

Cambios hidrográficos estacionales a lo largo de la costa del Golfo de Arauco (37° S)

Seasonal hydrographic changes along the Gulf of Arauco (37° S) coast

Odette A. Vergara^{1,2,*}, Josse Contreras-Rojas³, Richard Muñoz^{4,5}, Luis Bermedo^{4,6}, Marcus Sobarzo^{1,7,8}, Gonzalo S. Saldías^{1,2}, Cristian Chandía^{6,7}, Aldo Hernández⁹, Marco Salamanca^{6,7} & Eduardo Hernández-Miranda^{7,8,10}

¹Centro de Investigación Oceanográfica COPAS Coastal, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

²Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

³Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), La Serena, Chile.

⁴Programas de Postgrado en Oceanografía, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

⁵Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

⁶Laboratorio de Oceanografía Química (LOQ), Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

⁷Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

⁸Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR), Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

⁹Centro de Investigación en Recursos Naturales HOLON SpA., Concepción, Chile.

¹⁰Laboratorio de Investigación en Ecosistemas Acuáticos (LInEA), Concepción, Chile.

*Corresponding author: odvergar@udec.cl

RESUMEN

El golfo de Arauco, situado en Chile centro-sur, es una de las zonas con las tasas más altas de producción biológica en el Sistema de Corrientes de Humboldt Sur. En este golfo, donde la actividad urbano-industrial convive con comunidades pesqueras y concesiones acuícolas, son múltiples los forzantes físicos que influyen en la variabilidad espacio-temporal de las propiedades hidrográficas. En este contexto, el viento es uno de los forzantes más relevantes, el cual muestra un marcado ciclo estacional. Así, durante primavera-verano, predominan los vientos hacia el norte favorables a surgencia costera, promoviendo la incursión de aguas con alta concentración de nutrientes, bajo oxígeno, alta salinidad y baja temperatura que sustentan las altas tasas de producción primaria reportadas para esta zona. Durante otoño e invierno, el aumento de las descargas de agua dulce provenientes de ríos adyacentes y el predominio de los vientos favorables a hundimiento (hacia el sur), gobiernan la hidrodinámica del golfo. En esta investigación, caracterizamos la variabilidad estacional de la hidrografía en el golfo de Arauco con datos de tres campañas realizadas en primavera 2021, verano e invierno 2022. Adicionalmente, datos satelitales provenientes del sensor MODIS-aqua de temperatura superficial del mar, clorofila-a y Rrs645 fueron utilizados para complementar la información *in situ*. Nuestros resultados muestran una marcada estacionalidad en la hidrografía del golfo de Arauco, principalmente en la temperatura superficial del mar. En primavera, bajos valores térmicos (<13°C) abarcaron una extensa área del golfo, desde la desembocadura del río Biobío hasta Punta Lavapié. Por otra parte, en verano, altas temperaturas (>15°C) se observaron al interior del golfo de Arauco, caracterizando una sombra de surgencia. Bajas temperaturas (<12°C) fueron detectadas en invierno con una distribución espacial homogénea. La clorofila superficial fue alta (>20 mg m⁻³) en gran parte del golfo durante primavera y verano, lo cual obedece al aumento en la radiación solar y a los vientos favorables a surgencia. Destacamos la baja salinidad (<20 psu) presente durante invierno, donde la pluma del río Biobío se extendió desde la desembocadura hacia el sur del golfo de Arauco, abarcando toda la zona costera. La distribución del oxígeno disuelto en la columna de agua mostró variaciones similares en primavera y

verano, donde concentraciones $>5 \text{ ml L}^{-1}$ se presentaron en los 10 m superiores. No obstante, la hipoxia cubrió todo el fondo de la zona de estudio, desde el norte del golfo hasta la última estación en Boca Chica durante verano. A través de estos análisis, detectamos que el golfo de Arauco presenta diferentes patrones espaciales hidrográficos estacionales que evidencian la alta variabilidad a la cual está expuesto, donde el viento, la descarga del río Biobío y la radiación solar gobiernan la estructura de la columna de agua.

Palabras clave: río Biobío, estacionalidad, hidrografía, hundimiento, surgencia.

ABSTRACT

The Gulf of Arauco, located in central Chile, is one of the most productive areas in the Southern Humboldt Current System. Here, urban-industrial activities coexist with fishing communities and aquaculture concessions. In this context, the seasonal variability of the wind forcing is one of the main factors impacting its hydrographic variability. Upwelling favorable winds predominate in summer, promoting the incursion of subsurface waters with high nutrients that sustain the high primary production of the gulf. During autumn and winter, the increased freshwater discharges and downwelling-favorable winds drive to a large extent the gulf's hydrodynamics. We present the seasonal hydrographic variability of the Gulf of Arauco during three contrasting periods (spring 2021, summer, and winter 2022) through *in situ* and satellite data. Our results show a marked hydrographic seasonality, mainly in the sea surface temperature. Low thermal values ($<13^\circ\text{C}$) covered most of the gulf in spring, from the Biobío River mouth to Punta Lavapie. High temperatures ($>15^\circ\text{C}$) featuring an upwelling shadow characterized the gulf in summer. Low temperatures ($<12^\circ\text{C}$) were detected in winter with a homogeneous spatial distribution. Surface chlorophyll was high ($>20 \text{ mg m}^{-3}$) during spring and summer because of increased solar radiation and upwelling favorable winds predominance. Low salinity ($<20 \text{ psu}$) waters, associated with spreading the Biobío River plume, dominated in winter. The dissolved oxygen distribution showed similar variations in spring and summer, where waters with concentrations $>5 \text{ ml L}^{-1}$ were found in the upper 10 m. However, hypoxic waters covered the bottom along the entire nearshore coastal band during summer. We conclude that the Gulf of Arauco exhibits contrasting seasonal hydrographic patterns where the wind, the Biobío River discharge, and solar radiation modulate the water column structure.

Keywords: Biobío River, hydrography, seasonality, downwelling, upwelling.

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Corrientes de Humboldt (SCH), el cual cubre el 95% de la costa del Pacífico sureste (4° - 42° S) y más de 200 millas náuticas mar adentro (Gutiérrez *et al.* 2016), es una de las zonas de borde oriental con mayor productividad biológica de los océanos mundiales (Chavez *et al.* 2008; Chavez & Messie 2009). El SCH comprendido por las costas de Perú y Chile, se encuentra bajo la influencia de surgencias costeras estacionales o permanentes, las cuales generan altas tasas de producción primaria ($>1000 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$; Montero *et al.* 2007; Quiñones *et al.* 2009; Daneri *et al.* 2012) y pesquera, donde recursos pelágicos como sardina y anchoveta (desembarques anuales > 30 mil toneladas) (Gutiérrez *et al.* 2016); hacen de esta zona un ecosistema único.

En un clima cambiante, donde los efectos antropogénicos

han acelerado el incremento de temperatura en la atmósfera y las anomalías térmicas de la capa de mezcla superficial del océano han aumentado su frecuencia (Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010), el SCH se observa sujeto a una intensificación de los vientos favorables a surgencia debido a cambios en los gradientes de presión atmosférica a lo largo de la costa (Bakun *et al.* 2015). Cambios en los patrones climáticos del Pacífico Sur Oriental también han repercutido en la disminución de las precipitaciones (Bustos *et al.* 2015) y subsecuentes megasequías (Garreaud *et al.* 2017, 2019), cuyas secuelas en la productividad marina aún no han sido bien definidas.

El SCH, altamente variable de norte a sur, exhibe cambios abruptos en el borde costero, presentando bahías, golfos, puntas y cabos, los cuales junto a cambios en la batimetría y topografía de la zona costera (Völker *et al.* 2014), generan fluctuaciones adicionales en la oceanografía costera de este

productivo sistema. Dentro del SCH, el golfo de Arauco (37° S), denominado como una bahía orientada hacia el ecuador (Figuroa & Moffat, 2000) es una de las áreas más productivas de la zona centro-sur (30°-40° S) de Chile (Daneri *et al.* 2000). Su particular conformación, con una abertura aproximada en forma de "U" o media luna, se caracteriza por un marcado cambio en la orientación de la línea de costa desde Norte-Sur a Este-Oeste (Fig.1). Hacia el oeste limita con la Isla Santa María la cual divide al golfo en una pequeña abertura denominada "Boca Chica" (Sur) y otra abertura más ancha hacia el norte, denominada "Boca Grande" (Fig. 1). Desde Boca Grande hacia la costa, se extiende por casi 20 km y, desde Boca Chica

hasta la costa, se extiende por 25 km (Valle-Levinson *et al.* 2003). La mayor parte del golfo tiene menos de 100 m de profundidad presentando una batimetría relativamente suave con isóbatas que siguen la línea de costa. Hacia el norte, sin embargo, las isóbatas se modifican drásticamente debido al cañón del río Biobío el cual atraviesa zonalmente toda la plataforma continental en una extensión cercana a los 105 km y con un ancho máximo de 9 km (Djurfeldt, 1989; Pineda 1999; Sobarzo *et al.* 2016). La profundidad de este cañón fluctúa entre 10-20 m, cercano a la desembocadura del río Biobío, hasta alrededor de 1200 m en su boca, asociada al talud continental (Fig. 1).

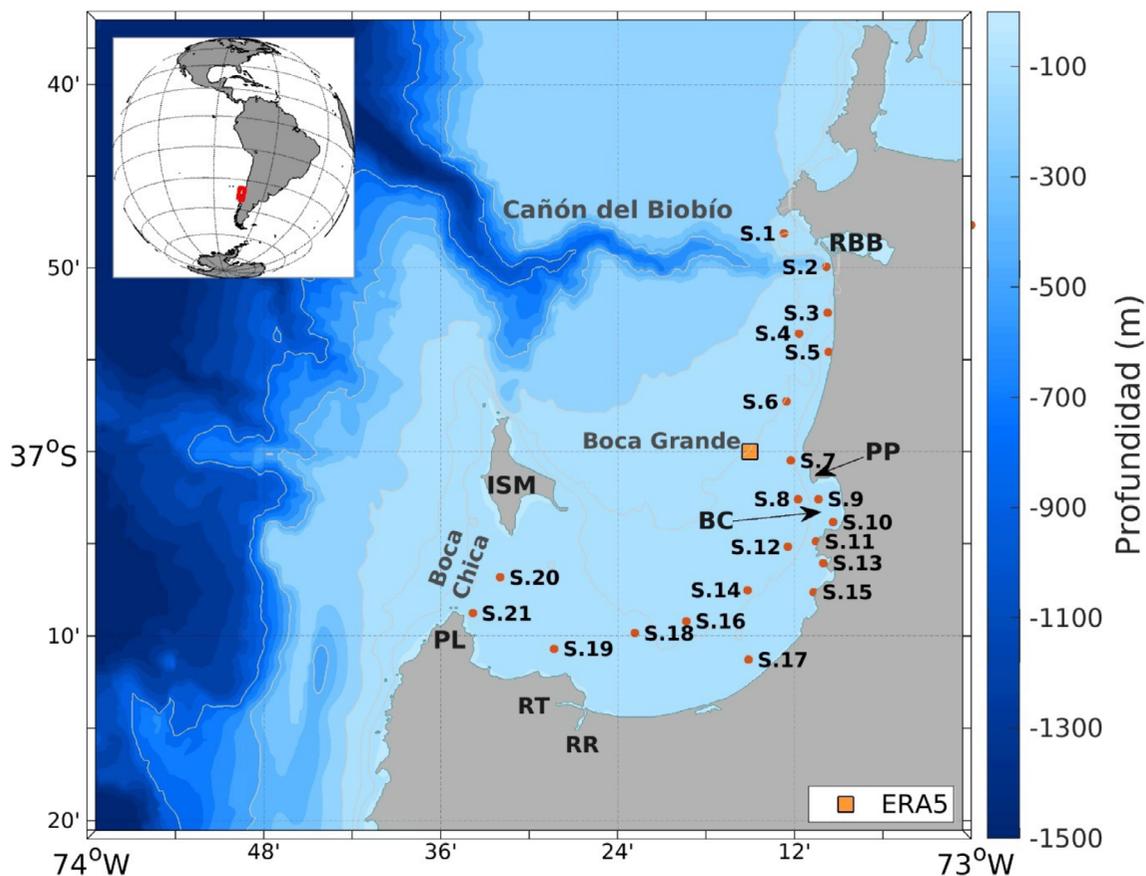


FIGURA 1. Zona de estudio (golfo de Arauco) señalando las estaciones hidrográficas del proyecto RGMA. Se destaca en cuadrado naranja el píxel de ERA5 usado para los datos de las series de tiempo. RBB: Río Biobío, ISM: Isla Santa María, PL: Punta Lavapie, BC: Bahía Coronel, PP: Punta Puchoco, RR: Río Raquí, RT: Río Tubul. / The study region (Gulf of Arauco) shows the hydrographic stations of the RGMA project. The ERA5 pixel used for time series data is marked in an orange square. RBB: Biobío River, ISM: Isla Santa María, PL: Punta Lavapie, BC: Bahía Coronel, PP: Punta Puchoco, RR: Raquí River, RT: Tubul River.

El golfo de Arauco es un área altamente productiva (10-20 g C/m² día; Daneri *et al.* 2000; Montero *et al.* 2007) que sustenta algunos de los principales recursos epipelágicos y mesopelágicos del país, siendo considerado un importante centro de desove y crianza de merluza (Landaeta & Castro 2002, 2006), anchoveta y sardina (Hernández & Castro 2000; Cubillos & Arcos 2002; Cubillos *et al.* 2007), así como de recursos bentónicos entre los que destacan el huepo y la navajuela (Hernández *et al.* 2011). Como consecuencia de la gran productividad biológica del golfo, se han desarrollado numerosas comunidades pesqueras, entre ellas Maule, Lo Rojas, Laraquete, Arauco, Tubul, Llico y Punta Lavapie, así como concesiones acuícolas que se utilizan para la cría de diferentes especies (e. g. mejillones, ostras y moluscos) (FAO 2013). Por otro lado, también existe una creciente e intensa actividad urbano industrial a lo largo del borde costero del golfo de Arauco, lo que se traduce en diferentes emisiones al ambiente marino costero (PLADECO ARAUCO, 2016; Ministerio del Medio Ambiente 2018).

Múltiples factores inducen variabilidad hidrográfica en el golfo de Arauco, sin embargo, destacan tres de principales forzantes: i) Las variaciones estacionales y sinópticas del viento (Saavedra, 1980; Parada *et al.* 2001; Wong *et al.* 2021 y Mardones *et al.* 2022); ii) La boyantes provocada por flujos locales de calor atmosférico, advección (surgencia) y descarga de agua dulce (Valle-Levinson *et al.* 2003; Saldías *et al.* 2012; Vergara *et al.* 2023) provenientes del Biobío y otros ríos; y iii) La surgencia topográfica generada desde la cabecera del cañón submarino del Biobío y evidenciada por pulsos de aguas frías en respuesta al paso de ondas atrapadas a la costa. La mayoría de los eventos de enfriamiento vinculados a este cañón se han asociado con fuertes flujos hacia el norte y anomalías negativas de presión en la costa (Sobarzo *et al.* 2016).

En este golfo, la surgencia topográfica se combina con la surgencia costera inducida por la variabilidad estacional y sinóptica del viento (Strub *et al.* 1998), más dominante en primavera-verano, y donde aguas con alta concentración de nutrientes (Silva *et al.* 2009), bajo oxígeno disuelto (Hernández-Miranda *et al.* 2010; 2017), alta salinidad y baja temperatura (propios del Agua Ecuatorial Subsuperficial; AESS) generan condiciones particulares en la columna de agua que permiten sustentar las altas tasas de producción registradas. En contraste, el aumento de las descargas de agua dulce (producto de mayores precipitaciones) y el predominio de los vientos favorables a hundimiento gobiernan la hidrodinámica del golfo en periodo otoño-invierno. En este periodo, el Agua Subantártica (ASSA; 33,8-34,3 psu) y el Agua de Transición del Pacífico Suroriental ("ESPTW" por sus siglas en inglés; 11,5-13 °C, <34 psu), prevalecen en esta zona (Sobarzo *et al.*

1993, 2007; Schneider *et al.* 2003 y Vergara *et al.* 2023).

La circulación del golfo está asociada a períodos de intensificación y relajación de la surgencia costera, donde el viento S-SW fuerza una circulación antihoraria, mientras que un viento debilitado o de relajación produce una capa superficial antihoraria y otra subsuperficial horaria (Parada *et al.* 2001). En contraste, un patrón de circulación ciclónico a lo largo de la costa sur de este golfo se desarrollaría bajo vientos favorables para el hundimiento costero (Parada *et al.* 2001), lo que posiblemente se intensifica durante eventos de alta descarga del río Biobío con una pluma que se propaga hacia el sur adherida a la costa. Durante verano, un patrón de circulación de dos capas fue observado en la Boca Grande del golfo con un flujo superficial (subsuperficial) de salida (entrada) durante condiciones de surgencia (Valle-Levinson *et al.* 2003). Estos autores propusieron que el viento produce un par de giros contra rotatorios que permiten divergencia cerca de la superficie y ventilación de las aguas profundas en el extremo sur del golfo.

La particular forma de "U" protege parcialmente al golfo de Arauco de los vientos favorables a surgencia, generando una sombra de surgencia con temperaturas anómalamente elevadas en el extremo sureste (Wong *et al.* 2021; Mardones *et al.* 2022). Los eventos de sombra más críticos se han desarrollado frecuentemente en verano con vientos favorables a surgencia y con un fuerte rotor ciclónico del estrés del viento, intercalado con periodos de relajación (Wong *et al.* 2021). Aunque los efectos de las sombras de surgencia en el golfo de Arauco aún son desconocidos, de acuerdo con Wong *et al.* (2021), los tiempos de residencia del agua durante estos eventos, pueden llegar incluso hasta 15 días, tiempo suficientemente extenso para que las propiedades biofísicas sean alteradas considerablemente.

En términos de descargas de agua dulce al golfo de Arauco, el principal aporte proviene del río Biobío (36.8° S), cuya descarga (~1000 m³s⁻¹ promedio anual; Masotti *et al.* 2018) presenta un drástico cambio estacional. Las mayores (~1500 m³ s⁻¹) y menores (~200 m³ s⁻¹) descargas promedio se presentan durante invierno (junio-septiembre) y verano (diciembre-marzo), respectivamente (Fig. 3d). Durante invierno, la pluma del Biobío y las plumas de ríos ubicados al norte del golfo de Arauco (Mataquito (35° S), Maule (35.4° S) e Itata (36.4° S)) se fusionan en un gran cuerpo de agua salobre que se extiende a lo largo de la costa en dirección sur empujado por los vientos norte favorables a hundimiento y la forzante de boyantes (Saldías *et al.* 2012). El río Biobío, en particular, impacta significativamente la circulación del golfo de Arauco, fortaleciendo localmente las corrientes, provocando una notable disminución de la salinidad y generando un aumento en la estratificación de

la columna de agua (Vergara *et al.* 2023). Durante los meses de mayores descargas (junio a septiembre) las corrientes zonales se intensifican considerablemente al oeste de la desembocadura del río Biobío, mientras que las corrientes meridionales aumentan su flujo hacia el sur (Vergara *et al.* 2023). Durante periodos de muy alta descarga ($>1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), el área de cobertura de la pluma del Biobío sobrepasa los 200 km^2 (Pérez *et al.* 2015; Vergara *et al.* 2023) por lo que su influencia abarca gran parte del golfo de Arauco. A pesar de los vastos antecedentes previamente expuestos respecto a la hidrografía, hidrodinámica y productividad del golfo de Arauco, resulta relevante actualizar la información respecto a los patrones hidrográficos estacionales generales en esta zona. Con este objetivo este artículo presenta un análisis de tres campañas oceanográficas realizadas en primavera (octubre 2021), verano (enero 2022) e invierno (agosto 2022) y procedentes del Proyecto RMGA (Red de Monitoreo Ambiental de Ecosistemas Marinos del golfo de Arauco).

MATERIALES Y MÉTODOS

VARIABLES HIDROGRÁFICAS

El análisis de las variables hidrográficas presentado en este artículo consideró mediciones en 21 sitios distribuidos en el borde costero del golfo de Arauco (Fig. 1), abarcando desde la zona norte en la desembocadura del río Biobío ($36^\circ 50' \text{ S}$) hasta punta Lavapie en el extremo suroeste ($37^\circ 10' \text{ S}$). Estas mediciones fueron realizadas por el Laboratorio de Oceanografía Química (Departamento de Oceanografía de la Universidad de Concepción, LOQ-UdeC), a bordo de la embarcación Kay Kay II de la misma Universidad. Las campañas se realizaron durante primavera 2021 (entre el 11 y el 15 de octubre), verano 2022 (desde el 17 hasta el 21 de enero), e invierno 2022 (entre el 1 y 5 de agosto). La información hidrográfica para cada campaña fue obtenida *in situ* mediante lances verticales de dos perfiladores hidrográficos SBE CTD-O 19 plus y SAIV/AS CTD-O SD204 equipado con un sensor de oxígeno disuelto óptico (Rinko III JFE). Ambos equipos registraron en forma continua los parámetros de profundidad, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, fluorescencia y turbidez desde el nivel superficial de la columna de agua hasta aproximadamente 2 metros sobre el fondo con una frecuencia de muestreo de 4,0 y 0,5 Hz, respectivamente. Con la finalidad de validar la información obtenida por los perfiladores hidrográficos CTDO, se colectaron muestras discretas de agua de mar en superficie y fondo para realizar mediciones en laboratorio de oxígeno disuelto (método de Winkler) y clorofila-a, lo que

permitió generar curvas de calibración para ajustar el sensor de oxígeno disuelto y transformar los registros del sensor de fluorescencia a concentraciones de clorofila-a.

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS VARIABLES HIDROGRÁFICAS

Las variables hidrográficas obtenidos *in situ* fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo para determinar tendencias centrales (mediana, promedio) y medidas de dispersión (mínimo, máximo, desviación estándar, coeficiente de variación), además de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks. Este análisis fue complementado con una prueba de multicolinealidad (correlación de Pearson) mediante gráficas matriciales (matrix-plot). El análisis fue efectuado en R (<https://www.r-project.org>) utilizando las librerías *dplyr* (Wickham *et al.* 2023), *pastecs* (Grosjean & Ibanez 2018) y *PerformanceAnalytics* (Peterson & Carl 2020).

INFORMACIÓN SATELITAL

Datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM), clorofila-a y Rrs645 para los mismos meses en los cuales se realizaron las campañas hidrográficas fueron descargados desde el sitio web de la NASA (NASA Ocean Color, <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/>) para el sensor MODIS-Aqua con un nivel de procesamiento L3 y con una resolución espacial de 4 km. Se presentan los compuestos promedios para los periodos de estudio.

SERIES DE TIEMPO

Datos de viento, en sus componentes U y V, radiación superficial solar neta y precipitación total se obtuvieron a partir del producto de reanálisis ERA5 proporcionado por ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) y disponibles en Copernicus Climate Change Service Information. El producto ERA5 combina datos de modelos con observaciones de todo el mundo para generar una grilla regular atmosférica de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ con una resolución temporal horaria. Las series de tiempo obtenidas desde ERA5 (viento, radiación superficial solar neta y precipitación) se extrajeron desde un píxel cercano a la costa en el golfo de Arauco ($37^\circ 0' \text{ S}$, $73^\circ 15' \text{ W}$; Fig. 1). El período analizado de estas series fue desde el 1 de octubre de 2021 hasta el 31 de agosto de 2022.

Además, se obtuvieron mediciones diarias de caudal en el mismo periodo que ERA5 desde la estación Río Biobío en la desembocadura ($36^\circ 50' 16'' \text{ S}$, $73^\circ 03' 41'' \text{ W}$) disponibles en la plataforma de la Dirección General de Aguas (DGA), Gobierno de Chile (Ministerio de Obras Públicas - Dirección de General de Aguas (<https://dga.mop.gob.cl/Paginas/hidrolineasatel.aspx>)).

RESULTADOS

PATRONES ESPACIALES ESTACIONALES EN EL GOLFO DE ARAUCO

A partir de la información satelital de MODIS-Aqua y los datos hidrográficos obtenidos *in situ*, fue posible observar claras diferencias estacionales en las condiciones oceanográficas del golfo. La TSM exhibió importantes cambios estacionales con temperaturas menores a 13°C en casi todo el golfo de Arauco y aguas oceánicas más frías ($\leq 11,5^\circ\text{C}$) durante octubre 2021 (Fig. 2a). Esta distribución fue concordante con el viento desde el suroeste predominante de esta época (Fig. 2j) el cual alcanzó velocidades meridionales mayores a 5 m s^{-1} . Concordante con esto, los datos hidrográficos *in situ* dieron cuenta de bajas temperaturas superficiales en toda la banda costera del golfo de Arauco, fluctuando entre 12 y $13,5^\circ\text{C}$ (Fig. 4a).

En verano (enero 2022), la TSM fue considerablemente mayor que la observada en octubre 2021, con valores entre $15,5^\circ\text{C}$ y 18°C (Fig. 2b). Similar a primavera, aguas más frías ($\sim 13^\circ\text{C}$) se observaron al oeste de punta Lavapié (Fig. 2b). La radiación solar durante este mes exhibió los mayores valores de toda la serie (Fig. 3b), lo que es coherente con el calentamiento elevado durante enero 2022. Al igual que los datos satelitales, la información hidrográfica presentó el mismo patrón espacial, con temperaturas mayores a 15°C en todo el borde del golfo de Arauco (Fig. 4b), siendo particularmente mayores en la cabecera.

En invierno (agosto 2022) el golfo de Arauco presentó las menores temperaturas superficiales ($< 11,5^\circ\text{C}$) en comparación a los otros periodos descritos previamente (Fig. 2c). Durante esta época la TSM fluctuó entre 10 y $11,5^\circ\text{C}$ (Fig. 2c). Como es típico del periodo invernal, vientos desde el noroeste (Fig. 2l), favorables a hundimiento costero y superiores a los 5 m s^{-1} (Fig. 3b) dominaron la región. La hidrografía *in situ* fue concordante con las observaciones satelitales con valores de TSM entre ~ 10 y $11,5^\circ\text{C}$ a lo largo del borde costero del golfo de Arauco (Fig. 4c).

La clorofila superficial satelital fue alta ($> 20 \text{ mg m}^{-3}$) en gran parte del golfo de Arauco durante primavera (2021) y verano (2022) (Fig. 2d, e), concentrándose los mayores valores al centro y al norte (al sur de la desembocadura del río Biobío) del golfo, respectivamente. A pesar de que la radiación solar durante enero 2022 fue la mayor del periodo de estudio (Fig. 3b), la clorofila no fue tan alta como la observada en primavera (Fig. 2d). En invierno (agosto 2022), la clorofila fue la más baja de los periodos estudiados ($< 15 \text{ mg m}^{-3}$), concentrándose los mayores valores hacia el sur del golfo de Arauco (Fig.

2f). Lo observado durante este mes, fue consistente con la radicación solar presente en esta época (Fig. 3b) la cual alcanzó los menores valores de la serie estudiada y con los vientos favorables para el hundimiento costero.

En general, la información hidrográfica de la clorofila en las tres épocas estudiadas (Fig. 4g, 4h, 4i) concuerda con la información satelital, donde concentraciones mayores a 20 mg m^{-3} se observaron en primavera (Fig. 4g), valores entre ~ 10 y 15 mg m^{-3} predominaron en verano (Fig. 4h) y concentraciones menores a 10 mg m^{-3} se detectaron en invierno (Fig. 4i).

A través del producto satelital Rrs645, que permite detectar la señal de turbidez asociada a plumas de ríos con alto contenido de sedimentos, fue posible identificar la expansión de la pluma del río Biobío durante agosto 2022 (Fig. 2i). La descarga del río Biobío alcanzó los mayores valores durante invierno, superando los $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Fig. 3d). Coherentemente, la pluma del Biobío mostró una extensión hacia el sur de su desembocadura, adhiriéndose a la costa hasta $\sim 37^\circ \text{ S}$ (Fig. 2i). La señal de turbidez durante este mes incluso fue detectable en casi todo el golfo de Arauco, presentando también altos valores en el extremo sur de esta zona cerca de la desembocadura de los ríos Carampangue, Raquí y Tubul (Fig. 2i). A diferencia de lo observado en invierno, la señal de turbidez fue baja durante primavera y verano (Fig. 2g, 2h).

La salinidad superficial de los datos hidrográficos osciló notablemente entre cada una de las épocas estudiadas (Fig. 4d, 4e, 4f). Durante primavera, los mayores valores ($> 32 \text{ psu}$) se presentaron en la cabecera del golfo de Arauco (Fig. 4d) y los menores ($< 30 \text{ psu}$), cerca de la desembocadura del río Biobío, hasta casi 37° S (Fig. 4d). En general, bajos valores de salinidad se registraron cerca de la desembocadura del río Biobío (Fig. 4d, 4e, 4f). La señal de baja salinidad fue detectable incluso hasta Boca Chica en invierno 2022 (Fig. 4f) lo que es coherente con la alta descarga del río (Fig. 3d).

El oxígeno disuelto superficial fue alto ($> 7 \text{ ml L}^{-1}$) durante primavera (Fig. 4j), presentándose un patrón uniforme a lo largo del borde costero del golfo de Arauco. Durante verano, menores valores fueron observados ($\sim 4\text{-}7 \text{ ml L}^{-1}$), siendo particularmente más bajos en la cabecera del golfo de Arauco y hacia Boca Chica (Fig. 4k). En invierno, el oxígeno disuelto superficial, no presentó importantes cambios espaciales en la zona de estudio, sin embargo, las concentraciones fueron menores a las detectadas en octubre y enero, con valores $< 5 \text{ ml L}^{-1}$ (Fig. 4l).

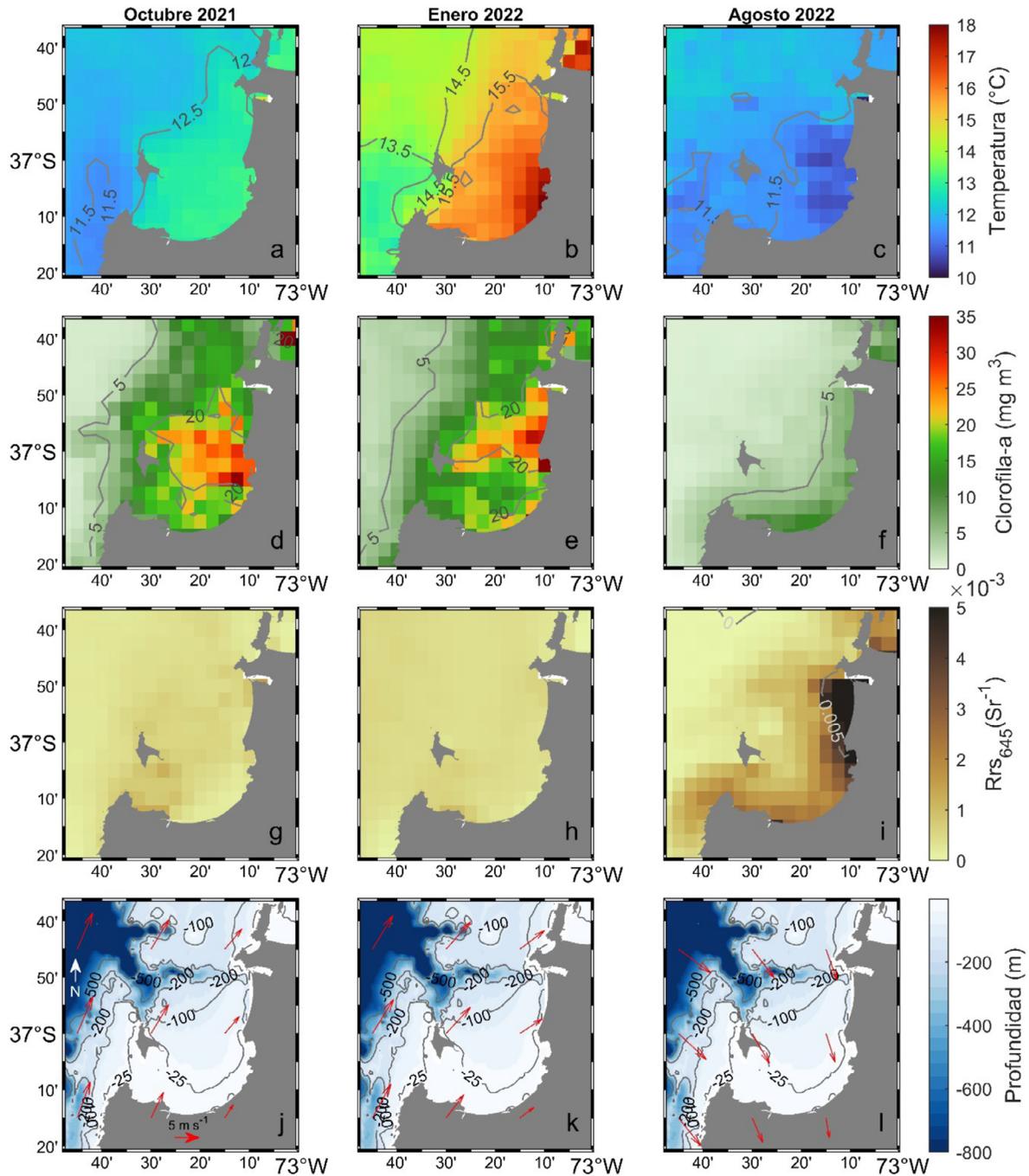


FIGURA 2. Compuestos satelitales promedio mensual de (a, b, c) temperatura superficial del mar, (d, e, f) clorofila, (g, h, i) turbidez a partir de la reflectancia a los 645 nm y, (j, k, l) vectores del viento a 10 m para los periodos octubre 2021, enero 2022 y agosto 2022. / Monthly average satellite composites for sea surface temperature (a, b, c), chlorophyll (d, e, f), turbidity from reflectance at 645 nm, and wind vectors at 10 m for October 2021, January 2022, and August 2022.

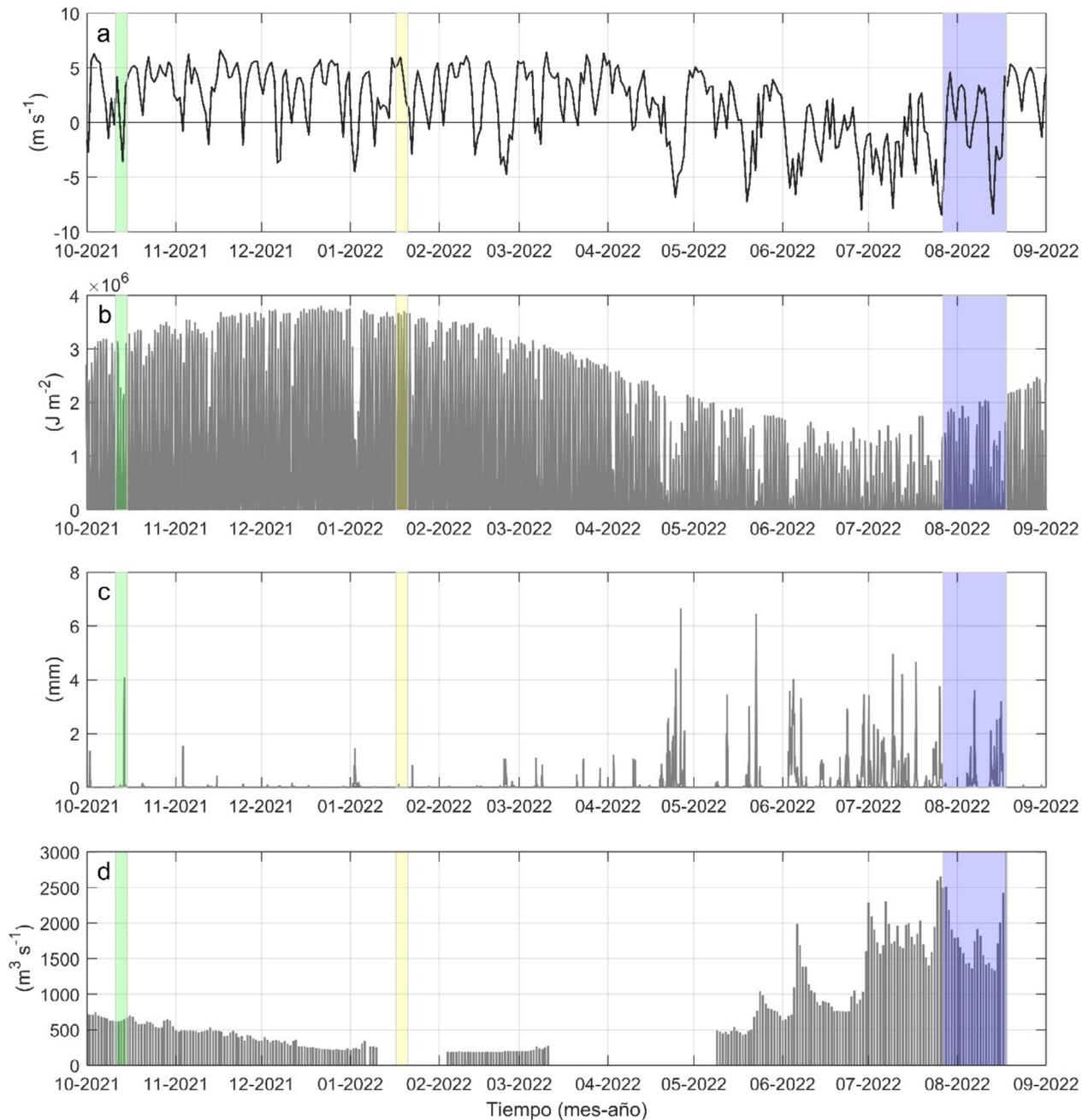


FIGURA 3. Evolución temporal de la (a) componente meridional del viento, (b) radiación superficial solar neta, (c) precipitación total y, (d) descarga del río Biobío entre el 1 de octubre 2021 y el 31 de agosto 2022. (a, b y c) provienen de ERA5 (ver localización en Fig. 1). Las franjas verde, amarillo y morado señalan las campañas realizadas. / Temporal evolution of (a) meridional wind component, (b) surface net solar radiation, (c) total precipitation and, (d) Biobío River discharges, from October 1, 2021 to August 31, 2022. (a, b and c) were acquire from ERA5 (see location in Fig. 1). The green, yellow and purple hatched indicate the campaigns carried out.

SERIES DE TIEMPO ASOCIADAS A LAS VARIABLES HIDROGRÁFICAS EN EL GOLFO DE ARAUCO

La componente meridional del viento (m s^{-1}) fue favorable a surgencia durante la mayoría del período entre octubre 2021 y abril 2022 (Fig. 3a). En general, las transiciones con vientos favorables a hundimiento y periodos de relajación no superaron los -5 m s^{-1} . Vientos favorables a hundimiento dominaron desde mayo hasta agosto 2022. Durante primavera (octubre de 2021), predominaron los vientos favorables a surgencia, los cuales la mayor parte del tiempo, fueron mayores a 5 m s^{-1} (Fig. 3a). En verano (enero 2022), aunque durante casi todo el mes se registraron vientos favorables a surgencia, se detectaron ciertos periodos de hundimiento (Fig. 3a). Durante invierno (agosto 2022), prevalecieron los vientos favorables a hundimiento, incluso superando los 5 m s^{-1} (Fig. 3a).

La radiación solar mostró características estacionales típicas de esta zona, con altos valores durante verano y menores en invierno (Fig. 3b). Los mayores registros de radiación solar ocurrieron en enero 2021 (Fig. 3b), lo cual insidió en la temperatura superficial del mar que presentó valores $>15^\circ\text{C}$ en todo el golfo de Arauco (Fig. 2b y 4b). A pesar de que la radiación solar fue alta durante octubre de 2021 (Fig. 3b), la temperatura superficial fue baja (Fig. 2a y 3a). En agosto de 2022, la radiación solar fue baja (Fig. 3b), coincidiendo con lo observado en la temperatura superficial, donde los valores oscilaron entre 10 y $11,5^\circ\text{C}$ en toda la zona de estudio (Fig. 2c y 4c).

Las precipitaciones registradas en el período de estudio mostraron sus más altos valores en otoño-invierno 2022 (Fig. 3c). Durante agosto 2022 se presentó la mayor frecuencia de días con precipitaciones (Fig. 3c), contribuyendo a que la descarga de agua dulce del río Biobío registrara altos valores, incluso superando los $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Fig. 3d). En primavera se registraron bajas precipitaciones (Fig. 3c), las que, aunque fueron escasas, influyeron en que la descarga de agua dulce del río Biobío alcanzara casi $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante octubre 2021 (Fig. 3d). En verano, las precipitaciones solo se presentaron en pulsos aislados a principios de enero 2022 (Fig. 3c). Estos leves eventos a principios de mes se manifestaron en la descarga de agua dulce del río Biobío, la cual fue de $\sim 250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Fig. 3d).

DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE LOS DATOS HIDROGRÁFICOS IN SITU EN EL GOLFO DE ARAUCO

Con el objetivo de determinar la variabilidad estacional y espacial de las variables hidrográficas, se seleccionaron 11 estaciones correspondientes a los datos *in situ* durante

los tres periodos estudiados. Las estaciones van desde la desembocadura del río Biobío (estación S1, zona norte) hasta la Boca Chica (estación S21, zona sur).

En primavera (octubre 2021), la temperatura fluctuó verticalmente entre 11 y 13°C , presentando los mayores valores en los primeros 5 metros de profundidad desde Punta Puchoco (estación S7; 37° S) hasta Boca Chica (estación S21; $37^\circ 10' \text{ S}$). Bajo 10 m de profundidad, la temperatura fue $<11,5^\circ\text{C}$ (Fig. 5a). En verano (enero 2022), la temperatura aumentó marcadamente respecto a lo observado en primavera. En los 5 metros superficiales se registraron valores $>15^\circ\text{C}$ detectándose, incluso, en la cabecera del golfo de Arauco (estaciones S12, S14 y S14), temperaturas de 18°C (Fig. 5b). Entre 5 y 20 m, aún se presentaron altas temperaturas, fluctuando entre 14 y 12°C . Valores entre 12 y 10°C se registraron cerca del fondo (Fig. 5b). En invierno, la temperatura de la columna de agua presentó una estructura homogénea con valores alrededor de los $12-12,5^\circ\text{C}$ (Fig. 5c).

La salinidad superficial presentó valores menores a 33 psu en primavera, siendo particularmente bajos cerca de la desembocadura del río Biobío (estación S1), en Punta Puchoco (estación S7) y en Boca Chica (estación S21) (Fig. 5d). Bajo 10 metros, la salinidad osciló entre 33,5 y 34 psu, encontrándose los mayores valores bajo 30 metros de profundidad (Fig. 5d). La mayor salinidad se registró en verano con valores menores a 34 psu cerca de la superficie y mayores a 34 psu bajo los 10 metros (Fig. 5e). En invierno en cambio, los primeros metros de la columna de agua la salinidad registró bajos valores (<33 psu), donde la pluma del río Biobío fue perceptible desde la desembocadura (estación S1) hasta frente a Bahía Lota (estación S12) (Fig. 5f). Entre 5 y 30 metros la salinidad osciló entre 33 y 34 psu y bajo 30 metros los valores fueron mayores a 34 psu (Fig. 5f).

La clorofila más alta de todo el período se observó durante octubre 2021 (primavera), donde concentraciones $>20 \text{ mg m}^{-3}$ se registraron en los primeros 10 metros superiores de la columna de agua, desde la zona norte (estación S1) hasta la cabecera del golfo de Arauco (estación S18) (Fig. 5g). Desde 10 a 30 metros, la clorofila fluctuó entre 2 y 10 mg m^{-3} , mientras que valores $<2 \text{ mg m}^{-3}$ caracterizaron las aguas cercanas al fondo. En verano, en cambio, concentraciones mayores a 20 mg m^{-3} fueron registradas sólo en una pequeña porción del golfo de Arauco (desde la estación S1 hasta S7) y entre 5 y 10 m de profundidad (Fig. 5h). En invierno, bajas concentraciones ($<2 \text{ mg m}^{-3}$) se presentaron en casi toda la columna de agua, registrándose los mayores valores ($>2 \text{ mg m}^{-3}$) cerca de Boca Chica (desde S16 a S21) (Fig. 5i).

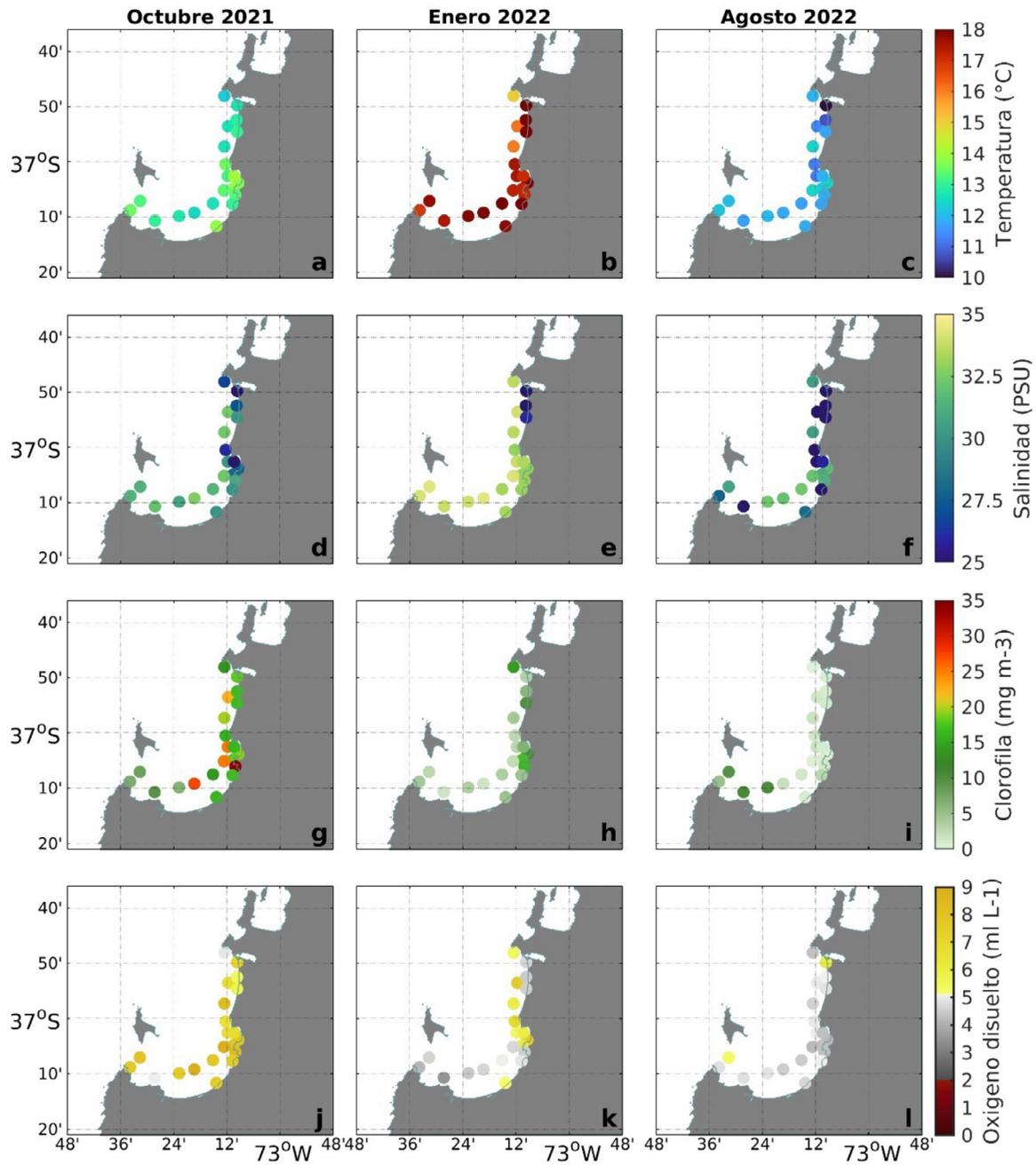


FIGURA 4. Campos superficiales de (a, b, c) temperatura, (d, e, f) salinidad, (g, h, i) clorofila y, (j, k, l) oxígeno a partir de datos hidrográficos del proyecto RMGA. / Temperature (a, b, c), salinity (d, e, f), chlorophyll (g, h, i), and oxygen surface fields (j, k, l) were obtained from the RMGA project hydrographic data.

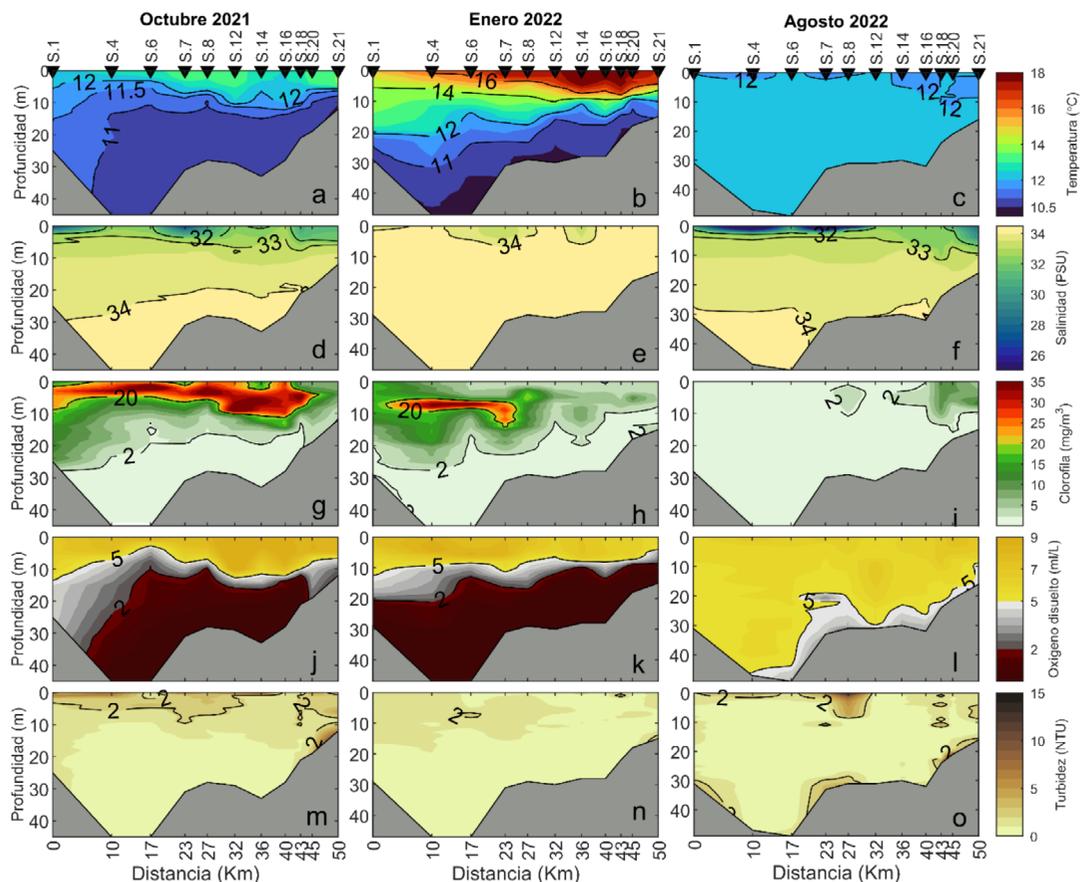


FIGURA 5. Secciones de (a, b, c) temperatura, (d, e, f) salinidad, (g, h, i) clorofila, (j, k, l) oxígeno y, (m, n, o) turbidez a lo largo del borde costero desde la zona norte (estación S1) hasta el sur (estación S21) del golfo de Arauco. / Sections of (a, b, c) temperature, (d, e, f) salinity, (g, h, i) chlorophyll, (j, k, l) oxygen, and (m, n, o) turbidity along the coast of the Gulf of Arauco from Station S1 (north) to Station S21 (south).

El oxígeno disuelto se distribuyó de forma similar en la columna de agua, tanto en primavera, como en verano, donde concentraciones $> 5 \text{ ml L}^{-1}$ se presentaron en los 10 m superiores (Fig. 5jk). Para ambos períodos, valores entre 2 y 5 ml L^{-1} , se registraron entre 10 y 20 m, y concentraciones desde 0,5 a 2 ml L^{-1} , fueron observadas bajo 20 m de profundidad. No obstante, la hipoxia cubrió todo el fondo de la zona de estudio, extendiéndose desde el norte de la zona (S1, desembocadura del Biobío), hasta la última estación en Boca Chica (estación S21) durante verano (Fig. 5k). En contraste, la columna de agua presentó elevadas concentraciones de oxígeno disuelto ($> 5 \text{ ml L}^{-1}$) en casi la totalidad de la columna de agua durante invierno, excepto cerca del fondo hacia la zona sur del área de estudio donde valores $< 2 \text{ ml L}^{-1}$, parecen alterar el patrón registrado durante este mes invernal (Fig. 5l).

En primavera, la turbidez presentó valores $> 2 \text{ NTU}$ en los primeros metros de la columna de agua (Fig. 5m), siendo

particularmente mayores cerca de la desembocadura del río Biobío (estaciones S1 a S6) y de Boca Chica (estaciones S18 a S21). Durante verano, en cambio, la señal de turbidez fue la más baja ($< 2 \text{ NTU}$) de todo el período (Fig. 5n), coincidiendo con las menores descargas de agua dulce reportadas para esta época (Fig. 3d). En invierno (Fig. 5o) la turbidez presentó una particular distribución: los primeros 2-5 m se observaron valores $> 2 \text{ NTU}$ (desde estación S1 en la desembocadura del río Biobío hasta S8 frente a la bahía de Coronel), registrándose también altos valores cerca del fondo (Fig. 5o).

Utilizando todos los perfiles hidrográficos de las tres campañas realizadas en el golfo de Arauco (octubre 2021, enero y agosto 2022), se realizaron diagramas TSO (temperatura, salinidad y oxígeno disuelto) y TSP (temperatura, salinidad y profundidad) con el objetivo de identificar las masas de agua predominantes en la zona de estudio (Fig. 6). Las aguas superficiales (0-15 m) fueron ocupadas por el

Agua de Transición del Pacífico Suroriental (ESPTW-verano) durante verano (Fig. 6a, 6b), las cuales se caracterizaron por presentar altas concentraciones de oxígeno disuelto (>5 ml L^{-1}), salinidad < 34 psu, y temperatura $> 14^{\circ}C$ (Fig. 6a, 6b). En aguas más profundas predominó el Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) durante verano y primavera, con bajas concentraciones de oxígeno (<2 ml L^{-1}), baja temperatura ($<12^{\circ}C$) y alta salinidad (≥ 34 psu) (Fig. 6a, b). En contraste, la señal de la ESPTW se mezcló con la baja salinidad producto de aportes fluviales generados por la precipitación (Fig. 3c) y la descarga del río Biobío (Fig. 3d) en invierno. En la zona costera del golfo de Arauco, la ESPTW-invernal se caracterizó por una salinidad < 34 psu y temperaturas entre 11.5 y 12.5 $^{\circ}C$ (Fig. 6a, 6b).

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS VARIABLES HIDROGRÁFICAS

El análisis de la estadística descriptiva por variable y campaña de muestreo (Tabla 1) reveló que el oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, turbidez y clorofila-a mostraron la

mayor variabilidad, con coeficientes de variación (cv %) que superaron el 75%, particularmente en los periodos de octubre 2021 y enero 2022. La temperatura y salinidad mostraron menor variabilidad en todas las campañas, observándose temperaturas máximas en enero 2022 y salinidades mínimas en agosto 2022. El oxígeno disuelto presentó, en general, menores concentraciones en verano, con mayor variabilidad en enero 2022. La turbidez exhibió máximos en agosto 2022, mientras que las mayores concentraciones de clorofila se registraron en enero 2022.

El resultado del análisis de multicolinealidad (Fig. sup. 1) permite observar que la mayoría de los parámetros hidrográficos mostraron correlaciones significativas, destacando correlaciones positivas entre temperatura y oxígeno disuelto, y negativas entre oxígeno disuelto y salinidad, con niveles superiores a 0,65. Secundariamente, destacan las correlaciones positivas entre clorofila y turbidez ($r=0,59$), y entre oxígeno y turbidez ($r=0,48$).

TABLA 1. Estadística descriptiva por parámetro hidrográfico y campaña de monitoreo. UM: Unidad de medida; Sigla: nombre utilizado en análisis posteriores; Nobs: número de observaciones; min: mínimo; max: máximo; prom: promedio; desvest: desviación estándar; cv%: coeficiente de variación; S.W.: prueba de normalidad de Shapiro-Wilks; valor-p: probabilidad asociada a la prueba de normalidad. / Descriptive statistics for hydrographic parameters and monitoring campaigns. UM: Measurement Unit; Nobs: Number of observations; min: Minimum; max: Maximum; avg: Average; desvest: Standard deviation; and cv%: coefficient of variation. S.W: Shapiro-Wilks normality test, and p-value represents the probability associated with the test.

Campaña	Parámetro	UM	Sigla	Nobs	min	max	mediana	prom	desvest	cv%	S.W.	valor-p
oct-21	Temperatura	($^{\circ}C$)	Temp	475	10,43	13,97	11,35	11,64	0,97	8%	0,8905	0,0000
	Salinidad	(psu)	Sal	475	22,29	34,30	33,57	33,01	1,63	5%	0,6683	0,0000
	Oxígeno disuelto	(mg/l)	Odis	475	0,03	15,04	5,85	6,06	4,61	76%	0,8993	0,0000
	Saturación oxígeno	(%)	Osat	475	0,28	171,97	64,88	68,03	52,10	77%	0,9001	0,0000
	Turbidez	(FTU)	Turb	475	0,01	10,66	1,35	1,64	1,35	82%	0,7932	0,0000
	Clorofila-a	(mg m^{-3})	Chla	452	0,46	43,74	9,46	12,27	10,92	89%	0,8935	0,0000
ene-22	Temperatura	($^{\circ}C$)	Temp	506	10,37	19,21	13,08	13,34	2,43	18%	0,9155	0,0000
	Salinidad	(psu)	Sal	506	20,06	34,66	34,48	34,19	1,31	4%	0,2801	0,0000
	Oxígeno disuelto	(mg/l)	Odis	506	0,03	14,38	4,63	4,71	4,08	87%	0,8936	0,0000
	Saturación oxígeno	(%)	Osat	506	0,28	171,59	53,48	57,02	50,34	88%	0,8907	0,0000
	Turbidez	(FTU)	Turb	506	0,20	4,19	0,88	0,98	0,62	63%	0,8785	0,0000
	Clorofila-a	(mg m^{-3})	Chla	486	0,66	60,29	4,19	7,08	7,61	107%	0,7729	0,0000
ago-22	Temperatura	($^{\circ}C$)	Temp	545	9,06	12,75	12,30	12,23	0,31	3%	0,5746	0,0000
	Salinidad	(psu)	Sal	545	1,75	34,21	33,58	32,74	3,12	10%	0,3914	0,0000
	Oxígeno disuelto	(mg/l)	Odis	545	3,92	10,91	7,89	7,90	1,01	13%	0,9752	0,0000
	Saturación oxígeno	(%)	Osat	545	44,33	117,67	86,89	85,44	10,99	13%	0,9860	0,0000
	Turbidez	(FTU)	Turb	545	0,01	18,66	0,66	1,29	2,08	162%	0,5329	0,0000
	Clorofila-a	(mg m^{-3})	Chla	505	0,01	12,21	0,94	1,54	2,19	142%	0,6148	0,0000

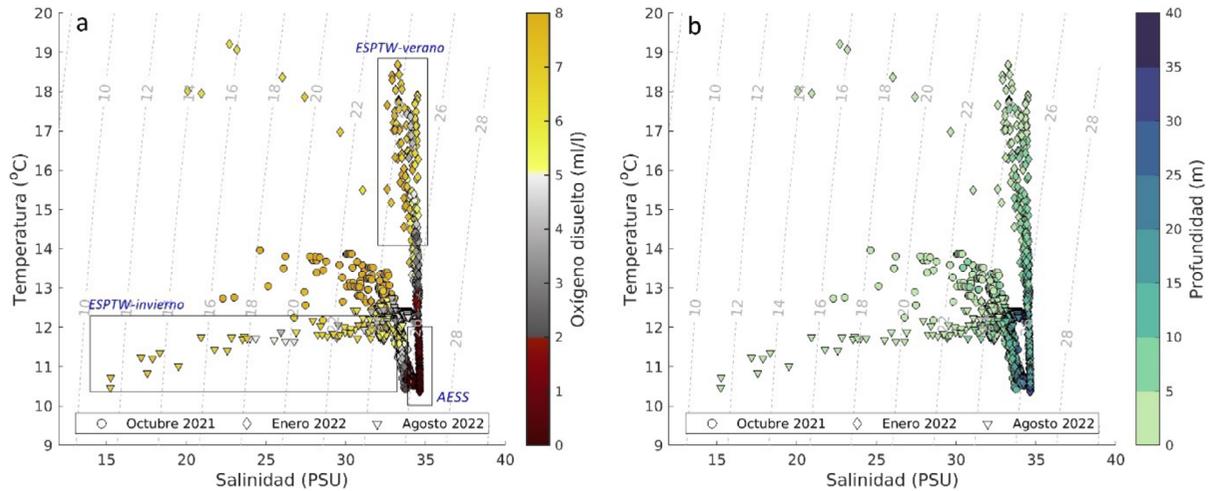


FIGURA 6. Diagramas T-S con codificación en colores para el (a) oxígeno y (b) la profundidad. Los símbolos identifican los datos para cada campaña oceanográfica (ver leyenda). / T-S diagrams of (a) oxygen and (b) depth. The symbols represents the oceanographic campaigns (see legend).

DISCUSIÓN

Las observaciones hidrográficas *in situ*, los registros satelitales, y las series de tiempo analizadas, muestran una clara estacionalidad en el golfo de Arauco donde marcadas diferencias espacio/temporales fueron encontradas entre los tres periodos estudiados.

En general, la TSM (Figs. 2a, 4a) y la clorofila-a (Fig. 4d) mostraron el típico patrón en respuesta a la surgencia costera durante primavera, donde el ascenso de Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS) advectadas a la superficie generaron un descenso en la temperatura y alta concentración de clorofila superficial (> 20 mg m⁻³). La alta clorofila-a observada en este periodo probablemente es consecuencia de las propiedades de la AESS (Silva *et al.* 2009), la cual presenta altas concentraciones de nutrientes (20–40 μM Nitrato, 2,6–3 μM Fosfato; 25–40 μM Silicato) que estimulan el crecimiento del fitoplancton y favorecen las altas tasas de producción primaria (Daneri *et al.* 2000; Montero *et al.* 2007). Aunque los vientos favorables para la surgencia fueron intensos durante octubre 2021, las concentraciones de oxígeno disuelto <2ml L⁻¹ típicas de las AESS llegaron sólo hasta 10 m de profundidad (Fig. 5l) no ascendiendo totalmente a la superficie. A pesar de esto, se registraron valores entre 0,5 y 2ml L⁻¹ en casi

toda la zona costera del golfo de Arauco. Probablemente, si el muestreo hidrográfico hubiese cubierto la totalidad del golfo (hasta Boca Chica y Boca Grande), se observaría que las concentraciones hipóxicas alcanzarían la superficie como ha sido reportado en estudios previos al norte del golfo de Arauco (De la Maza & Farías, 2023).

En verano, se desarrollaron tres eventos particulares. Por un lado, la temperatura superficial del mar presentó altos valores (>15,5°C) en todo el golfo de Arauco, llegando incluso hasta ~18°C en su cabecera. Por otro lado, bajas concentraciones de oxígeno disuelto (<2ml L⁻¹) se presentaron desde 20 m hasta el fondo en toda la extensión costera del golfo de Arauco y, además, intensos vientos favorables a surgencia, intercalados con relajación y hundimiento, predominaron durante ese mes. La alta temperatura superficial alimentada por la alta radiación solar durante este periodo (Fig. 3b) reveló la presencia de una sombra de surgencia, captada tanto por la información satelital (Fig. 2b), como por los datos hidrográficos *in situ* (Fig. 4b). Los resultados de este estudio revelaron que el golfo de Arauco estuvo totalmente cálido en enero 2022, mientras que en la zona oceánica frente a Punta Lavapie se presentó un foco activo de surgencia con una lengua de baja temperatura dirigiéndose hacia el norte (Fig. 2a). Las sombras de surgencia descritas ampliamente en Wong *et al.*

(2021) y Mardones *et al.* (2022) para el golfo de Arauco, han sido definidas como regiones localizadas dentro de un activo sistema de surgencia costera, donde la surgencia se reduce y se observa un patrón coherente de temperatura superficial anómalamente alta al interior de las bahías (Graham & Largier 1997). Wong *et al.* (2021) desarrollaron un índice para calcular las sombras de surgencia (USI) basado en las diferencias de temperatura superficial entre el golfo de Arauco y una región lejana a la costa frente a Punta Lavapie (37° S), caracterizada por presentar surgencia activa. Los autores encontraron que los eventos USI más importantes fueron más frecuentes en primavera/verano durante eventos de vientos favorables a surgencia, con un fuerte rotor ciclónico del viento, intercalados con eventos de relajación. Observaron, además, altas correlaciones entre el USI, el rotor del estrés del viento y la radiación solar para algunos meses de verano ($r^2 = 40\% - 80\%$). Además, determinaron tiempos de residencia del agua de hasta 15 días durante el desarrollo de estos eventos de sombra en el golfo. La información del mes de enero 2022 obtenida en este artículo podría ser complementada con datos del rotor del estrés del viento en un estudio futuro, con el objetivo de calcular el mismo índice (USI) implementado por Wong *et al.* (2021). Esto permitiría profundizar en los efectos de las sombras de surgencia sobre la estructura vertical de la columna de agua en este significativo importante y productivo golfo del SCH (Hernández-Miranda *et al.* 2013)

Otro evento encontrado en enero 2022 mostró que bajas concentraciones de oxígeno disuelto ($< 2 \text{ ml L}^{-1}$) se distribuyeron en las aguas profundas ($> 20 \text{ m}$) de toda la zona costera del golfo de Arauco (Fig. 5k). Aunque estas bajas concentraciones no llegaron a superficie, la influencia de las AESS (Fig. 6a, b) fue notoria en esta época. Esto último también se ve reflejado en la alta salinidad a lo largo del borde costero del golfo (Fig. 5e). Por otro lado, a diferencia de lo registrado en primavera, y aunque los vientos favorables a surgencia fueron intensos en enero 2022, su carácter fue casi permanente, intercalando estos períodos con vientos favorables a hundimiento y con relajaciones. Tal como fue reportado por Wong *et al.* (2021), vientos favorables a surgencia y posteriores relajaciones generan las condiciones para el desarrollo de las sombras de surgencia y su influencia en los componentes biológicos del ecosistema.

En invierno, el sistema fue completamente disímil a lo registrado en primavera y verano. El golfo de Arauco y la zona oceánica adyacente presentaron bajas temperaturas ($< 12^\circ\text{C}$), especialmente en la cabecera (Figs. 2c y 4c). Es interesante notar que la sección de temperatura durante invierno (Fig. 5c) desde el norte (estación S1 en desembocadura) hasta la zona sur (estación S21 en Boca Chica) del golfo de Arauco registró en superficie valores $\leq 12^\circ\text{C}$ mientras que en profundidad

fluctuaron alrededor de $12,5 - 13^\circ\text{C}$. Esto reveló la presencia de inversiones térmicas en las costas del golfo de Arauco durante invierno, patrón previamente reportado por Sobarzo *et al.* (1993), quienes sugieren que las aguas del río Biobío, levemente más frías que las del golfo de Arauco, generarían esta inversión. Faúndez-Báez *et al.* (2001), también registraron inversiones térmicas, enfocándose particularmente en las bahías de Coronel, Concepción y San Vicente.

Por otro lado, la influencia del río Biobío, fue altamente notoria durante agosto 2022. Los valores más altos de descarga de agua dulce hacia el golfo de Arauco ocurrieron durante otoño-inverno (Fig. 3d), lo cual es concordante con el aumento de precipitaciones en esta época (Fig. 3c). Tanto en las observaciones satelitales de turbidez (Rrs 645; Fig. 2i), así como en los datos de salinidad superficial (Fig. 4f) y de la sección en las costas del golfo de Arauco (Fig. 5f), se reveló una clara señal de la pluma del río Biobío al interior del golfo. Esta pluma se dirigió hacia el sur desde la desembocadura del río Biobío, llegando incluso más allá de 37° S (Fig. 2d), lo que es coherente a la influencia del viento hacia sureste (Fig. 5l) predominante a hundimiento (Fig. 3a) durante invierno más el forzamiento de boyantes, que promueve la rotación y propagación hacia la izquierda de la pluma en el hemisferio sur. Estudios satelitales (Saldías *et al.* 2012, 2016), datos *in situ* (Léniz *et al.* 2012; Pérez *et al.* 2015; Vargas *et al.* 2016; Krautz *et al.* 2017), y simulaciones hidrodinámicas (Vergara *et al.* 2023), han reportado ampliamente la presencia de esta pluma en las costas del golfo de Arauco y la influencia del río Biobío en la hidrodinámica de la zona.

Por otra parte, se identificaron dos masas de agua: AESS, presente principalmente en primavera y verano (Figs. 6a, 6b) y ESPTW (verano e invierno; Figs. 6a, 6b). La AESS ya había sido observada por Sobarzo *et al.* (1993) en primavera-verano en el golfo de Arauco, donde, dependiendo de la intensidad de la surgencia costera registrada para ese periodo, ingresa al golfo desde el oeste ocupando casi todo el fondo. En nuestros resultados, observamos en las secciones de primavera 2021 y verano 2022, que el oxígeno disuelto $< 2 \text{ ml L}^{-1}$, alta salinidad ($> 34 \text{ psu}$) y baja temperatura ($< 11^\circ\text{C}$), cubrieron el fondo del golfo de Arauco, revelando la clara presencia del AESS, la cual ingresó a esta zona producto de los intensos vientos favorables a surgencia.

Respecto a la ESPTW, Schneider *et al.* (2003) describieron su presencia cerca de las costas de Chile, entre 20° y 38° S . La ESPTW se forma en el Pacífico Sur oriental, debido a que el Agua Superficial Subantártica (SASW, por sus siglas en inglés) localizada al norte del Frente Subantártico, se transporta hacia el norte en el Océano Pacífico Sur oriental, viajando a lo largo del borde del giro subtropical. La ESPTW a medida que se dirige hacia el ecuador, aumenta su temperatura

(Emery & Meincke, 1986). Debido a sus orígenes subárticos, la ESPTW es de baja salinidad. Esta masa de agua, también se ha observado en la Estación 18 (36°30.8' S, 73° 7.75' W) en aguas superficiales (0–30 m) durante invierno y verano (Sobarzo *et al.* 2007).

Finalmente, los resultados de este estudio dan cuenta de la marcada estacionalidad en el golfo de Arauco. Futuras investigaciones deberían considerar muestreos hidrográficos en la totalidad del golfo, abarcando desde Boca Grande en el norte, hasta punta Lavapie en el sur, incluyendo también las zonas de intercambio de aguas delimitadas por la Isla Santa María (Valle-Levinson *et al.* 2003). Estudios estacionales permanentes deberían ser establecidos en el golfo de Arauco, ya que esta zona, es particularmente importante por la gran producción primaria (Daneri *et al.* 2000) y pesquera (Cubillos *et al.* 2007) que sostiene, además de las concesiones de acuicultura, caletas de pescadores e industrias de amplia variedad que colindan con asentamientos urbanos a lo largo del borde costero. Contar, por ejemplo, con mediciones continuas en el tiempo de oxígeno disuelto, permitiría “adelantarse” a sucesos que generan desastres en la zona costera por eventos de aguas hipóxicas. Existe evidencia de efectos agudos sobre los organismos, como eventos de mortalidad masiva en peces (Hernández-Miranda *et al.* 2010, 2012) y efectos crónicos, incluyendo cambios en los ciclos de vida y dinámicas poblacionales de diversas especies de los fondos marinos (Hernández-Miranda *et al.* 2012).

CONCLUSIÓN

La hidrografía del golfo de Arauco reveló la marcada estacionalidad a la cual esta productiva zona está expuesta. Los cambios en la estructura de la columna de agua están fuertemente influenciados por la variabilidad estacional de forzantes tales como: vientos meridionales favorables a surgencia/hundimiento, radiación solar, descarga de agua dulce y precipitación.

La temperatura superficial del mar, durante primavera 2021, exhibió importantes cambios estacionales; bajos valores (<13°C) abarcaron casi por completo el golfo de Arauco, desde la desembocadura del río Biobío en la zona norte hasta Punta Lavapié al sur. Hacia el oeste de Punta Lavapie durante esta época, se detectó una lengua de agua aún más fría ($\leq 11,5^\circ\text{C}$) que presentó una clara extensión hacia el norte encerrando aguas superficiales con temperaturas $>12,5^\circ\text{C}$ al interior del golfo. En verano 2022, la temperatura superficial del mar fue considerablemente mayor que la observada en primavera

2021, con valores entre $15,5^\circ\text{C}$ y 18°C . Al igual que durante primavera, una lengua de agua fría ($\sim 13^\circ\text{C}$) se presentó fuera de Punta Lavapie, evidenciando un foco de surgencia activa en esta zona. La alta temperatura superficial alimentada por la radiación solar durante este periodo reveló la presencia de una sombra de surgencia, captada tanto por la información satelital, como por los datos hidrográficos *in situ*.

La clorofila superficial fue alta ($>20 \text{ mg m}^{-3}$) en gran parte del golfo de Arauco durante primavera (2021) y verano (2022). En invierno 2022, en cambio, la clorofila fue la más baja de los periodos estudiados ($<15 \text{ mg m}^{-3}$), presentándose los mayores valores hacia el sur del golfo de Arauco. Lo observado durante el invierno, fue consistente con la radicación solar presente en esta época la cual alcanzó los menores valores de la serie temporal y donde los vientos favorables a hundimiento costero predominaron durante este período.

La salinidad y la señal de turbidez permitieron identificar la expansión de la pluma del río Biobío durante invierno 2022. Esto es resultado del aumento de las precipitaciones durante esta época, ocasionando un incremento en la descarga del río Biobío ($>1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). El desplazamiento pegado a la costa de la pluma del Biobío hacia el sur de su desembocadura fue consistente con el viento favorable a hundimiento (hacia el sur), los que sobrepasaron incluso los 5 m s^{-1} .

El oxígeno disuelto se distribuyó de manera similar en los primeros 10 m la columna de agua, tanto en primavera (2021) como en verano (2022), con concentraciones $>5 \text{ ml L}^{-1}$. En ambos periodos, valores entre 2 y 5 ml L^{-1} se identificaron entre 10 y 20 m, y concentraciones desde $0,5$ a 2 ml L^{-1} , fueron observadas bajo 20 m. Sin embargo, la señal de hipoxia cubrió todo el fondo de la zona de estudio, expandiéndose desde el norte (desembocadura del Biobío) hasta la última estación en Boca Chica durante verano. En contraste, la columna de agua presentó elevadas concentraciones de oxígeno disuelto ($> 5 \text{ ml L}^{-1}$) en casi la totalidad de la columna de agua durante invierno.

Mediante los diagramas TSO y TSP, se identificaron dos masas de agua: el Agua de Transición del Pacífico Suroriental y el Agua Ecuatorial Subsuperficial, esta última, presente durante verano y primavera principalmente, exhibiendo bajas concentraciones de oxígeno disuelto ($<2 \text{ ml L}^{-1}$), baja temperatura ($<12^\circ\text{C}$) y alta salinidad ($\geq 34 \text{ psu}$).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Se incluyen una figura con los resultados de la prueba de multicolinealidad para parámetros hidrográficos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen al Proyecto Red de Monitoreo Ambiental de Ecosistemas Marinos del Golfo de Arauco, financiado por el Ministerio del Medio Ambiente, a través del cual se obtuvieron los datos hidrográficos presentados en esta investigación. Además, a los profesionales científico-técnicos que participaron de las actividades de terreno y a la tripulación de la L/C Kay-Kay II, del Departamento de Oceanografía de la Universidad de Concepción. Agradecemos también la revisión anónima realizada a nuestro manuscrito, cuyos comentarios y sugerencias permitieron generar una versión mejorada del artículo. Odette A. Vergara fue parcialmente financiada por una Beca Postdoctoral de la Universidad del Bío-Bío y por ANID COPAS Coastal FB210021. Gonzalo S. Saldías y Marcus Sobarzo fueron financiados parcialmente por ANID Fondecyt Regular 1220167 y ANID COPAS Coastal FB210021. Marcus Sobarzo y Eduardo Hernández-Miranda fueron parcialmente financiados por INCAR-FONDAP-1522A0004-1523A0007.

REFERENCIAS

- Bakun, A., Black, B.A., Bograd, S.J., Garcia-Reyes, M., Miller, A.J., Rykaczewski, R.R., Sydeman, W.J. 2015. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. *Current Climate Change Report* 1: 85-93.
- Bustos, S., Gallardo, L., Garreaud, R., Tondreau, N. 2015. La Megasequía 2010–2015: una lección para el futuro. Centre for Climate and Resilience Research (CR)2, Universidad de Chile. URL: <http://www.cr2.cl/megasequia>. Consultado: Agosto 20, 2023.
- Chavez, F.P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P., Csirke, J. 2008. The northern Humboldt Current System: brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography* 79(2-4): 95–105.
- Chavez, F.P., Messié, M. 2009. A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress in Oceanography* 83(1-4): 80-96.
- Cubillos, L.A., Arcos, D.F. 2002. Recruitment of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central-south Chile in the 1990s and the impact of the 1997–1998 El Niño. *Aquatic Living Resources* 15(2): 87-94.
- Cubillos, L.A., Ruiz, P., Claramunt, G., Gacitúa, S., Núñez, S., Castro, L., Riquelme, K., Alarcón, C., Oyarzún, C., Sepúlveda, A. 2007. Spawning, daily egg production, and spawning stock biomass estimation for common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central southern Chile in 2002. *Fisheries Research* 86(2-3): 228-240.
- Daneri, G., Dellarossa, V., Quiñones, R., Jacob, B., Montero, P., Ulloa, O. 2000. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Marine Ecology Progress Series* 197: 41-49.
- Daneri, G., Montero, P., Lizarraga, L., Torres, R., Iriarte, J.L., Jacob, B., González, H., Tapia, F.J. 2012. Primary productivity and heterotrophic activity in an enclosed marine area of central Patagonia (Puyuhuapi channel; 44° S, 73° W). *Biogeosciences Discussions* 9(5): 5929-5968.
- De La Maza, L., Farías, L. 2023. The intensification of coastal hypoxia off central Chile: Long term and high frequency variability. *Frontiers in Earth Science* 10: 929271.
- Djurfeldt, L. 1989. Circulation and mixing in a coastal upwelling embayment; Gulf of Arauco, Chile. *Continental Shelf Research* 9(11): 1003-1016.
- Emery, W.J., Meincke, J. 1986. Global water masses: summary and review. *Oceanologica acta* 9(4): 383-391.
- Faúndez- Báez, P., Morales, C.E., Arcos, D. 2001. Variabilidad especial y temporal en la hidrografía invernal del sistema de bahías frente a la VIII región (Chile centro-sur). *Revista Chilena de Historia Natural* 74(4): 817-831.
- Figuerola, D., Moffat, C. 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean coast. *Geophysical Research Letters* 27(23): 3905-3908.
- Garreaud, R.D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. 2017. The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Science* 21(12): 6307-6327.
- Garreaud, R., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D. 2019. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40(1): 421-439.
- Graham, W.M., Largier, J.L. 1997. Upwelling shadows as nearshore retention sites: The example of northern Monterey Bay. *Continental Shelf Research* 17(5): 509-532.
- Grosjean, P., Ibanez, F. 2018. Pastecs: Package for Analysis of Space-Time Ecological Series. R package version 1.3.21. <https://CRAN.R-project.org/package=pastecs>.
- Gutiérrez, D., Akester, M., Naranjo, L. 2016. Productivity and Sustainable Management of the Humboldt Current large marine ecosystem under climate change. *Environmental Development* 17: 126-144.
- Hernández, A.F., Cubillos, L.A., Quiñones, R.A. 2011. Evaluación de la talla estructurada de los stocks de *Ensis macha* y *Tagelus dombeii* en el Golfo de Arauco, Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 46(2): 157-176.
- Hernández, E.H., Castro, L.R. 2000. Larval growth of the

- anchoveta *Engraulis ringens* during the winter spawning season off central Chile. *Fishery Bulletin* 98(4): 704-710.
- Hernández-Miranda, E., Quiñones, R.A., Aedo, G., Valenzuela, A., Mermoud, N., Román, C., Yañez, F. 2010. A major fish stranding caused by a natural hypoxic event in a shallow bay of the eastern South Pacific Ocean. *Journal of Fish Biology* 76(7): 1543-1564.
- Hernández-Miranda, E., Veas, R., Labra, F.A., Salamanca, M., Quiñones, R.A. 2012. Response of the epibenthic macrofaunal community to a strong upwelling-driven hypoxic event in a shallow bay of the southern Humboldt Current System. *Marine Environmental Research* 79: 16-28.
- Hernández-Miranda, E., Veas, R., Anabalón, V., Quiñones, R.A. 2017. Short-term alteration of biotic and abiotic components of the pelagic system in a shallow bay produced by a strong natural hypoxia event. *PLoS ONE* 12(7): e0179023.
- Hoegh-Guldberg, O., Bruno, J.F. 2010. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science* 328(5985): 1523-1528.
- Krautz, M.C., Hernández-Miranda, E., Veas, R., Bocaz, P., Riquelme, P., Quiñones, R.A. 2017. An estimate of the percentage of non-predatory dead variability in coastal zooplankton of the southern Humboldt Current System. *Marine Environmental Research* 132: 103-116. doi: 10.1016/j.marenvres.2017.10.008.
- Landaeta, M.F., Castro, L.R. 2002. Spring spawning and early nursery zone of the mesopelagic fish *Maurolicus parvipinnis* at the coastal spawning zone off Talcahuano, central Chile. *Marine Ecology Progress* 226: 179-191.
- Landaeta, M.F., Castro, L.R. 2006. Spawning and larval survival of the Chilean hake *Merluccius gayi* under later summer conditions in the Gulf of Arauco, central Chile. *Fisheries Research* 77(1): 115-121
- Landaeta, M.F., Castro, L.R. 2012. Seasonal and annual variation in Chilean hake *Merluccius gayi* spawning locations and egg size off central Chile. *Progress in Oceanography* 92: 166-177.
- Léniz, B., Vargas, C.A., Ahumada, R. 2012. Characterization and comparison of microphytoplankton biomass in the lower reaches of the Biobío River and the adjacent coastal area off Central Chile during autumn-winter conditions, *Latin American Journal of Aquatic Research* 40(4): 847-857.
- Mardones, P., Wong, Z., Contreras-Rojas, J., Muñoz, R., Hernández-Miranda, E., Sobarzo, M. 2022. Upwelling shadows driven by the low-level jet along the subtropical west coast of South America. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 127(8): e2021JC017979.
- Masotti, I., Aparicio-Rizzo, P., Yevenes, M.A., Garreaud, R., Belmar, L., Farías, L. 2018. The influence of river discharge on nutrient export and phytoplankton biomass off the central Chile Coast (33-37 S): seasonal cycle and interannual variability. *Frontiers in Marine Science* 5: 423.
- Montero, P., Daneri, G., Cuevas, L.A., González, H.E., Jacob, B., Lizárraga, L., Menschel, E. 2007. Productivity cycles in the coastal upwelling area off Concepción: the importance of diatoms and bacterioplankton in the organic carbon flux. *Progress in Oceanography* 75(3): 518-530.
- Parada, C.E., Sobarzo, M.A., Figueroa, D., Castro, L. 2001. Circulation of the Arauco Gulf in a seasonal transitional period: A new approach. *Investigaciones Marinas. CICIMAR* 29(1): 11-23.
- Pérez, C.A., DeGrandpre, M.D., Lagos, N.A., Saldías, G.S., Cascales, E.K., Vargas, C.A. 2015. Influence of climate and land use in carbon biogeochemistry in lower reaches of rivers in central southern Chile: implications for the carbonate system in river-influenced rocky shore environments. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120(4): 673-692.
- Peterson, B.G., Carl, P. 2020. Performance Analytics: Econometric Tools for Performance and Risk Analysis. R package version 2.0.4. <https://CRAN.R-project.org/package=PerformanceAnalytics>.
- Pineda, V. 1999. El cañón submarino del Biobío: Aspectos dinámicos y ambientales. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Centro EULA-CHILE. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Quiñones, R.A., Gutiérrez, M.H., Daneri, G., Gutiérrez, D., González, H., Chavez, F., 2009. Pelagic carbon fluxes in the Humboldt Current System. In: Liu, K.-K., Atkinson, L., Quiñones, R., Talaue-McManus, L. (Eds.), *Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: A Global Synthesis*, Springer-Verlag, Weinheim, pp. 44-64. Chapter 2.3. Series: Global Change-The IGBP Series.
- Saldías, G.S., Largier, J.L., Mendes, R., Pérez-Santos, I., Vargas, C.A., Sobarzo, M. 2016. Satellite-measured interannual variability of turbid river plumes off central-southern Chile: spatial patterns and the influence of climate variability. *Progress in Oceanography* 146: 212-222.
- Saldías, G.S., Sobarzo, M., Largier, J., Moffat, C., Letelier, R. 2012. Seasonal variability of turbid river plumes off central Chile based on high-resolution MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*. 123: 220-233.
- Schneider, W., Fuenzalida, R., Rodríguez-Rubio, E., Garcés-Vargas, J., Bravo, L. 2003. Characteristics and formation of eastern South Pacific intermediate water. *Geophysical Research Letters* 30(11): 1581.
- Silva, N., Rojas, N., Fedele, A. 2009. Water masses in the Humboldt Current System: properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for equatorial subsurface water off Chile. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(16): 1004-1020.
- Sobarzo, M.E., Sansone, E., De Maio, A., Arcos, D., Salamanca,

- M., Henríquez, J. 1993. Oceanografía física del Golfo de Arauco. Variabilidad espacio temporal de la estructura hidrográfica de las aguas del Golfo de Arauco. Primer parte. Faranda, F., Parra, O. (Ed.). Universidad de Concepción, Serie Monografías Científicas 4. 152 pp.
- 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.
- Sobarzo, M., Saldías, G.S., Tapia, F.J., Bravo, L., Moffat, C., Largier, J.L. 2016. On subsurface cooling associated with the Biobio River Canyon (Chile). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121(7): 4568-4584.
- Strub, P.T., Mesías, J., Montecino, V., Rutlland, J., Salinas, S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. En: Robinson, A.R., Brink, K.H. (Eds.) *Endless forms: The sea: The global coastal ocean, Regional studies and synthesis: 273-313*. New York, Wiley.
- Valle-Levinson, A., Atkinson, L.P., Figueroa, D., Castro, L. 2003. Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 108(C2): 3054.
- Vargas, C.A., Contreras, P.Y., Pérez, C.A., Sobarzo, M., Saldías, G.S., Salisbury, J. 2016. Influences of riverine and upwelling waters on the coastal carbonate system off Central Chile and their ocean acidification implications. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 121(6): 1468-1483.
- Vergara, O.A, Echevin, V., Sobarzo, M., Sepúlveda, H.H., Castro, L., Soto-Mendoza, S. 2023. Impacts of interannual freshwater discharge on hydrodynamical patterns in the Gulf of Arauco (central-southern Chile) using a high-resolution model. *Journal of Marine Systems* 240: 103862.
- Völker, D., Geersen, J., Contreras-Reyes, E., Sellanes, J., Pantoja, S., Rabbel, W., Thorwart, M., Reichert, C., Block, M., Reimer, W. 2014. Morphology and geology of the continental shelf and upper slope of southern Central Chile (33 S-43 S). *International Journal of Earth Sciences* 103: 1765-1787.
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D. 2023. *Dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.2. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>.
- Wong, Z., Saldías, G.S., Largier, J.L., Strub, P.T., Sobarzo, M. 2021. Surface thermal structure and variability of upwelling shadows in the Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126(4): e2020JC016194.

Received: 07.09.2023

Accepted: 20.12.2023