2a).

Al superponer en el análisis PCoA burbujas proporcionales al valor de algunos parámetros de los sedimentos, se puede observar que en Puerto Coronel (PC), Lota (L) y Coronel Norte (CN) el porcentaje de limo-arcilla es más alto y hacia el lado derecho del eje PCO1, esto se asocia con la dirección que tienen de los vectores de limo-arcilla, media (en escala ϕ) y sorting. Por otro lado, las zonas de monitoreo de Quihua (Q) mostraron menores porcentajes de limo-arcilla (Figura 2b).

La misma gráfica PCoA con burbujas, pero esta vez representando el porcentaje de MOT (Figura 2c), muestra que los mayores porcentajes de este parámetro están en las zonas de monitoreo de Quihua (Q) y Coronel Sur (CS), coincidiendo con la orientación de los vectores de MOT y temperatura. Por otro lado, los valores del potencial redox (Figura 2d) aumentan hacia los valores

positivos del eje PCO2, y menores hacia los valores negativos de dicho eje. Por lo tanto, valores bajos a negativos de este parámetro se pueden observar en varias zonas, como Quihua y Coronel Sur. El vector de este parámetro va en dirección opuesta a MOT, indicando una relación inversa entre ambos parámetros. Por último, la distribución espacial del potencial redox muestra una heterogeneidad principalmente en las zonas de monitoreo de Quihua (Q).

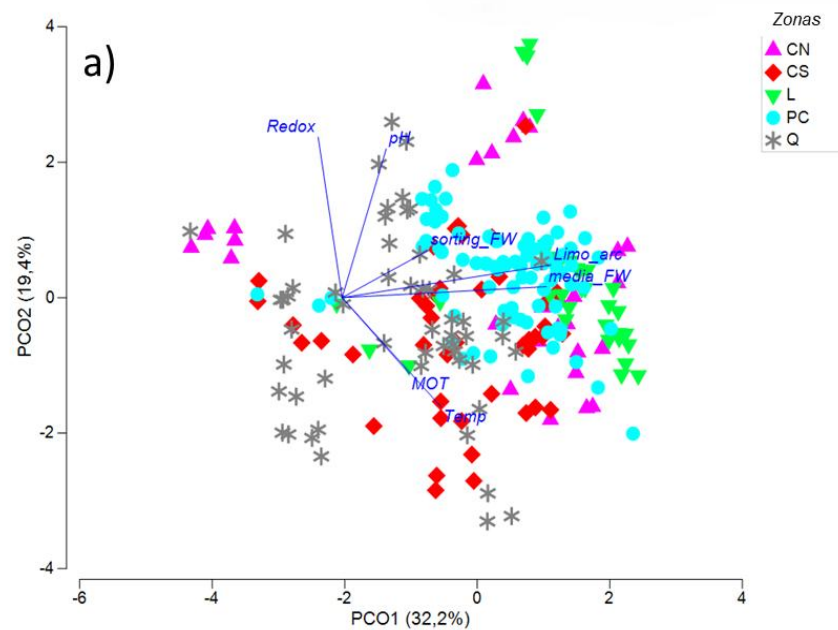


FIGURA 2a.

Análisis de coordenadas principales (PCoA) de los parámetros sedimentarios de las zonas de monitoreo de Coronel Norte (CN), Coronel Sur (CS), Lota (L), Puerto Coronel (PC) y Quihua (Q).

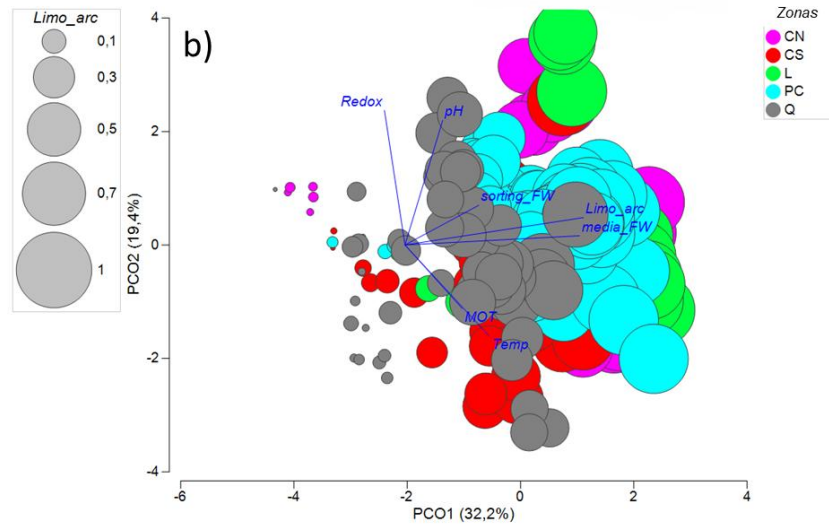


FIGURA 2b.

Gráfico de burbujas del porcentaje (%) de limo-arcilla (0,1 equivale a un 10%).

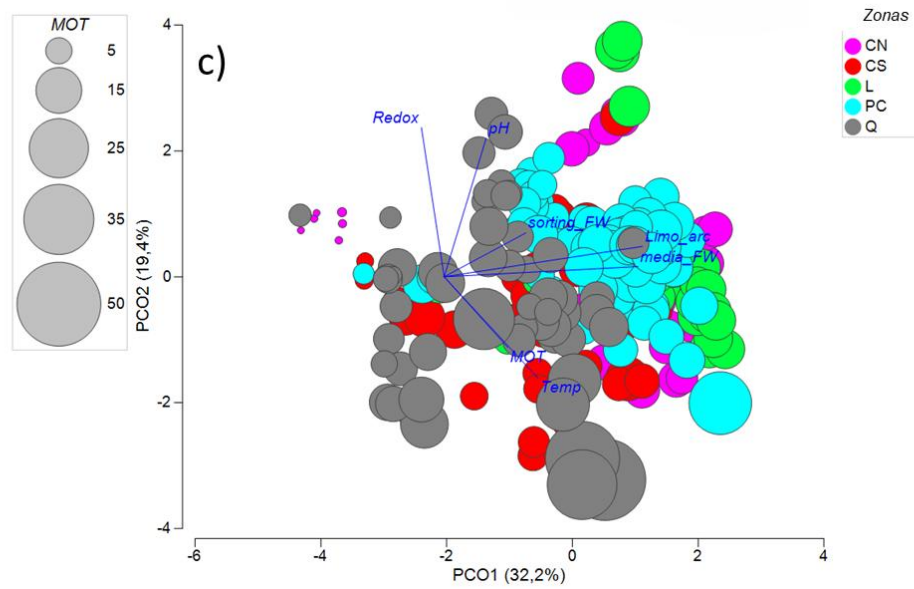


FIGURA 2c.

Gráfico de burbujas del porcentaje (%) de MOT.

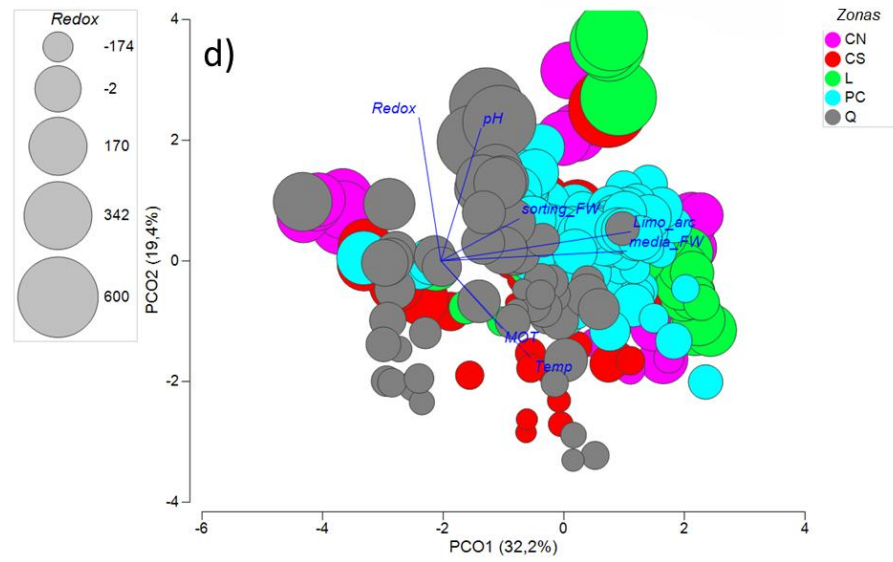


FIGURA 2d.

Gráfico de burbujas de las condiciones redox (mV).

Por último, PERMANOVA detectó diferencias significativas entre las zonas de monitoreo. Sin embargo, el análisis PERMDISP también resultó significativo, indicando heterogeneidad en la dispersión multivariada entre zonas (Tabla 1). Por lo tanto, las diferencias observadas pueden estar asociadas tanto con cambios en la posición de los centroides como con diferencias en la variabilidad interna de las zonas. Las comparaciones múltiples mostraron diferencias significativas entre todas las zonas de muestreo ($p < 0,05$) (Tabla 2). Por último, se visualiza en el análisis no métrico de escalamiento multidimensional (nMDS) (Figura 3), que los centroides de las zonas presentan distinta dispersión multivariada, donde Quihua (Q) está separada de las demás zonas de muestreo, en cambio, se observa que Puerto Coronel (PC) y Coronel Norte (CN) están sobrepuestas, y que la elipse de Coronel Norte (CN) presenta mayor tamaño y dispersión.

TABLA 1

Resultados del análisis PERMANOVA para evaluar diferencias significativas en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios entre las zonas de monitoreo (ZONAS = 5). Valor p -permutado en negrita indica significancia estadística ($p < 0.05$). Test PERMDISP para el factor zona, $p = 0,001$.

Fuente	g.l.	SC	CM	Pseudo-F	P(perm)	P.U.
Zonas	4	304,85	76,212	13,025	0,001	998
Residuos	241	1410,2	5,8512			
Total	245	1715				

P.U: Permutaciones únicas

TABLA 2

Resultados de la prueba de comparaciones “*pair-wise*”, para evaluar si hay diferencias significativas en los parámetros sedimentarios multivariados entre las zonas de muestreo. Valores *p*-permutados y *p*-Monte Carlo (P(MC)) en negrita indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Grupos	T	P(perm)	P.U.	P(MC)
CN, CS	2,05	0,003	998	0,006
CN, L	2,21	0,002	999	0,002
CN, PC	1,91	0,009	998	0,009
CN, Q	3,04	0,001	999	0,001
CS, L	4,38	0,001	999	0,001
CS, PC	3,82	0,001	999	0,001
CS, Q	3,16	0,001	998	0,001
L, PC	3,51	0,001	999	0,001
L, Q	4,90	0,001	999	0,001
PC, Q	4,99	0,001	999	0,001

P.U: Permutaciones únicas

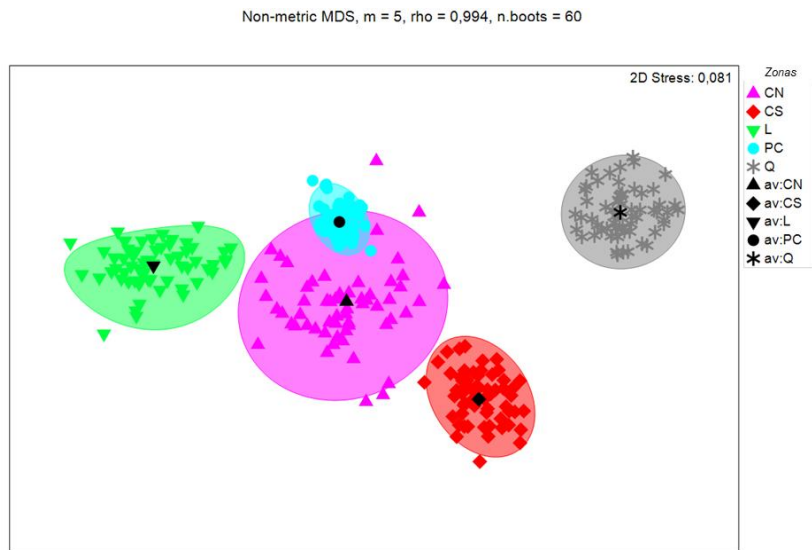


FIGURA 3.

Análisis no métrico de escalamiento multidimensional (nMDS), estimados a partir de una matriz de distancia euclidiana. Se visualizan centroides promedio y las elipses de confianza al 95% mediante *bootstrap*, estimados para las cinco zonas, CN (Coronel Norte), Coronel Sur (CS), Lota (L), Puerto Coronel (PC) y Quihua (Q).

Variabilidad estacional a lo largo del periodo de estudio

En términos generales, ambas estaciones presentaron promedios similares en los parámetros sedimentarios. El pH registró un promedio de 7,4 en verano y 7,5 en invierno. La temperatura presentó un promedio de 15,2 °C en verano y 13,5 °C en invierno. El porcentaje de MOT fue mayor en verano con un promedio de 10,26%, en comparación a invierno que registró un promedio de 8,14%. El potencial redox registró un promedio de -68,1 mV en verano y en invierno un promedio de -19,4 mV. La media fue de 4,5 ϕ en verano y 4,2 ϕ en invierno. Además, el grado de selección (sorting) presentó un valor promedio de 1,9 ϕ en ambas estaciones. Por último, el porcentaje promedio de limo-arcilla fue 54,2% en verano y 51,0% en invierno (Tabla 3, Anexo 1). A continuación, se presentan los resultados correspondientes al objetivo 3.

Los resultados del análisis PCoA, correspondientes a las observaciones por época del año (verano e invierno), muestran solapamiento entre ellas (Figura 4a). Al superponer burbujas proporcionales al porcentaje de limo-arcilla (Figura 4b), en el lado positivo del eje de PCO1 se observa la presencia de burbujas de mayor tamaño en ambas estaciones, lo que se relaciona positivamente con la dirección de los vectores de limo-arcilla, media (en escala ϕ) y el sorting. Asimismo, las estaciones de invierno y verano tienden a mezclarse entre sí.

En el caso de la MOT (Figura 4c), en eje positivo del PCO1 se observan burbujas de mayor tamaño en verano, lo que también se asocia con la dirección de los vectores de MOT y temperatura. Para el potencial redox, las burbujas de mayor tamaño están distribuidas en el eje positivo de PCO2 predominando la estación de invierno (I) y está asociada hacia donde apunta el vector de redox. En cambio, las burbujas de menor tamaño de la estación de verano (V) están distribuidas hacia la dirección de los vectores de MOT y temperatura.

El sedimento compuesto por limo-arcilla se mantiene constante en ambas estaciones del año, pero la MOT y el redox presentaron variaciones estacionales (Figura 4). En términos estadísticos, el análisis de PERMANOVA evidencia diferencias significativas entre invierno y verano en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios (Tabla 3). Estos resultados se pueden visualizar con el análisis no métrico de escalamiento multidimensional (mMDS) (Figura 5), el cual muestra una

segregación en los centroides de invierno y verano, ambos con similar patrón de dispersión multivariada.

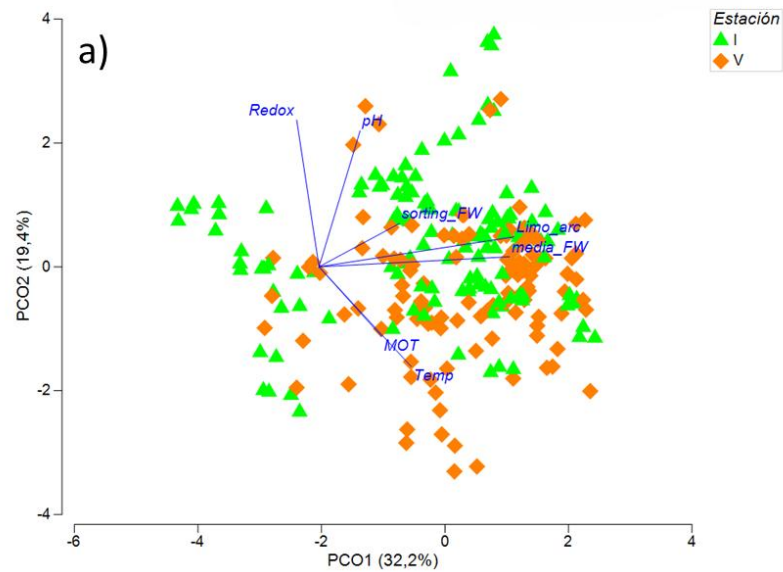


FIGURA 4a.

Análisis de coordenadas principales (PCoA) de las estaciones de invierno (I) y verano (V) de las zonas de muestreo.

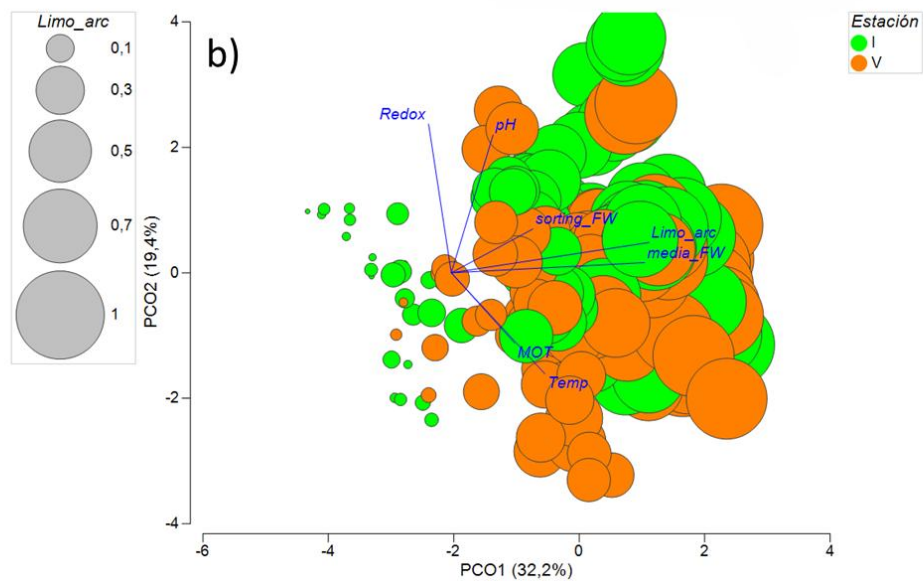


FIGURA 4b.

Gráfico de burbujas en relación con el porcentaje (%) de limo-arcilla (0,1 equivale a un 10%).

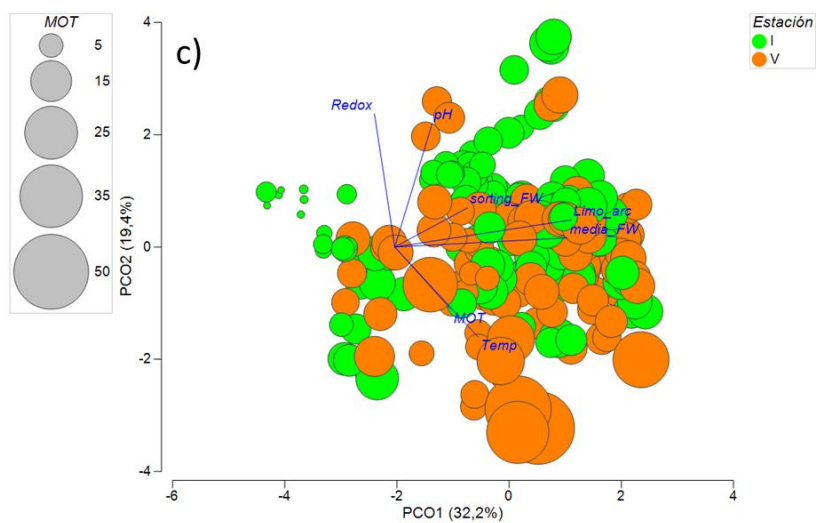


FIGURA 4c.

Gráfico de burbujas del porcentaje (%) de MOT.

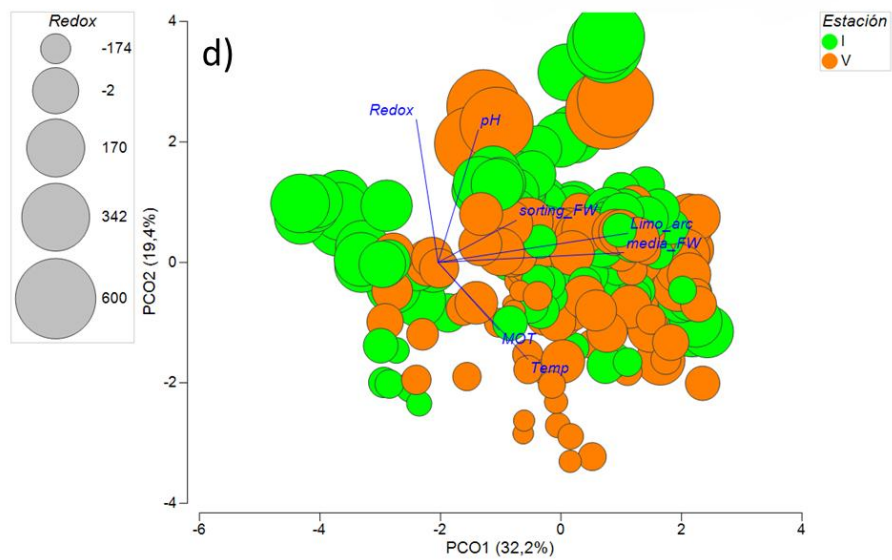


FIGURA 4d.

Gráfico de burbujas de las condiciones redox (mV).

Para el factor estación-año, el eje PCO1 explica un 34,6% y el eje PCO2 un 26,5%, representando en conjunto el 60,6% de la variación total. Se observa una segregación entre las estaciones de verano (V) e invierno (I). Las estaciones de invierno están proyectadas hacia los valores negativos del eje PCO1, mientras que las de verano se agrupan hacia los valores positivos del eje PCO1 y una mayor dispersión en el eje PCO2. Los vectores proyectados en correlaciones de Pearson indican que el porcentaje de limo-arcilla, la media ϕ y el porcentaje de MOT se correlacionan entre sí y se orientan hacia los valores positivos del eje PCO1. El vector de temperatura está orientado hacia los valores positivos de ambos ejes, mientras que el potencial redox, el grado de selección (sorting) están orientados hacia los valores negativos del eje PCO1, mostrando una correlación negativa a los vectores de MOT.

Al superponer burbujas proporcionales al porcentaje de limo-arcilla (Figura 5b), se observa que los mayores porcentajes corresponden a la estación de verano en los años 2021, 2022 y 2025. El vector está orientado hacia los valores positivos del eje PCO1, esto se asocia con la dirección del vector de limo-arcilla. En cambio, en la estación de invierno se presentan menores porcentajes de sedimentos finos.

Para la MOT (Figura 5c), se observa que hay mayores valores principalmente en la estación de verano, esto se asocia con la dirección del vector de MOT y de la temperatura. En cambio, las muestras de invierno presentan menores contenidos de MOT.

Por último, para el potencial redox (Figura 5d), se observa una heterogeneidad de este parámetro en ambas estaciones (verano e invierno). Los mayores valores se concentran principalmente hacia los valores positivos del eje PCO2, mientras que los valores más bajos y negativos están distribuidos hacia los valores negativos del dicho eje. La dirección opuesta de los vectores de redox y MOT refuerza la relación inversa entre ambos parámetros.

Se evidencian variaciones entre años y estaciones del año (invierno y verano). El pH registró valores promedios entre 7,2 y 7,8 (Tabla 3, Anexo 1). Se observan mayores valores promedios de temperatura en las estaciones de verano, alcanzando un máximo de 16,3 °C en los veranos de 2021 y 2024, mientras que el menor valor promedio registrado fue en invierno de 2024 (11,4°C). El porcentaje de MOT mostró variaciones entre los años y estaciones, presentó un menor valor promedio de 5,4% en el verano del 2023, y un mayor valor promedio de 14,0% en el verano de 2022. Por último,

el potencial redox varía entre años y estaciones, con valores promedios que fluctuaron entre -140,2 mV en el verano de 2023 y 88,5 mV en invierno de 2025, mostrando condiciones tanto reductoras como oxidantes durante el periodo de estudio (Tabla 3, Anexo 1).

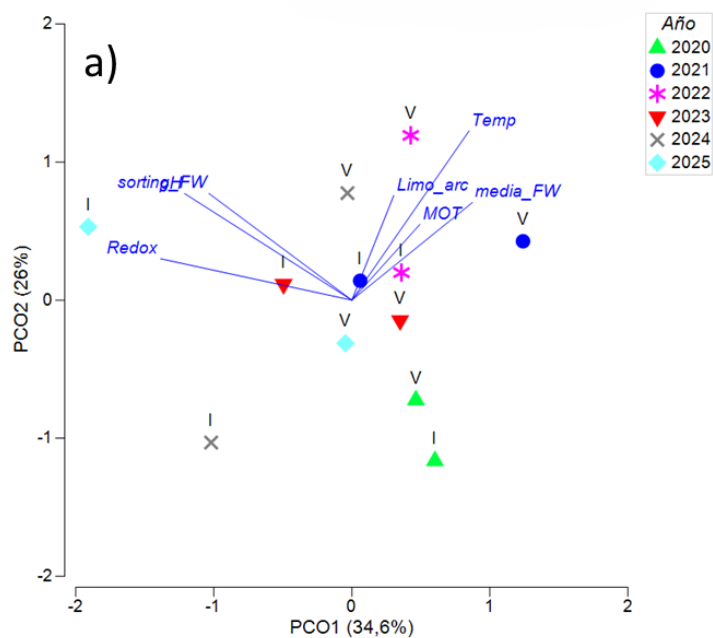


FIGURA 5a.
Análisis de coordenadas principales (PCoA) para el factor estación-año.

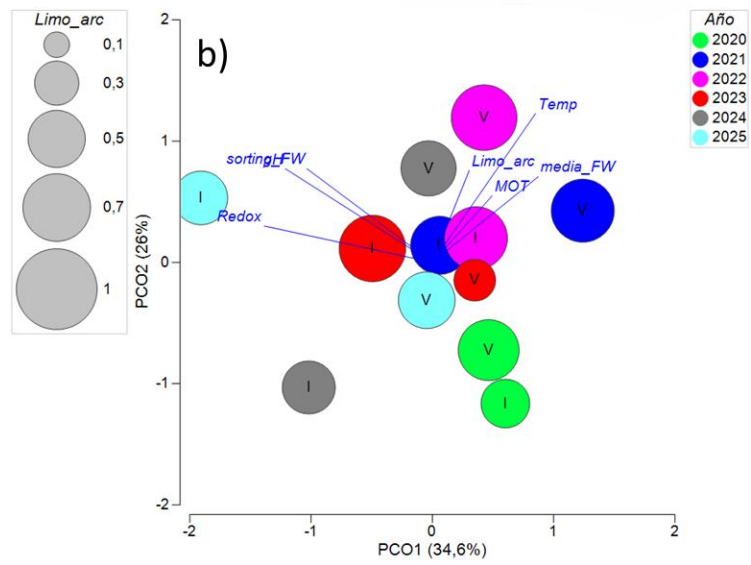


FIGURA 5b.

Gráfico de burbujas en relación con el porcentaje (%) de limo-arcilla (0,1 equivale a un 10%).

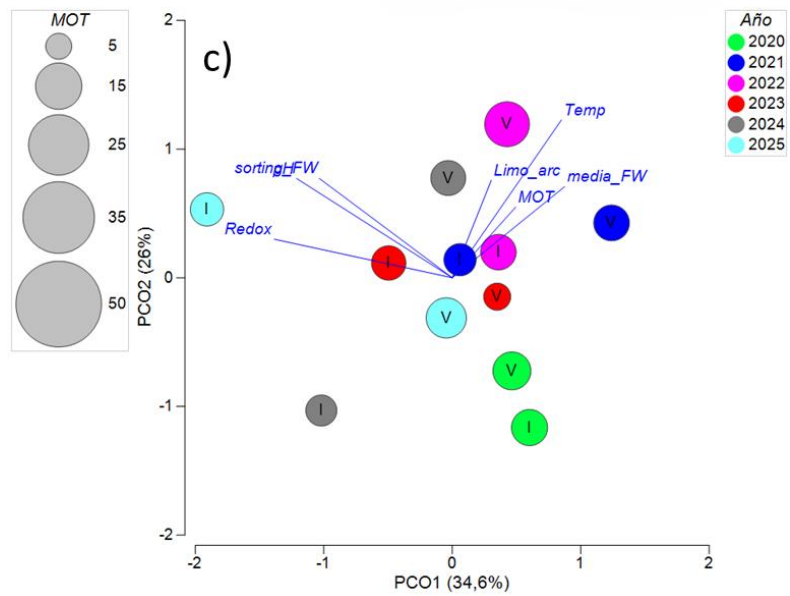


FIGURA 5c.

Gráfico de burbujas del porcentaje (%) de MOT.

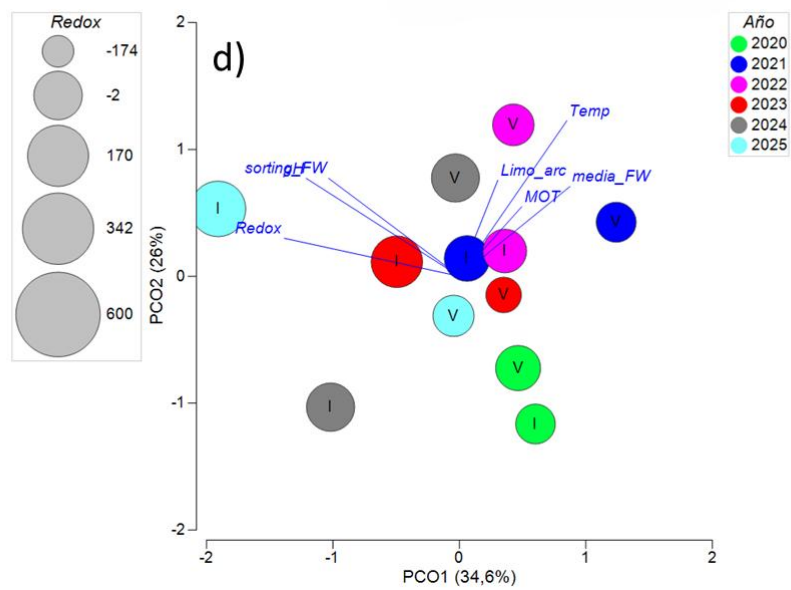


FIGURA 5d.

Gráfico de burbujas de las condiciones redox.

TABLA 3

Resultados del análisis de PERMANOVA para evaluar si hay diferencias significativas en los parámetros sedimentarios multivariadas entre las estaciones de invierno y verano en el área de estudio. Valor *p*-permutado en negrita indica significancia estadística ($p < 0.05$). Test PERMDISP para el factor estación, $p = 0.847$.

Fuente	g.l.	SC	CM	Pseudo-F	P(permut)	P.U.
Estación	1	63,279	63,279	9,3478	0,001	998
Residuos	244	1651,7	6,7693			
Total	245	1715				

P.U.: Permutaciones únicas

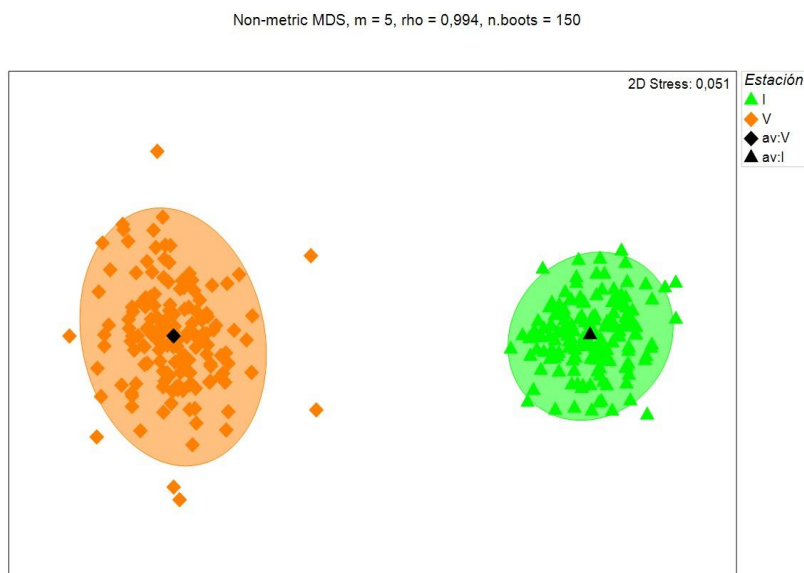


FIGURA 6.

Análisis no métrico de escalamiento multidimensional (nMDS), estimado a partir de una matriz de distancia euclidiana. Se visualizan centroides promedio y su elipse de confianza al 95% mediante *bootstrap*, estimados para las estaciones de invierno (I) y verano (V).

Variabilidad interanual

Los análisis de PCoA que abordaron la variabilidad interanual mostraron segregación entre los años de estudio. En este análisis el eje PCO1 explicó un 47,7% y el eje PCO2 un 34,1%, lo que representó, en conjunto, un 81,8% de la variación total de los datos. El año 2020 se segregó respecto de los otros años. Los años 2020 al 2022 se ubicaron en la zona correspondiente a los valores positivos del eje PCO1, mientras que los años 2023 al 2025 se localizaron en los valores negativos del eje PCO1. Se observó que los vectores proyectados en correlaciones de Pearson indicaron que el porcentaje de limo-arcilla, la media (ϕ), la temperatura y el porcentaje de MOT se mostraron correlación entre sí y se ubicaron hacia los valores positivos del eje PCO1. En cambio, el potencial redox y el grado de selección (sorting) están orientados hacia los valores negativos del eje PCO1, mostrando una correlación negativa respecto a los demás parámetros (Figura 7). Al superponer burbujas proporcionales al porcentaje de limo-arcilla (Figura 7b), se observó que los mayores porcentajes están concentrados en los años 2020 y 2022, mientras que el año 2023 presenta los menores valores. Esto coincide con la dirección del vector de limo-arcilla (Tabla 4, Anexo 1). Para la MOT (Figura, 7c), se observó que los mayores porcentajes de MOT están registrados en los años 2021 y 2022, mientras que el 2023 presenta valores más bajos (Tabla 4, Anexo 1). Por último, para el potencial redox (Figura 7d), los mayores valores se concentraron en el año 2020, mientras que los menores valores se observaron en los años 2024 y 2025 (Tabla 4, Anexo 1). La orientación de los vectores está en dirección opuesta al MOT, indicando que estos parámetros están inversamente correlacionados.

A continuación, se entregan los resultados asociados al objetivo 4. En cuanto a las variaciones interanuales en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios, en el análisis PERMANOVA (Tabla 5) se observaron diferencias significativas entre los años 2020 al 2025. Las comparaciones múltiples entre años entregaron diferencias significativas en los años 2020, 2021 y 2022 (Tabla 6). Por el contrario, no hubo diferencias significativas entre 2023-2024, y entre 2024-2025, lo que se puede observar en el análisis nMDS (Figura 6), donde hay superposición de los centroides asociados a estos años.

Los parámetros sedimentarios presentaron variaciones entre los años de estudio (2020-2025). El pH mostró un promedio de 7,3 en 2020, 7,4 en 2021, 7,5 en 2022, 2023 y 2024. Por último, 7,6 en

2025. La temperatura registró un promedio de 13,1 °C en 2020, con un aumento de 15,6 °C en 2021 y 15,1 °C en 2022. Luego disminuyó a 13,8 °C en 2023 y 2024, hasta alcanzar 13,3 °C en 2025. El porcentaje de MOT presentó valores promedio más altos en el año 2022 (11,5%), seguido de 2020 y 2025 con un valor de 9,6% en ambos años. Los menores promedios se observaron en el 2023 (7,6%) y 2024 (7,82%). El potencial redox mostró un incremento, pasando de un promedio de -76,2 mV en 2020 a -67,4 mV en 2021, -70,0 mV en 2022, -12,1 mV en 2023, -7,1 mV en 2024 y 1,3 mV en 2025. La media granulométrica presentó un aumento desde 4,1 ϕ en 2020 hasta 4,8 ϕ en 2022. Posteriormente, disminuyó a 4,6 ϕ en 2023 y 3,9 ϕ en 2024 y 2025. Además, el grado de selección (sorting) aumentó desde un promedio 1,5 ϕ en 2020 hasta 2,2 ϕ en 2025. Por último, para los sedimentos finos, el porcentaje de limo-arcilla fue de 50% en 2020, 60% en 2021, 2022 y 2023, 40% en 2024 y 50% en 2025 (Tabla 4, Anexo 1).

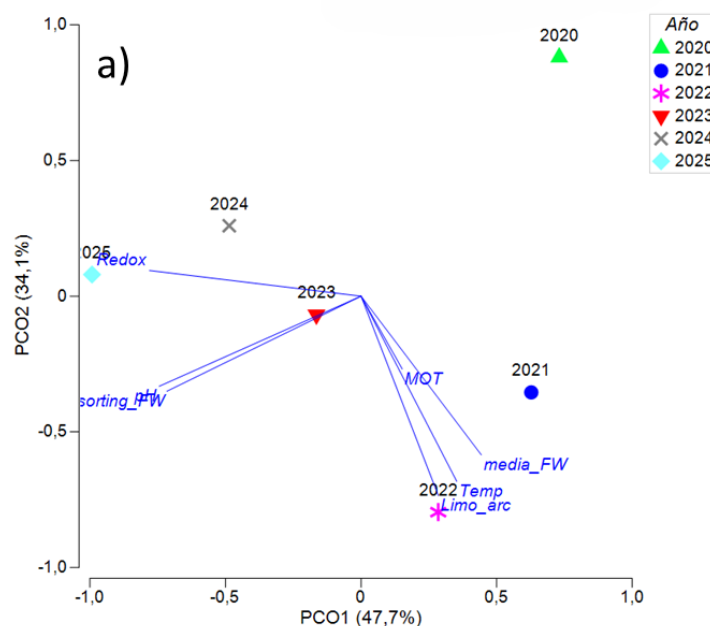


FIGURA 7a.

Análisis de coordenadas principales (PCoA) entre años.

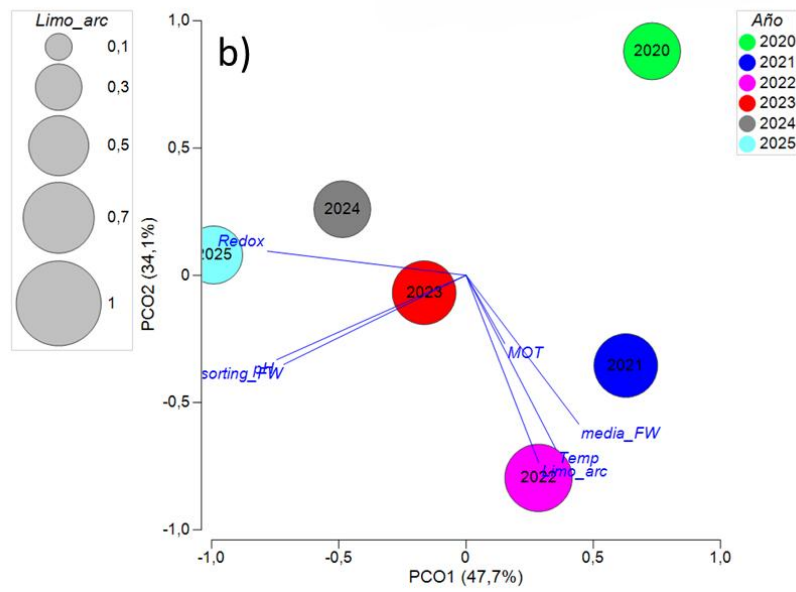


FIGURA 7b.

Gráfico de burbujas en relación con el porcentaje (%) de limo-arcilla (0,1 equivale a un 10%).

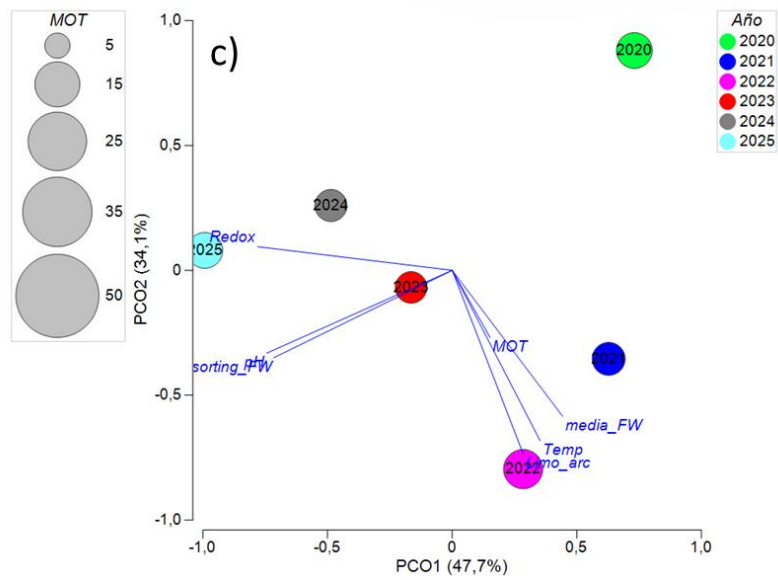


FIGURA 7c.

Gráfico de burbujas del porcentaje (%) de MOT.

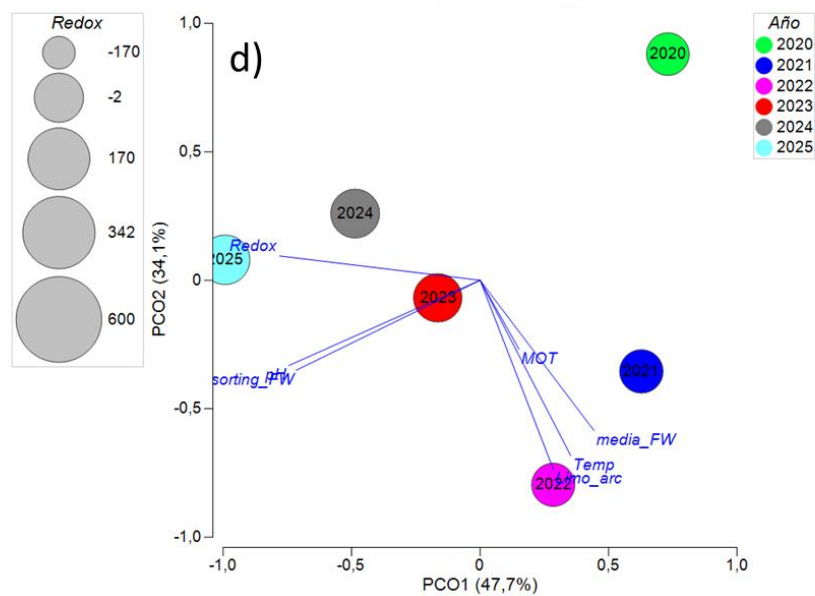


FIGURA 7d.

Gráfico de burbujas de las condiciones redox (mV).

TABLA 5

Tabla con resultados del análisis de PERMANOVA para evaluar si hay diferencias significativas en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios entre los años del periodo de estudio (2020 a 2025). Valor *p*-permutado en negrita indica significancia estadística ($p < 0.05$). Test PERMDISP para el factor año, $p = 0,281$.

Fuente	g.l.	SC	CM	Pseudo-F	P(perm)	P.U.
Año	5	187,63	37,526	5,8965	0,001	998
Residuos	240	1527,4	6,364			
Total	245	1715				

P.U.: Permutaciones únicas

TABLA 6

Resultados de la prueba de comparaciones “*pair-wise*”, para evaluar si hay diferencias significativas en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios en el periodo de estudio (2020 al 2025) en áreas adyacentes de la zona costera de Coronel y Lota. Valores *p*-permutados y *p*-Monte Carlo (P(MC)) en negrita indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Grupos	t	P(perm)	P.U.	P(MC)
2020, 2021	2,4169	0,003	999	0,001
2020, 2022	3,0902	0,001	999	0,001
2020, 2023	2,4088	0,002	999	0,003
2020, 2024	2,6301	0,002	999	0,001
2020, 2025	2,9842	0,001	996	0,001
2021, 2022	1,8874	0,007	999	0,009
2021, 2023	1,9138	0,007	998	0,011
2021, 2024	2,5045	0,001	998	0,001
2021, 2025	2,9612	0,001	999	0,001
2022, 2023	2,0759	0,002	997	0,002
2022, 2024	2,9431	0,001	999	0,001
2022, 2025	2,6925	0,001	998	0,001
2023, 2024	1,5134	0,05	999	0,071
2023, 2025	1,8246	0,010	999	0,015
2024, 2025	1,2674	0,131	999	0,168

P.U.: Permutaciones únicas

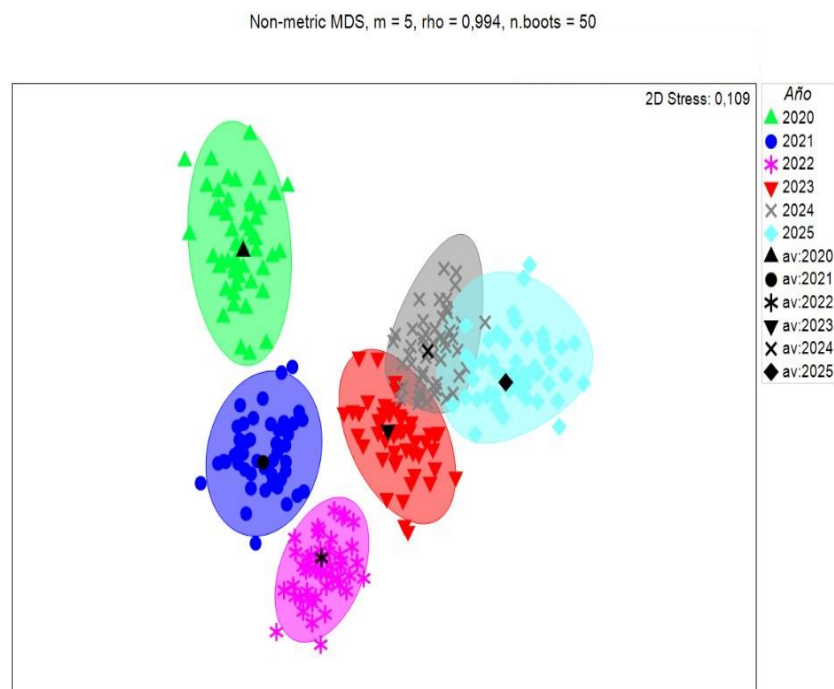


FIGURA 8.

Análisis no métrico de escalamiento multidimensional (nMDS), estimado a partir de una matriz de distancia euclidiana. Se visualizan centroides promedio y su elipse de confianza al 95% mediante *bootstrap*, estimados para los años del período de estudio (2020 al 2025).

El análisis PERMANOVA de tres vías detectó efectos significativos de la zona de monitoreo, la estación y el año, así como de sus interacciones (Tabla 7). Estos resultados indican que las diferencias temporales no fueron uniformes entre las zonas de monitoreo. Sin embargo, debido al desbalance del diseño, la presencia de celdas vacías y la heterogeneidad de dispersión detectada, las interacciones deben interpretarse de manera exploratoria.

Tabla 7

Resultados del análisis de PERMANOVA de tres vías para evaluar si hay diferencias significativas en los parámetros sedimentarios multivariados en las zonas de monitoreo, estación y año. Valor *p*-permutado en negrita indica significancia estadística ($p < 0.05$). La homogeneidad de las dispersiones se evaluó mediante el Test PERMDISP para el agrupamiento Zona de monitoreo x Estación x Año, $p = 0,001$.

Fuente	g.l.	SC	CM	Pseudo-F	P(permut)	P.U.
Zonas de monitoreo	4	304,85	76,212	13,55	0,001	996
Estación	1	65,401	65,401	6,0068	0,001	999
Año	5	183,02	36,603	4,0855	0,001	998
Zonas de monitoreo x Estación	4	92,134	23,034	3,8257	0,001	998
Zonas de monitoreo x Año**	19	336,78	17,725	3,5103	0,001	997
Estación x Año	5	146,91	29,382	3,6424	0,001	998
Zonas de monitoreo x Estación x Año**	13	227,13	17,472	9,4475	0,001	997
Residuos	194	358,77	1,8494			
Total	245	1715				

P.U.: Permutaciones únicas

** El término tiene una o más celdas vacías.

DISCUSIÓN

Patrones espacio-temporales de los parámetros sedimentarios

Los resultados obtenidos mostraron heterogeneidad espacial en las características del sedimento, asociada a la distribución de fracciones finas (limo-arcilla), contenido de MOT y potencial redox. Estas variaciones podrían estar asociadas con la interacción entre procesos hidrodinámicos, aportes continentales, productividad primaria y actividades antrópicas presentes en la zona costera entre Coronel y Lota.

En ambientes costeros, la acumulación de MOT puede estar relacionada con sedimentos finos, ya que presentan una mayor superficie específica y menor permeabilidad, lo que facilita la retención y preservación de partículas orgánicas. Como consecuencia, la degradación microbiana de la MOT incrementa el consumo de oxígeno y favorece el desarrollo de condiciones reductoras, reflejadas en valores más negativos del potencial redox (Burdige, 2007; Schüring et al., 1999). Este patrón ha sido descrito en distintos sistemas costeros, incluyendo la Bahía Concepción, Bahía San Vicente y Bahía de Chetumal, donde los sedimentos finos presentan contenidos de MOT superiores al 10% (Ahumada et al., 1989; Carrasco et al., 1999; De Jesús-Navarrete et al., 2000; Rudolph et al., 1984). De acuerdo con lo observado en los análisis, Quihua no siguió completamente este patrón, ya que presentó una menor proporción de limo-arcilla (25%), pero un mayor contenido de MOT y condiciones redox predominantemente reductoras. Esto sugiere que, además de la granulometría podrían intervenir factores locales en la acumulación de MOT. Entre ellos se encuentran las actividades pesqueras y portuarias presentes en el sector (Hernández et al., 2024; Torres-Ramírez et al., 2024), que constituyen fuentes potenciales de materia orgánica; sin embargo, la información analizada no permite establecer el origen de la MOT sedimentaria.

Por otra parte, Lota presentó el mayor porcentaje de limo-arcilla y un alto porcentaje de MOT, no obstante, registró un potencial redox promedio positivo, lo que indica condiciones más oxidadas. Este resultado difiere de la relación esperada entre la materia orgánica y el potencial redox, lo que sugiere que el contenido de MOT por sí solo no determina el estado redox de los sedimentos superficiales, ya que, el potencial redox no depende exclusivamente del contenido de MOT (Morford & Emerson, 1999). Una posible explicación es que parte de la materia orgánica corresponda a

compuestos refractarios, como lignina, algaenanos y kerógeno, que presentan mayor resistencia a la degradación microbiana. Además, procesos como bioturbación y la bioirrigación pueden favorecer el ingreso de oxígeno al sedimento y mantener condiciones más oxidadas (Burdige, 2007; Kristensen et al., 1995; Reimers et al., 2013). En su conjunto, estos resultados indican que la variabilidad espacial observada entre ambas zonas no responde exclusivamente a la composición granulométrica del sedimento. Considerando que la proporción de limo-arcilla constituye un factor determinante en el contenido de MOT, la hidrodinámica local, las actividades antrópicas y los procesos biogeoquímicos también podrían contribuir a determinar el estado redox de los sedimentos. Esto es consistente con lo descrito para el Golfo de Arauco, donde se atribuyen la distribución de los sedimentos superficiales a la interacción entre procesos hidrodinámicos y geomorfológicos (Chandía et al., 2024).

En otras zonas de Chile, como por ejemplo en la bahía Quintero-Puchuncaví, se han registrado contenidos de MOT inferiores al 2%, asociados principalmente a sedimentos arenosos. Las diferencias observadas entre las zonas de monitoreo de nuestro estudio y la bahía Quintero-Puchuncaví son consistentes con las diferencias texturales, ya que los sedimentos del tipo arenas presentan una menor capacidad para retener MOT, mientras que los sedimentos finos poseen una mayor superficie que favorece la retención y preservación de partículas orgánicas (Salamanca et al., 2021). Sin embargo, además de la granulometría, la acumulación de MOT y las condiciones redox también dependen de la interacción entre la hidrodinámica, las propiedades fisicoquímicas del sedimento y los procesos biogeoquímicos (de Pontes et al., 2026). En esta memoria, varias zonas de monitoreo presentaron condiciones reductoras asociadas a mayor contenido de MOT, lo que concuerda con la relación inversa descrita entre el contenido de MOT y el potencial redox. En el Golfo de Arauco se ha observado una marcada heterogeneidad espacial en la distribución de los sedimentos superficiales, cuyas características granulométricas responde a la interacción entre las condiciones hidrodinámicas, geomorfológicas y los procesos locales de sedimentación (Chandía et al., 2024). De acuerdo con la información disponible para el presente estudio, Lota presentó una alta proporción de limo-arcilla, a pesar de corresponder a un sector ubicado fuera de la Bahía Lota, mientras que Quihua se ubica al interior de dicha bahía. Esta condición sugiere que la acumulación de partículas finas podría estar influenciada por otros factores además de la exposición hidrodinámica, como la interacción entre procesos de transporte y deposición, los cuales pueden modificar la distribución granulométrica de los sedimentos incluso en sectores expuestos (McLaren & Bowles, 1985). Entre estos factores, la mayor profundidad registrada en Lota podría constituir un parámetro

adicional a considerar, dado que esta zona presentó profundidades cercanas a 28 m, superiores a las observadas en Quihua (5-9 m) (Tabla 5, Anexo 1). No obstante, como la profundidad no fue incorporada en los análisis, su posible influencia debe considerarse una hipótesis y no una explicación demostrada.

Diferencias estacionales entre verano e invierno

La zona costera de la región del Biobío presenta un marcado ciclo estacional, caracterizado en verano por condiciones de surgencia costera que favorecen el ascenso de aguas con nutrientes, de baja temperatura, alta salinidad y bajo contenido de oxígeno, mientras que en invierno influyen las descargas de agua provenientes del río Biobío y aportes fluviales que modifican las condiciones hidrográficas de la columna de agua (Sobarzo et al., 2007; Vergara et al., 2024). En este contexto regional, los resultados de esta memoria muestran también una variabilidad estacional (invierno vs verano) en los sedimentos superficiales entre Coronel y Lota, la cual estuvo asociada principalmente a cambios en el contenido de MOT y el potencial redox, mientras que la composición granulométrica permaneció relativamente estable entre ambas estaciones del año.

El mayor contenido de MOT registrado durante el verano es consistente con lo descrito para la costa centro-sur de Chile, donde la dinámica estacional está influenciada por la surgencia del Sistema de la Corriente de Humboldt. La intensificación de la surgencia favorece el ascenso de aguas ricas en nutrientes, incrementa la productividad primaria y puede intensificar el acoplamiento bento-pelágico y el flujo de carbono hacia el fondo marino (Sellanes et al., 2010; Sobarzo et al., 2007). En este contexto, el mayor contenido de MOT observado durante el verano es consistente con un aumento del consumo de oxígeno y con el desarrollo de condiciones más reductoras. Este mecanismo ha sido ampliamente estudiado en sistemas costeros influenciados por surgencia (Eggleton & Thomas, 2004; Valdés et al., 2000).

En contraste, durante el invierno el menor contenido de MOT puede reflejar una disminución del flujo del carbono hacía el fondo marino debido a una menor intensidad de la surgencia y a un aumento de los aportes fluviales. Estas condiciones podrían favorecer una mayor disponibilidad de oxígeno de los sedimentos, y, por consiguiente, valores menos negativos del potencial redox (Sobarzo et al., 2007; Vergara et al., 2024). Para el Golfo de Arauco, se ha reportado que las diferencias estacionales de las condiciones sedimentarias están asociadas a una mayor estratificación en verano

y una columna de agua más mezclada durante el invierno (Hernández et al., 2024; Salamanca et al., 2024). Estas observaciones son consistentes con lo observado por Carrasco et al. (1999), en la Bahía Concepción, quienes observaron que durante invierno ocurre un aumento del oxígeno disuelto asociado a la disminución de la intensidad de la surgencia costera y a una menor productividad primaria. En conjunto, los antecedentes de ambas bahías sugieren que la variabilidad estacional en la disponibilidad de oxígeno puede modificar las condiciones redox de los sedimentos en la costa centro-sur de Chile.

A diferencia del contenido de MOT y del potencial redox, la proporción de limo-arcilla presentó escasa variación entre verano (54%) e invierno (51%), por lo que la composición textural se mantuvo estable entre ambas estaciones. Esto sugiere que la variabilidad estacional observada en las zonas de estudio pudo estar asociada con procesos biogeoquímicos del sedimento, más que por modificaciones texturales. Este comportamiento ha sido descrito en diferentes ambientes costeros y estuarinos, donde la mineralización y el reciclaje de MOT presentan una marcada variación estacional, produciendo cambios en las condiciones redox del sedimento (Alongi et al., 1999; Khalil et al., 2013). En el presente estudio, la composición granulométrica permaneció relativamente estable entre verano e invierno. En otros sistemas costeros y estuarinos, en cambio, se ha observado que las variaciones estacionales del contenido de MOT pueden estar asociadas a cambios en la fracción fina del sedimento (Lu et al., 2020; Thomson-Becker & Luoma, 1985). Asimismo, estudios recientes realizados en bahías semicerradas muestran que la granulometría puede modificarse cuando ocurren cambios en la hidrodinámica, el aporte sedimentario o las actividades antrópicas, lo que, a su vez, puede influir en la capacidad del sedimento para retener materia orgánica (Hou et al., 2025; Zeng et al., 2026).

La estabilidad en la composición de los sedimentos entre estaciones del año sugiere que la distribución del tamaño del grano puede responder principalmente a procesos de la dinámica sedimentaria de mayor escala temporal, mientras que la materia orgánica y el potencial redox pueden responder más rápidamente a la variabilidad estacional de las condiciones de oxigenación. En ambientes costeros y estuarinos se ha registrado una marcada variabilidad estacional en los procesos de mineralización de la materia orgánica y la disponibilidad de oxígeno (Khalil et al., 2013), mientras que la textura sedimentaria puede mantenerse relativamente estable a lo largo del tiempo (Jiménez-Arias et al., 2016).

Variaciones interanuales

Durante el período de estudio (2020-2025) se observó una marcada heterogeneidad en los parámetros sedimentarios en las zonas de estudio. Las diferencias interanuales muestran cambios en la estructura multivariada de los sedimentos superficiales, donde el porcentaje de limo-arcilla presentó un promedio de 50% en 2020 hasta un 60% en 2021, 2022 y 2023, disminuyendo hasta 40% en 2024. Del mismo modo, el porcentaje de MOT alcanzó su mayor promedio en 2022 (11,5%) y disminuyó durante 2023 (7,6%) y 2024 (7,8%). En cuanto al potencial redox, se observó una tendencia opuesta, pasando de condiciones reductoras en 2020 (-76,2 mV) hacia condiciones más oxidadas, alcanzando un promedio positivo en 2025 (1,3 mV) (Tabla 4, Anexo 1). En conjunto, estos cambios muestran una transición desde años caracterizados por mayores contenidos de MOT y sedimentos finos hacia condiciones relativamente más oxidadas desde 2023. Este patrón podría reflejar variaciones interanuales en la disponibilidad, acumulación y degradación de materia orgánica y concuerda por lo descrito por Burdige (2007) y Kristensen et al. (1995), quienes señalan que la retención de sedimentos finos favorece la preservación de MOT y el desarrollo de condiciones más reductoras.

Los cambios interanuales se relacionaron principalmente con el contenido de MOT, la proporción de limo-arcilla y las condiciones redox. Lo que sugiere que la influencia de la surgencia costera, la variabilidad de los aportes continentales asociados al río Biobío y actividades antrópicas presentes en el borde costero (Chandía et al., 2024). El incremento de la MOT y el porcentaje de limo-arcilla (2020 y 2022) concuerda con lo descrito para otros sistemas costeros del centro-sur de Chile. Por ejemplo, en la Bahía Concepción se ha registrado que el mayor contenido de MOT está en zonas dominadas por sedimentos finos, al respecto, (Rudolph et al., 1984) señalaron que este incremento podría atribuirse a la elevada productividad asociada a la surgencia costera, lo que produce un aumento en el MOT en los sedimentos superficiales, y un ambiente más reductor.

Por otro lado, la disminución del contenido de MOT observada durante los años 2023 y 2024, junto con el incremento progresivo del potencial redox hasta alcanzar valores positivos en 2025, sugiere una mayor oxigenación de los sedimentos superficiales. Una posible explicación para este patrón interanual podría relacionarse a los cambios oceanográficos asociados al evento El Niño 2023-2024. En el sistema de la Corriente de Humboldt, estos eventos pueden reducir o modificar la intensidad de la surgencia costera, pudiendo disminuir el aporte de nutrientes hacia la superficie y en consecuencia, la productividad primaria y el consecuente flujo de materia orgánica exportada hacia

el fondo marino (Arntz et al., 2006). Lo anterior puede llevar a que disminuya la acumulación de MOT en los sedimentos y aumenten las condiciones oxidantes. Esta interpretación concuerda con lo descrito por Gutiérrez et al. (2000), quienes registraron durante El Niño 1997-1998 un aumento del oxígeno disuelto en las aguas de fondo y una disminución de la MOT en los sedimentos en la plataforma continental frente a Concepción. Del mismo modo, Graco et al. (2006) señalaron que la variabilidad interanual del sistema de surgencia modifica el acoplamiento bento-pelágico y el aporte de carbono hacia el fondo marino en Bahía de Concepción y la plataforma adyacente, mientras que Aparicio-Rizzo & Masotti (2019) señalaron que los años influenciados por el Niño en la bahía de Valparaíso presentaron una menor disponibilidad de nutrientes y una disminución de la productividad primaria respecto de los años bajo condiciones de La Niña. En este contexto, la disminución de la MOT y el incremento del potencial redox registrados entre 2023 y 2025 en la presente memoria son consistentes con patrones descritos durante eventos El Niño previos en la costa centro-sur de Chile. No obstante, dado el carácter observacional de este estudio y la ausencia de parámetros oceanográficos integrados al análisis multivariado, esta relación debe interpretarse como una hipótesis consistente con la literatura y no como una relación causal demostrada.

En conjunto, los resultados son consistentes con la dinámica descrita para el Golfo de Arauco, donde los sedimentos superficiales están expuestos a la interacción entre la surgencia costera, la circulación local y los aportes continentales del río Biobío. La variabilidad de estos procesos podría contribuir a explicar parte de las diferencias observadas durante el período de monitoreo (Chandía et al., 2024; Hernández et al., 2024; Salamanca et al., 2024).

CONCLUSIONES

La integración y sistematización de información proveniente de distintos Programas de Vigilancia Ambiental permitió generar una visión conjunta de la variabilidad sedimentaria de la zona costera entre Coronel y Lota, aportando antecedentes útiles para la comprensión de los procesos que ocurren en los sedimentos superficiales y para la interpretación de futuros programas de monitoreo ambiental en la zona de muestreo. Las conclusiones obtenidas en el presente trabajo son las siguientes:

1. La zona costera comprendida entre Coronel y Lota presentó una marcada variabilidad espacio-temporal en las características sedimentarias superficiales durante el período 2020-2025. El análisis integrado de parámetros granulométricos, materia orgánica total (MOT), pH y potencial óxido-reducción (redox) permitió identificar patrones diferenciados entre zonas de muestreo, estaciones del año y períodos de monitoreo.
2. Se detectaron diferencias significativas en la estructura multivariada de los parámetros sedimentarios entre las zonas de monitoreo (PVAs estudiados). Estas diferencias estuvieron acompañadas por heterogeneidad en la dispersión multivariada entre zonas. Lota se caracterizó por presentar los mayores porcentajes de limo-arcilla y sedimentos más finos, mientras que Quihua mostró los mayores contenidos de materia orgánica total y condiciones redox reductoras. Estos resultados sugieren una heterogeneidad espacial posiblemente asociada a diferencias en las condiciones hidrodinámicas, procesos de sedimentación y características locales de cada sector.
3. La variabilidad estacional estuvo asociada principalmente a cambios en la materia orgánica total y en las condiciones redox del sedimento. Durante el verano se registraron mayores contenidos de MOT y potenciales redox más negativos, mientras que en invierno se observaron condiciones relativamente más oxidadas. En contraste, la granulometría mostró una mayor estabilidad entre estaciones, sugiriendo que los procesos de acumulación y degradación de materia orgánica presentan una respuesta estacional más marcada que la textura sedimentaria.
4. Se observaron variaciones interanuales significativas en la estructura sedimentaria entre los años 2020 y 2025. Los análisis multivariados permitieron identificar cambios en la composición de los sedimentos y en las condiciones de materia orgánica y potencial redox, evidenciando que la

dinámica sedimentaria de la zona presenta una componente temporal relevante que podría estar influenciada por variaciones oceanográficas y ambientales de escala regional. Sin embargo, el PERMANOVA de tres vías mostró que la respuesta temporal dependió de la zona de monitoreo y de la estación del año, por lo que el patrón interanual no fue uniforme en toda el área de estudio.

5. Los resultados muestran que la relación entre granulometría, materia orgánica total y condiciones redox no es uniforme entre las zonas de muestreo. Sectores con altos porcentajes de sedimentos finos no necesariamente presentaron las condiciones más reductoras, lo que sugiere que factores como la calidad de la materia orgánica, la hidrodinámica local, la bioturbación y los procesos biogeoquímicos también podrían contribuir a la variabilidad observada en los sedimentos superficiales.

6. Las variaciones interanuales observadas en la estructura sedimentaria, particularmente la disminución de la MOT y la tendencia hacia condiciones menos reductoras entre 2023 y 2025, coinciden temporalmente con el desarrollo del evento El Niño 2023-2024. Estos resultados sugieren que las fluctuaciones oceanográficas regionales asociadas a este fenómeno podrían haber influido en los procesos de acumulación y degradación de materia orgánica en los sedimentos superficiales de las zonas de estudio, aunque esta relación debe considerarse una hipótesis que requiere ser evaluada mediante información oceanográfica complementaria y series temporales de mayor extensión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahumada, R., Rudolph, A., Madariaga, S., & Carrasco, F. (1989). Descripción de las condiciones oceanográficas de la bahía San Vicente y antecedentes sobre los efectos de la contaminación. *Biología Pesquera*, (18), 37-52. <https://doi.org/10.21703/0067-8767.1989.18.2531>
- Alarcón, E. (1970). Descripción Oceanográfica Preliminar del Golfo de Arauco. *Boletín Científico Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)*, 13, 1-51.
- Alongi, D. M., Tirendi, F., Dixon, P., Trott, L. A., & Brunskill, G. J. (1999). Mineralization of Organic Matter in Intertidal Sediments of a Tropical Semi-enclosed Delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(4), 451-467. <https://doi.org/10.1006/ecss.1998.0465>
- Amjadian, P., Neill, S. P., & Martí Barclay, V. (2023). Characterizing seabed sediments at contrasting offshore renewable energy sites. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1156486. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1156486>
- Anderson, M. J. (2026). *What's New in PRIMER 8*. PRIMER-e. PRIMER-e Learning Hub. <https://learninghub.primer-e.com/books/whats-new-in-primer-8>.
- Aparicio-Rizzo, P., & Masotti, I. (2019). Inter-annual variability of oceanographic conditions and phytoplankton in Valparaíso Bay (~33°S), central Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 54(1), 70-81. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.1.1495>
- Araruna Júnior, J. T., De Campos, T. M. P., & Pires, P. J. M. (2014). Sediment characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 71, 41-47. <https://doi.org/10.2112/SI71-005.1>
- Arntz, W. E., Gallardo, V. A., Gutiérrez, D., Isla, E., Levin, L. A., Mendo, J., Neira, C., Rowe, G. T., Tarazona, J., & Wolff, M. (2006). El Niño and similar perturbation effects on the benthos of the Humboldt, California, and Benguela Current upwelling ecosystems. *Advances in Geosciences*, 6, 243-265. <https://doi.org/10.5194/adgeo-6-243-2006>
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Bravo Ferretti, C., Sandoval-Díaz, J., & Astudillo Pizarro, F. (2022). Narrativas del acorralamiento. Identidad de lugar en la Bahía de Coronel a partir de la reconversión productiva. *Revista de Historia (Concepción)*, 29(1), 73-105. <https://doi.org/10.29393/RH29-4NACF30004>
- Burdige, D. J. (2007). Preservation of organic matter in marine sediments: Controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets? *Chemical Reviews*, 107(2), 467-485. <https://doi.org/10.1021/cr050347q>

- Carrasco, F. D., Gallardo, V. A., & Baltazar, M. (1999). The structure of the benthic macrofauna collected across a transect at the central Chile shelf and relationships with giant sulfur bacteria *Thioploca spp.* *Mats. Cahiers de Biologie Marine*, 40, 195-202.
- Chandía, C., Salamanca, M., Hernández, A., Bermedo, L., Hernández-Miranda, E., & Inostroza-Michael, O. (2024). Variación espacial y estacional de metales y compuestos orgánicos en los sedimentos costeros del Golfo de Arauco. *Gayana (Concepción)*, 88(2), 195-214. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382024000200195>
- Cupul-Magana, L. A., Möso-Aranda, C., Sierra, J. P., Martí, E., Ferman-Almada, J. L., Rodillo, M., González del Río, J., & Sánchez-Arcilla, A. (2006). Characterization and distribution patterns of surficial sediments of Cullera Bay, Spain. *Ciencias Marinas*, 32(4), 617-629. <https://doi.org/10.7773/cm.v32i4.1161>
- De Jesús-Navarrete, A., Oliva Rivera, J., Valencia Beltrán, V., & Quintero López, N. (2000). Distribución de los sedimentos en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo, México. *Hidrobiológica*, 10(1), 61-67.
- De La Lanza Espino, G. J., Ortiz Pérez, M. A., & Carbajal Pérez, J. L. (2013). Diferenciación hidrogeomorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas*, 81, 33-50. <https://doi.org/10.14350/rig.33375>
- de Pontes, G. C., Schmidt, S., de Carvalho Vicente, M., Guimarães, T. C., Machado, W. T. V., & Wasserman, J. C. (2026). Factors determining nutrient distribution in sediments and porewater in a semi-confined coastal environment subject to anthropogenic pressure. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198(3), 248. <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15065-y>
- Eggleton, J., & Thomas, K. V. (2004). A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International*, 30(7), 973-980. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.001>
- Faúndez-Báez, P., Morales, C. E., & Arcos, D. (2001). Variabilidad espacial y temporal en la hidrografía invernal del sistema de bahías frente a la VIII región (Chile centro-sur). *Revista Chilena de Historia Natural*, 74, 817-831. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2001000400009>
- Ferrans, L., Jani, Y., Gao, L., & Hogland, W. (2019). Characterization of dredged sediments: A first guide to define potentially valuable compounds – the case of Malmfjärden Bay, Sweden. *Advances in Geosciences*, 49, 137-147. <https://doi.org/10.5194/adgeo-49-137-2019>
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Gill, A. B. (2005). Offshore renewable energy: Ecological implications of generating electricity in the coastal zone. *Journal of Applied Ecology*, 42(4), 605-615. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01060.x>

- González, C. J., Álvarez, Ó., Reyes, J., & Acevedo, A. (2010). Modelado bidimensional de la hidrodinámica y transporte de sedimento en el caño de marea San Pedro (Bahía de Cádiz): Implicaciones morfodinámicas. *Ciencias Marinas*, 36(4). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-38802010000400006&script=sci_arttext
- Graco, M., Gutiérrez, D., & Farías, L. (2006). Inter-annual variability of the Pelagic-Benthic coupling in the upwelling system off central Chile. *Advances in Geosciences*, 6, 127-132. <https://doi.org/10.5194/adgeo-6-127-2006>
- Gutiérrez, D., Gallardo, V., Mayor, S., Neira, C., Vásquez, C., Sellanes, J., Rivas, M., Soto, A., Carrasco, F., & Baltazar, M. (2000). Effects of dissolved oxygen and fresh organic matter on the bioturbation potential of macrofauna in sublittoral sediments off Central Chile during the 1997/1998 El Niño. *Marine Ecology Progress Series*, 202, 81-99. <https://doi.org/10.3354/meps202081>
- Hernández, A., Inostroza-Michael, O., Salamanca, M., Chandía, C., Hernández-Miranda, E., Vergara, O. A., Bogdanovich, J. M., & González, C. L. (2024). Usos de la zona costera en el Golfo de Arauco: Importancia ambiental y ecológica. *Gayana (Concepción)*, 88(2), 138-153. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382024000200138>
- Hernández, S. (2001). Fracciones biodisponibles de materia orgánica, Cu y Zn en sedimentos superficiales de la bahía Concepción, Chile. *Biología Pesquera*, 29, 31-35. <https://doi.org/10.21703/0067-8767.2001.29.2615>
- Hou, Y., Zhou, C., Gao, R., Zhang, M., Huang, Z., Yang, W., Zhang, M., & Yu, F. (2025). Spatiotemporal characteristics of grain size composition of surface sediment in a semi-enclosed bay and their responses to anthropogenic forcing—A case study from Weihai Bay, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 44(9), 95-107. <https://doi.org/10.1007/s13131-025-2525-x>
- Jiménez-Arias, J. L., Mata, M. P., Corzo, A., Poulton, S. W., März, C., Sánchez-Bellón, A., Martínez-López, J., Casas-Ruiz, M., García-Robledo, E., Bohórquez, J., & Papaspyrou, S. (2016). A multiproxy study distinguishes environmental change from diagenetic alteration in the recent sedimentary record of the inner Cadiz Bay (SW Spain). *The Holocene*, 26(9), 1355-1370. <https://doi.org/10.1177/0959683616640046>
- Khalil, K., Raimonet, M., Laverman, A. M., Yan, C., Andrieux-Loyer, F., Viollier, E., Deflandre, B., Ragueneau, O., & Rabouille, C. (2013). Spatial and Temporal Variability of Sediment Organic Matter Recycling in Two Temperate Eutrophicated Estuaries. *Aquatic Geochemistry*, 19(5-6), 517-542. <https://doi.org/10.1007/s10498-013-9213-8>
- Kristensen, E., Ahmed, S. I., & Devol, A. H. (1995). Aerobic and anaerobic decomposition of organic matter in marine sediment: Which is fastest? *Limnology and Oceanography*, 40(8), 1430-1437. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1430>
- Lara Acosta, M., Castañeda-Chávez, M. del R., Ruiz Sánchez, A., Lango Reynoso, F., Montoya Mendoza, J., & Reynier Valdes, D. (2026). Relación entre granulometría y materia orgánica en sedimentos marinos de Veracruz. *Revista INCAING (Investigación en Ciencia Aplicada e Ingeniería)*, 9(51), 70-75.

- Lu, X., Zhou, F., Chen, F., Lao, Q., Zhu, Q., Meng, Y., & Chen, C. (2020). Spatial and Seasonal Variations of Sedimentary Organic Matter in a Subtropical Bay: Implication for Human Interventions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1362. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041362>
- McLaren, P., & Bowles, D. (1985). The Effects of Sediment Transport on Grain-Size Distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55(4), 457-470. <https://doi.org/10.1306/212F86FC-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Morford, J. L., & Emerson, S. (1999). The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11-12), 1735-1750. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00126-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00126-X)
- Morford, J. L., Russell, A. D., & Emerson, S. (2001). Trace metal evidence for changes in the redox environment associated with the transition from terrigenous clay to diatomaceous sediment, Saanich Inlet, BC. *Marine Geology*, 174(1-4), 355-369. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00160-2)
- Ortiz Pérez, M. A., & De La Lanza Espino, G. (2006). *Diferenciación del Espacio Costero de México: Un inventario regional* (Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Pineda, V. (2009). Granulometría y geoquímica de los sedimentos marinos en el área comprendida entre el Seno Reloncaví y Golfo Corcovado, Chile. *Crucero CIMAR 10 fiordos. Ciencia y Tecnología del Mar*, 32(1), 27-47.
- Quispe, J. M. (2007). *Simulación de la hidrodinámica en la Bahía de Paracas, Pisco-Perú; utilizando forzantes físicos* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Reimers, C. E., Alleau, Y., Bauer, J. E., Delaney, J., Girguis, P. R., Schrader, P. S., & Stecher, H. A. (2013). Redox effects on the microbial degradation of refractory organic matter in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 121, 582-598. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.08.004>
- Rudolph, A., Ahumada, R., & Hernández, S. (1984). Distribución de la materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno orgánico y fósforo total en los sedimentos recientes de la Bahía de Concepción. *Biología Pesquera*, 13, 71-82. <https://doi.org/10.21703/0067-8767.1984.13.2485>
- Sahu, B. K. (1964). Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34(1), 73-83. <https://doi.org/10.1306/74d70fce-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Salamanca, M., Bermedo, L., Chandía, C., Hernández, A., & Hernández-Miranda, E. (2024). Condiciones físico-químicas en aguas costeras del Golfo de Arauco. *Gayana (Concepción)*, 88(2), 172-194. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382024000200172>
- Salamanca O., M., Chandia V, C., Bermedo C, L., Hidalgo G, M., Hernández R, A., Figueroa SM, C., Franyola V, G., Rosenberg, L., & Leal, C. (2021). *Evaluación temporal y espacial del*

contenido de metales pesados en sedimentos de la Bahía de Quintero-Puchuncaví (Informe Final para licitación del Ministerio del Medio Ambiente Informe). Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas.

- Schüring, J., Schulz, H. D., Fischer, W. R., Böttcher, J., & Duijnisveld, W. H. M. (1999). *Redox: Fundamentals, Processes and Applications* (1.^a ed., Vol. 1). Springer-Verlag.
- Seibold, E., & Berger, W. (2017). *The Sea Floor*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51412-3>
- Sellanes, J., Neira, C., Quiroga, E., & Teixido, N. (2010). Diversity patterns along and across the Chilean margin: A continental slope encompassing oxygen gradients and methane seep benthic habitats. *Marine Ecology*, 31(1), 111-124. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2009.00332.x>
- Sobarzo, M., Bravo, L., Donoso, D., Garcés-Vargas, J., & Schneider, W. (2007). Coastal upwelling and seasonal cycles that influence the water column over the continental shelf off central Chile. *Progress in Oceanography*, 75(3), 363-382. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.08.022>
- Thomson-Becker, E. A., & Luoma, S. N. (1985). Temporal fluctuations in grain size, organic materials and iron concentrations in intertidal surface sediment of San Francisco Bay. *Hydrobiologia*, 129, 91-107.
- Torres-Ramírez, P., Veas, R., Krautz, M. C., Chandía, C., Salamanca, M., Hernández, A., Contreras, S., & Hernández-Miranda, E. (2024). Estatus ecológico del bentos de la zona costera del Golfo de Arauco: Patrones espacio-temporales de índices bióticos de la macrofauna. *Gayana (Concepción)*, 88(2), 236-258. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382024000200236>
- 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/https://doi.org/10.3856/vol42-issue3-fulltext-10>
- Valdés, J., López, L., LoMónaco, S., & Ortlieb, L. (2000). Condiciones paleoambientales de sedimentación y preservación de materia orgánica en bahía Mejillones del Sur (23° S), Chile. *Revista de biología marina y oceanografía*, 35(2). <https://doi.org/10.4067/S0718-19572000000100005>
- Vergara, O. A., Contreras-Rojas, J., Muñoz, R., Bermedo, L., Sobarzo, M., Saldías, G. S., Chandía, C., Hernández, A., Salamanca, M., & Hernández-Miranda, E. (2024). Cambios hidrográficos estacionales a lo largo de la costa del Golfo de Arauco (37° S). *Gayana (Concepción)*, 88(2), 154-171. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382024000200154>
- Zeng, Y., Lao, Q., Chen, C., Zeng, H., & Chen, F. (2026). Sources and temporal-spatial variations of sedimentary organic matter and black carbon in Zhanjiang Bay: Insights into coastal carbon burial. *Marine Environmental Research*, 213, 107711. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107711>

INSTRUMENTOS LEGALES Y REGLAMENTARIOS

Decreto Supremo N.º 40 (30 de octubre de 2012). Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, del Ministerio del Medio Ambiente. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053563>

Ley N.º 19.300 (9 de marzo de 1994). Bases Generales del Medio Ambiente, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. URL: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

ANEXO 1: RESÚMENES ESTADÍSTICOS

Tabla 1

Resumen estadístico de los parámetros sedimentarios con el factor Zonas de muestreo durante el período de estudio.

Zonas de monitoreo	Parámetros	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Tamaño de la muestra
Coronel Norte (CN)	pH	7,44	6,9	8,1	0,3	30
	Redox (mV)	12,9	-214,0	209,8	128,5	30
	Temp (°C)	14,6	10,5	18,8	2,9	30
	MOT (%)	6,8	0,4	9,9	3,4	30
	Media ϕ	4,3	1,4	5,8	1,5	30
	Sorting ϕ	1,9	0,7	3,2	0,8	30
	Limo-Arcilla (%)	61,0%	0%	92,2%	33,0%	30
Coronel Sur (CS)	pH	7,30	6,8	7,8	0,22	43
	Redox (mV)	-79,9	-253,4	563,7	151,4	43
	Temp (°C)	15,0	10,3	19,1	2,3	43
	MOT (%)	8,4	2,2	13,8	2,2	43
	Media ϕ	3,8	2,1	5,6	1,0	43
	Sorting ϕ	2,2	0,7	2,7	0,6	43
	Limo-Arcilla (%)	44,0%	0%	83,8%	23,0%	43
Lota (L)	pH	7,55	7,2	8	0,1	34
	Redox (mV)	29,7	-184,0	508,5	167,0	34
	Temp (°C)	15,7	11,9	21,4	2,8	34
	MOT (%)	10,4	5,6	14,0	1,9	34
	Media ϕ	5,3	2,6	5,9	0,9	34
	Sorting ϕ	1,8	1,0	3,1	0,5	34
	Limo-Arcilla (%)	78%	1%	95,3%	24,0%	34
Puerto Coronel (PC)	pH	7,54	7,0	8	0,2	84
	Redox (mV)	-59,71	-209,9	120,2	76,9	84
	Temp (°C)	13,9	10,3	18,3	1,8	84
	MOT (%)	8,8	3,3	28,0	2,9	84
	Media ϕ	4,7	1,9	5,8	0,8	84
	Sorting ϕ	2,0	0,9	2,8	0,4	84
	Limo-Arcilla (%)	61,0%	0%	89,7%	20,0%	84
Quihua (Q)	pH	7,39	7,0	7,9	0,22	55
	Redox (mV)	-57,5	-238,4	463,5	156,9	55
	Temp (°C)	13,3	11,4	17,2	1,3	55
	MOT (%)	10,7	2,5	47,2	8,5	55
	Media ϕ	3,5	0,4	5,2	0,8	55
	Sorting ϕ	1,5	0,6	2,4	0,5	55
	Limo-Arcilla (%)	25,0%	0%	74,3%	18%	55

Tabla 2

Resumen estadístico de los parámetros sedimentarios de las estaciones de verano e invierno.

Estación	Parámetros	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Tamaño de la muestra
Verano	pH	7,4	6,8	7,9	0,24	114
	Redox (mV)	-68,1	-253,4	563,7	149,0	114
	Temp (°C)	15,2	11,4	19,3	2,1	114
	MOT (%)	10,26	4,08	47,1	6,1	114
	Media ϕ	4,48	2,4	5,8	1,0	114
	Sorting ϕ	1,9	0,6	2,8	0,46	114
	Limo-Arcilla (%)	54,0%	0,54%	92,2%	27,0%	114
Invierno	pH	7,5	6,9	8,1	0,24	132
	Redox (mV)	-18,6	-211,4	418,5	120,1	132
	Temp (°C)	13,5	10,3	21,4	2,1	132
	MOT (%)	8,1	0,4	16,4	2,9	132
	Media ϕ	4,2	0,4	5,9	1,2	132
	Sorting ϕ	1,9	0,6	3,2	0,7	132
	Limo-Arcilla (%)	51,0%	0%	95,3%	29,2%	132

TABLA 3

Resumen estadístico de los parámetros sedimentarios con el factor estación-año durante el período de estudio.

Estación-año	Parámetros	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Tamaño de la muestra
I-2020	pH	7,2	7	7,4	0,1	20
	Redox (mV)	-100,6	-211,4	106,1	102,6	20
	Temp (°C)	13,3	12,3	14,2	0,5	20
	MOT (%)	9,2	3,3	16,4	2,9	20
	Media ϕ	3,7	1,9	5,7	1,4	20
	Sorting ϕ	1,6	0,626	2,7	0,6	20
	Limo-Arcilla (%)	50,0%	0,9%	88,3%	36,0%	20
V-2020	pH	7,4	7,1	7,7	0,1	15
	Redox (mV)	-43,6	-214	563,7	239,0	15
	Temp (°C)	12,8	11,9	15,7	1,0	15
	MOT (%)	10,2	6,86	14,5	1,9	15
	Media ϕ	4,7	2,5174	5,8	1,3	15
	Sorting ϕ	1,4	0,6	2,1	0,49	15
	Limo-Arcilla (%)	60,0%	0,54%	92,2%	40,0%	15
I-2021	pH	7,5	7,1	8	0,30	25
	Redox (mV)	-36,9	-209,9	209,8	128,3	25
	Temp (°C)	15,0	11,9	21,4	2,7	25
	MOT (%)	7,5	0,5	13,8	3,7	25
	Media ϕ	4,2	0,43	5,9	1,6	25
	Sorting ϕ	1,6	0,7	2,7	0,5	25
	Limo-Arcilla (%)	50,0%	0,3%	95,3%	34,0%	25
V-2021	pH	7,2	6,8	7,6	0,23	25
	Redox (mV)	-97,9	-239,8	120,2	92,9	25
	Temp (°C)	16,3	14,1	18,6	1,4	25
	MOT (%)	9,1	4,1	28,0	4,4	25
	Media ϕ	4,7	3,2	5,7	0,8	25
	Sorting ϕ	2,0	1,5	2,5	0,3	25
	Limo-Arcilla (%)	60%	31,2%	89,0%	20,0%	25
I-2022	pH	7,4	6,9	7,6	0,17	25
	Redox (mV)	-58,8	-184,6	18,6	61,3	25
	Temp (°C)	14,5	12,4	19	2,2	25
	MOT (%)	9,0	4,94	12,2	2,0	25
	Media ϕ	4,7	2,4	5,9	0,77	25
	Sorting ϕ	2,0	1,2	2,8	0,42	25
	Limo-Arcilla (%)	60,0%	3,7%	94,0%	20,0%	25
V-2022	pH	7,6	7,2	7,9	0,24	25
	Redox (mV)	-81,1	-230,2	102,5	103,2	25
	Temp (°C)	15,7	13,6	18,5	1,71	25
	MOT (%)	14,0	6,75	47,1	10,5	25
	Media ϕ	4,9	3,0	5,8	0,9	25
	Sorting ϕ	1,9	1,4	2,4	0,3	25
	Limo-Arcilla (%)	70,0%	24,2%	91,9%	22,0%	25

Estación-año	Parámetros	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Tamaño de la muestra
I-2023	pH	7,5	7,3	8,1	0,19	21
	Redox (mV)	36,6	-31,5	172,3	69,5	21
	Temp (°C)	13,1	11,6	14,7	1,0	21
	MOT (%)	8,5	2,16	12,7	2,7	21
	Media ϕ	4,8	2,0	5,8	1,0	21
	Sorting ϕ	2,0	0,7	2,8	0,6	21
	Limo-Arcilla (%)	70,0%	0,4%	91,9%	25,0%	21
V-2023	pH	7,6	7,5	7,7	0,06	8
	Redox (mV)	-140,2	-238,4	-19,4	83,3	8
	Temp (°C)	15,6	14,3	17,1	1,0	8
	MOT (%)	5,4	4,44	6,01	0,5	8
	Media ϕ	4,0	3,3	4,4	0,4	8
	Sorting ϕ	1,4	1,0	1,6	0,2	8
	Limo-Arcilla (%)	30,0%	11,7%	38,2%	8,0%	8
I-2024	pH	7,5	7,1	7,9	0,2	26
	Redox (mV)	-5,6	-142	102	65,3	26
	Temp (°C)	11,4	10,3	15,2	1,2	26
	MOT (%)	7,0	0,4	14,0	3,0	26
	Media ϕ	3,8	1,4	5,7	1,1	26
	Sorting ϕ	2,0	0,6	2,9	0,7	26
	Limo-Arcilla (%)	40,0%	0,0%	86,4%	25,0%	26
V-2024	pH	7,5	7,2	7,8	0,21	26
	Redox (mV)	-8,6	-190,1	463,6	188,5	26
	Temp (°C)	16,3	12,7	19,3	2,1	26
	MOT (%)	8,7	5,0	12,2	2,0	26
	Media ϕ	4,1	2,4	5,7	0,9	26
	Sorting ϕ	2,1	1,0	2,6	0,41	26
	Limo-Arcilla (%)	50,0%	5,3%	86,9%	22,0%	26
I-2025	pH	7,8	7,6	8	0,12	15
	Redox (mV)	88,5	-198,3	418,5	203,0	15
	Temp (°C)	13,6	12,4	14,9	0,87	15
	MOT (%)	7,9	5,1	11,7	2,17	15
	Media ϕ	3,6	3,0	4,0	0,32	15
	Sorting ϕ	2,4	1,5	3,2	0,70	15
	Limo-Arcilla (%)	40,0%	23,6%	74,6%	21,0%	15
V-2025	pH	7,5	7,2	7,7	0,15	15
	Redox (mV)	-85,9	-253,4	66,9	98,4	15
	Temp (°C)	13,1	11,4	14,8	1,2	15
	MOT (%)	11,4	8,13	26,7	4,4	15
	Media ϕ	4,1	2,7	5,8	1,2	15
	Sorting ϕ	1,9	1,2	2,8	0,6	15
	Limo-Arcilla (%)	50,0%	9,1%	91,8%	31,0%	15

Tabla 4

Resumen estadístico de los parámetros sedimentarios con el factor año durante el período de estudio.

Años	Parámetros	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Tamaño de la muestra
2020	pH	7,3	7,0	7,7	0,2	35
	Redox (mV)	-76,2	-214,0	563,7	173,9	35
	Temp (°C)	13,1	11,9	15,6	0,8	35
	MOT (%)	9,6	3,3	16,4	2,5	35
	Media ϕ	4,1	1,9	5,8	1,4	35
	Sorting ϕ	1,5	0,6	2,7	0,6	35
	Limo-Arcilla (%)	50,0%	0,0%	90,0%	40,0%	35
2021	pH	7,4	6,8	8,0	0,3	50
	Redox (mV)	-67,4	-239,8	209,8	115,1	50
	Temp (°C)	15,6	11,9	21,4	2,2	50
	MOT (%)	8,3	0,5	28,0	4,1	50
	Media ϕ	4,4	0,4	5,9	1,3	50
	Sorting ϕ	1,8	0,7	2,7	0,5	50
	Limo-Arcilla (%)	60,0%	0,0%	100%	30,0%	50
2022	pH	7,5	6,9	7,9	0,2	50
	Redox (mV)	-70,0	-230,2	102,5	84,8	50
	Temp (°C)	15,1	12,4	19,0	2,0	50
	MOT (%)	11,5	4,9	47,2	7,9	50
	Media ϕ	4,8	2,4	5,9	0,8	50
	Sorting ϕ	1,9	1,2	2,8	0,4	50
	Limo-Arcilla (%)	60,0%	0,0%	90,0%	20,0%	50
2023	pH	7,5	7,3	8,1	0,2	29
	Redox (mV)	-12,2	-238,4	172,3	108,0	29
	Temp (°C)	13,8	11,6	17,1	1,5	29
	MOT (%)	7,6	2,2	12,8	2,7	29
	Media ϕ	4,6	2,1	5,8	1,0	29
	Sorting ϕ	1,8	0,7	2,8	0,6	29
	Limo-Arcilla (%)	60,0%	0,0%	90,0%	30,0%	29
2024	pH	7,5	7,1	7,9	0,2	52
	Redox (mV)	-7,1	-190,1	463,6	139,7	52
	Temp (°C)	13,8	10,3	19,3	3,0	52
	MOT (%)	7,8	0,4	14,0	2,7	52
	Media ϕ	3,9	1,4	5,7	1,0	52
	Sorting ϕ	2,1	0,6	2,9	0,6	52
	Limo-Arcilla (%)	40,0%	0,0%	90,0%	20,0%	52
2025	pH	7,6	7,2	8,0	0,2	30
	Redox (mV)	1,3	-253,4	418,5	180,1	30
	Temp (°C)	13,3	11,4	14,9	1,1	30
	MOT (%)	9,6	5,1	26,7	3,8	30
	Media ϕ	3,9	2,7	5,8	0,9	30
	Sorting ϕ	2,2	1,2	3,2	0,7	30
	Limo-Arcilla (%)	50,0%	100%	90,0%	30,0%	30

Tabla 5

Profundidades en las zonas de muestreo en cada sitio de monitoreo

Zonas de monitoreo	Zonas	Profundidad (m)
Coronel Norte (CN)	E1	31
	E2	33
	E3	34
	E4	36
	E5	34
	E6-C	34
Coronel Sur (CS)	E1	9
	E2	9
	E3	10
	E4	11
	E5	8
	E6-C	8
Lota (L)	E1	27
	E2	26,8
	E3	27
	E4	28
	E5	27
	E6-C	27
Puerto Coronel (PC)	E1	13
	E2	15
	E3	13,5
	E4	16,5
	E5	15,9
	E6	13,0
	E7	15
	E8	19
	E9	15
	E10	9
	E11	21
Quihua (Q)	E0	7,9
	E1	8,2
	E2	8,5
	E3	9,0
	E4	8,0
	E5	5,0

ANEXO 2: ACTIVIDADES REALIZADAS EN LA PRÁCTICA PROFESIONAL



FIGURA 1.

Control y recepción de muestras.

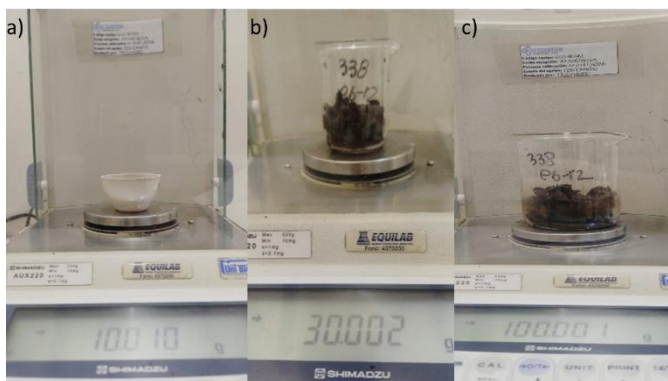


FIGURA 2.

Peso húmedo para a) Materia Orgánica Total (MOT), b) Humedad y c) Granulometría



FIGURA 3.

Procedimiento ensayo de carbono orgánico total (COT)



FIGURA 4.

Tamizadores automáticos

Anexo 3: Entidades participantes en los Plan de Vigilancia Ambiental (PVA)

Tabla 6 Entidades responsables de la ejecución del Plan de Vigilancia Ambiental (PVA)

Zona de monitoreo	Período	Empresa
Coronel Norte	2020-2025	Ecogestión Ambiental Ltda
Puerto Coronel	2020-2024	Ecogestión Ambiental Ltda
Puerto Coronel	2025	Rigadem Monitoreo y Estudios Ambientales Spa
Coronel Sur	2020-2025	Ecogestión Ambiental Ltda
Colbún	2020	Ecogestión Ambiental Ltda
Colbún	2021-2024	SGS Chile Ltda
Colbún	2025	Ecogestión Ambiental Ltda
Lota	2020-2025	Ecogestión Ambiental Ltda
Quihua	2020-2025	Ecogestión Ambiental Ltda