



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
OCEANOGRÁFICAS



HIDRODINÁMICA INVERNAL DE LA BAHÍA DE CONCEPCIÓN

Amin Kadim Ali Cordero

Profesor guía: Dr. Marcus Sobarzo B.

Seminario de Título presentado al
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

Para optar al Título de
BIOLOGO MARINO

Concepción – Chile

2025

AGRADECIMIENTOS

A mi “mamápapá”, Alejandra, por mostrarme un camino libre lleno de opciones, lleno de apoyo, siempre con amor y felicidad. Sin tí hubiera sido imposible. A mis abuelos, que dejaron sus enseñanzas y conexión eterna, su presencia siempre será un catalizador.

A mi profesor Dr. Marcus Sobarzo, que siempre tuvo una lección que entregar para los oídos dispuestos a escuchar, y a Richard Muñoz, ambos en conjunto me mostraron un futuro de mar, cerca de mis sueños de niño.

A mi pareja por estar en cada paso de este proceso, con sus consejos y sus barras. A mis amigos que son mi familia, el mundo con ustedes se siente más cálido.

A la Universidad de Concepción y a la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, por mostrarme la ciencia y la academia, junto con experiencias, habilidades, personas que hubiera sido imposible encontrar sin este privilegio. Al centro COPAS COASTAL por financiar el crucero oceanográfico invernal en bahía Concepción. Al Centro INCAR por proporcionar los liberadores acústicos y al Departamento de Oceanografía y su cuerpo docente y académico que me entregó conocimiento invaluable.

A la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) por proporcionar los datos meteorológicos de la estación meteorológica del aeropuerto Carriel Sur.

CONTENIDO

Abstract.....	5
1. Introducción	6
1.1. La bahía de Concepción.....	6
1.2 Antecedentes hidrodinámicos.....	7
1.3 Objetivo general.....	9
2. Materiales y métodos	10
2.1. Procesamiento datos CTDO.....	12
2.2. Procesamiento datos ADCP	13
3. Resultados	15
3.1. Dispersión de las corrientes	¡Error! Marcador no definido.
3.2. Diagramas de vector progresivo	23
3.3. Viento, nivel del mar y variabilidad de la corriente.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4. Funciones ortogonales empíricas: Estructura vertical de la corriente	25
3.5. Descomposición ortogonal empírica utilizando los tres anclajes combinados.	29
3.6. Hidrografía.....	31
4. Discusión	34
5. Conclusiones.....	38
6. Bibliografía	40
7. Anexo.....	45
7.1. Tablas materiales y métodos	45
7.2. Tablas Resultados	47

Resumen

Este estudio caracteriza la hidrodinámica invernal de la bahía de Concepción (BC), Chile, durante el invierno austral de 2023 (junio-agosto). A partir de datos de CTD y ADCPs, se analizó la temperatura, salinidad, densidad, turbidez, oxígeno disuelto, fluorescencia, y las corrientes marinas con el objetivo de comprender la hidrografía invernal y los patrones de circulación y su variabilidad.

Los análisis incluyeron dispersión de las corrientes, diagramas de vector progresivo y descomposición ortogonal para evaluar el flujo medio y su variabilidad por cada anclaje. Además, se aplicaron funciones ortogonales empíricas (EOF) a las corrientes horarias originales de cada anclaje por separado (estructura vertical) y también combinando los tres anclajes (EOF total). Los resultados revelaron una estructura de dos capas en las corrientes del sector Tomé (cercano a la boca Grande) con flujos superficiales predominantes hacia la cabecera de BC y un flujo compensatorio hacia el océano en el fondo, durante eventos de vientos desde el norte. Se identificó una correlación de Pearson (r) de 0,8 ($p < 0,001$), y una correlación cruzada máxima de un valor de 0,8, con un desfase de +2 horas entre la componente meridional del viento y la serie de tiempo del modo empírico 1 vertical en Tomé. Los primeros tres modos del modo empírico 1 de los tres anclajes combinados, explicaron el 64.4% de la variabilidad total de las corrientes en BC (modo 1: 39.8%, modo 2: 16.9%, modo 3: 7.6%).

Por otra parte, la hidrografía evidenció una alta sensibilidad a las tormentas invernales en términos de influencia del viento, lluvia y aportes de agua dulce continental. Mientras que las fluctuaciones del viento invernal explicaron entre el 37 y 49% de la variabilidad de la corriente total, el agua dulce logró diluir la capa superficial de la BC en hasta un 80%, con respecto a una salinidad de referencia de 34. El estudio permite proponer que las tormentas de viento norte y el aumento de los caudales invernales provoca un apilamiento de agua diluida hacia la cabecera de BC, donde el nivel del mar aumenta generando un gradiente de presión meridional que tiende a evacuar el exceso de agua acumulada por el nivel del

fondo, provocando una doble capa de circulación en la boca Grande de BC. Estos eventos son, por lo tanto, eficientes mecanismos de renovación de aguas en BC. Esta investigación representa el primer estudio que utiliza ADCPs anclados dentro de la bahía, entregando información actual para fortalecer el entendimiento de los procesos físicos que caracterizan la BC y orientar estrategias de su gestión ambiental.

Abstract

This study characterizes the winter hydrodynamics of Concepción Bay (BC), Chile, during the austral winter of 2023 (June-August). From data sampled by CTD and ADCPs, physicochemical variables such as temperature, salinity, density, turbidity, dissolved oxygen, and fluorescence were analyzed, along with current measurements, to understand circulation patterns and their variability. The analyses included progressive vector diagrams to assess residual transport and mean flow for each anchorage. In addition, empirical orthogonal functions (EOF) were applied for the raw hourly currents of each anchor separately (vertical structure) and by combining the three anchors (total EOF). The results revealed a two-layer structure in the currents of the Tomé sector (near the Boca Grande) with predominant surface flows towards the head of BC and a compensatory flow towards the ocean at the bottom during wind events from the north. A Pearson correlation (r) of 0.8 ($p < 0.001$) was identified, and a maximum cross-correlation of a value of 0.8, with a lag of +2 hours between the southern component of the wind and the time series of the empirical mode 1 vertical in Tomé. The first three modes of empirical mode 1, when combined with the three anchors, explained 64.4% of the total variability of the currents in BC (mode 1: 39.8%, mode 2: 16.9%, mode 3: 7.6%).

On the other hand, the fluctuations in hydrographic properties indicated the high sensitivity of the system to winter storms, both in terms of wind influence and rainfall, which diluted the surface layer of the BC by up to 80%. This analysis provides a comprehensive perspective to understand the physical mechanisms that control the circulation of this bay, highlighting the influence of winds on currents and surface layer dilution. These findings lay the foundation for the first study to utilize bay-anchored ADCPs, providing current information to enhance the understanding of the physical processes that characterize this region and inform environmental management strategies.

1. Introducción

Actualmente, cerca de dos tercios de las grandes ciudades del mundo se encuentran en áreas adyacentes a sistemas costeros semicerrados, como estuarios, bahías y golfos. Estos sistemas son zonas de alta productividad biológica e intensa actividad humana, siendo de gran valor ecológico, económico y social, pero también de considerable vulnerabilidad ambiental (Sobarzo, 2002; Halpern et al., 2008). En estos entornos, la variabilidad hidrodinámica responde rápidamente al forzamiento del viento en escalas diarias y sinópticas (Cáceres-Euse et al., 2023; Gilcoto et al., 2017), afectando la estratificación local (Zavialov et al., 2003) y los patrones de circulación (Matano & Palma, 2010; Hickey & Banas, 2003). Estos procesos están fuertemente influenciados por eventos de surgencia y descargas de agua dulce estacionales que aportan nutrientes (nitratos y fosfatos), carbono orgánico e inorgánico, metales traza, sedimentos y contaminantes provenientes de fuentes naturales y/o antropogénicas (Jickells, 1998; Raymond & Bauer, 2001; Carey et al., 2002; Zavialov et al., 2003; Dagg et al., 2004; Bakun et al., 2015; R  ther et al., 2018).

1.1. La bahía de Concepción

La bahía de Concepción (BC) se ubica en 35  42' S–73  0.3' W ocupando un área total de 167.4 km². Es una bahía semicerrada con una forma en “U”, somera y con una profundidad máxima de ~45 metros (Bustos-Espinoza et al., 2024). La bahía se encuentra abierta hacia el ecuador, extendiéndose por aproximadamente 16 km en sentido meridional desde su cabecera hasta la boca y 9 km en sentido zonal, desde la península de Tumbes hasta la punta de Tome (Valle-Levinson et al., 2004). Su orientación norte-sur favorece un patrón de circulación estacional y sin  ptico influenciado por el viento a lo largo de la costa (Sobarzo et al., 1997; Valle-Levinson et al., 2004). Desde un punto de vista ecológico, una característica fundamental de este sistema altamente productivo es la retención de larvas de especies comerciales (Ahumada et al., 1983; Castro et al., 1997; Tapia et al., 2014), las cuales son de importancia para las pesquerías de anchovetas (*Engraulis ringens*) y sardina común (*Strangomera bentincki*), entre otras (IFOP, 2024).

A nivel socioeconómico, BC es relevante debido a su oferta turística, gastronómica, actividades deportivas y a la explotación de sus recursos naturales (Bustos-Espinoza et al., 2024). Además, la región se destaca por su diversidad de actividades industriales, que incluyen la silvicultura, minería, pesca y manufactura (Pérez-Bustamante et al., 2007).

Particularmente, la industria pesquera en Concepción está fuertemente influenciada por las fluctuaciones estacionales en los niveles de oxígeno (Charpentier et al., 2012), la disponibilidad de nutrientes y la biomasa del fitoplancton asociado a eventos de surgencia costera, lo que afecta a la producción primaria (Ahumada, 1989). De igual forma, se han encontrado niveles altos de metales pesados como plomo (Pb) en los sedimentos y agua de fondo probablemente asociado a la combustión de gasolinas y al transporte atmosférico de partículas (Hernández & Sergio, 1995). Otras investigaciones sobre desechos marinos plásticos indican la presencia de polipropileno (PP), polietileno (PE), bifenilos policlorados (PCB) y éteres difenílicos polibromados (PBDE), los cuales son tóxicos para los microorganismos (Gómez et al., 2023). Conjuntamente, estudios recientes han detectado altos niveles de coliformes fecales, vinculada con descargas de aguas residuales y asociada a brotes de hepatitis A en la población, así como a impactos en organismos marinos, como el caso del bivalvo *Perumytilus purpuratus* (González-Saldía et al., 2019).

1.2 Antecedentes hidrodinámicos

Antes de 1990 se realizaron cuatro estudios sobre la hidrodinámica de la BC (Ahumada & Chuecas, 1979; Arcos & Wilson, 1984; Ahumada, 1989; Mesías & Salinas M., 1986). En este contexto, Ahumada & Chuecas (1979) realizaron la primera caracterización hidrográfica e hidrodinámica, describiendo cuatro períodos de circulación. El presente estudio se realizó durante el periodo de circulación estuarina, que abarca desde fines de mayo hasta principios de agosto, dominado por vientos desde el Norte que arrastran aguas subantárticas superficiales (ASAA) hacia el interior de BC. Arcos & Wilson (1984) enfatizaron la influencia del viento sobre los campos de densidad. Además, estos autores confirmaron una estructura vertical de dos capas en la boca de la bahía y demostraron

cómo las descargas de agua dulce también influyen en su hidrodinámica (Ahumada et al., 1983; Ahumada, 1989).

Posteriormente, Sobarzo et al (1997) demostraron, a través de mediciones directas de corrientes marinas, la respuesta de dos capas de circulación en la boca de BC al forzamiento del viento. Según estos autores, en ausencia de viento, las capas de circulación desaparecen y la columna de agua se mueve en fase en respuesta a las mareas. Luego Valle-Levinson et al. (2004) mostraron la influencia del viento como principal forzante del flujo durante el verano en BC. Estos estudios se han centrado mayoritariamente en el comportamiento estacional durante el verano, destacando la influencia significativa de los vientos del suroeste y los cuerpos de agua ASAA (Agua Subantártica) y AEES (Agua Ecuatorial Subsuperficial) en la hidrografía de la bahía.

La dinámica invernal de BC, por otra parte, está determinada por temporales de viento norte, aumento en los caudales de los ríos, cambios en la disponibilidad de oxígeno y en las concentraciones de nutrientes. Ahumada (1989), subrayó que durante el invierno se producen cambios significativos en estos parámetros, afectando los sedimentos y los procesos biológicos de la bahía, y describió una circulación estuarina para el fin de mayo hasta el comienzo de agosto (Ahumada & Chuecas, 1979). Estos factores configuran colectivamente la hidrodinámica, la ecología y la productividad de las pesquerías de esta bahía (Ahumada et al., 1983; Castro et al., 1991).

La hidrodinámica de ambientes costeros juega un papel crucial en la comprensión de los procesos oceanográficos a nivel local. La información relacionada con los patrones de circulación es esencial para la gestión eficaz de sus recursos y la mitigación de impactos ambientales (Sobarzo, M., 2002; Valle-Levinson et al., 2004; Halpern et al., 2008; Archetti & Mancini, 2013). En este sentido, la BC se presenta como un laboratorio natural para comprender los impactos del cambio climático en ecosistemas costeros semicerrados, especialmente sensibles a las perturbaciones climáticas y antropogénicas (Arcos & Wilson, 1984; Sobarzo, 2002; Halpern et al., 2008).

1.3 Objetivo general

Este estudio tiene por objetivo comprender la hidrodinámica al interior de BC durante el invierno, evaluando la circulación y la hidrografía. El estudio busca identificar patrones de circulación de la BC durante el invierno austral con el objetivo de contribuir a una mejor comprensión de la dinámica de este ecosistema costero semicerrado.

1.4 Objetivos específicos

1. Describir las condiciones meteorológicas durante el período de muestreo
2. Analizar las corrientes marinas durante invierno dentro de bahía Concepción
3. Describir las condiciones hidrográficas invernales de bahía Concepción

2. Materiales y métodos

Los datos hidrográficos utilizados en este estudio se obtuvieron con un CTDO Seabird 19 plus v2 con sensores de oxígeno (SBE 43 Dissolved Oxygen Sensor), fluorescencia (WET Labs ECO Chlorophyll Fluorometer) y turbidez (WET Labs ECO Turbidity sensor) provenientes del Proyecto bahía Concepción, financiado por el centro COPAS COASTAL. Los cruceros de recolección de datos se llevaron a cabo el 28 y 29 de junio de 2023, utilizando la embarcación L/C Kay-Kay II. En cada salida, se realizaron 15 y 24 lances de CTDO, respectivamente, abarcando puntos estratégicos en BC para capturar la variabilidad espacial (Fig. 1). Las Tablas 1 y 2 muestran la ubicación, profundidad del lance y del fondo de cada perfil realizado.

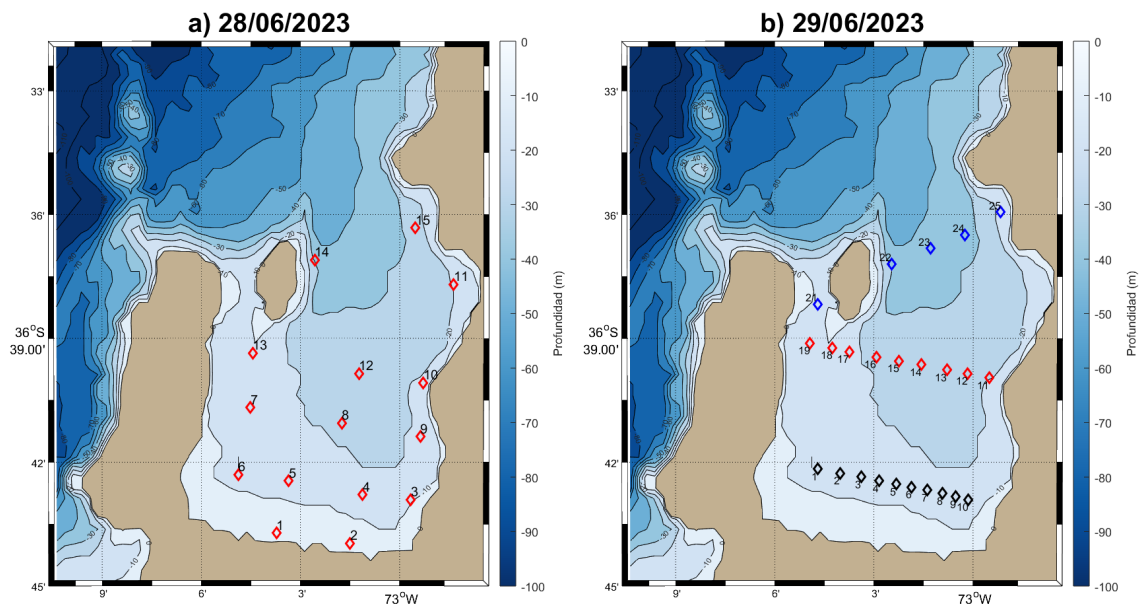


Figura 1: Ubicaciones de estaciones hidrográficas CTDO. Bahía Concepción. (a) 28 de junio y (b) 29 de junio de 2023.

Los datos de corrientes fueron obtenidos con tres perfiladores acústicos (ADCP) Workhorse II Sentinel de Teledyne Marine, instalados en la bahía de Concepción desde el 29 de junio al 26 de agosto de 2023. Los tres sectores de medición, profundidad de cada instalación y fechas se indica en Fig. 2 y Tabla 3. Todos los ADCPs fueron instalados con los transductores orientados hacia la superficie en un marco de fibra de vidrio anclado al fondo. Cada instrumento recolectó datos cada 15 minutos con una resolución vertical de 1 m, con datos válidos entre 4 m y 33 m en Tomé, entre 4 m y 14 m en Talcahuano y entre 4 m y 16 m en Lirquén. Los liberadores acústicos de los tres anclajes fueron proporcionados por el Centro FONDAP INCAR (Fig. 2, Tabla 3).

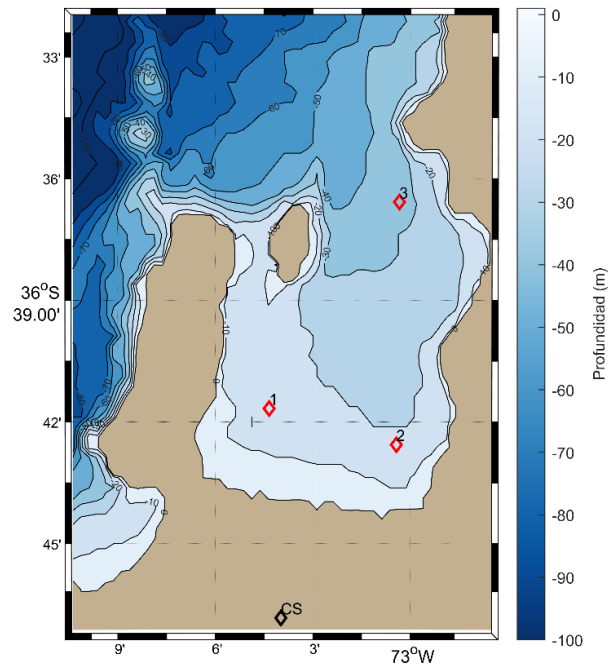


Figura 2: Ubicación de anclajes ADCP en (1) Talcahuano, instalados entre el 29 de junio y el 26 de agosto de 2023, (2) Penco, del 28 de junio al 22 de agosto de 2023, y (3) Tomé, del 28 de junio al 29 de julio de 2023. CS indica la posición de la estación meteorológica del aeropuerto de Carriel Sur.

Los datos de viento se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto de Carriel Sur de la Dirección Meteorológica de Chile (datos disponibles en <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosHistoricosEma/360019>).

Se descendieron imágenes del espectro visible del satélite Sentinel-2 L2A desde la página web de Copernicus (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) del Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea. Estas imágenes fueron utilizadas para obtener información sobre la distribución espacial de turbidez. Se utilizaron las bandas del espectro visible para crear imágenes en color verdadero: roja (banda 4, 665 nm), verde (banda 3, 560 nm) y azul (banda 2, 490 nm).

2.1. Procesamiento datos CTDO

Los datos de CTDO se almacenaron en archivos nombre.hex y se procesaron utilizando el software SBE Data Processing, siguiendo metodología (Sea-Bird Scientific, 2017). Posteriormente, se utilizó el programa MATLAB de Mathworks para el análisis y graficación de los datos hidrográficos de BC.

Para la estructura hidrográfica vertical se generaron perfiles metro a metro de temperatura, salinidad, densidad, turbidez, oxígeno disuelto y fluorescencia para cada punto de muestreo (28 y 29 de junio de 2023). Los datos se separaron por lance y tipo de medición. Adicionalmente, para evaluar la estratificación de la columna de agua, se calculó y graficó la frecuencia Brunt-Väisälä (N^2) utilizando la rutina Gibbs-SeaWater (GSW) (<https://www.teos-10.org/software.htm>) de TEOS-10, en MATLAB. Los límites de los ejes se ajustaron para facilitar la comparación visual entre todos los perfiles.

Para la distribución hidrográfica horizontal se elaboraron mapas de temperatura, salinidad, densidad, turbidez, oxígeno disuelto y fluorescencia a diferentes profundidades (1 m, 5 m, 10 m, 15 m y fondo), utilizando el paquete M_map de MATLAB (www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html) de la Universidad de British Columbia. Estos mapas se generaron para los días 28 y 29 de junio de 2023 permitiendo la visualización de los campos hidrográficos horizontales.

Se construyeron diagramas Temperatura-Salinidad (TS), Densidad-Salinidad (DS) y Densidad-Temperatura (DT) para analizar los cuerpos de agua presentes en la zona de

estudio, su extensión y mezcla. Además, se calculó la fracción de agua dulce (FAD) a través de expresión dada por Blanton & Atkinson (1983):

$$K_f = \int_{-D} \frac{(S_{ref} - S_{(z)})}{(S_{ref})} dz$$

donde S_{ref} es la salinidad de referencia, $S_{(z)}$ es la salinidad a la profundidad z y D es la profundidad de integración, definida en este estudio en -5 m. Se utilizó una salinidad de referencia de 34 (S_{ref}), ya que fue el valor más salino encontrado en los datos a mayor profundidad. Luego se traspasó a valor porcentual para facilitar comparaciones.

$$\% K_f = \left[\frac{S_{ref} - S_{(z)}}{S_{ref}} \right] \times 100$$

Los resultados de la FAD se recopilaron en un archivo Excel con el cual se elaboraron distribuciones horizontales en la capa superficial de la zona de estudio utilizando el paquete M_map (en MATLAB) (www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html) de la Universidad de British Columbia.

2.2. Procesamiento datos ADCP

Previo al análisis de las series de tiempo de corrientes se calcularon promedios horarios y los datos se orientaron hacia el norte geográfico aplicando la corrección magnética correspondiente para el área de estudio, obtenida desde la página de NOAA (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>) (Sobarzo & Djurfeldt, 2004). Las corrientes zonales (u) y meridionales (v) fueron positivas hacia el Este y hacia el Norte, respectivamente. Se realizaron gráficos de las componentes u y v , de la dirección y magnitud de las corrientes, así como histogramas de la dirección, las componentes u , v , y la magnitud. Además, se confeccionaron diagramas de vector progresivo (DVP), para analizar el transporte residual en todos los anclajes y a distintas profundidades. Debido a la topografía de la bahía en el sitio de despliegue de los ADCPs,

se calcularon los ejes de máxima varianza (EMV), a lo largo del cual se maximiza la varianza de las fluctuaciones de las corrientes (Kundu & Allen, 1976; Sobarzo & Djurfeldt, 2004). Con ello se generaron diagramas de dispersión de las componentes u y v con el cálculo del EMV y el porcentaje de varianza explicada.

Posteriormente, la variabilidad de la corriente se calculó usando las funciones ortogonales empíricas (EOF) (Halldor & Venegas, 1997; Contreras-Rojas et al., 2024). El cálculo tuvo en cuenta los dos primeros modos ortogonales, el primero describe el patrón principal que domina los datos (mayor parte de la variación). El modo dos revela el segundo patrón más importante independiente del primero (Halldor & Venegas, 1997). Adicionalmente, se aplicaron filtros de paso bajo (40 horas) y se calcularon las correlaciones utilizando coeficientes de Pearson, Spearman y correlación cruzada. Este análisis incluyó la corriente horaria original de cada anclaje en particular (estructura vertical) y de los tres anclajes combinados (estructura horizontal y vertical).

3. Resultados

3.1. Variabilidad de la corriente, viento y nivel del mar

La dispersión de la corriente total en BC tendió a ser más elíptica en Tomé y más circular en Penco (Fig. 3). En Tomé, el eje mayor se orientó diagonalmente en dirección noroeste-sureste, con un flujo superficial hacia el sureste y un flujo de fondo hacia el noroeste, con magnitudes que no excedieron los 60 cm/s (Fig. 3 y 4a). En el sector de Talcahuano también se observó una dispersión elíptica, menos pronunciada en comparación con Tomé, con magnitudes de corriente que no superaron los 30 cm/s, con un flujo superficial que se orientó diagonalmente en dirección noreste-suroeste y un flujo de fondo con dirección norte (Fig. 3 y 4b). Por otro lado, en Penco se observó la menor elipticidad, con valores de magnitud menores a los 25 cm/s (Fig. 3 y 4c).

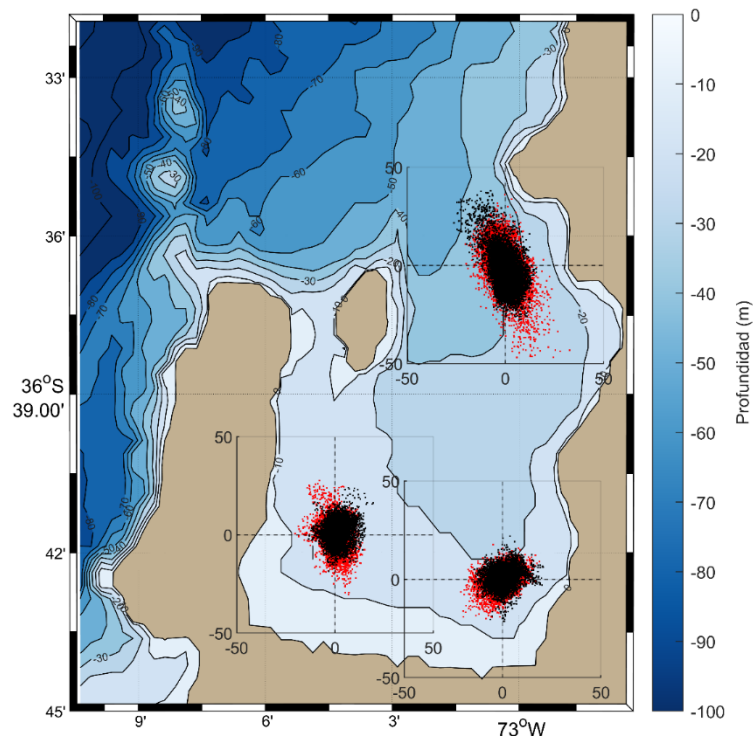


Figura 3. Diagramas de dispersión del promedio horario de las componentes u y v de la corriente superficial (puntos rojos) y de fondo (puntos negros) para Tomé (grafico superior derecho), Talcahuano (grafico inferior izquierdo) y Penco (grafico inferior derecho).

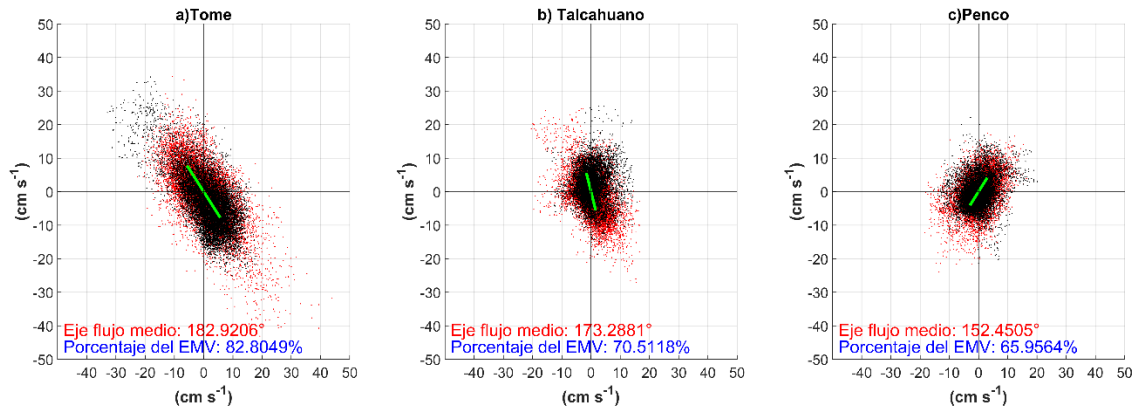


Figura 4: Diagramas de dispersión de las componentes horarias u y v de la corriente total. Capa superficial (puntos rojos) y capa de fondo (puntos negros). (a) Tomé (b) Talcahuano (c) Penco. EMV (línea verde). La capa superficial corresponde a la mitad superior de la columna de agua y la capa de fondo a la mitad inferior.

En Tomé, las componentes u y v oscilaron entre -40 y 40 cm/s y -43 y 42 cm/s, respectivamente (Fig. 5ab). Las corrientes promedios zonales (u) mostraron una tendencia hacia el Oeste (valores negativos) en los primeros 9 m, con magnitudes promedio inferior a 3 cm/s. A partir de los 10 m, la corriente tendió hacia el Este (valores positivos), manteniendo también magnitudes promedio inferiores a 3 cm/s (Fig. 5a). La componente meridional (v) de velocidades fue mayor, con un flujo promedio orientado al norte (valores positivos) en los primeros 9 m y hacia el sur (valores negativos) desde los 10 m hasta el fondo, mostrando un flujo superficial hacia el exterior de la bahía (Boca Grande) e ingreso por el fondo (Fig. 5b). La energía cinética (K_e) varió de 112.4 cm²/s² a 36.0 cm²/s² en profundidad (Tabla 4). La varianza mostró una disminución de energía cinética hasta los 15 m, un aumento hasta los 29 m y una caída hacia el fondo (Fig. 5c). Los EMV explicaron entre el 77% y el 89% de la variabilidad, con orientación constante alrededor de 125° (Fig. 5d). La dirección del flujo rotó gradualmente de ~290°, en los primeros 6 m, hasta ~100° hacia el fondo (Fig. 5d).

En Talcahuano, la componente zonal (u) promedió entre 0.47 cm/s y 0.05 cm/s, mientras que la componente meridional (v) fluctuó entre -2.50 cm/s y -0.67 cm/s (Fig. 6ab). Las

corrientes promedio zonales (u) tendieron en los primeros 9 y últimos 2 m hacia el este (positivo), con valores máximos entre -20 y 18 cm/s y promedios entre -0.15 y 2.6 cm/s (Fig. 6a). Meridionalmente (v), las corrientes promediaron hacia el sur (valores negativos) en los primeros 9 m y hacia el norte (valores positivos) desde los 10 m hasta el fondo, con valores promedio entre -2.3 y 3.1 cm/s y valores máximos entre -30 y 25 cm/s (Fig. 6b). La energía cinética (Ke) disminuyó de 38.42 cm²/s² cerca de la superficie a 26.40 cm²/s² en profundidad (Tabla 5). Los EMV explicaron entre el 71% y 78%, con orientación constante $\sim 347^\circ$ (Fig. 6d).

En Penco, la componente zonal (u) promedió entre 0.84 cm/s y 0.20 cm/s, mientras que la componente meridional (v) osciló entre 0.48 cm/s y -0.51 cm/s (Fig. 7ab). Las corrientes promedio zonales (u) tendieron hacia el este (valores positivos) en los primeros 13 m y hacia el oeste (valores negativos) desde 14 m hasta el fondo, con valores promedios entre -0.9 y 0.7 cm/ (Fig. 7a). Meridionalmente (v), las corrientes se orientaron hacia el norte (valores positivos) en los primeros 6 m y en el último metro, y hacia el sur (valores negativos) entre 7 y 15 m. La energía cinética específica (Ke) disminuyó progresivamente desde 33.78 cm²/s² en la superficie hasta 19.28 cm²/s² en fondo (Tabla 6.). Los EMV explicaron entre el 66% y 71% de la variabilidad, con orientación constante $\sim 55^\circ$ (Fig. 7d.).

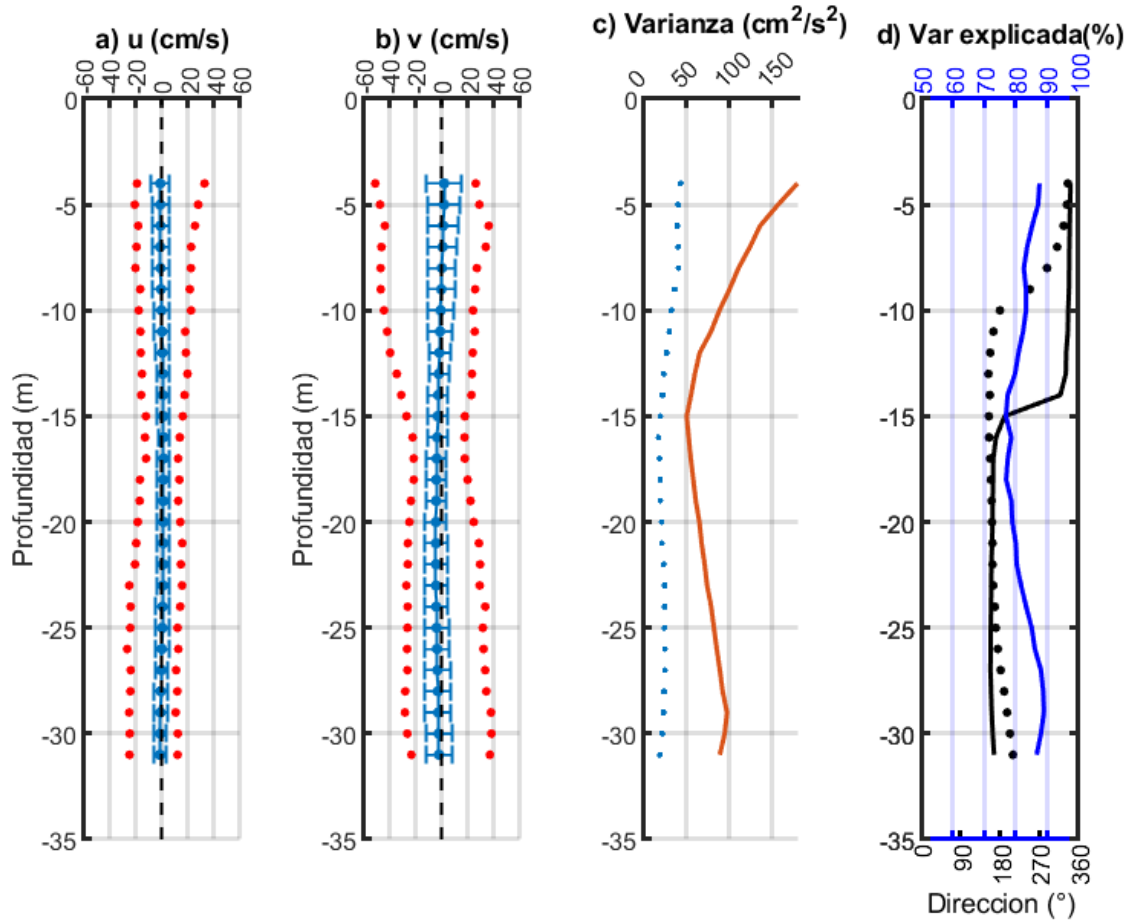


Figura 5: Estructura vertical promedio de las componentes ortogonales de corriente total. ab) Promedio y desviación estándar zonal (u) y meridional (v) (en azul), respectivamente. Valores máximos y mínimos en a y b en rojo. c) Varianza en las componentes u (puntos) y v (línea). d) Eje inferior: Dirección del flujo promedio (puntos negros). Eje superior: Porcentaje de varianza explicada (línea azul) y orientación (línea negra) del eje de máxima varianza. ADCP Tomé.

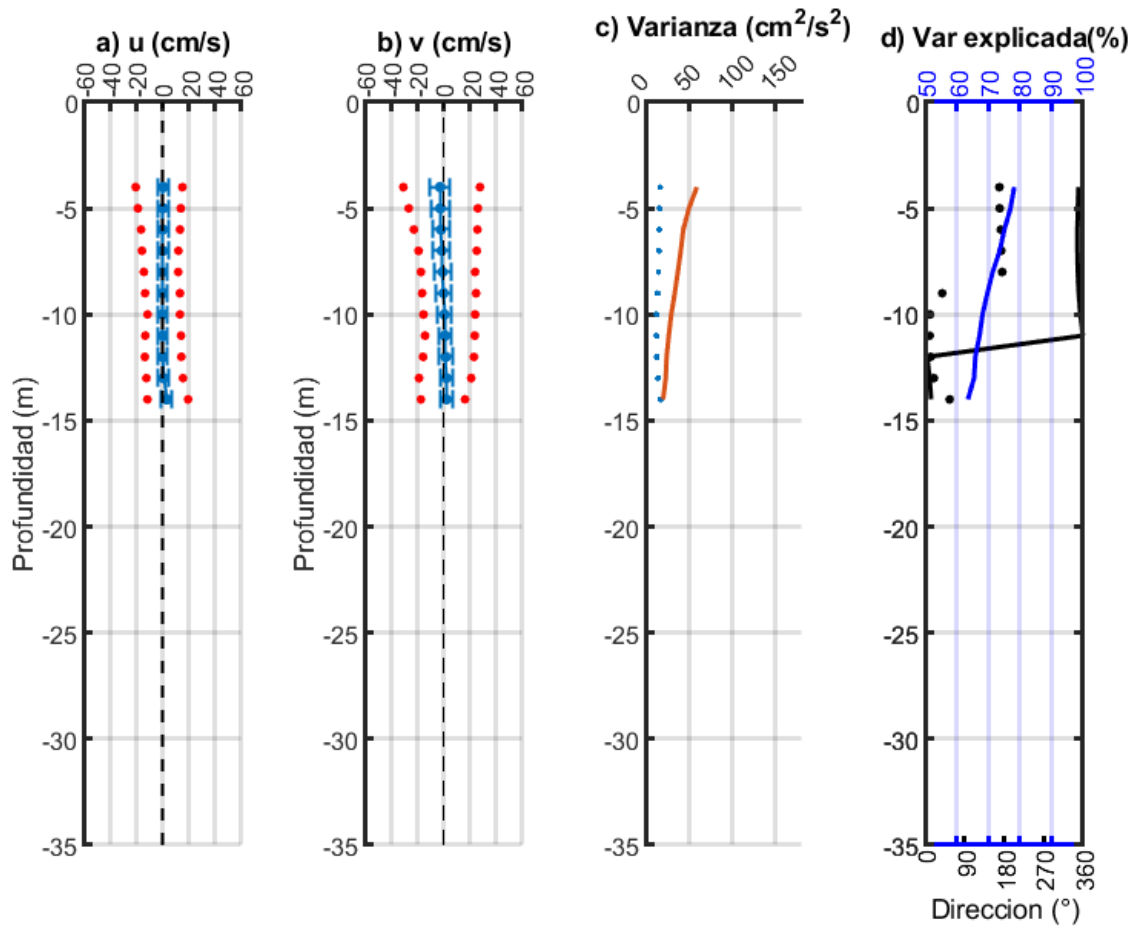


Figura 6: Estructura vertical promedio de las componentes ortogonales de corriente total. ab) Promedio y desviación estándar zonal (u) y meridional (v) (en azul), respectivamente. Valores máximos y mínimos en a y b en rojo. c) Varianza en las componentes u (puntos) y v (línea). d) Eje inferior: Dirección del flujo promedio (puntos negros). Eje superior: Porcentaje de varianza explicada (línea azul) y orientación (línea negra) del eje de máxima varianza. ADCP Talcahuano.

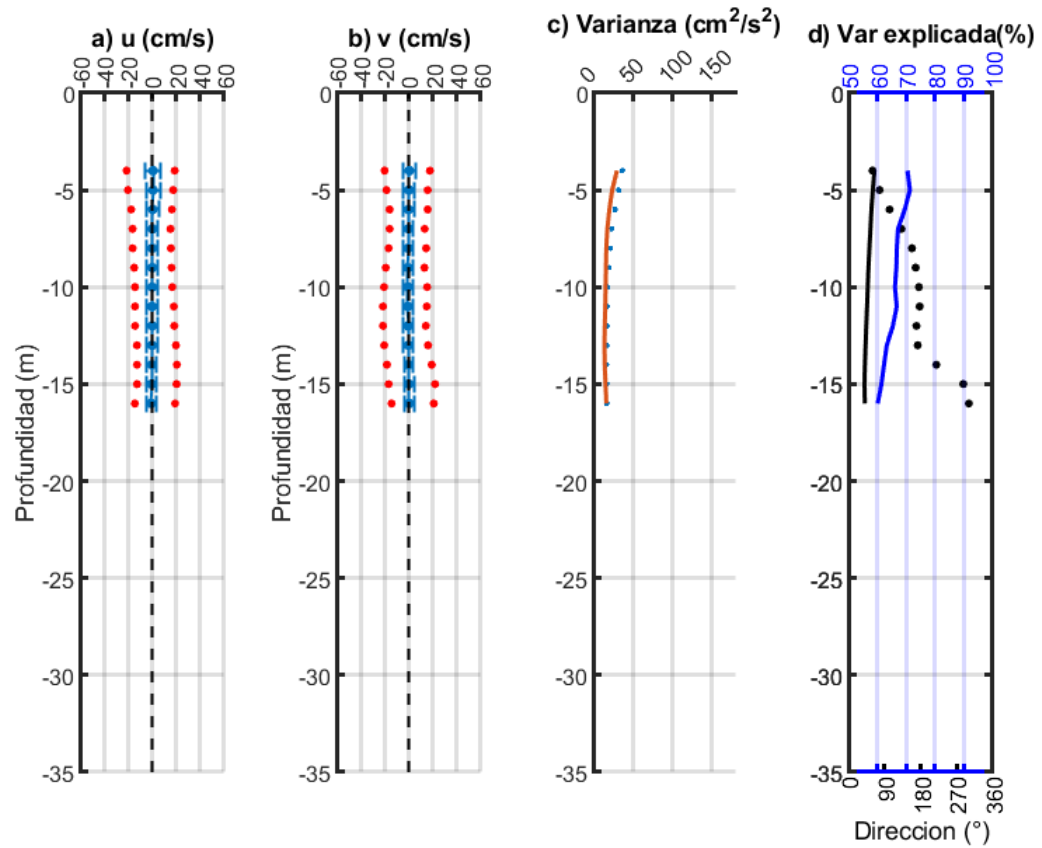


Figura 7: Estructura vertical promedio de las componentes ortogonales de corriente total. ab) Promedio y desviación estándar zonal (u) y meridional (v) (en azul), respectivamente. Valores máximos y mínimos en a y b en rojo. c) Varianza en las componentes u (puntos) y v (línea). d) Eje inferior: Dirección del flujo promedio (puntos negros). Eje superior: Porcentaje de varianza explicada (línea azul) y orientación (línea negra) del eje de máxima varianza. ADCP Penco.

La componente v del viento, mostró fluctuaciones hacia el sur y el norte con amplitudes máximas de aproximadamente -20 a 10 m/s (Fig. 8a, línea negra), se correlacionó inversamente con la anomalía del nivel del mar sin constituyentes armónicos principales y restado el efecto de barómetro invertido, que presentó variaciones de hasta ± 20 cm (Fig. 8a, línea azul). El coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables fue de 0.5 ($p < 0,001$) y una correlación cruzada máxima de 0.4 con un desfase de + 63 horas, indicando una correlación negativa entre ambas variables) (Tabla 7a). Con viento desde el norte (valores negativos), el nivel del mar en la cabecera de la bahía (puerto de Talcahuano) tendió a aumentar por acumulación de agua dentro de la bahía.

Además, durante los eventos de viento norte, la boca de la bahía (sector Tomé) tendió a generar una doble capa de circulación, con corrientes superficiales hacia dentro de la bahía y corrientes de fondo de salida (Fig. 8b). En Talcahuano (Fig. 8c) y Penco (Fig. 8d) la velocidad disminuyó su intensidad y en ambos casos tendió a responder como una sola capa de circulación. El flujo hacia el sur en Tomé provocó un aumento en el nivel del mar residual en la cabecera (Tabla 7c). Durante condiciones de viento sur la corriente se debilitó, pero en Tomé mantuvo la estructura de dos capas. Incluso en algunas instancias mostró 3 capas (entrada por superficie y fondo, y salida por media agua) como es el caso entre el 12 y 15 de julio (Fig. 8b).

En Tomé, las temperaturas fluctuaron entre $\sim 12.5^{\circ}\text{C}$ y $\sim 13.5^{\circ}\text{C}$ (Fig. 8e, línea negra). En Talcahuano, las temperaturas oscilaron entre $\sim 12.0^{\circ}\text{C}$ y $\sim 13.5^{\circ}\text{C}$ (Fig. 8e, línea roja). En Penco, vario entre ~ 11.5 y ~ 13.5 (Fig. 8e, línea verde).

Los análisis de correlaciones entre la componente v del viento y la ANM mostraron una relación negativa, con un coeficiente de Pearson de -0.5 ($p < 0.001$) y un desfase de 63 horas (Tabla 7a). Entre la componente v del viento y la componente v de la corriente en Tomé, se observó una relación lineal negativa, con coeficientes de Pearson de -0.7 ($p < 0.001$) y un desfase de -47 horas (Tabla 7b). Por último, entre la componente v de la corriente en Tomé y la ANM se observó una correlación positiva, con coeficientes de Pearson de 0.4 ($p < 0.001$), y un desfase de -4 horas (Tabla 7c).

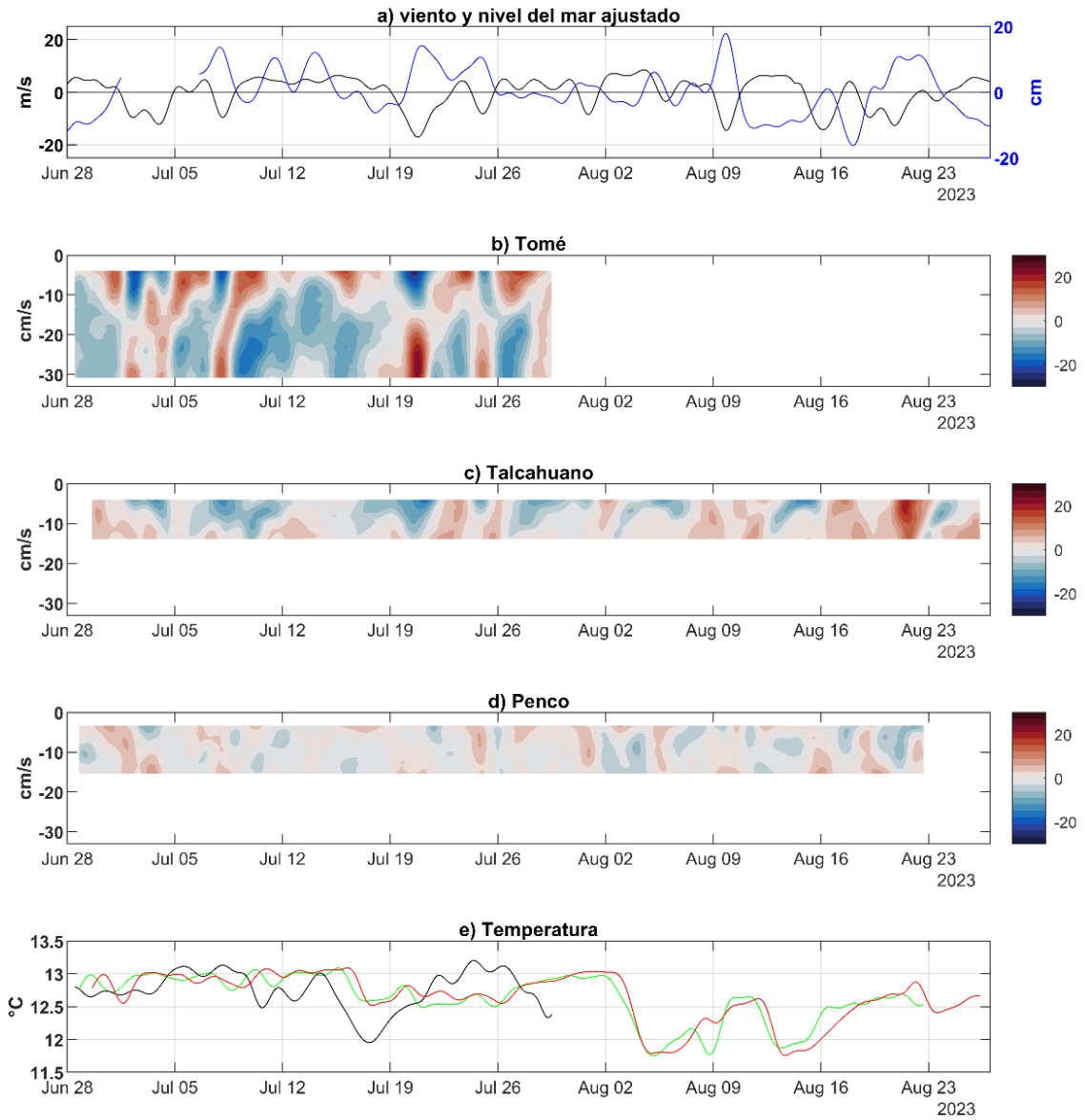


Figura 8: (a) Anomalia del nivel del mar filtrado (ANM, línea azul) y componente meridional del viento en Carriel Sur (línea negra). (b), (c) y (d) Componente meridional de la corriente filtrada en Tomé, Talcahuano y Penco, respectivamente. Valores azules: corrientes hacia el Sur. Valores rojos: corrientes hacia el norte. (e) Temperatura obtenida de los ADCPs en Tomé (negro), Talcahuano (rojo) y Penco (verde).

3.2. Diagramas de vector progresivo

En Tome, la corriente superficial (4 m) presentó un desplazamiento residual de 61.1 km con dirección noreste (114.6°), una velocidad residual de 2.3 cm/s y un parámetro de Newman de 18%. En el fondo (31 m), el desplazamiento residual fue de 55.4 km con dirección sursuroeste (240.0°), una velocidad residual de 2.1 cm/s y un parámetro de Newman de 23.4%. A nivel intermedio (17 m), se registró un desplazamiento residual de 104.4 km con dirección sureste (292.0°), una velocidad residual de 3.9 cm/s y un parámetro de Newman de 46.2% (Fig. 9a y Tabla 8).

En Penco, la corriente superficial (4 m) presentó un desplazamiento residual de 45.8 km con dirección noreste (29.8°), una velocidad residual de 1.00 cm/s y un parámetro de Newman de 13.5%. En el fondo (16 m), el desplazamiento residual fue de 42.1 km con dirección oeste-noroeste (149.6°), una velocidad residual de 0.9 cm/s y un parámetro de Newman de 17.8%. A nivel medio (10 m), se registró un desplazamiento residual de 33.6 km con dirección sureste (274.2°), una velocidad residual de 0.7 cm/s y un parámetro de Newman de 14.4% (Fig. 9c y Tabla 9).

En Talcahuano la corriente superficial (4 m) mostró un desplazamiento residual de 127.0 km con dirección predominante hacia el sureste (280.6°), una velocidad residual de 2.6 cm/s y un parámetro de Newman de 33.5%. En el fondo (14 m), el desplazamiento residual aumentó significativamente a 198.4 km con dirección noreste (33.8°), una velocidad residual de 4.0 cm/s y un parámetro de Newman de 62.7%, reflejando una alta constancia direccional. En el nivel medio (9 m), se registró un desplazamiento residual mínimo de 2.0 km, con dirección norte-noreste (50.7°), una velocidad residual de 0.04 cm/s y un parámetro de Newman de 0.7%, evidenciando una alta variabilidad direccional (Fig. 9b y Tabla 10).

Los mayores desplazamientos residuales se registraron en Tomé a 14 m, con 198.3 km, mientras que los menores correspondieron a 9 m en la misma ubicación, con apenas 2.0 km (Fig. 10 y Tabla 8, 9,10). La velocidad residual alcanzó un máximo de 4.3 cm/s en el

nivel de fondo en Tomé y un mínimo de 0.04 cm/s a 9 m en la misma ubicación. Finalmente, el parámetro de Newman, el cual refleja la constancia de la dirección, tuvo su valor más alto en las corrientes de fondo en Tomé con 62.7%, indicando alta estabilidad, mientras que el mínimo se presentó también en Tomé a 9 m, con apenas 0.7%, siendo esta capa como la más variable tanto en dirección como en intensidad (Tabla 7, 8, 9).

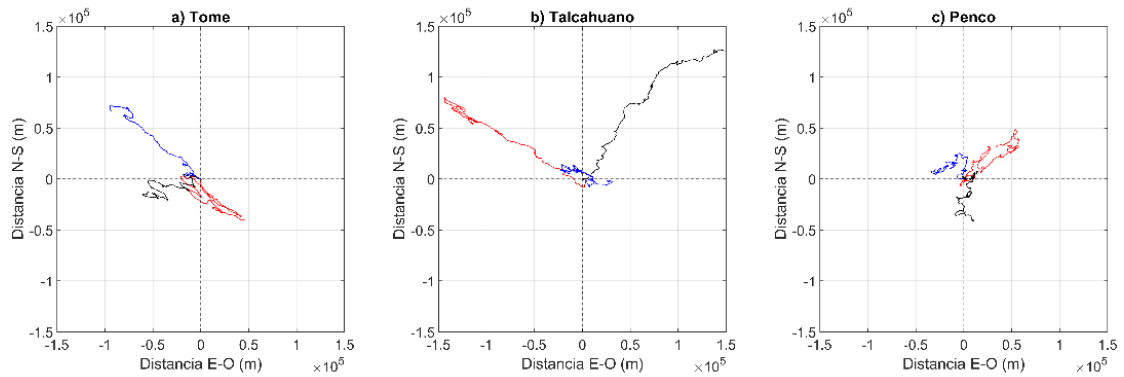


Figura 9: Diagramas de vector progresivo en metros de la corriente superficial (línea roja), de fondo (línea negra) y media (línea azul) en a) Tomé, b) Talcahuano y c) Penco.

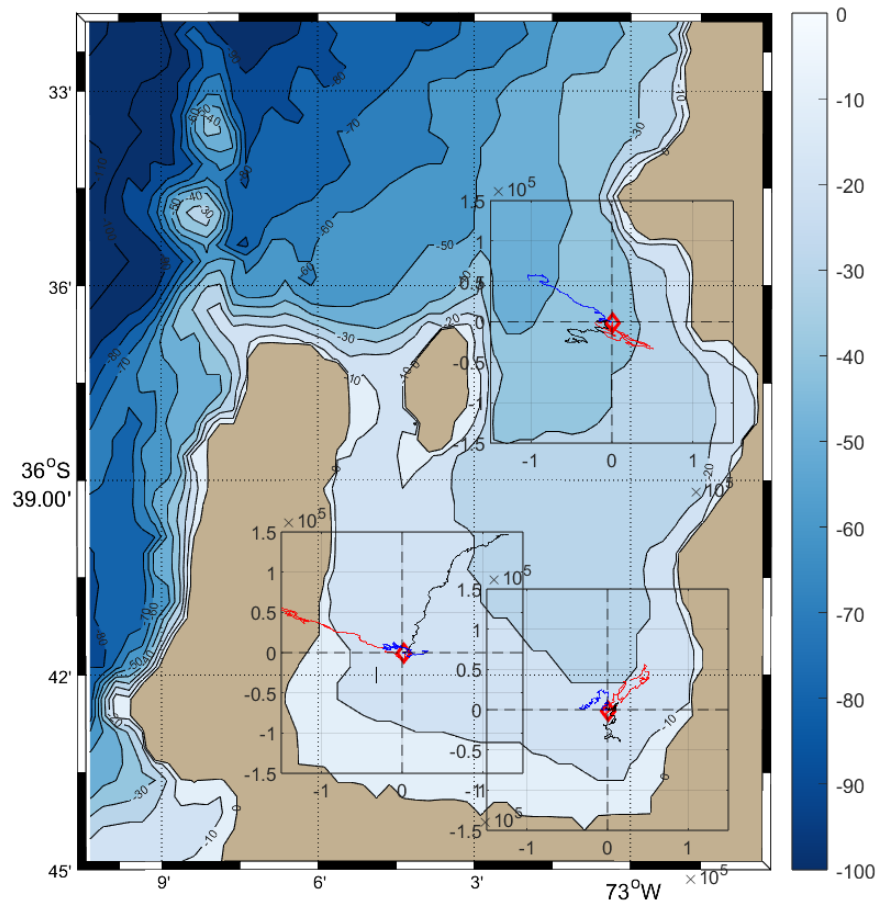


Figura 10: Diagrama de vector progresivo del promedio horario de las componentes u y v de la corriente superficial (línea roja), media (línea azul) y de fondo (línea negra) para Tomé (diagrama superior derecho), Talcahuano (diagrama inferior izquierdo) y Penco (diagrama inferior derecho).

3.3. Funciones ortogonales empíricas: Estructura vertical de la corriente

Los análisis EOF de la estructura vertical mostraron que el primer modo vertical fluctuó entre Tomé (48,8%), Talcahuano (44,6%), y Penco (37,0%) (Fig. 11). En Tomé, se encontró una estructura cuasi-baroclínica, con inversiones en los valores de ambas componentes a medida que aumentó la profundidad. Mientras que en Penco y Talcahuano se comportó como una sola capa en donde la componente v de la corriente conservó el mismo signo en la columna de agua.

El segundo modo vertical (no mostrado) explicó el 21.6% para Tomé, 20.6% para Penco y 20.4% para Talcahuano. El conjunto de los primeros tres modos para los tres anclajes explicó sobre el 72% de la varianza.

El primer modo vertical de Tomé presentó la mayor relación con la componente v del viento (Figs. 12a y 13). El coeficiente de correlación de Pearson (r) fue de 0,8 ($p < 0,001$), la correlación cruzada máxima mostró un valor de 0,8, con un desfase de +2 horas para el primer modo respecto de la componente v del viento (Tabla 11a). En Talcahuano, el coeficiente de correlación de Pearson disminuyó a 0,4 ($p < 0,001$), la correlación cruzada máxima fue de 0,4, con un desfase de +1 hora (Fig. 12b y Tabla 11b). En Penco, respecto al primer modo obtuvo valores que no alcanzaron significancia (Fig. 12c y Tabla 11c), sin embargo se identificó una asociación entre el segundo modo y la componente v del viento con valores de coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0,6 ($p < 0,001$) y una correlación cruzada máxima de 0,7 se registró con un desfase -6 horas para el modo respecto de la componente v del viento (Tabla 11d).

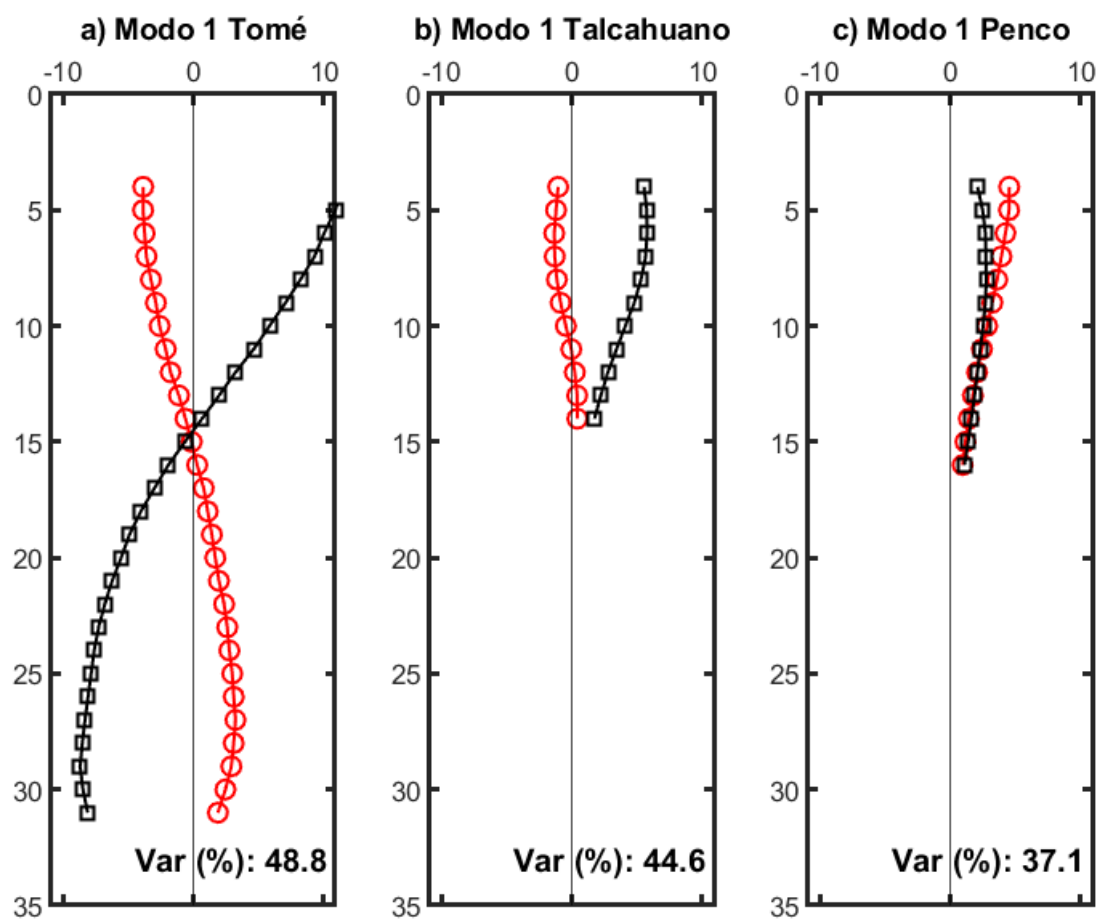


Figura 11: Estructura vertical de las amplitudes de las componentes ortogonales u (rojo) y v (negro) del primer modo EOF calculado por separado para cada localidad. a) Tomé. b) Talcahuano. c) Penco.

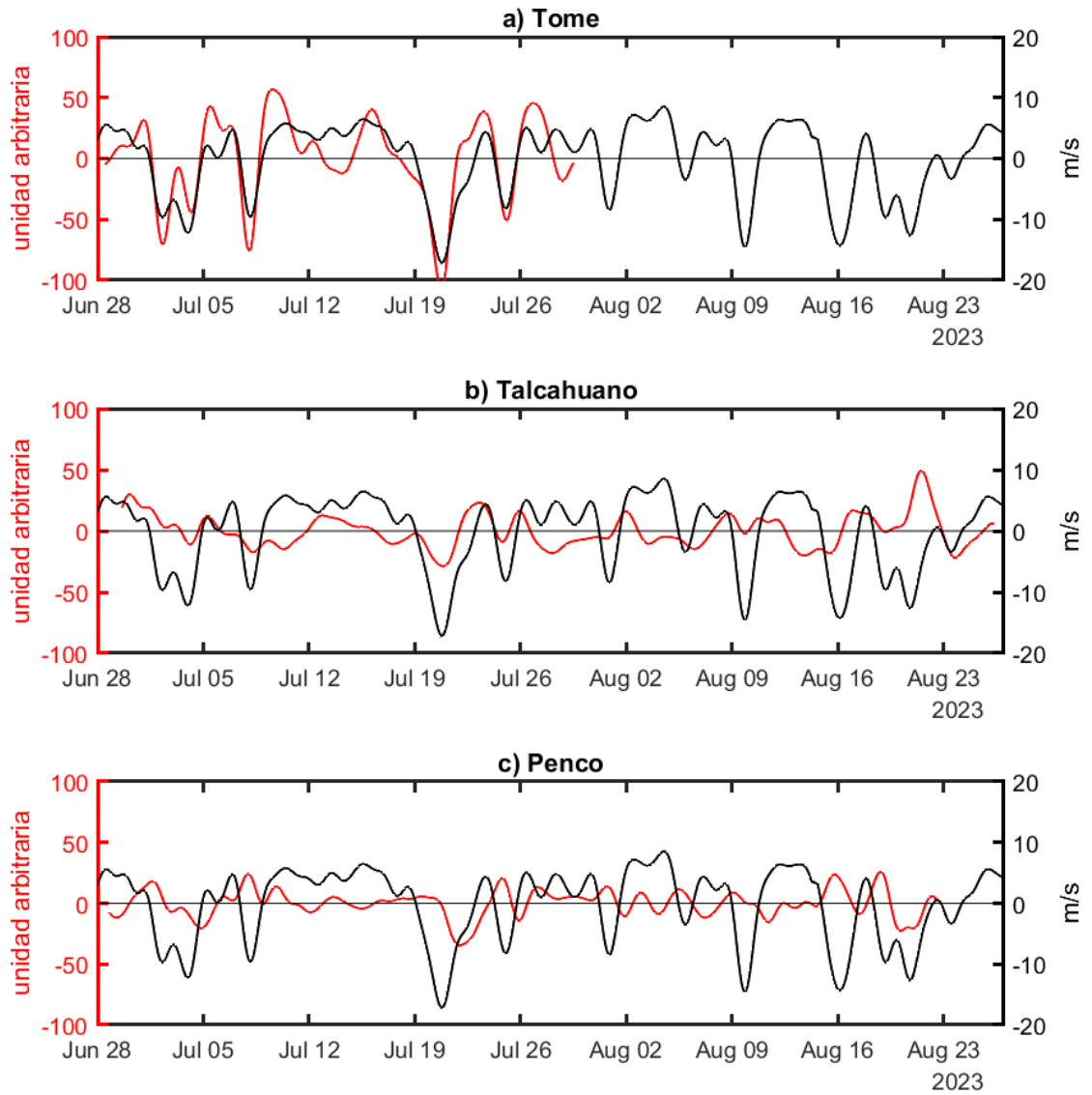


Figura 12: Series de tiempo (en rojo) del primer modo EOF vertical para las localidades de: (a) Tomé, (b) Talcahuano y (c) Penco. En cada gráfico se ha agregado la componente meridional del viento filtrada (filtro de 40 horas) medido en Carriel Sur.

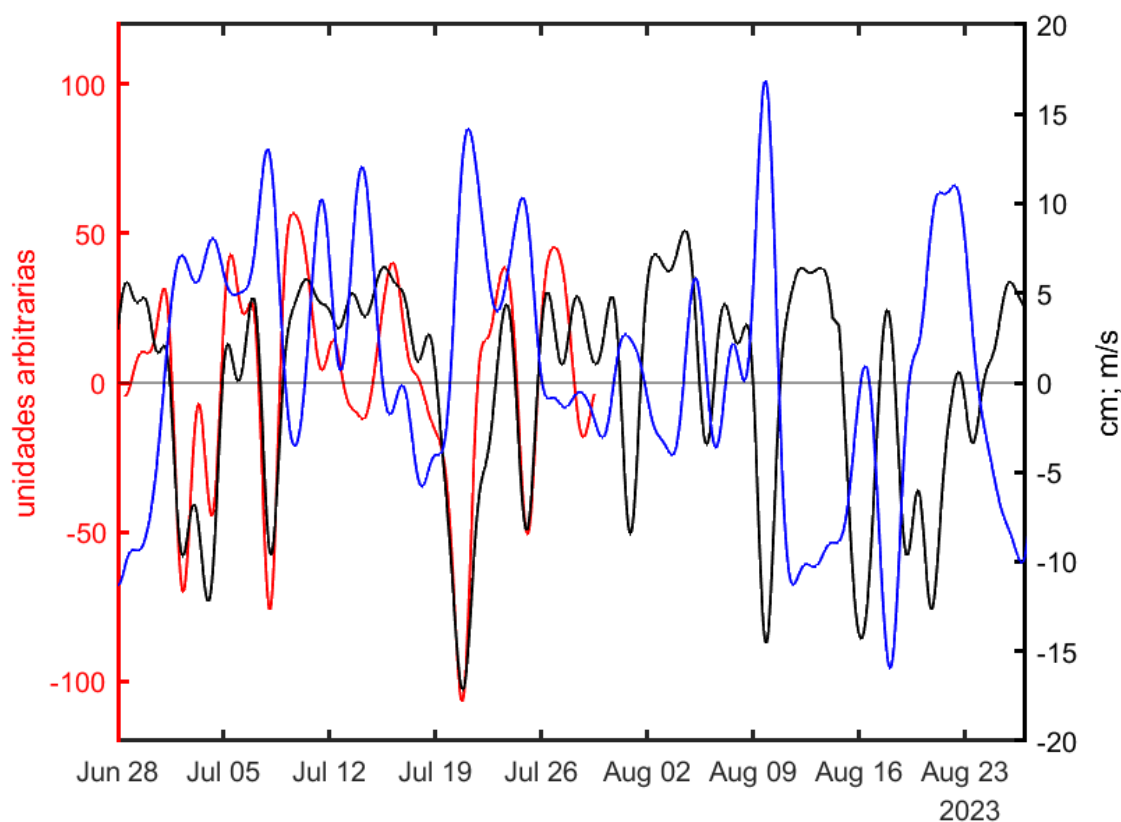


Figura 13: Amplitud del primer modo EOF en Tomé (48.8%) en línea roja. Nivel del mar residual en línea azul y componente v del viento en línea negra.

3.4. Funciones ortogonales empíricas utilizando los tres anclajes combinados.

En esta sección se realizó un análisis EOF de la corriente total usando los tres anclajes (Tomé, Talcahuano y Penco) en forma conjunta en el lapso comprendido entre el 29 de junio y el 29 de julio de 2023. Para este caso, los primeros tres modos explicaron el 64.4% de la variabilidad total de las corrientes en la BC (modo 1: 39.8%, modo 2: 16.9%, modo 3: 7.6%) (Fig. 14). Se determinó la relación del modo 1 con la componente v del viento a través de cálculos de coeficientes de correlación de Pearson y correlación cruzada. El coeficiente de Pearson entregó un valor de 0.8 (valor $p < 0,001$), lo que indica una alta relación entre ambas variables. Además, la correlación cruzada normalizada máxima fue de 0.8 con un desfase de -2 horas del modo 1 respecto a la componente v del viento (Tabla 11e), mostrando un retardo en la respuesta de la corriente al viento y demostrando la gran influencia del viento sobre las corrientes de la BC.

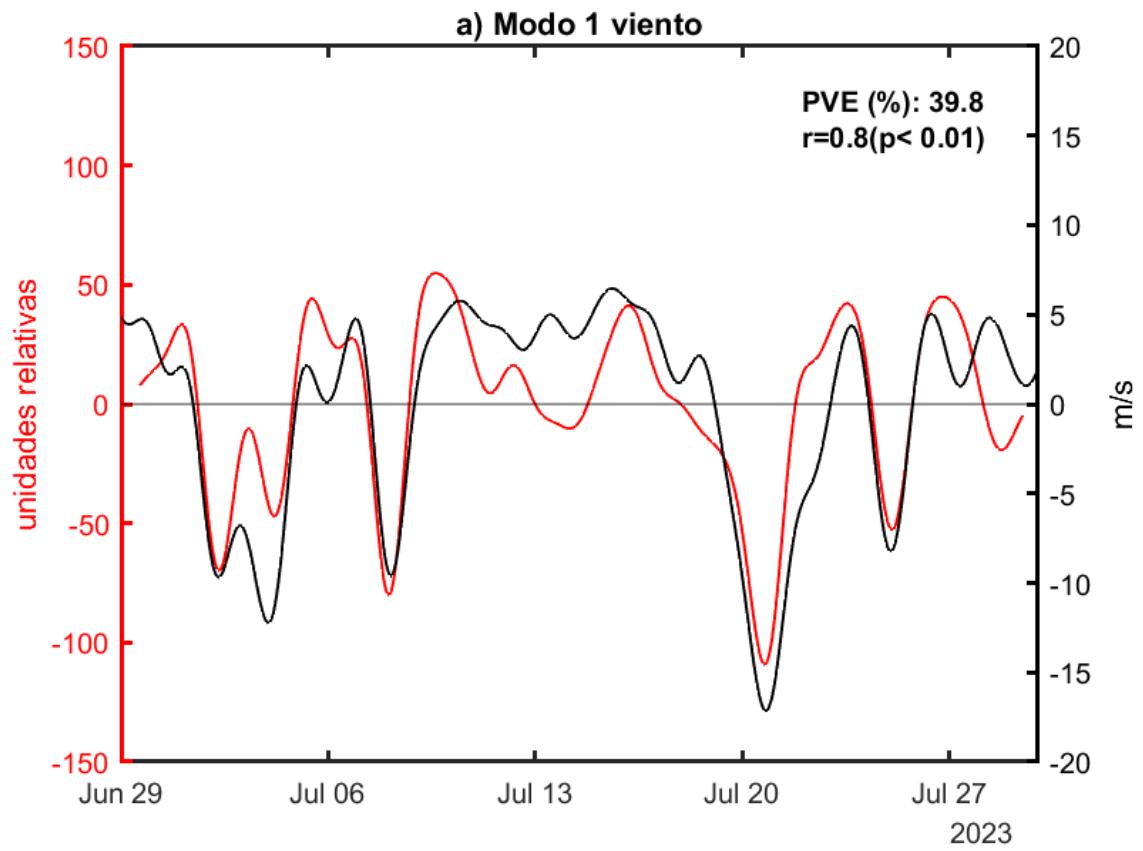


Figura 14: Serie de tiempo de la amplitud del modo empírico total (en rojo) y la velocidad del viento en la componente meridional (en negro). Los números en la esquina superior derecha corresponden al porcentaje de varianza explicado (PVE) por el primer modo empírico total y el coeficiente de correlación de Pearson (r) y su valor de significancia entre paréntesis (p)

3.5. Hidrografía

La salinidad superficial (primeros 5 m) mostró una importante dilución (K_f) con un porcentaje cercano al 80% el 28 de junio, y al 60%, el día 29 de junio (Figs. 15 y 16), en respuesta a un evento de precipitación sostenido por tres días con caudales acumulados superiores a 30 mm (Fig. 17). En estos eventos se observó una fluctuación térmica de $\sim 1^\circ\text{C}$ entre 12°C y 13°C y una variación salina que osciló desde 26 hasta 34 psu (~ 8 unidades) (Fig. 18). Estos datos coinciden con lo observado en las imágenes satelitales del 27 de junio de 2023, obtenida del Sentinel-2 (Fig. 19), la cual muestra en el sector oceánico colores azules que muestran aguas profundas y menos diluidas, de origen oceánico (Fig. 19a). Los colores más verdes/pardos en el borde costero y al interior de BC están asociados a los efluentes terrestres, aguas boyantes y de alta turbidez (Fig. 19b), que aportan agua con alto grado de dilución y de turbidez (Fig. 19), resultado rápido de las tormentas.

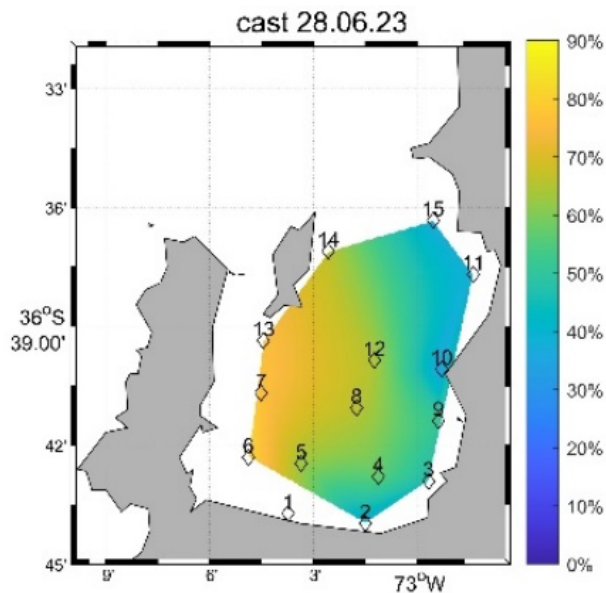


Figura 15: Distribución horizontal del porcentaje de dilución (K_f) en la capa superficial (0–5 m) en bahía Concepción el 28 de junio de 2023.

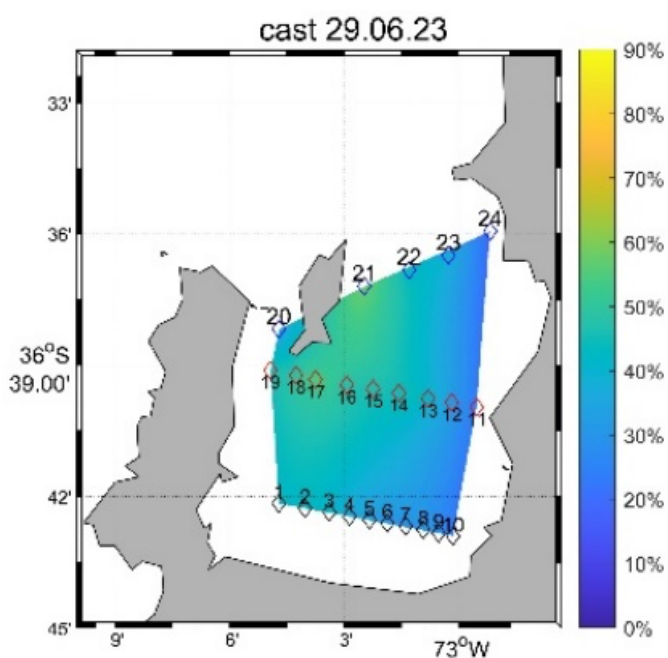


Figura 16. Distribución horizontal del porcentaje de dilución (K_f) en la capa superficial (0–5 m) de la bahía de Concepción el 29 de junio de 2023.

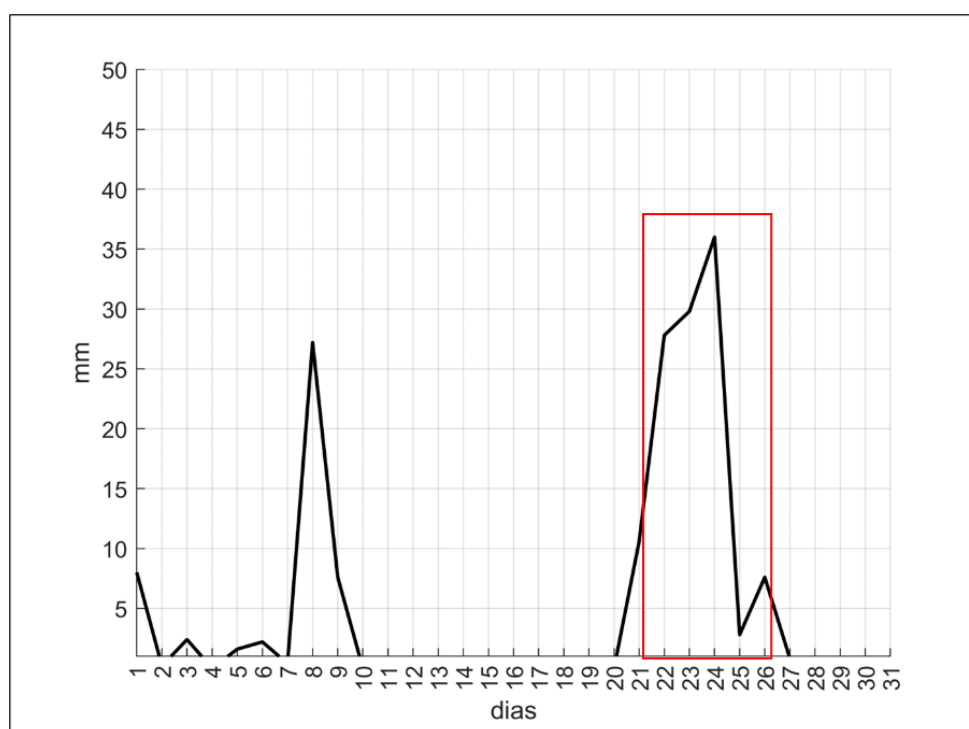


Figura 17. Precipitación mensual de Junio en mm de agua caída en estación Carriel Sur, Concepción. En cuadro rojo, evento previo al muestreo hidrográfico del 28 de junio.

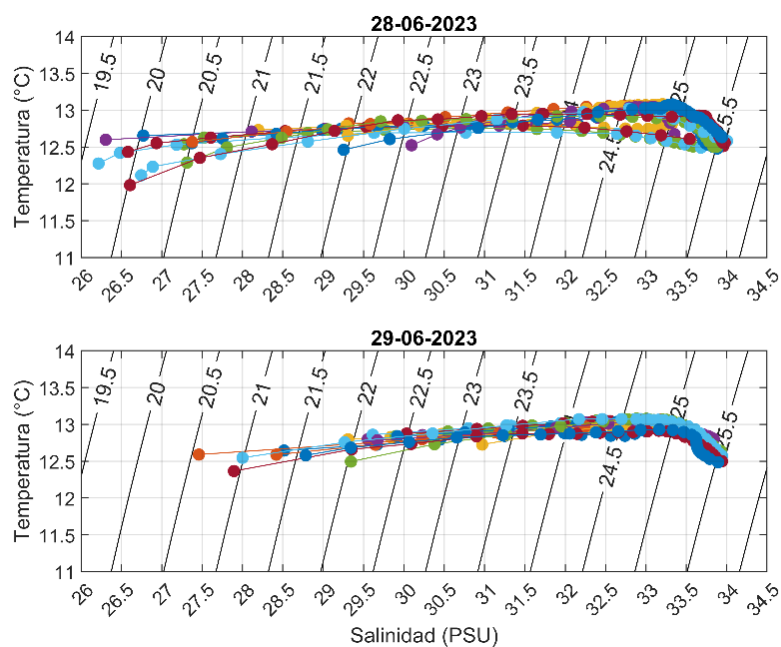


Figura 18. Diagrama TS para los días 28 y 29 de junio de 2023 en bahía Concepción. Los colores corresponden a cada lance realizado.

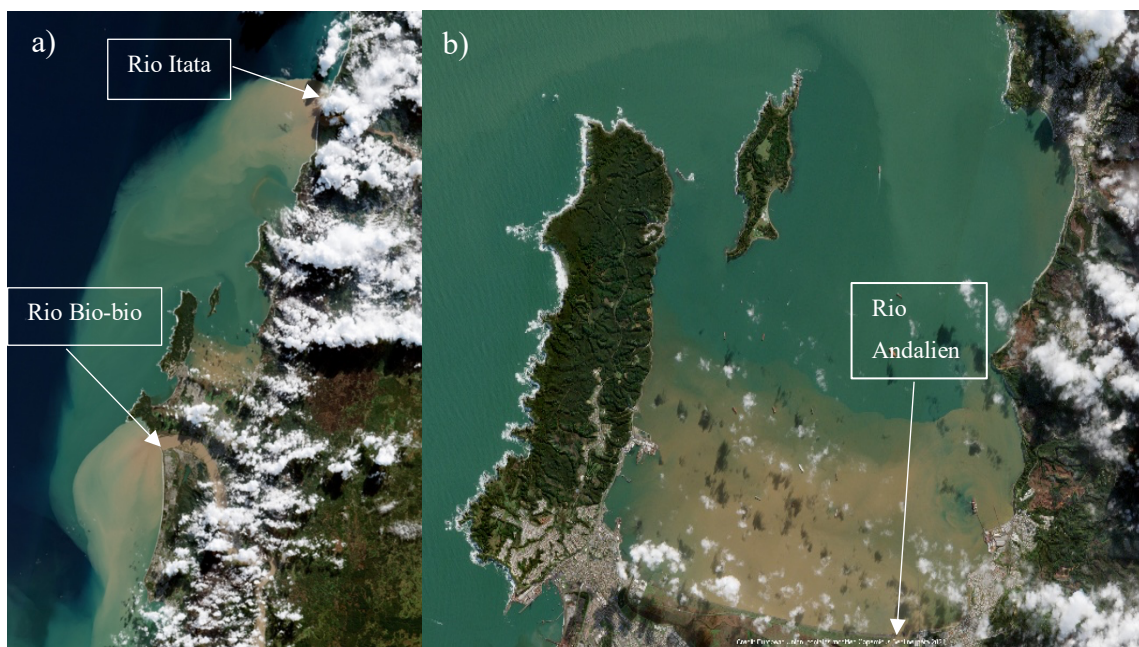


Figura 19: Imagen del día 27 de junio del 2013 del satélite Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA). (a) corresponde a la imagen original y (b) corresponde a la ampliación para la bahía de Concepción.

4. Discusión

Investigaciones sobre la hidrodinámica de BC son relativamente escasos. Los primeros estudios provienen de fines de los 70 hasta la década del 90 (Ahumada Bermúdez & Chuecas Muñoz, 1979; Ahumada et al., 1983; Arcos & Wilson, 1984; L. R. Castro et al., 1991; Hernández & Sergio, 1995; Mesías & Salinas M., 1986; M. Sobarzo et al, 1997). Estudios más recientes se enfocaron en las áreas oceánicas adyacentes y no solo en los sistemas costeros (González-Saldía et al., 2019; Gómez et al., 2023; Bustos-Espinoza et al., 2024).

Estudios anteriores que han utilizado ADCP (Valle-Levinson et al., 2004; Ramos & Pizarro, 2005) lo han hecho con un muestreo de ADCP remolcado. En el caso de Valle-Levinson et al., 2004, el muestreo se realizó exclusivamente en la entrada de la bahía por un periodo de 25 h en enero del 2002, otorgando una imagen acotada (Fig. 20). La metodología ocupada por Ramos & Pizarro (2005), incluyó 3 transectos y un periodo de muestreo más amplio de 7 días, y alrededor de 15 transectos en diciembre del año 2004 (Fig. 21). Ambos correspondientes al verano austral.

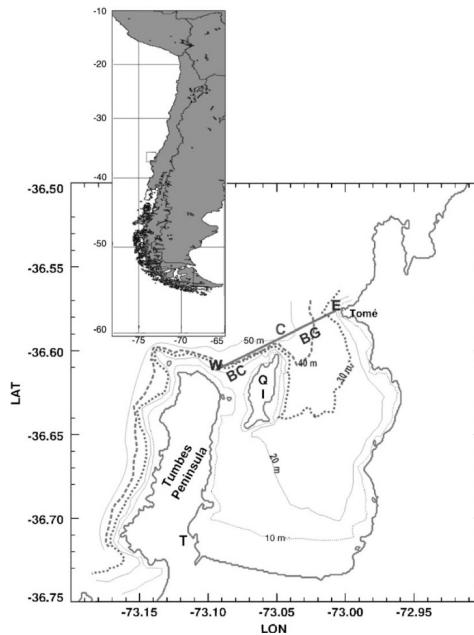


Figura 20: Mapa del área de estudio en Chile central mostrando el transecto de muestreo ADCP y las estaciones CTD W, C, y E, con batimetría aproximada (Valle-Levinson et al., 2004).

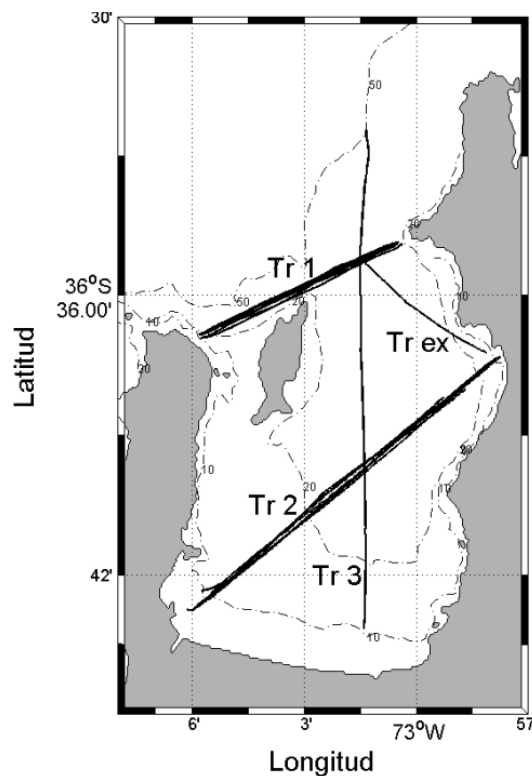


Figura 21: Ubicación de los transectos realizados con ADCP montado en la embarcación durante la campaña de *Ramos & Pizarro, 2005*.

Estudios iniciales como el de Ahumada(1989), subrayaron que durante el invierno se producen cambios significativos en la salinidad, temperatura y circulación, los cuales afectan los sedimentos y los procesos biológicos de la bahía, y describió una circulación estuarina para el fin de mayo hasta el comienzo de agosto (Ahumada & Chuecas, 1979). Lo que queda evidenciado con las fracciones de dilución (Figs. 15 y 16) y las imágenes satelitales (Fig. 19). Factores que configuran colectivamente la hidrodinámica, la ecología y la productividad de las pesquerías de esta bahía (Ahumada et al., 1983; Castro et al., 1991).

Antes de 1990 se habían realizado estudios sobre la hidrodinámica de la BC (Ahumada & Chuecas, 1979; Arcos & Wilson, 1984; Mesías & Salinas, 1986; Ahumada, 1989). Los estudios previos, se basaron en metodologías menos precisas debido a las limitaciones

tecnológicas de la época. Ejemplo correntómetro de gelatina ocupado por Mesías & Salinas, 1986. Sin embargo, estas mediciones directas permitieron estimar que la circulación tiene un componente importante de marea (Mesías & Salinas 1986). Lo cual se condice con los resultados presentados de correlación la serie de tiempo del modo 2 de la función EOF vertical, que logro baja significancia (Tabla 11i).

Arcos & Wilson (1984) enfatizaron la influencia del viento sobre los campos de densidad, aplicando la ecuación del viento térmico, sugirieron que bajo condiciones de surgencia costera (viento del suroeste), se forma una circulación superficial en sentido antihorario con un flujo superficial hacia afuera a través de Boca Grande. Para condiciones de viento del norte (convergencia), el campo de densidad en la boca de la bahía sugiere un patrón de circulación de tres capas, con un flujo superficial y de fondo hacia adentro y un flujo intermedio hacia afuera. Lo cual no se pudo comprobar debido a que los resultados del presente estudio para condiciones de viento del norte (convergencia), mostraron que la corriente reacciona a estos vientos formando dos capas ingresando el agua (hacia la cabecera) por la superficie y retirándose por el fondo (Fig. 8b). Esto fue consistente con los resultados publicados por Ahumada et al., 1983 y Ahumada, 1989. Estos autores también encontraron una estructura vertical de dos capas en la boca de la bahía y demostraron cómo las descargas de agua dulce también influyen en su hidrodinámica.

Posteriormente, Arcos et al. (1995) estimaron la variabilidad estacional en la estructura de densidad y el intercambio de agua entre la bahía y la plataforma continental adyacente. Describieron una estructura de dos y tres capas en la boca de la bahía, especulando que el intercambio de agua con el océano abierto dependía del contraste de densidad entre la bahía y el mar adyacente. Se propuso una estructura de dos capas cuando la diferencia de densidad entre la bahía y el océano adyacente era baja, mientras que se asumió una estructura de tres capas cuando la diferencia de densidad era alta. En el estudio de Arcos et al. (1995), se presentaron perfiles de corrientes verticales similares entre el invierno y el verano (flujo superficial hacia el interior de BC y un flujo de fondo evacuando la BC). En contraste al patrón postulado por Arcos & Wilson (1984), que menciona un proceso inverso (evacuación por superficie e ingreso por fondo). Posteriormente Sobarzo et al.,

(1997) apoya la conclusión de Arcos sugiriendo que el sistema de dos capas en la boca de esta bahía corresponde a una reacción compensatoria de la capa de fondo al forzamiento del viento en la capa superficial. El flujo compensatorio de fondo del volumen interno responde a la acumulación de agua en la cabecera de la bahía, producida por los vientos del norte que impulsan el flujo superficial hacia adentro. Esto se aproxima de buena forma a los resultados registrados en la Fig. 8a. donde hay una relación entre el viento v negativo (del norte, hacia el sur) que mueve la corriente y apila agua en la cabecera de la bahía. De manera que los vientos del norte transportan agua superficial hacia la bahía, causando un flujo de fondo compensatorio hacia afuera (Fig. 8b).

El análisis de las estructuras verticales de las corrientes en Tomé, Talcahuano y Penco demostró la influencia del viento en la circulación de la bahía de Concepción (Fig. 12). En Tomé (Fig. 12a), el primer modo EOF explicó el 48.8% de la varianza, el viento norte-sur (componente v) se correlacionó significativamente con el primer modo EOF ($r = 0.8$, $p < 0.001$), con un desfase de +2 horas (Tabla 11a). Este comportamiento evidencia una respuesta rápida al forzamiento del viento, consistente con estudios previos que destacan el rol del viento en la generación de flujos superficiales hacia la cabecera y flujos compensatorios de fondo hacia el océano (M. Sobarzo et al., 1997; Valle-Levinson et al., 2004).

Por el contrario, en Talcahuano y Penco el primer modo presentó valores más bajos (44.6% y 37.0%) y la correlación entre el viento y las corrientes disminuyeron ($r = 0.4$ y $r = 0.1$, respectivamente) (Tabla 11 cd). Esto mostró que las fluctuaciones en la corriente tienen menos dependencia de la componente v del viento, en comparación con Tomé. En Penco, el segundo modo EOF (20.6%) mostró correlaciones más altas con el viento ($r = 0.6$, $p < 0.001$) (Tabla 11d). Esto demostró que el viento tiene un rol secundario en este sector.

Respecto a los datos de dispersión, se evidenciaron diferencias en el comportamiento de las corrientes. Tomé presentó la mayor elipticidad, con flujos opuestos en las capas superficiales y de fondo (NE–SO) y velocidades de hasta 60 cm/s. Talcahuano mostró flujos similares, pero con magnitudes reducidas (≤ 30 cm/s), mientras que en Penco la

dispersión fue menos marcada (≤ 25 cm/s). Las reducciones en la magnitud de Talcahuano y Penco podrían, deberse a la batimetría y las variaciones en el porcentaje de variabilidad del viento en la corriente que, por ejemplo en Penco, se relacionó con el segundo modo vertical.

5. Conclusiones

Este estudio ha permitido agregar nuevos antecedentes científicos en el modo de entender la relación entre las tormentas de viento norte invernales con los patrones de circulación dentro de la BC. Aunque algunos aspectos de esta relación ya habían sido descritos en estudios previos, esta nueva investigación ha permitido una mejor cuantificación de los aspectos físicos involucrados. Los resultados coinciden con estudios previos como los de Sobarzo et al. (1997) y Valle-Levinson et al. (2004). Confirmando la relación de los eventos de viento norte con las corrientes sur y el apilamiento de agua en BC y que en la boca Grande la corriente forma una capa de entrada por superficie y un flujo de salida por el fondo durante eventos de viento norte.

Este trabajo ha permitido identificar por primera vez los modos empíricos principales que dominan las corrientes en BC durante el invierno. Se logró cuantificar las velocidades y direcciones de las corrientes para puntos estratégicos, como la boca Grande de BC (Tomé) y los sectores adyacentes a Talcahuano y Penco (Fig. 2). Se encontró que el primer modo total, explicó un 39.8% de la variabilidad en los tres anclajes (Fig. 14). La serie de tiempo de este modo se relacionó con el viento de forma positiva (coeficiente de Pearson igual a 0.8, valor $p < 0,001$), la correlación cruzada normalizada máxima fue de 0.8 con un desfase de -2 horas del modo 1 respecto a la componente v del viento (Tabla 11e). También se encontró que el primer modo vertical en Tomé tuvo una correlación fuerte con el viento de coeficiente de Pearson 0.8 ($p < 0.001$) (Tabla 11a), no así Talcahuano (coeficiente de Pearson 0.4, $p < 0.001$) (Tabla 11b) y Penco (coeficiente de Pearson 0.6, $p < 0.001$) (Tabla 11c).

Sin embargo, la ausencia de sensores en áreas como la boca Chica, dificultan una evaluación más precisa de la contribución de esta área a la circulación general. Se recomienda la instalación de anclajes en esta zona estratégica para abordar esta carencia y mejorar los modelos de circulación. Sería fundamental ampliar el espacio muestral del estudio para abarcar todas las estaciones del año. Además, se sugiere realizar análisis específicos durante eventos de tormentas, tanto hidrográficos como hidrodinámicos, los que ayudarían a entender cómo estos afectan el comportamiento de la bahía. Finalmente, este tipo de estudios podrían aportar antecedentes en la comprensión del transporte y retención de contaminantes dentro de BC. Esto podría ayudar en la toma de medidas informadas y podría contribuir al desarrollo de mejores políticas públicas en la administración ecosistémica de BC.

La hidrografía fue capaz de cuantificar la respuesta de la salinidad a una tormenta a través de la fracción de agua dulce posterior a una tormenta.

Las principales conclusiones del trabajo son:

1. En Tomé se identificó una estructura de dos capas durante viento norte, la corriente superficial fluye hacia la cabecera, mientras que el flujo compensatorio evacua agua de la bahía por el fondo
2. Se encontró una correlación entre la componente meridional del viento y el primer modo empírico vertical en Tomé, con un desfase temporal de 2 horas. Una correlación entre la componente meridional del viento y el primer modo empírico total ($r = 0,8$, $p < 0,001$).
3. Los vientos invernales explican el 39.8% de la variabilidad total de las corrientes en la bahía de Concepción., mientras que los vientos invernales explican el 48.8% de la variabilidad en Tomé, el 44.6% en Talcahuano, el 37.1% en Penco.
4. La hidrografía de la bahía mostró alta sensibilidad a las tormentas invernales, donde las lluvias y los aportes continentales de agua dulce diluyen la capa superficial hasta en un 80% respecto a una salinidad de referencia de 34.
5. Las tormentas invernales representan una forma eficiente de renovación de las aguas dentro de la bahía de Concepción.

6. Bibliografía

- Sea-Bird Scientific. (2017). Seasave V7: CTD real-time data acquisition software for Windows. Sea-Bird Scientific. <https://www.seabird.com/asset-get.download.jsa?id=55174002257>
- Instituto de Fomento Pesquero. (2024). Informe trimestral de gestión 08: Actividades octubre a diciembre 2023. Transferencia monitoreo sardina común y anchoveta asociado a la flota pesquera artesanal. Código BIP 40035256-0. Heraldo Álvarez Pérez & Juan Olivares Cayul (Eds.). Sede Talcahuano.
- Arcos, D. F., Nuñez, S., Urrutia, A., & Chuecas, L. (1995). Shelf-embayment water exchange and residence times within Concepcion Bay, Chile. *Gayana Oceanologia*, 3(2), 75-87.
- Sobarzo, M. Caracterización de la circulación de Bahía Concepción, Chile: un análisis temporal en el dominio de la frecuencia. Diss. Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía, 1993.
- Ahumada Bermúdez, R., & Chuecas Muñoz, L. (1979). ALGUNAS CARACTERISTICAS HIDROGRAFICAS DE LA BAHIA DE CONCEPCION (36°40'S; 73°02'W) Y AREAS ADYACENTES. CHILE. *Gayana Miscelanea*, 8(1), 3–56. <https://doi.org/10.29393/gm8-1acrl20001>
- Ahumada, R. (1989). PRODUCTION AND FATE OF PHYTOPLANKTON BIOMASS IN AN EMBAYMENTS SYSTEM AT CENTRAL CHILE: AN HYPOTHESIS. En *Biología Pesquera* (Vol. 18).
- Ahumada, R., Rudolph, A., & Martinez, victorino. (1983). *Circulation and Fertility of Waters in Conception Bay*'.
- Archetti, R., & Mancini, M. L. (2013). Freshwater discharge by estuarine transition flow near cesenatico (Italy). *Journal of Coastal Research*, 65, 13–18. <https://doi.org/10.2112/si65-003.1>
- Arcos, D. F., & Wilson, R. E. (1984). Upwelling and the Distribution of Chlorophyll a within the Bay of Concepción, Chile. En *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (Vol. 18).

- Bakun, A., Black, B. A., Bograd, S. J., García-Reyes, M., Miller, A. J., Rykaczewski, R. R., & Sydeman, W. J. (2015). Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems. En *Current Climate Change Reports* (Vol. 1, Número 2, pp. 85–93). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0008-4>
- Bustos-Espinoza, L., Torres-Ramírez, P., Figueroa, S., González, P. S., Pavez, M. A., Jerez, R., Saldías, G. S., Espinoza, C., & Galán, A. (2024). Biogeochemical Response of the Water Column of Concepción Bay, Chile, to a New Regime of Atmospheric and Oceanographic Variability. *Geosciences*, 14(5), 125. <https://doi.org/10.3390/geosciences14050125>
- Cáceres-Euse, A., Morales-Márquez, V., & Molcard, A. (2023). On the Observed Wind-Driven Circulation Response in Small Semienclosed Bays. *Journal of Physical Oceanography*, 53(9), 2245–2261. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-22-0224.1>
- Carey, A. E., Nezat, C. A., Lyons, W. B., Kao, S., Hicks, D. M., & Owen, J. S. (2002). Trace metal fluxes to the ocean: The importance of high-standing oceanic islands. *Geophysical Research Letters*, 29(23). <https://doi.org/10.1029/2002gl015690>
- Castro, L., Quiñones, R., Arancibia, H., Figueroa, D., Roa, R., Sobarzo, M., & Retamal, M. (1997). Áreas de Desove de Anchoqueta y Sardina Común en la Zona Central. *Informe Final Proyecto Fondo de Investigación Pesquera*, 96–11.
- Castro, L. R., Bernalb, P. A., & Gonzalezb, H. E. (1991). Vertical Distribution of Copepods and the Utilization of the Chlorophyll u-rich Layer within Concepcion Bay, Chile. En *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (Vol. 32).
- Charpentier, J., Mediavilla, D., & Pizarro, O. (2012). *Modeling oxygen dynamics offshore of Concepción, Chile Modeling the seasonal cycle of the oxygen minimum zone over the continental shelf off Concepción, Chile (36.5 • S) Modeling oxygen dynamics offshore of Concepción, Chile*. <https://doi.org/10.5194/bgd-9-7227-2012>
- Contreras-Rojas, J., Mardones, P., & Sobarzo, M. (2024). Impact of Extratropical Cyclones on Coastal Circulation in a Semi-Enclosed Bay within the Humboldt Current System. *EGUsphere*, 2024, 1–25. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1822>
- Dagg, M., Benner, R., Lohrenz, S., & Lawrence, D. (2004). Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: Plume

- processes. *Continental Shelf Research*, 24(7–8), 833–858.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.02.003>
- Gilcoto, M., Largier, J. L., Barton, E. D., Piedracoba, S., Torres, R., Graña, R., Alonso-Pérez, F., Villacieros-Robineau, N., & de la Granda, F. (2017). Rapid response to coastal upwelling in a semienclosed bay. *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2388–2397. <https://doi.org/10.1002/2016GL072416>
- Gómez, V. A., Pozo, K., Clérandeau, C., Cachot, J., Montes, C., Příbylová, P., Glabán-Malagón, C., Clarke, B., Klanova, J., & Morin, B. (2023). Plastic debris, persistent organic pollutants and their toxicity impacts in coastal areas in Central Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115361>
- González-Saldía, R. R., Pino-Maureira, N. L., Muñoz, C., Soto, L., Durán, E., Barra, M. J., Gutiérrez, S., Díaz, V., & Saavedra, A. (2019). Fecal pollution source tracking and thalassogenic diseases: The temporal-spatial concordance between maximum concentrations of human mitochondrial DNA in seawater and Hepatitis A outbreaks among a coastal population. *Science of the Total Environment*, 686, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.415>
- Halldor, B., & Venegas, S. A. (1997). *A manual for EOF and SVD analyses of climate data*. <https://geog.mcgill.ca/gec3/wp-content/uploads/2009/03/Report-no.-1997-1.pdf>
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R., & Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319(5865), 948–952. <https://doi.org/10.1126/science.1149345>
- Hernández, & Sergio. (1995). SEASONAL VARIATION IN THE CONCENTRATION OF Cd, Zn AND Pb IN SUPERFICIAL SEDIMENTS OF CONCEPCION BAY, CHILE. *Biología Pesquera*, 24, 33–37.
<https://doi.org/https://doi.org/10.21703/0067-8767.1995.24.2577>
- Jickells, T. D. (1998). El Niño: North Effects in the Eastern Subarctic Pacific Ocean (Washington Sea Grant Program. En *Data Record of Oceanographic Observations*

and Explorations Fisheries nos (Vol. 356, Número 6). Fisheries Research Board.
www.sciencemag.orgSCIENCEVOL28110JULY1998

- Kundu, P. K., & Allen, J. S. (1976). SOME-THREEDIMENSIONAL-CHARACTERISTICS-OF-LOWFREQUENCY-CURRENT-FLUCTUATIONS-NEAR-THE-OREGON-COAST. *Journal of Physical Oceanography*, 6(2), 181–199. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006<0181:stdcol>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006<0181:stdcol>2.0.co;2)
- Matano, R. P., & Palma, E. D. (2010). The upstream spreading of bottom-trapped plumes. *Journal of Physical Oceanography*, 40(7), 1631–1650. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4351.1>
- Mesías, J. M., & Salinas M., S. (1986). Corrientes en la Bahía de Concepción. *Biología Pesquera*, 15, 55–62. [https://doi.org/https://doi.org/10.21703/0067-8767.1986.15.2506](https://doi.org/10.21703/0067-8767.1986.15.2506)
- Pérez-Bustamante, L., & Varela, E. (2007). CRECIMIENTO URBANO Y GLOBALIZACIÓN: TRANSFORMACIONES DEL ÁREA METROPOLITANA DE CONCEPCIÓN, CHILE, 1992-2002. *REVISTA ELECTRÓNICA DE GEOGRAFÍA Y CIENCIAS SOCIALES*, 11(251). <https://www.researchgate.net/publication/28184536>
- Ramos, M., & Pizarro, O. (2005). *DATA REPORT TRANSECTAS DE ADCP CAMPAÑA DE VERANO 2005 Bahías de Concepción y San Vicente*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15730.32960>
- Raymond, P. A., & Bauer, J. E. (2001). *Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean*. www.nature.com
- Rüther, N., Aleixo, R., Guerrero, M., Sørås, S., & Stokseth, S. (2018). Towards an establishment of a rating curve for suspended sediment transport by means of ADCP measurements. *E3S Web of Conferences*, 40. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184004024>
- Sobarzo, M., Figueroa, D., & Arcos, D. R. (1997). The influence of winds and tides in the formation of circulation layers in a bay, a case study: Concepcion Bay, Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45(6), 729–736. <https://doi.org/10.1006/ecss.1997.0233>

- Sobarzo, M., & Djurfeldt, L. (2004). Coastal upwelling process on a continental shelf limited by submarine canyons, Concepción, central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(12), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2004JC002350>
- Tapia, F. J., Largier, J. L., Castillo, M., Wieters, E. A., & Navarrete, S. A. (2014). Latitudinal discontinuity in thermal conditions along the nearshore of central-northern Chile. *PLoS ONE*, 9(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110841>
- Ton, A., Lee, M., Vos, S., Gawehn, M., den Heijer, K., & Aarninkhof, S. (2020). Beach and nearshore monitoring techniques. En *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 659–687). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00027-8>
- Valle-Levinson, A., Schneider, W., Sobarzo, M., Bello, M., Bravo, L., Castillo, M., Duarte, L., Fuenzalida, R., Gallegos, J. M., Garcés-Vargas, J., González, J., Gutiérrez, D., Molinet, C., Navarro, M. S., Pierini, J., Rodríguez-Rubio, E., Valdenegro, A., Vera, L., & Zenteno, L. (2004). Wind-induced exchange at the entrance to Concepción Bay, an equatorward facing embayment in central Chile. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(20–21), 2371–2388. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.08.010>
- Wang, J., Zhou, X., Miao, Y., Jiang, G., Tong, L., Tao, P., Yu, Q., & Peng, W. (2023). Integrated and compact fiber-optic conductivity-temperature-depth (CTD) sensor for marine detection. *Optics and Laser Technology*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109523>
- Zavialov, P. O., Kostianoy, A. G., & Möller, O. O. (2003). SAFARI cruise: Mapping river discharge effects on Southern Brazilian shelf. *Geophysical Research Letters*, 30(21). <https://doi.org/10.1029/2003GL018265>

7. Anexo

7.1.Tablas materiales y métodos

Tabla 1: Red de estaciones hidrográficas de CTDO. Bahía Concepción. 28 de junio de 2023.

Nº perfil	Latitud	Longitud	Hora	Prof. Eco (m)	Prof. CTD (m)
1	-36.728	-73.062	15:36	3	2
2	-36.732	-73.024	16:12	6	5
3	-36.715	-72.994	16:35	19	18
4	-36.713	-73.018	17:18	19	18
5	-36.707	-73.055	17:38	17	16
6	-36.705	-73.081	18:19	14	13
7	-36.677	-73.075	18:40	15	14
8	-36.684	-73.029	19:32	23	22
9	-36.689	-72.989	19:55	23	22
10	-36.667	-72.988	20:32	26	25
11	-36.628	-72.972	20:53	18	17
12	-36.664	-73.020	22:01	26	25
13	-36.655	-73.074	22:30	17	16
14	-36.618	-73.042	23:36	40	39
15	-36.605	-72.992	0:24	36	35

Tabla 2: Red de estaciones hidrográficas CTDO. Bahía Concepción. 29 de junio de 2023.

Nº perfil	Latitud	Longitud	Hora	Prof. Eco (m)	Prof. CTD (m)	Secciones
1	-36.702	-73.0784	16:57	13.2	12.0	1
2	-36.704	-73.067	17:11	14.6	13.0	
3	-36.705	-73.056	17:23	15.4	14.0	
4	-36.707	-73.047	17:33	16.1	15.0	
5	-36.708	-73.038	17:48	16.0	15.0	

6	-36.710	-73.030	17:59	15.7	14.0	
7	-36.711	-73.023	18:11	15.5	14.0	
8	-36.712	-73.015	18:21	15.0	14.0	
9	-36.713	-73.008	18:32	14.8	14.0	
10	-36.715	-73.002	18:42	14.3	13.0	
11	-36.665	-72.991	19:21	24.8	23.0	2
12	-36.664	-73.002	19:51	25.5	24.0	
13	-36.662	-73.013	20:03	26.1	25.0	
14	-36.660	-73.026	20:16	25.9	25.0	
15	-36.659	-73.037	20:31	25.0	24.0	
16	-36.657	-73.048	20:44	22.3	21.0	
17	-36.655	-73.062	20:58	19.1	18.0	
18	-36.653	-73.070	21:14	19.4	18.0	
19	-36.651	-73.082	21:27	18.0	17.0	
20	-36.636	-73.078	21:44	20.4	19.0	3
21	-36.619	-73.041	22:38	37.0	36.0	
22	-36.613	-73.021	22:57	35.4	34.0	
23	-36.608	-73.004	23:17	32.1	31.0	
24	-36.598	-72.986	23:32	23.0	20.0	

Tabla 3: Especificaciones de los tres ADCP utilizados

ADCP	Latitud (S)	Longitud (W)	Profundidad (m)	Inicio	Término
Tomé	36°41'40''	73°4'20''	33	29-06-2023 15:25	26-08-2023 8:55
Penco	36°42'33''	73°0'20''	18	28-06-2023 19:07	22-08-2023 16:07
Talcahuano	36°36'34''	73°0'25''	17	28-06-2026 12:26	29-07-2023 12:26

7.2.Tablas Resultados

Tabla 4: Estadística de la componente zonal (u) y meridional (v) de la corriente total por nivel de profundidad. Desvest: Desviación estándar. KE: Energía cinética. EMV: Orientación del eje de máxima varianza. EFM: Orientación del eje de flujo medio. EMV y EFM se orientan con respecto al norte geográfico. Anclaje Tomé.

Prof. (m)	U promedi o (cm/s)	V promedi o (cm/s)	U desvest (cm/s)	V desvest (cm/s)	Ke (cm ² s- 2)	EFM	EMV
-4	-0.9	2.1	6.7	13.4	112.4	335.4	341.4
-5	-1.0	1.9	6.4	12.6	99.7	333.1	340.5
-6	-0.9	1.3	6.3	11.7	88.7	325.7	339.6
-7	-1.0	0.9	6.4	11.2	83.3	310.9	338.9
-8	-0.8	0.2	6.5	10.6	76.7	287.8	338.4
-9	-0.4	-0.2	6.1	10.1	69.3	248.3	337.9
-10	0.0	-0.6	5.8	9.5	61.6	180.2	336.2
-11	0.3	-1.1	5.6	8.9	55.4	165.4	335.4
-12	0.6	-1.6	5.3	8.2	47.3	158.0	331.7
-13	1.0	-2.0	5.0	7.8	42.7	153.9	330.8
-14	1.1	-2.5	4.8	7.5	39.8	156.9	318.2
-15	1.4	-2.9	4.5	7.2	36.0	155.0	190.8
-16	1.5	-3.2	4.3	7.3	36.1	155.4	171.2
-17	1.5	-3.6	4.4	7.5	38.0	158.0	165.0
-18	1.4	-3.9	4.5	7.7	39.8	159.7	164.6
-19	1.4	-4.0	4.5	7.9	41.3	161.4	163.8
-20	1.3	-4.1	4.7	8.1	44.1	162.0	163.0
-21	1.3	-4.1	4.8	8.3	45.7	163.2	162.5
-22	1.2	-4.1	5.0	8.5	48.4	163.4	160.8
-23	1.1	-4.1	5.1	8.7	50.4	164.9	160.3
-24	0.8	-3.9	5.1	8.9	52.7	168.4	160.0
-25	0.6	-3.7	5.1	9.1	54.4	170.8	159.1
-26	0.3	-3.4	5.1	9.3	56.2	175.3	159.0
-27	-0.1	-3.1	5.1	9.5	58.1	181.9	158.7
-28	-0.5	-2.7	5.0	9.7	59.1	189.8	160.0
-29	-0.7	-2.4	4.9	9.9	61.5	196.6	161.5
-30	-0.9	-2.1	4.8	9.8	59.3	203.1	163.8
-31	-1.0	-1.8	4.5	9.5	55.1	210.0	166.9

Tabla 5: Estadística de la componente zonal (u) y meridional (v) de la corriente total por nivel de profundidad. Desvest: Desviación estándar. KE: Energía cinética. EMV: Orientación del eje de máxima varianza. EFM: Orientación del eje de flujo medio. EMV y EFM se orientan con respecto al norte geográfico. Anclaje Talcahuano.

Prof. (m)	U promedi o (cm/s)	V promedi o (cm/s)	U desvest (cm/s)	V desvest (cm/s)	Ke (cm ² s- 2)	EFM	EMV
-4	0.5	-2.5	4.1	7.7	38.4	169.4	349.3
-5	0.4	-2.3	4.1	7.1	33.5	170.0	348.2
-6	0.3	-1.9	4.0	6.6	30.0	172.4	347.0
-7	0.1	-1.3	4.0	6.4	28.4	173.8	347.0
-8	0.0	-0.7	3.9	6.1	26.4	175.7	347.9
-9	0.0	0.0	3.7	5.8	24.0	39.3	349.9
-10	0.1	0.7	3.6	5.5	21.4	11.2	353.7
-11	0.2	1.2	3.6	5.2	19.8	10.7	359.4
-12	0.4	1.7	3.6	5.0	18.9	12.9	4.7
-13	0.8	2.1	3.8	4.9	19.0	20.3	10.6
-14	3.3	2.2	4.2	4.5	19.1	56.2	14.0

Tabla 6: Estadística de la componente zonal (u) y meridional (v) de la corriente total por nivel de profundidad. Desvest: Desviación estándar. KE: Energía cinética. EMV: Orientación del eje de máxima varianza. EFM: Orientación del eje de flujo medio. EMV y EFM se orientan con respecto al norte geográfico. Anclaje Penco.

Prof. (m)	U promedi o (cm/s)	V promedi o (cm/s)	U desvest (cm/s)	V desvest (cm/s)	Ke	EFM (cm ² s- 2)	EMV
-4	0.8	0.5	6.1	5.5	33.8	60.2	65.1
-5	0.8	0.2	5.7	4.9	28.5	77.8	61.1
-6	0.6	-0.1	5.3	4.5	24.3	102.7	57.5
-7	0.3	-0.3	4.9	4.2	21.0	132.5	55.1
-8	0.2	-0.5	4.7	4.1	19.3	158.4	52.5
-9	0.1	-0.6	4.5	4.0	18.1	167.7	50.2
-10	0.1	-0.7	4.3	4.0	17.0	175.8	48.3
-11	0.0	-0.6	4.2	3.9	16.6	177.7	46.7
-12	0.1	-0.5	4.2	3.9	16.2	169.8	44.6
-13	0.0	-0.3	4.2	3.8	15.9	172.8	43.0
-14	-0.1	-0.1	4.2	3.8	16.0	219.3	41.3
-15	-0.4	0.1	4.2	4.0	16.6	286.3	40.3
-16	-0.8	0.4	4.2	4.1	17.1	300.4	41.0

Tabla 7: Análisis de correlación Pearson, Spearman y máxima correlación cruzada entre variables de viento N-S, corriente N-S, anomalía del nivel del mar (ANM)

	Pearson:		Spearman		correlación cruzada máxima	
	Coeficiente de correlación	p (significancia):	Coeficiente de correlación	p (significancia):	Coeficiente de correlación	Desfase (h):
a) Viento N-S, ANM	-0.5	7.4E-47	-0.4	0	0.4	63
b) Viento N-S, corriente N-S Tomé	-0.7	5.3E-122	-0.6	0	0.3	-47
c) Corriente N-S Tomé, ANM	0.4	4.9E-32	0.4	0	0.2	-4

Tabla 8. Valores de los diagramas de vector progresivo para las corrientes en Tome por nivel de profundidad. La dirección residual en grados está referida al norte geográfico. Em indica el parámetro de Newman o el grado de estabilidad de la corriente en porcentaje.

Prof. (m)	Desplazamiento residual (Km)	Dirección Residual (deg)	Velocidad Residual ()	Em (%)
4	61.086	114.6	2.278	17.984
5	57.354	116.9	2.138	18.165
6	41.590	124.3	1.551	14.058
7	36.209	139.1	1.350	12.605
8	21.707	162.2	0.809	7.916
9	11.767	201.7	0.439	4.491
10	17.215	269.8	0.642	6.971
11	29.786	284.5	1.111	12.542
12	45.278	291.9	1.688	20.406
13	59.621	296.1	2.223	27.720
14	72.109	293.0	2.689	33.399

15	86.061	295.0	3.209	40.191
16	95.592	294.5	3.564	43.974
17	104.398	292.0	3.893	46.177
18	110.832	290.3	4.132	47.585
19	114.142	288.6	4.256	48.079
20	116.234	287.9	4.334	47.210
21	116.170	286.8	4.331	47.144
22	114.325	286.6	4.263	45.225
23	115.097	285.1	4.291	45.257
24	107.415	281.6	4.005	42.196
25	99.415	279.2	3.707	39.374
26	90.621	274.7	3.379	35.825
27	82.764	268.1	3.086	32.743
28	74.053	260.2	2.761	29.550
29	66.999	253.4	2.498	26.680
30	60.942	246.9	2.272	24.902
31	55.415	240.0	2.066	23.364

Tabla 9. Valores de los diagramas de vector progresivo para las corrientes en Penco por nivel de profundidad. La dirección residual en grados está referida al norte geográfico. Em indica el parámetro de Newman o el grado de estabilidad de la corriente en porcentaje.

Prof. (m)	Desplazamiento residual (Km)	Dirección Residual (deg)	Velocidad Residual ()	Em (%)
4	45.774	29.8	0.965	13.531
5	37.837	12.2	0.797	12.195
6	26.829	347.2	0.565	9.417
7	21.082	317.5	0.444	7.979
8	25.797	291.6	0.544	10.248
9	30.952	282.3	0.652	12.754
10	33.586	274.2	0.708	14.402
11	30.533	272.3	0.644	13.340
12	22.925	280.2	0.483	10.103
13	14.184	277.1	0.299	6.334
14	8.354	230.7	0.176	3.735
15	18.616	163.7	0.392	8.090
16	42.098	149.6	0.887	17.751

Tabla 10. Valores de los diagramas de vector progresivo para las corrientes en Talcahuano por nivel de profundidad. La dirección residual en grados está referida al norte geográfico. Em indica el parámetro de Newman o el grado de estabilidad de la corriente en porcentaje.

Prof (m)	Desplazamiento residual (Km)	Dirección Residual (deg)	Velocidad Residual ()	Em (%)
4	127.01	280.6	2.546	33.48
5	118.07	280.0	2.366	32.65
6	95.71	277.6	1.918	27.94
7	64.94	276.1	1.302	19.81
8	33.30	274.3	0.667	10.74
9	2.02	50.7	0.040	0.69
10	33.19	78.8	0.665	11.87
11	61.02	79.3	1.223	22.16
12	88.43	77.1	1.772	32.28
13	113.89	69.7	2.283	40.69
14	198.34	33.8	3.975	62.73

Tabla 11. Análisis de correlación Pearson, Spearman y máxima correlación cruzada entre variables de viento N-S, anomalía del nivel del mar (ANM), modos verticales (Tomé, Talcahuano, Penco) y totales de análisis EOF

	Pearson:		Spearman		correlación cruzada máxima	
	Coefficiente de correlación	p (significancia):	Coefficiente de correlación	p (significancia):	Coefficiente de correlación	Desfase (h):
a) Viento N-S, modo 1 Tomé	0.8	1.8E-166	0.6	0	0.8	2
b) Viento N-S, modo 1 Talcahuano	0.4	1.5E-23	0.2	3.40E-08	0.4	1
c) Viento N-S, modo 1 Penco	0.1	1.9E-03	0.0	1.0	0.7	-25
d) Viento N-S, modo 2 Penco	0.6	1.6E-78	0.6	0	0.7	-6
e) Viento N-S, modo 1 total	0.8	1.9E-173	0.7	0	0.8	2
f) residuo, modo 2 Tomé	-0.04	0.25	0.01	0.9	0.3	70
g) residuo, modo 2 Talcahuano	-0.4	9.83E-36	-0.4	0	0.4	-58
h) residuo, modo 2 Penco	-0.4	1.70E-29	-0.5	0	0.3	-79
i) residuo, modo 2 total	0.03	3.57E-01	-0.01	0.8	0.3	-218