



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y  
OCEANOGRÁFICAS



# INFLUENCIA DE LA BRISA MARINA EN LA CIRCULACIÓN DEL GOLFO DE ARAUCO

Nicolás Cisternas Torres

Tesis para optar al Título de Biólogo marino

Profesor Guía: Dr. Marcus Sobarzo Bustamante

Diciembre, 2024

Concepción, Chile

# Índice

Resumen.....	4
Introducción .....	5
1.1.    Brisa marina .....	5
1.2.    Estado del arte sobre el tema de la brisa marina en el golfo de Arauco .....	7
1.3.    Golfo de Arauco.....	8
1.4.    Brisa marina y corrientes costeras.....	11
1.5.    Corrientes al interior del golfo de Arauco .....	12
1.6.    Vientos y dispersión de contaminantes .....	13
1.7.    Hipótesis .....	15
1.8.    Objetivos .....	15
1.8.1.    Objetivo general .....	15
1.8.2.    Objetivos específicos.....	15
Metodología.....	16
2.1.    Obtención de datos .....	16
2.1.1.    Datos de viento .....	16
2.1.2.    Datos de corrientes .....	16
2.2.    Procesamiento de datos.....	17
2.2.1.    Variabilidad diurna del viento .....	17
2.2.2.    Corrientes del periodo diurno.....	18
Resultados .....	19
3.1.    Variabilidad diurna del viento .....	19
3.1.1.    Ciclo del viento en el verano.....	19
3.1.2.    Espectros del viento .....	21
3.2.    Corrientes de período diurno .....	22
3.2.1.    Diagramas de dispersión .....	22
3.2.2.    Estructura vertical de la columna de agua.....	25
3.2.3.    Diagrama de vector progresivo .....	28
3.2.4.    Espectros rotatorios.....	31
3.2.5.    Armónico de 24 horas de la corriente.....	32
3.2.6.    Ciclos diarios de la corriente .....	38
3.3.    Coherencia cuadrada y fase entre el viento y las corrientes.....	40
3.3.1.    Coherencia cuadrada y fase de la componente zonal .....	40

3.3.2. Coherencia cuadrada y fase de la componente meridional .....	43
Discusión .....	46
4.1. Contraste de resultados con estudios previos .....	46
4.2. Hallazgos Principales .....	49
4.3. Implicaciones para la gestión ambiental y pesquera .....	50
4.4. Evaluación de la calidad del método utilizado .....	51
4.5. Evaluación de las limitaciones y proyecciones del estudio .....	51
4.6. Cumplimiento de la hipótesis planteada .....	52
Conclusión.....	54

## Resumen

El presente estudio evalúa el impacto de la brisa marina (BM) sobre la circulación costera del golfo de Arauco a través del análisis de datos de dirección e intensidad del viento durante primavera-verano. Con datos de corrientes marinas obtenidas *in situ* se evaluó la formación de una estructura de doble capa en la columna de agua (circulación superficial y subsuperficial) debido a la influencia de vientos diurnos. Los datos de la estación meteorológica de Carriel Sur (febrero-marzo 2022) y tres anclajes oceanográficos mostraron que el ciclo diario explicó el 25.8% de la variabilidad zonal del viento y hasta el 7.9% de la variabilidad de las corrientes superficiales en Arauco, aunque en Boca Chica y Punta Delicada este efecto fue menor debido a la geomorfología. La coherencia cuadrada entre viento y corrientes fue significativa en Arauco y Boca Chica, con desfases de hasta 3.5 h, mientras que en Punta Delicada fue limitada. Eventualmente, en presencia de material disuelto o en suspensión en la columna de agua en el sector de Arauco, esta variabilidad diurna podría favorecer la acumulación de este material en la costa durante la noche y su dispersión hacia el norte durante el día, destacando la importancia de la BM sobre la dinámica costera y su relevancia para la gestión ambiental del golfo.

**Palabras clave:** Brisa marina, circulación costera, Golfo de Arauco, variabilidad diurna, estructura de corrientes de doble capa.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Brisa marina

Este es un proceso meteorológico de mesoescala atmosférica (del orden de decenas a cientos de kilómetros) producido por la diferencia de temperatura diurna entre océano y continente. Se debe al hecho de que el calor específico del agua es de dos a cuatro veces mayor que el calor específico de la tierra (Schink & Room, 2012). Esto significa que, expuestas a una misma cantidad de radiación solar, las masas de agua tardan más en calentarse o enfriarse en comparación con las masas de tierra. En este escenario, el aire que está en contacto con la superficie del agua se calentará o se enfriará más lentamente que el aire sobre la tierra. Esta diferencia en la temperatura crea una diferencia en la densidad del aire, ya que el aire caliente es menos denso que el aire frío. Este gradiente térmico y de densidad resultante genera un gradiente de presión atmosférico, lo que intensifica el viento resultante de mar a tierra (Urrutia et al., 1996).

El aire caliente que se encuentra sobre la tierra tiende a ascender, debido a que, mientras el aire se calienta, las moléculas que lo componen ganan energía cinética. Como resultado, el espacio entre las moléculas tiende a aumentar, lo que hace que el aire se expanda y se eleve. Cuando ocurre este ascenso, el aire se enfriará y se volverá más denso. Esta acumulación de aire más denso resultará en un aumento de la presión en el punto más alto (NOAA 2011).

Una vez que se genera un centro de alta presión en altura, la atmósfera nuevamente intentará mantener la continuidad de la masa, por consecuencia, se creará un viento que soplará de regreso hacia el mar. Este viento en altura se llama flujo de retorno. A medida que el aire cruza el agua se volverá más frío y denso, lo que creará la

tendencia del aire a hundirse hacia la superficie del agua. Este descenso sobre el agua creará un centro de menor presión en altura y un hundimiento en la superficie del agua (Fig. 1, Schink & Room, 2012).

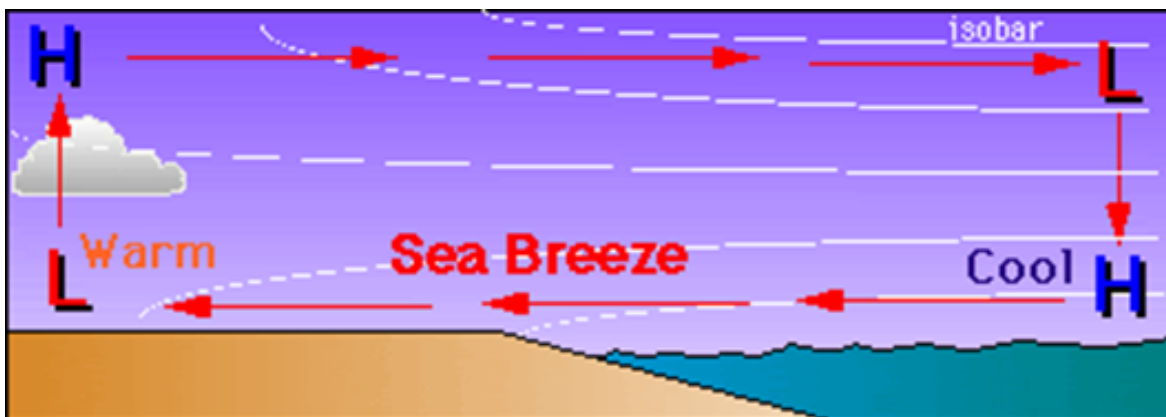


Figura 1: Diagrama del efecto de la brisa marina. Las flechas representan el flujo del viento. Las líneas blancas representan las superficies de presión (Extraído de: Air pollution Training Institute (APTI)).

Durante la noche, la masa de tierra se enfriará más rápido que la masa de agua, lo que significa que el agua estará relativamente más caliente que la masa de tierra. A través de la conducción y la convección térmica, las superficies del agua y la tierra volverán a modificar el aire sobre la tierra y el agua, haciendo que el aire sobre la tierra sea más frío que el aire sobre el agua. En consecuencia, el efecto de la brisa marina se invierte durante la noche originando la brisa terrestre (Fig. 2).

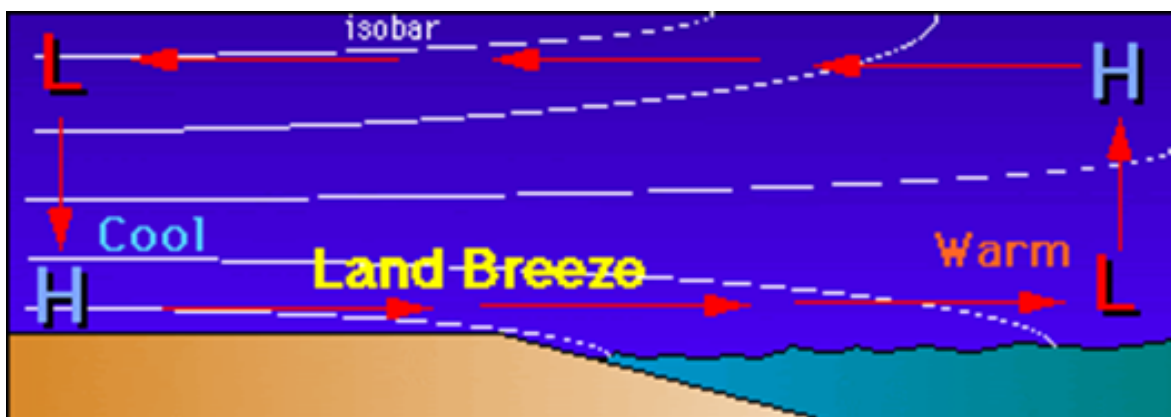


Figura 2: Diagrama del efecto de la brisa terrestre. Las flechas rojas representan el flujo del viento. Las líneas blancas representan las superficies de presión. (Extraído de: Air Pollution Training Institute (APTI)).

## 1.2. Estado del arte sobre el tema de la brisa marina en el golfo de Arauco

Estudios publicados sobre el efecto de la brisa marina (BM) en la circulación de las corrientes dentro del golfo de Arauco (GA) no existen. Desde un punto de vista meteorológico, el único estudio publicado de BM en este golfo proviene de Urrutia et al., 1996. Estos autores encontraron que la BM superficial en el golfo de Arauco es un fenómeno regular y bien definido que se establece principalmente en días despejados y con débiles vientos. Este fenómeno se caracteriza por un patrón diurno, donde los vientos soplan predominantemente desde el mar hacia la costa durante las horas de la tarde, debido al calentamiento diferencial entre el continente y el océano. Además, observaron que la intensidad y la persistencia de la BM estaban influenciadas por factores estacionales, siendo más pronunciadas durante los meses de verano.

Por otro lado, Valle-Levinson et al. (2003), encontraron que los vientos predominantes del sur presentan un patrón diurno bien definido. Estos vientos alcanzan su máxima intensidad al atardecer (20:00-21:00) y generan oscilaciones en la columna de agua. Estas oscilaciones, impulsadas por el flujo vertical del momento horizontal y el intercambio aire-mar, pueden generar movimientos internos que se propagan en forma de ondas Kelvin a lo largo de la costa y se disipan en zonas poco profundas, como Boca Chica. Además, este patrón diurno también está relacionado con una circulación inducida por vientos, caracterizada por flujos divergentes en la superficie que permiten la ventilación de aguas subsuperficiales surgidas en la parte sur del golfo. Estos hallazgos resaltan la influencia crítica de la variabilidad diurna del viento en la dinámica oceanográfica y ecológica del GA.

### 1.3. Golfo de Arauco

El GA constituye la mayor área costera semicerrada en la zona central de Chile. Ubicado en la región del Biobío ( $37^{\circ}02'12''\text{S}$ ,  $73^{\circ}19'42''\text{O}$ ), abarca cerca de 1400 km<sup>2</sup> con dos áreas de contacto con el mar abierto: "boca Grande" entre punta Cullinto y la isla Santa María (ISM), y "boca Chica" entre punta Lavapié y la ISM (Alarcón, 1970), con profundidades cercanas a los 20 y 50 metros y con un ancho cercano a los 8 y 25 km, respectivamente (Wong et al., 2021).

Comparado con otras áreas costeras el GA presenta características geomorfológicas únicas que es necesario destacar: (a) PL se extiende zonalmente hacia el oeste en una extensión cercana a los 40 km constituyendo la cabecera del GA. Otros cabos prominentes en la costa de Chile, como Curaumilla ( $33^{\circ}05'\text{S}$ ), Lengua de Vaca ( $36^{\circ}15'\text{S}$ ), o Mejillones ( $23^{\circ}02'\text{S}$ ), no superan los 25 km en dirección Este-Oeste (Wong et al., 2021). Esta extensión zonal significa que es el lugar en la costa chilena donde la línea de costa cambia su orientación más dramáticamente ( $30^{\circ}$ ). (b) Al sur de PL, la orientación de la línea de costa es hacia los  $350^{\circ}$  (relativo al Norte geográfico). Al norte de PL, la línea de costa está orientada hacia los  $20^{\circ}$  con respecto al Norte geográfico (Valle-Levinson et al., 2003). (c) Al sur del GA se ubica el límite occidental de la cordillera de Nahuelbuta (CN). Las alturas típicas entre la CN y PL fluctúan alrededor de 200–300 m con valores que, en PL, pueden alcanzar los 350 m de altura. Esta orografía constituye una barrera natural que protege al GA de la mayor parte de la influencia de los vientos del sur (Wong et al., 2021). (d) El ancho de la plataforma continental es del orden de 12 km al sur de PL. Esta condición cambia bruscamente al norte del cañón del Biobío, llegando a  $\sim 60$  km (Sobarzo & Djurfeldt, 2004). Así entonces, el GA puede dividirse en dos zonas: (a) Al sur de  $37^{\circ}\text{S}$  corresponde a la cabecera, de menor profundidad que 50 m, y caracterizada por una orientación de la línea de costa este-oeste; (b) Al norte de  $37^{\circ}\text{S}$ , el GA se extiende hasta el cañón submarino del Biobío con profundidades

entre 50 y 500 m, aproximadamente. Por lo tanto, esta área está más expuesta a las influencias eólicas y oceánicas (Mardones et al., 2022).

Esta batimetría, que incluye el cañón submarino del Biobío en su lado norte y la ISM en su borde occidental, hace del GA una ensenada semicerrada única, conectada con las aguas subsuperficiales del talud continental a través del cañón del Biobío y su afluente ubicado en el extremo norte de la ISM (Sobarzo et al., 2016).

Además, al noroeste del GA se ubica la desembocadura del río Biobío, cuyos caudales medios mensuales varían entre 300 y 2000 m<sup>3</sup>/s entre verano e invierno (Sobarzo et al., 1993). Este río, junto con los ríos Tubul, Raqui y Carampangue, son las principales fuentes de agua dulce para el GA (Sobarzo et al., 2016).

El GA, gracias a sus condiciones oceanográficas y geomorfológicas, se considera una de las zonas costeras más productivas a nivel mundial (Hernández et al., 2011), con elevados niveles de producción primaria (Daneri et al., 2000) y amplios sitios de retención de plancton (Castro et al., 2007). En sus aguas habitan grandes cantidades de diversas especies de peces, algas, moluscos y crustáceos, que no solo son la base del ecosistema, sino también de la economía local (Arrizaga et al., 1991). Entre estas especies destacan la anchoveta en invierno (Castro et al., 1997) y la cigala y la merluza en primavera-verano (Vargas y Castro, 2001; Yannicelli et al., 2006). Además, el golfo es un importante centro de desove y reclutamiento de peces (Landaeta y Castro, 2006), lo que potencia aún más la intensa actividad pesquera en la zona.

Esta riqueza hidrobiológica ha convertido a la pesca en una de las principales actividades económicas del lugar, contribuyendo hasta con un 50% de los desembarques pesqueros anuales en Chile y hasta con un 4% a nivel mundial (Daneri et al., 2000). La actividad pesquera ha promovido la concentración de caletas y el desarrollo de una infraestructura significativa asociada, consolidando al golfo como un polo de desarrollo urbano e industrial (Contreras, 2017).

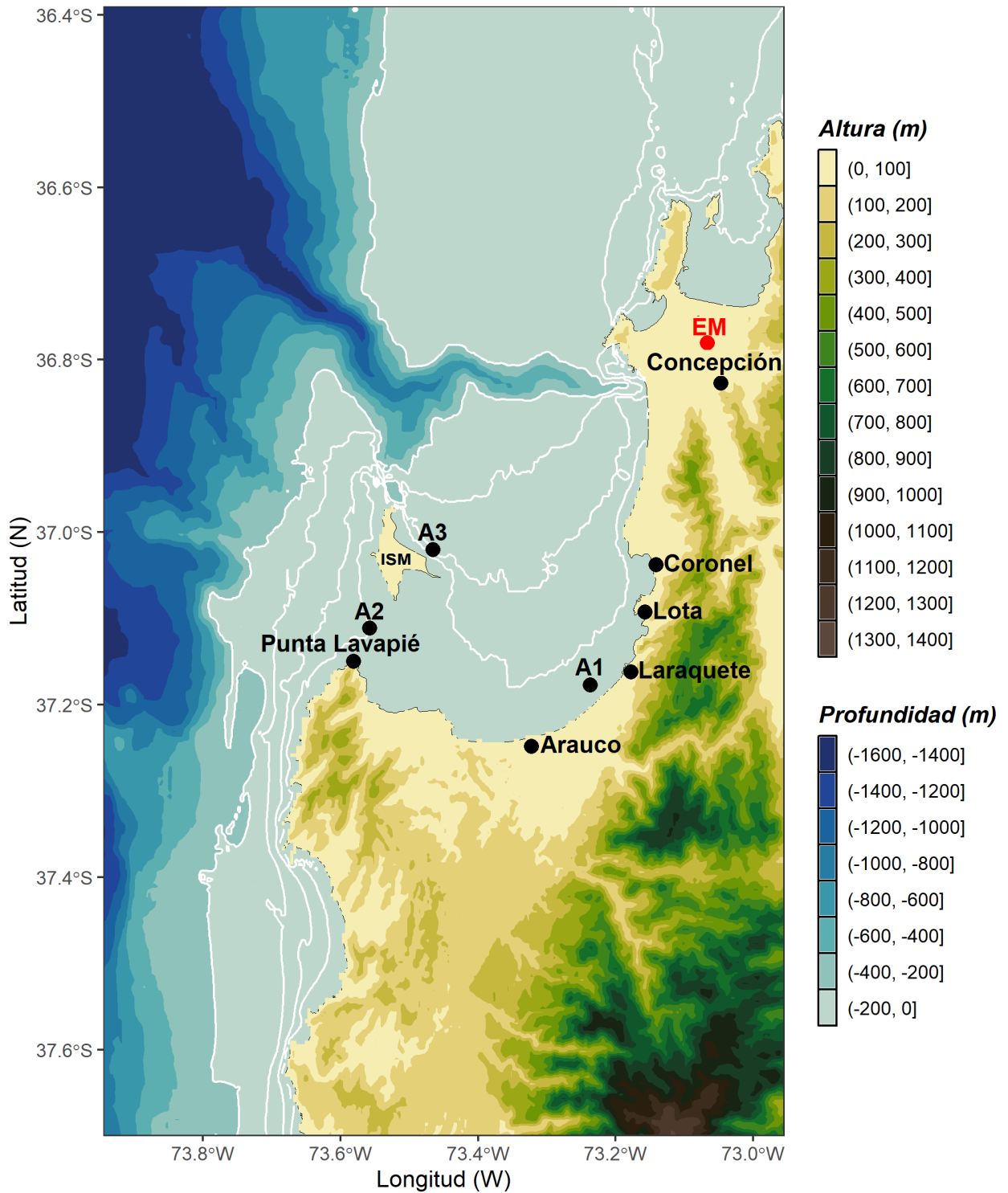


Figura 3: Área de estudio. ISM (Isla Santa María), EM (Estación meteorológica aeropuerto Carriel Sur). Ubicación de los ADCP (A1: Arauco, A2: Boca Chica, A3: Punta Delicada).

#### 1.4. Brisa marina y corrientes costeras

El forzamiento del viento en el Golfo presenta una señal semestral bien definida, con vientos del sudoeste durante la mayor parte de la primavera y el verano austral, que cambian a direcciones predominantemente norte y noroeste a fines del otoño y el invierno (Saavedra, 1980; Parada, 1999; Parada et al., 2001). Se cree que estos vientos son el principal agente impulsor de la circulación no mareal en el golfo (Parada et al., 2001). Durante la primavera-verano, los vientos presentan un régimen de brisa marina con su componente terrestre, alcanzando un máximo de alrededor de 3-5 m/s en la tarde (entre las 15:00 y las 20:00 hora local) y revirtiéndose a débilmente costa afuera en la noche (Valle-Levinson et al., 2003).

Por tanto, la brisa marina (BM) es uno de los procesos dominantes durante los periodos de verano. Por ejemplo, Hyder et al. (2002) demostraron que la BM afecta las corrientes superficiales diurnas en el Golfo de Thermaikos, sugiriendo que pueden generar corrientes diurnas en amplias zonas oceánicas, especialmente cerca de los 30° de latitud. De manera similar, Sobarzo et al. (2010) evidenciaron que la variabilidad de las corrientes diurnas costeras, forzadas por el viento, es significativa en la plataforma interior frente a Concepción. Durante sus estudios, los vientos predominantes desde el suroeste generaron corrientes costeras con una rotación antihoraria en toda la columna de agua, aunque con un desfase de 180° entre las capas superficial y de fondo. Además, la BM puede inducir cizalle vertical, un proceso crucial en la mezcla vertical del agua.

Por estas razones, es fundamental conocer y caracterizar la BM ya que, a pesar de la relevancia del GA en la productividad biológica costera, aún existe una falta significativa de comprensión sobre los mecanismos físicos que afectan a la circulación del GA, lo que, a su vez, puede afectar al ecosistema costero. Un objetivo clave es entender la circulación y la mezcla inducidas por el viento, lo que permitirá explicar por qué estos sistemas son altamente productivos (Valle-Levinson et al., 2003).

## 1.5. Corrientes al interior del golfo de Arauco

La circulación en el golfo de Arauco (GA) está impulsada principalmente por las mareas y el viento, siendo estos los principales forzantes del sistema (Parada et al., 2001; Valle-Levinson et al., 2003). El viento, en combinación con la topografía (presencia de isla Santa María), juega un papel clave en la propagación del oleaje dentro del golfo (Villagrán et al., 2022). En esta región, el viento presenta fluctuaciones diurnas bien definidas, alcanzando su máxima intensidad al atardecer (Valle-Levinson et al., 2003; Yannicelli et al., 2006). Durante la primavera y el verano, predominan vientos desde el sur y suroeste que generan una circulación antihoraria en el golfo (Parada et al., 2001; Yannicelli et al., 2006).

El régimen de viento en el GA también está condicionado por fenómenos de mayor escala y características geográficas. El anticiclón del Pacífico Sur y el paso de anticiclones migratorios generan variabilidad en los patrones de viento (Garreaud et al., 2002; Renault et al., 2012; Rahn & Garreaud, 2014; Ancapichún & Garcés-Vargas, 2015), lo que a su vez afecta el régimen de oleaje en el golfo (Villagrán et al., 2022). La forma de la costa, especialmente en punta Lavapié, introduce variaciones en el campo de viento (Peñailillo, 2023).

El GA es, en definitiva, un sistema de circulación costera dinámico y complejo, influenciado por factores climáticos, meteorológicos, remotos y geomorfológicos. Presenta una marcada estacionalidad en sus corrientes, con flujos predominantes hacia el norte durante el verano, mientras que en invierno el flujo es más variable e intenso. Estas dinámicas están asociadas a la interacción entre las distintas escalas de influencia del viento (por ejemplo, BM) y la configuración batimétrica del golfo, lo cual modula la intensidad y dirección de las corrientes (Contreras, 2017).

## 1.6. Vientos y dispersión de contaminantes

Las principales fuentes de contaminación marina en Chile se agrupan en tres categorías principales: los residuos industriales líquidos, los puertos y terminales pesqueros, y los emisarios submarinos. Los residuos industriales líquidos (RILES) pueden ser descargados en ríos o directamente al mar, usualmente después de un tratamiento que busca reducir su impacto contaminante. Por su parte, los puertos y terminales pesqueros requieren servicios como carga y descarga de suministros, transporte de personal y reparaciones, actividades que, junto con derrames crónicos de hidrocarburos y la acumulación de residuos, transforman estas zonas en sistemas ambientalmente alterados. Esto genera una progresiva degradación de la calidad de las aguas y los sedimentos (Ahumada, 1995; Rudolph et al., 2002a; McCready et al., 2004; Casado-Martínez et al., 2007; Sprovieri et al., 2007). Finalmente, los emisarios submarinos trasladan aguas residuales urbanas al océano, transportando compuestos derivados de descargas domiciliarias e industriales, como metales pesados, hidrocarburos y sólidos sedimentables (Contreras, 2017). Chile ha sido señalado como uno de los mayores productores de desechos domésticos vertidos al océano en Sudamérica, lo que contribuye significativamente a la contaminación del Pacífico (Fortt & de Oceana, 2007). Este nivel de contaminación tiene consecuencias negativas tanto para la salud humana como para los ecosistemas marinos. El contacto con aguas contaminadas puede ser perjudicial, mientras que las bacterias coliformes presentes consumen grandes cantidades de oxígeno, limitando su disponibilidad para peces y otros organismos marinos (Fortt & de Oceana, 2007; Peredo Núñez, 2010). Esta intensa actividad industrial está relacionada con una alta productividad biológica, como ya ha sido indicado y que, además, podría influenciar sobre un sitio de retención de plancton (Castro et al., 2007), con grandes cantidades de diversas especies de peces, algas, moluscos y crustáceos, que son la base del ecosistema y de la economía del golfo de Arauco (Arrizaga et al., 1991).

Por tanto, en el GA confluyen numerosas caletas y otras infraestructuras asociadas a actividades pesqueras y flujos constantes de residuos provenientes de emisarios industriales y domésticos situados en la costa. Este aumento en la actividad antropogénica ha llevado a un deterioro significativo de las condiciones ambientales, afectando a las comunidades costeras del GA. Estudios previos (Pradenas & Rudolph, 1989; Ahumada et al., 1989; Arcos et al., 1993) han señalado que la falta de manejo adecuado ha resultado en niveles críticos de contaminación, agravados por las descargas de aguas residuales urbanas que contienen materia fecal humana (Peñailillo, 2023).

Es fundamental, por tanto, analizar la influencia del viento diurno en el transporte atmosférico superficial, ya que la BM no se limita únicamente al área costera, sino que puede propagarse desde la costa hacia el interior del continente. Por ejemplo, en la costa occidental de la península de Corea, se ha registrado una penetración de hasta 30 km (Pokhrel & Lee, 2011), mientras que en la costa sur de Inglaterra se han observado efectos a más de 100 km (Simpson et al., 1977). Estas distancias deben ser consideradas al estudiar el transporte y la difusión de contaminantes en la atmósfera impulsados por la brisa marina (Pokhrel & Lee, 2011).

La realización de este estudio en el golfo de Arauco es de vital importancia debido a las características únicas de esta región, su importancia económica/biológica, y al escaso conocimiento que se tiene sobre la dinámica costera de alta frecuencia en este lugar.

## 1.7. Hipótesis

Existe una respuesta diurna de las corrientes dentro del golfo de Arauco a la BM que se traduce en una rotación antihoraria de toda la columna de agua, con un retraso entre superficie y fondo, y con una intensificación de las corrientes superficiales en relación con las corrientes de fondo.

## 1.8. Objetivos

### 1.8.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de la BM sobre la circulación del GA, específicamente en el ámbito de la formación de una estructura de doble capa en el comportamiento de las corrientes marinas.

### 1.8.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar la orientación y la intensidad de la BM durante primavera-verano utilizando datos de vientos de Carriel Sur.
2. A partir del registro de corrientes *in situ* obtenidos utilizando ADCPs, analizar la circulación superficial y de fondo en el GA en respuesta a vientos diurnos.
3. Cuantificar la amplitud y fase de las corrientes diurnas en tres sectores diferentes del GA (Boca Chica, Isla Santa María y Arauco), y en toda la columna de agua.

## Capítulo 2

### Metodología

#### 2.1. Obtención de datos

##### 2.1.1. Datos de viento

Para el estudio de los vientos costeros se utilizó la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto de Carriel Sur, Concepción. Las series temporales de vientos abarcaron desde el 1 de febrero de 2022 al 31 de marzo de 2022 con una tasa de muestreo de 15 minutos.

##### 2.1.2. Datos de corrientes

Entre los días 5 y 7 de febrero de 2022 se desplegaron en el golfo de Arauco tres anclajes oceanográficos. Junto a ellos se instalaron perfiladores de corrientes RD Instruments con una frecuencia de muestreo de 15 minutos, un tamaño de celdas de 1 metro en las localidades de Arauco (A1), Boca Chica (A2) y Punta Delicada (A3) y por un período de 40 días. Las coordenadas de ubicación de los anclajes con sus respectivas profundidades se muestran en la Tabla 1 y están representadas en la Figura 2.

Tabla 1: Coordenadas y profundidades de los instrumentos desplegados en el golfo de Arauco. 5 de febrero al 16 de marzo de 2022.

<b>Anclaje</b>	<b>Latitud (S)</b>	<b>Longitud (W)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Frecuencia (kHz)</b>
A1	37°10.598'	73°14.144'	15	300
A2	37°06.679'	73°33.427'	25	600
A3	37°01.044'	73°27.662'	40	300

## 2.2. Procesamiento de datos

### 2.2.1. Variabilidad diurna del viento

Utilizando las ecuaciones descritas por Pond & Pickard (1983), se calcularon las componentes ortogonales del viento:

$$V = W * \cos\phi; U = W * \sin\phi$$

donde  $V$  corresponde a la componente meridional y  $U$  a la componente zonal del viento.  $W$  es la magnitud del viento expresada en  $m/s$  y  $\phi$  es la dirección desde dónde viene el viento. Con estas componentes se realizaron gráficos de dispersión y se calculó el promedio y la desviación estándar de cada componente para cada hora del día y a lo largo de toda la serie de tiempo. Además de ello, con este procedimiento se identificó la variabilidad temporal del viento.

Posteriormente, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados de un armónico de 24 h para cuantificar la amplitud y fase del ciclo diurno del viento. Por último, se realizaron espectros de las componentes rectangulares del viento y espectros rotatorios para observar el aporte de las frecuencias más importantes. Para ello, se usaron 4 trozos de 10 días para realizar el espectro, y se empleó un nivel de confianza del 95% para determinar la significancia de los picos. El umbral de significancia se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$Umbral = 1 - \alpha^{\frac{1}{N-1}}$$

donde  $\alpha$  es el nivel de significancia, y  $N$  es el número de grados de libertad.

### 2.2.2. Corrientes del periodo diurno

Se aplicó un filtro pasa banda Coseno-Lanczos para extraer las componentes de la corriente dentro del rango de frecuencias 0.73-1.60 ciclos por día). La energía inercial no se eliminó de las series y está contenida en este rango de frecuencias en esta latitud. Por medio de análisis espectral rotatorio se identificó el aporte de las frecuencias más importantes dentro de las series temporales de corrientes. Para observar la variabilidad diurna de la corriente se aplicó un armónico de 24 h para cuantificar la amplitud y fase del ciclo diurno. Tanto los auto espectros de corrientes como el análisis de coherencia cuadrada y fase entre el viento y las corrientes costeras se efectuaron utilizando 4 trozos de 10 días.

## Capítulo 3

### Resultados

#### 3.1. Variabilidad diurna del viento

##### 3.1.1. Ciclo del viento en el verano

Como es característico del periodo de verano, la dirección promedio del viento fue desde el suroeste, con un flujo medio orientado hacia el noreste (Fig. 5a). En el promedio del ciclo diario del viento se observó un giro antihorario que alcanzó su velocidad máxima hacia el noreste de 3 m/s a 5 m/s entre las 15:00 y las 20:00 h (Fig. 5b). Posteriormente, el viento disminuyó de manera progresiva, llegando a un valor mínimo de 1 a 2 m/s alrededor de las 08:00 h. El ajuste por mínimos cuadrados de un armónico de 24 horas mostró que, para el período de estudio, el 25.6 % de la variabilidad del viento zonal fue explicada por el ciclo diurno (Fig. 5c). En la componente meridional, el porcentaje de varianza explicada fue muy bajo (0.63%), lo que sugiere que los cambios en la dirección norte-sur del viento no están fuertemente modulados por el ciclo diurno, mientras que en la componente zonal sí se observa una mayor influencia de este ciclo.

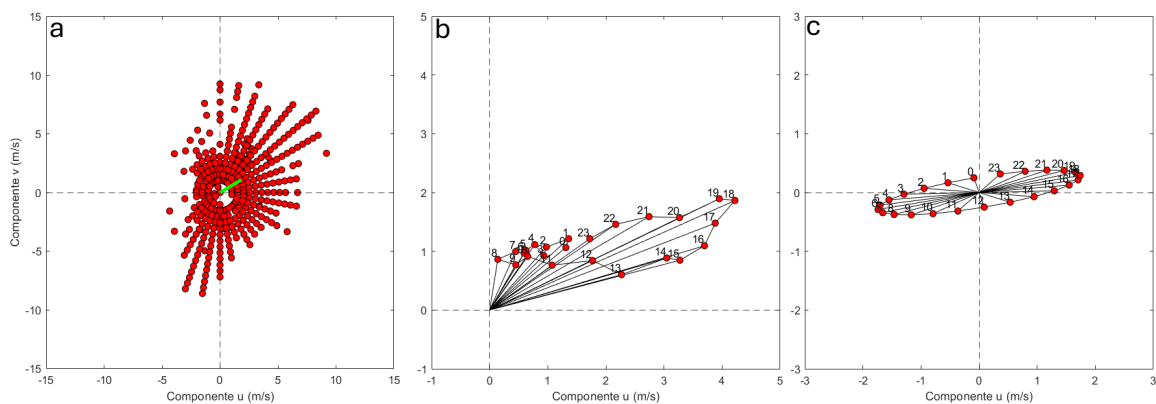


Figura 5: (a) Diagrama de dispersión del viento horario para febrero-marzo de 2022. La línea verde indica el flujo medio. (b) Ciclo diario del viento. (c) Ajuste de un armónico de 24 h por mínimos cuadrados. Aeropuerto Carriel Sur.

Esta orientación zonal hizo que la amplitud del ciclo diario del viento en la componente meridional fuese dos veces menor que en la componente zonal. La fase, en cambio, fue similar en ambas componentes (Tabla 2).

Tabla 2: Resultados del ajuste de un armónico de 24 h a la serie temporal del viento horario utilizando mínimos cuadrados. Aeropuerto Carriel Sur. Febrero y marzo de 2022.

	<b>Amplitud (m/s)</b>	<b>Fase (grados)</b>	<b>% de varianza explicada</b>
Componente zonal	1.67	159	25.79
Componente meridional	0.25	160	0.63

### 3.1.2. Espectros del viento

Los espectros de las componentes rectangulares y de las componentes rotatorias de la velocidad del viento revelaron un intenso ciclo diario en la componente zonal (Fig. 6a) y una rotación antihoraria significativa (Fig. 6c).

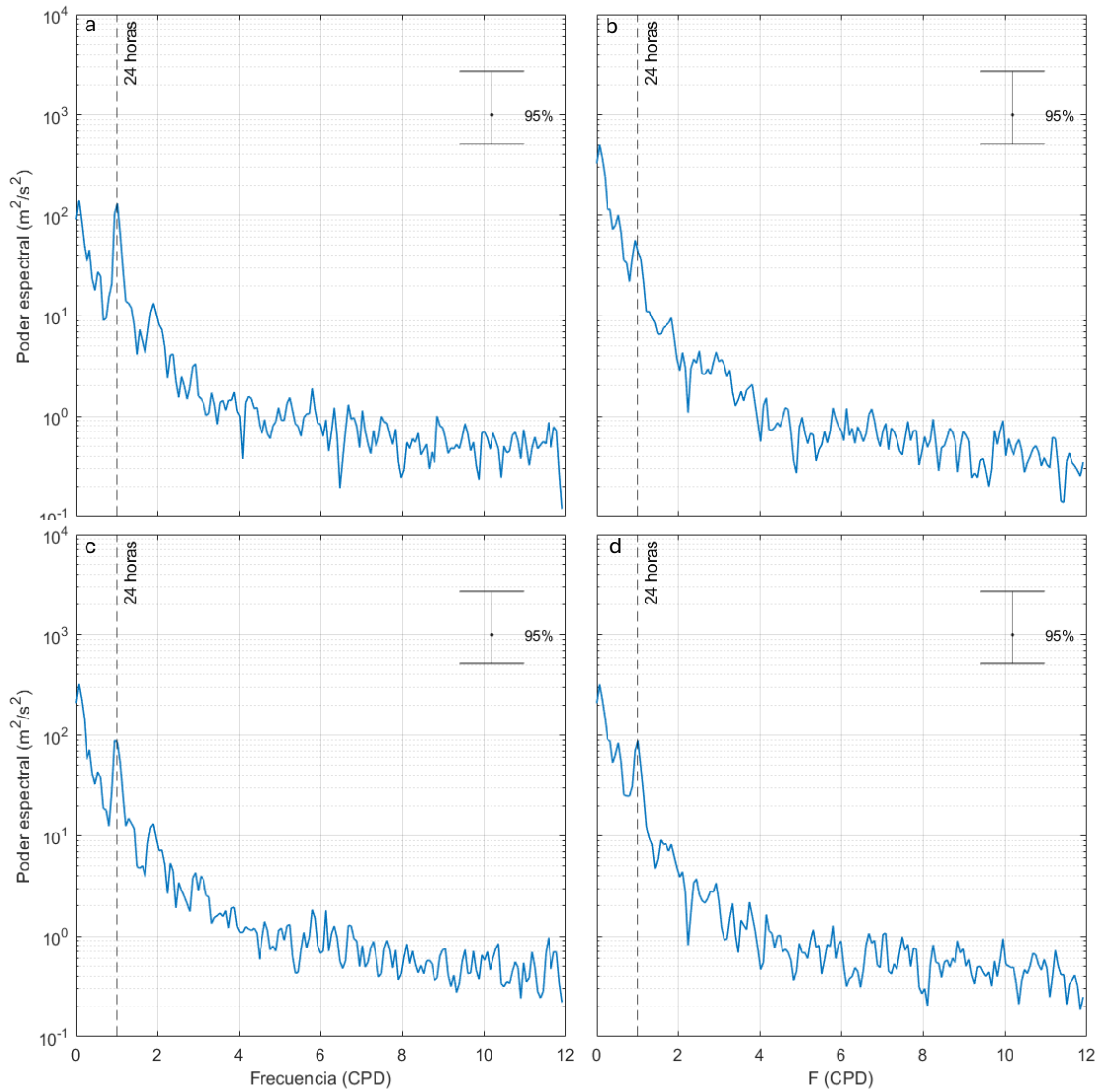


Figura 6: a, b) Espectros de las componentes rectangulares de la velocidad del viento (a: Componente zonal; b: Componente meridional). c, d) Espectros rotatorios del viento (c: Rotación antihoraria; d: Rotación horaria). Aeropuerto Carriel Sur. Febrero-marzo de 2022.

## 3.2. Corrientes de período diurno

### 3.2.1. Diagramas de dispersión

**Arauco:** Hacia el sector de la cabecera del GA, la dispersión de la corriente mostró un alineamiento con la línea de costa, especialmente en superficie (Fig. 7b). El eje de máxima varianza se ubicó a lo largo de la línea de costa, con corrientes superficiales con tendencia hacia el noroeste (puntos rojos) y corrientes de fondo con tendencia hacia el sureste (puntos negros). Las velocidades mayores, cercana a 100 cm/s se registraron en la superficie.

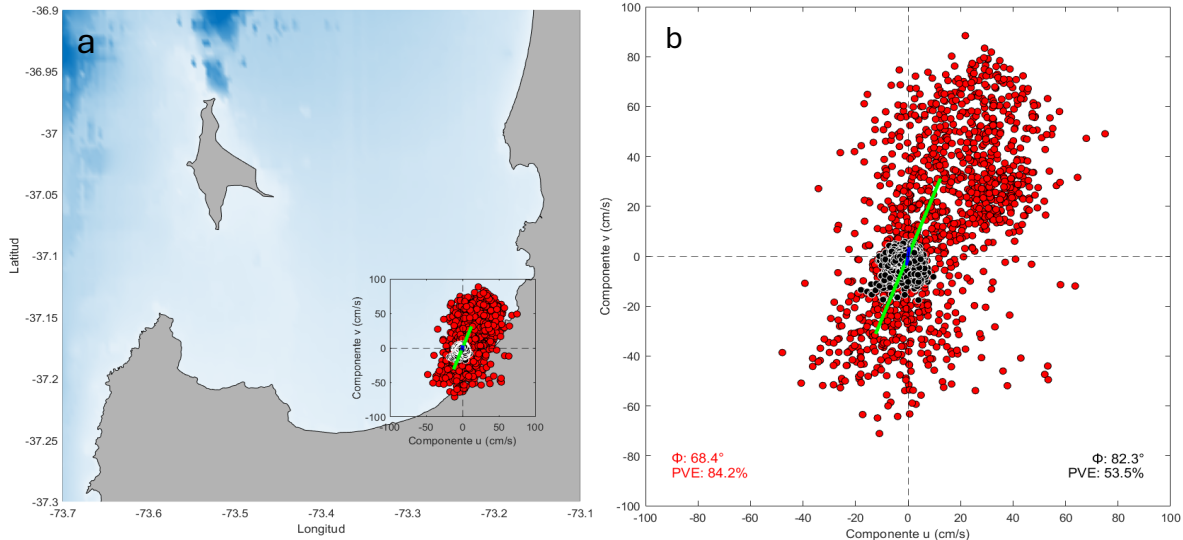


Figura 7: Diagramas de dispersión superficial (puntos rojos) y de fondo (puntos negros) de la corriente total en Arauco. Las líneas verde y azul muestran el eje de máxima varianza (EMV) para superficie y fondo.  $\phi$  es el ángulo del EMV de superficie (texto rojo) y de fondo (texto negro). Se muestra el porcentaje de varianza explicado (PVE) para superficie y fondo. 5 de febrero al 16 de marzo de 2022.

**Boca Chica:** La dispersión de las corrientes en este sector está determinada por el direccionamiento que impone la ISM y punta Lavapié al flujo. Ambos ejes de máxima varianza (superficial, línea azul y de fondo, línea verde), presentaron una disposición aproximadamente zonal. Las corrientes superficiales (puntos rojos) presentaron cerca del doble de la intensidad de las aguas de fondo (Fig. 8b).

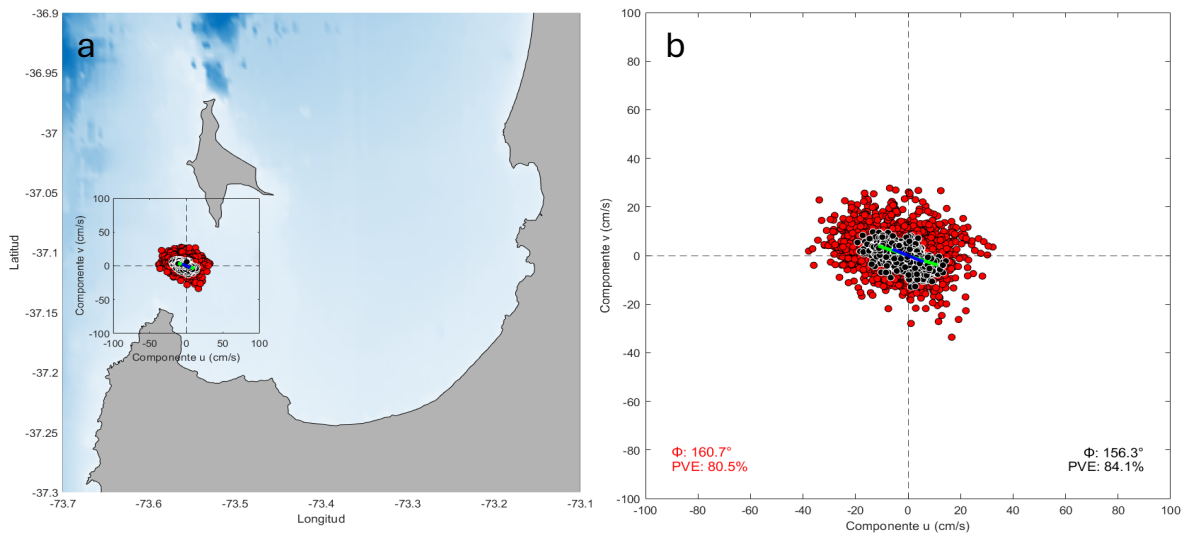


Figura 8: Diagramas de dispersión superficial (puntos rojos) y de fondo (puntos negros) de la corriente total en Boca Chica. Las líneas verde y azul muestran el eje de máxima varianza (EMV) para superficie y fondo.  $\phi$  es el ángulo del EMV de superficie (texto rojo), y de fondo (texto negro). Se muestra el porcentaje de varianza explicada (PVE) para superficie y fondo. 5 de febrero al 16 de marzo de 2022.

**Punta Delicada:** La dispersión elíptica de la corriente total tendió a seguir la batimetría y línea de costa, con corrientes superficiales totales dirigidas predominantemente hacia el sureste. Los valores de velocidad no excedieron los 40 cm/s en toda la columna de agua (Fig. 9b). De los tres anclajes, este sector presentó las corrientes comparativamente más débiles.

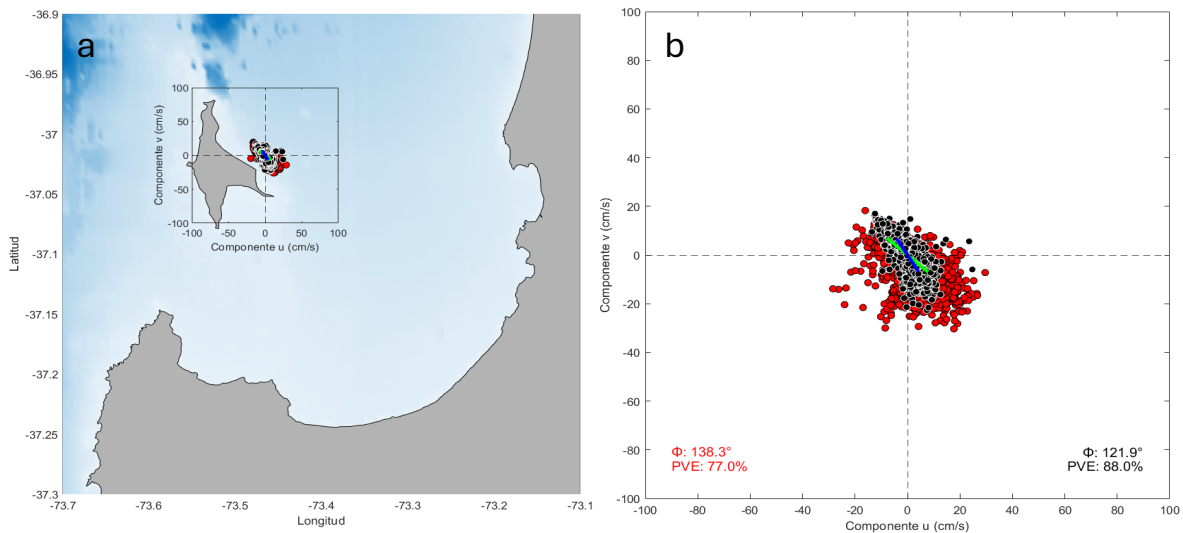


Figura 9: Diagramas de dispersión superficial (puntos rojos) y de fondo (puntos negros) de la corriente total en Punta Delicada. Las líneas verde y azul muestran el eje de máxima varianza (EMV) para superficie y fondo.  $\phi$  es el ángulo del EMV de superficie (texto rojo), y de fondo (texto negro). Se muestra el porcentaje de varianza explicada (PVE) para superficie y fondo. 5 de febrero al 16 de marzo de 2022.

### 3.2.2 Estructura vertical de la columna de agua

**Arauco:** El flujo medio superficial (cerca de 20 cm/s) mostró un valor promedio hacia el Este. A mayor profundidad el flujo medio cambió hacia el Oeste (cerca de 2 cm/s). Los valores máximos oscilaron en toda la columna de agua entre - 50 y + 70 cm/s, aproximadamente (Fig. 10a). En la componente meridional, se observó un flujo medio superficial hacia el norte y hacia el sur en zonas más profundas (Fig. 10b). La varianza de las corrientes fue mayor a lo largo del golfo que a través del golfo, mostrando una reducción gradual de la magnitud de las fluctuaciones con la profundidad (Fig. 10c). El EMV de la corriente total explicó cerca del 75% de la variabilidad del flujo (línea azul). La orientación de este eje se mantuvo constante en la columna de agua, con fluctuaciones entre 80° y 90° (línea roja). Por otro lado, la dirección media del flujo (puntos negros) mostró un flujo superficial hacia el norte y un flujo de fondo hacia el suroeste (fig. 10d).

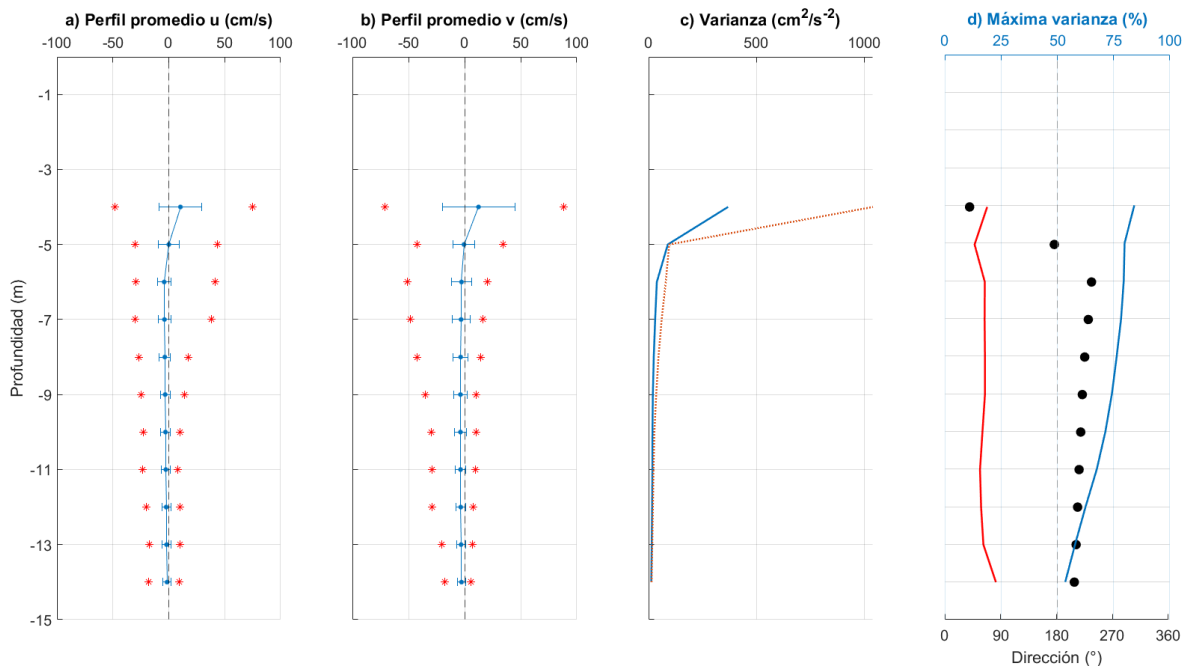


Figura 10: (a, b) Estructura vertical media (línea azul continua), desviación estándar (barras de error) y valores máximo y mínimo (\*) de la corriente total en el componente zonal (u) y meridional (v). (c) Varianza en ambas componentes (línea azul u, línea naranja v). (d) En eje superior: Porcentaje de varianza explicada (línea azul) y orientación (línea roja) del EMV. En eje inferior: Dirección del flujo medio (puntos negros). Sector Arauco.

**Boca Chica:** El promedio de prácticamente toda la columna de agua fue hacia el Oeste. Los valores máximos oscilaron en toda la columna de agua entre - 40 y + 50 cm/s, aproximadamente (Fig. 11a). Transversal a la Boca Chica se observó un flujo hacia el norte, dentro de los primeros 2 m, y muy cercano a 0 en el resto de la columna de agua (Fig. 11b). La varianza de las corrientes fue mayor en la componente zonal que en la meridional mostrando una reducción gradual de la magnitud de las fluctuaciones con la profundidad (Fig. 11c). El porcentaje de varianza explicado por el EMV de la corriente total en cada nivel explicó entre el 65 y 85% de la variabilidad del flujo (línea azul). La orientación de este eje tuvo un leve movimiento en la columna de agua, con valores entre los 170° a 160°. Por otro lado, la orientación del flujo medio fue hacia el Oeste en toda la columna de agua (Fig. 11d).

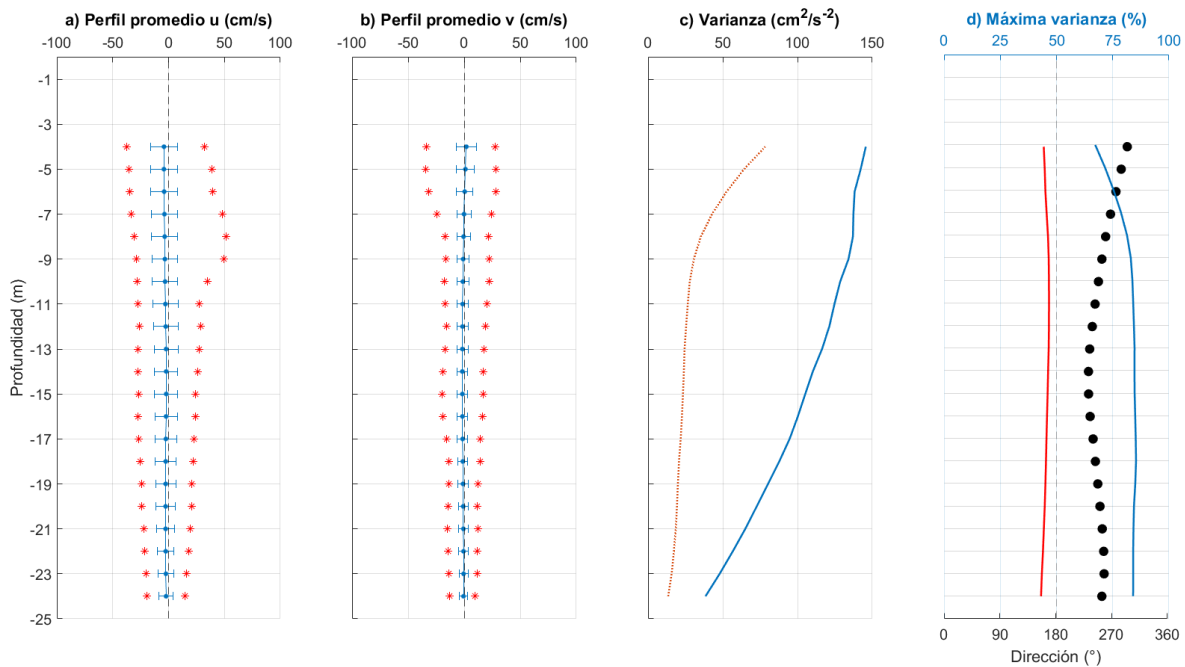


Figura 11: (a, b) Estructura vertical media (línea azul continua), desviación estándar (barras de error) y valores máximo y mínimo (\*) de la corriente total en el componente zonal (u) y meridional (v). (c) Varianza en ambas componentes (línea azul u, línea naranja v). (d) En eje superior: Porcentaje de varianza explicada (línea azul) y orientación (línea roja) del EMV. En eje inferior: Dirección media del flujo (puntos negros). Sector Boca Chica.

**Punta Delicada:** El flujo medio mostró un valor promedio hacia el Este en toda la columna de agua, con valores medios superficiales cercano a los 10 cm/s, y en el fondo menores a 3 cm/s. Los valores máximos oscilaron en toda la columna de agua entre  $-30$  y  $+30$  cm/s, aproximadamente (Fig. 12a). En la componente meridional, se observó un flujo medio constante hacia el sur en toda la columna de agua (Fig. 12b). La varianza de las corrientes fue similar en la superficie; sin embargo, con el aumento de la profundidad, se observa un predominio de la componente meridional (Fig. 12c). El eje de máxima varianza de la corriente total explicó alrededor del 85% de la variabilidad del flujo (línea azul). Por otro lado, la dirección del flujo medio mostró una dirección hacia el sureste en toda la columna de agua (puntos negros) (Fig. 12d).

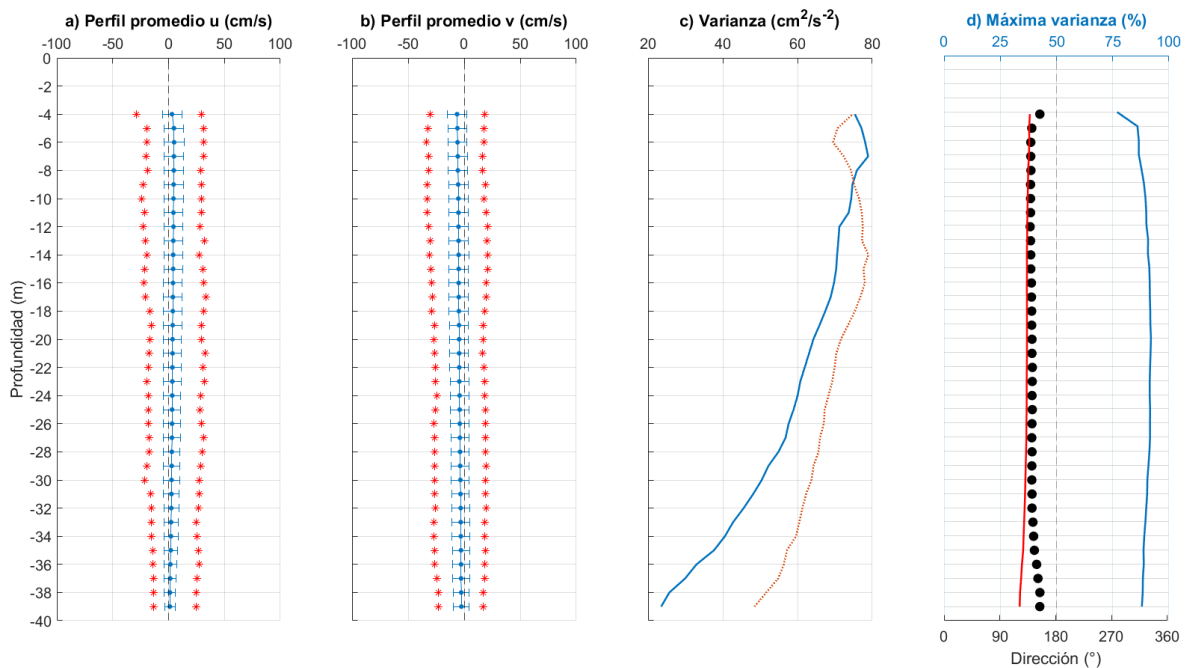


Figura 12: (a, b) Estructura vertical media (línea azul continua), desviación estándar (barras de error) y valores máximo y mínimo (\*) de la corriente total en el componente zonal (u) y meridional (v). (c) Varianza en ambas componentes (línea azul u, línea naranja v). (d) En eje superior: Porcentaje de varianza explicada (línea azul) y orientación (línea roja) del EMV. En eje inferior: Dirección media del flujo (puntos negros). Sector Punta Delicada.

### 3.2.3 Diagrama de vector progresivo

**Arauco:** El diagrama de vector progresivo a 4 m de profundidad mostró un desplazamiento residual de 812 km (línea roja) con una orientación hacia el noreste y una velocidad media de 16.2 cm/s. En contraste, a 14 m de profundidad (línea negra), la dirección fue hacia el suroeste con un desplazamiento residual de 157.9 km y una velocidad media de 3.15 cm/s, opuesta a la dirección de la superficie (Fig. 13).

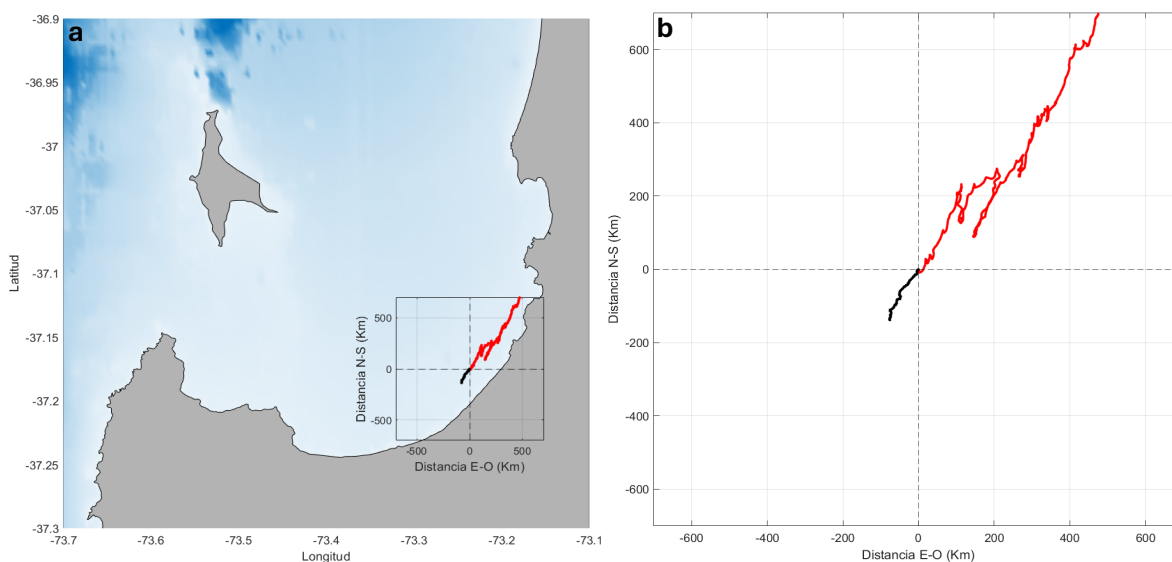


Figura 13: Diagramas de vector progresivo de superficie (línea roja) y de fondo (línea negra) de la corriente en el sector Arauco. 5 de febrero al 16 de marzo de 2022.

**Boca Chica:** El diagrama de vector progresivo a 4 metros de profundidad (línea roja), nos indica que la partícula, tiene una dirección hacia el noreste, con una velocidad media de 4.5 cm/s, y un desplazamiento residual de 207 km, por lado, la partícula a 24 metros de profundidad (línea negra) tiene una orientación hacia el oeste, con una velocidad media de 2.3 cm/s, y un desplazamiento residual de 106 km (Fig. 14).

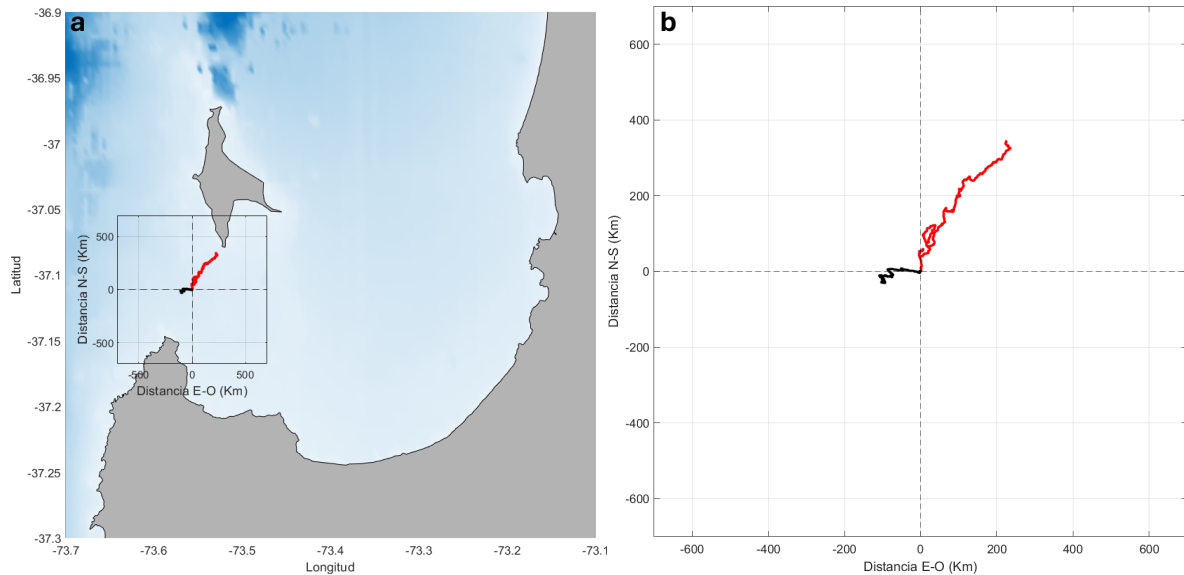


Figura 14: Diagramas de vector progresivo de superficie (línea roja) y de fondo (línea negra) de la corriente en Boca Chica. 5 de febrero al 16 de marzo de 2022.

**Punta Delicada:** El diagrama de vector progresivo a 4 metros de profundidad mostró una orientación hacia el sureste con una velocidad media de 7.0 cm/s (línea roja), y un desplazamiento residual de 321 km. En 39 m de profundidad (línea negra) la dirección fue hacia el suroeste con una velocidad media de 3.8 cm/s, y un desplazamiento residual de 172 km (Fig. 15).

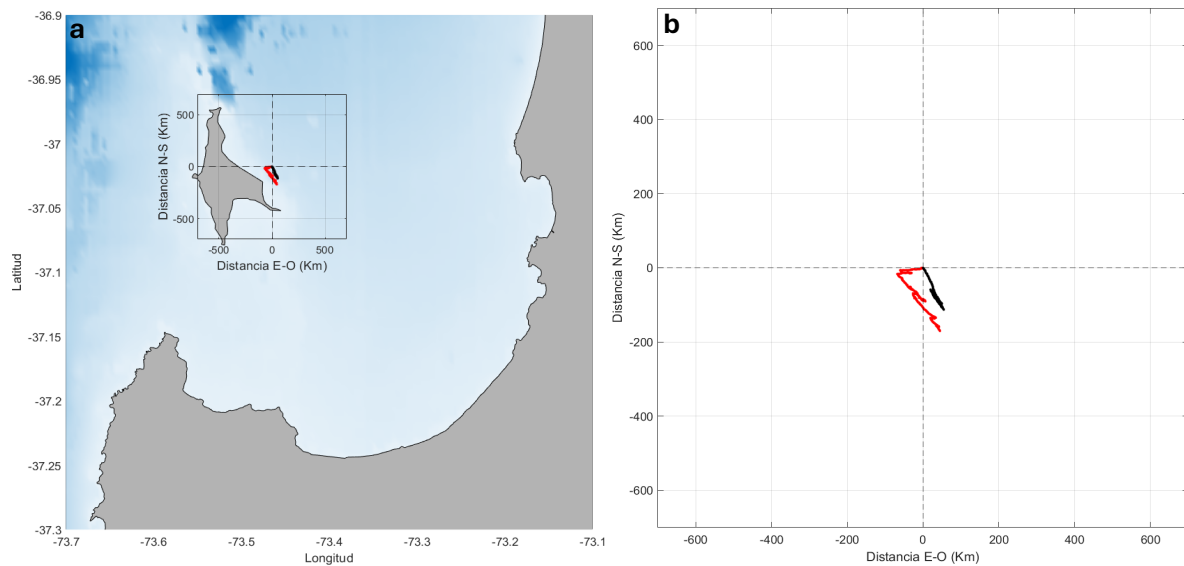


Figura 15: Diagramas de vector progresivo de superficie (línea roja) y de fondo (línea negra) de la corriente en Punta Delicada. 5 de febrero al 16 de marzo de 2022.

### 3.2.4 Espectros rotatorios

Los espectros rotatorios de la serie temporal de velocidad de la corriente mostraron máximos de energía intensos en escalas temporales semidiurnas y diurnas (Fig. 16). Particularmente en escalas temporales casi diurnas, la energía es mayor en el componente antihorario (paneles izquierdos) que en el sentido horario (paneles derechos) en toda la columna de agua, excepto en Punta Delicada, donde hubo una menor intensidad de las frecuencias diurnas. La estructura barotrópica de la marea semidiurna fue máxima en Boca Chica (A2), de menor intensidad en Punta Delicada (A3) y más débil Arauco (A1).

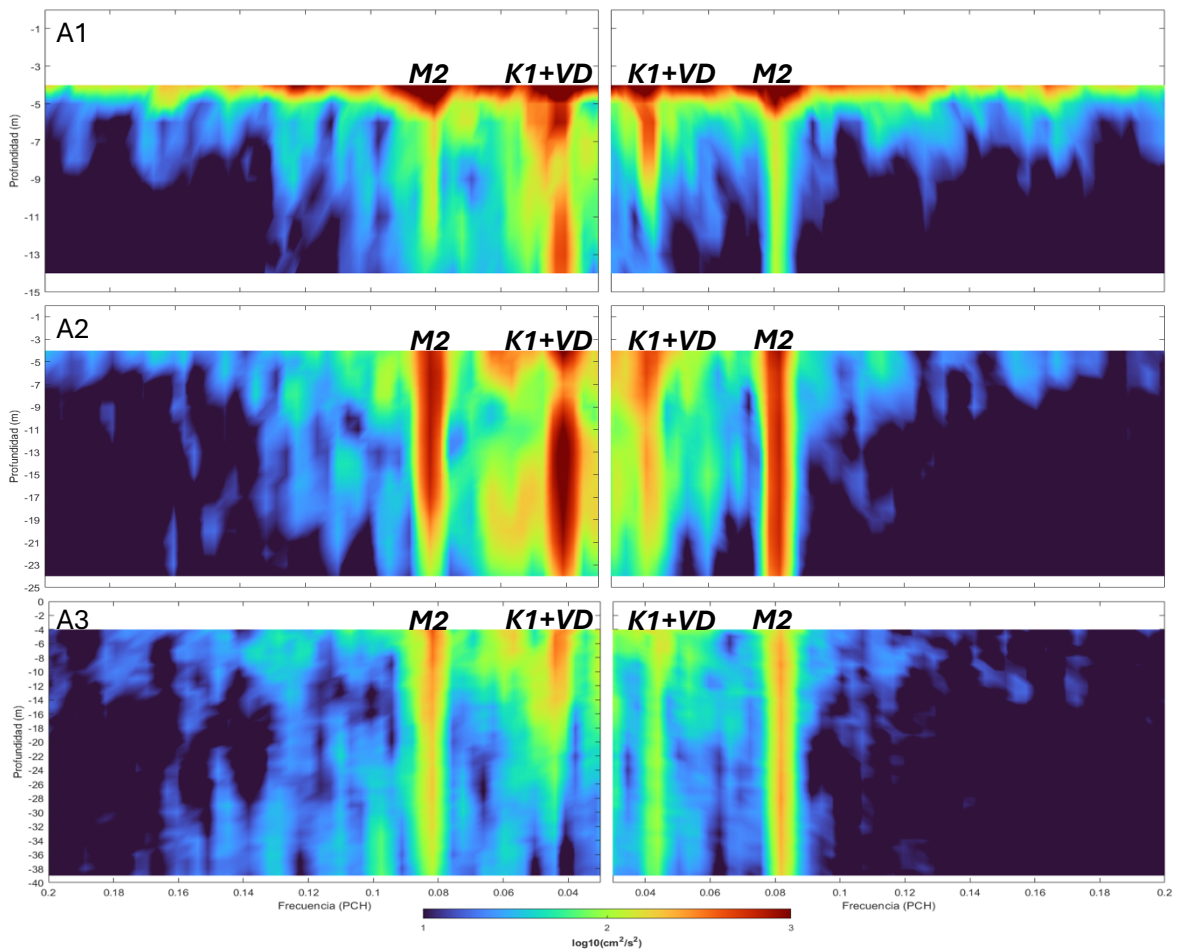


Figura 16: Variación vertical de la energía espectral en sentido antihorario (paneles izquierdos) y horario (paneles derechos) para (A1) Arauco, (A2) Boca Chica y (A3) Punta Delicada. K1: Mareas diurnas. VD: Variabilidad diurna. M2: Mareas semidiurnas.

### 3.2.5 Armónico de 24 horas de la corriente

**Arauco:** El ajuste por mínimos cuadrados de un armónico de 24 horas (Fig. 17) reveló que la amplitud del ciclo diario de las corrientes en la componente meridional fue mayor que en la componente zonal en la superficie (4 m); sin embargo, esta relación se invirtió a mayor profundidad (12 m). En la componente zonal, la amplitud pasó de 7.20 m/s en la superficie a 2.25 m/s a los 12 m, mientras que en la componente meridional disminuyó de 11.69 m/s en la superficie a 2.02 m/s a la misma profundidad.

La fase también mostró diferencias significativas entre ambas componentes. En la componente zonal, la fase fue de  $133.06^\circ$  en la superficie y aumentó a  $222.03^\circ$  a los 12 m. Por otro lado, en la componente meridional, la fase fue  $219.29^\circ$  en la superficie y de  $325.57^\circ$  a mayor profundidad, con una diferencia notable de casi  $100^\circ$  entre componentes a los 12 m.

Respecto a los porcentajes de varianza explicada, se observó que el ciclo diurno explicó solo el 7.9 % de la variabilidad de la componente zonal en la superficie, aumentando a un 21.0 % a 12 m. En la componente meridional, estos valores fueron más bajos: 6.8 % en la superficie y 14.9 % a los 12 m (Tabla 3).

Tabla 3: Resultados del ajuste de un armónico de 24 h a la serie temporal de las corrientes horarias utilizando mínimos cuadrados. Sector Arauco. Febrero y marzo de 2022.

Componente zonal	Amplitud (cm/s)	Fase (grados)	% de varianza explicada
Superficie (4 m)	7.2	133.1	7.9
Profundidad (12 m)	2.3	222.0	21.0
Componente meridional	Amplitud (cm/s)	Fase (grados)	% de varianza explicada
Superficie (4 m)	11.7	219.3	6.8
Profundidad (12 m)	2.0	325.6	14.9

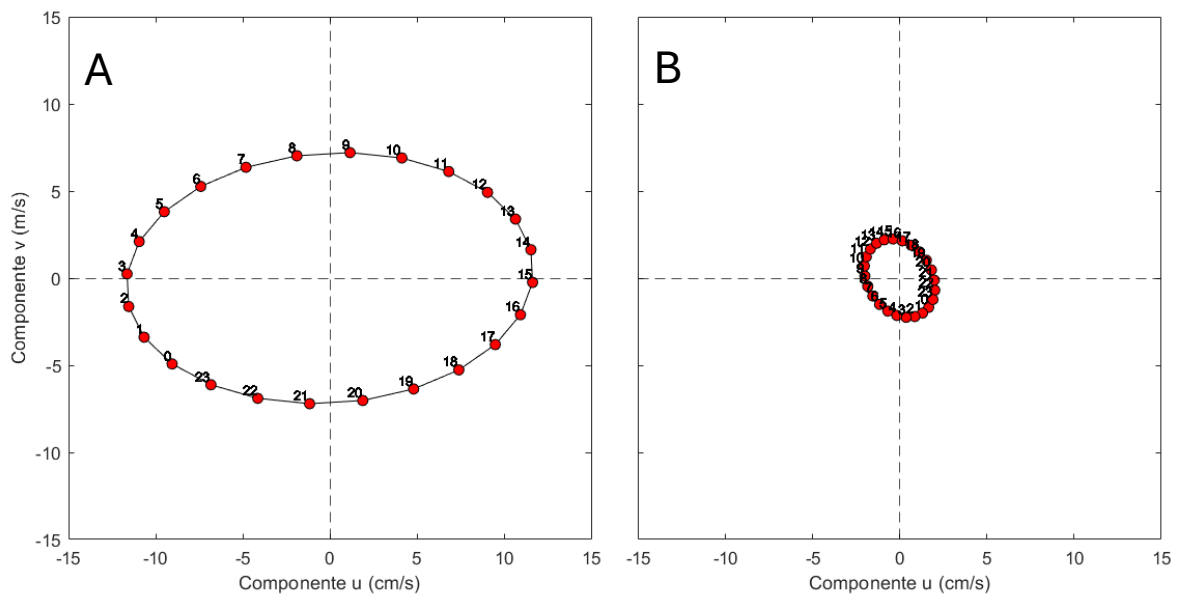


Figura 17: Ajuste de un armónico de 24 h por mínimos cuadrados para superficie (A), y fondo (B). Sector Arauco.

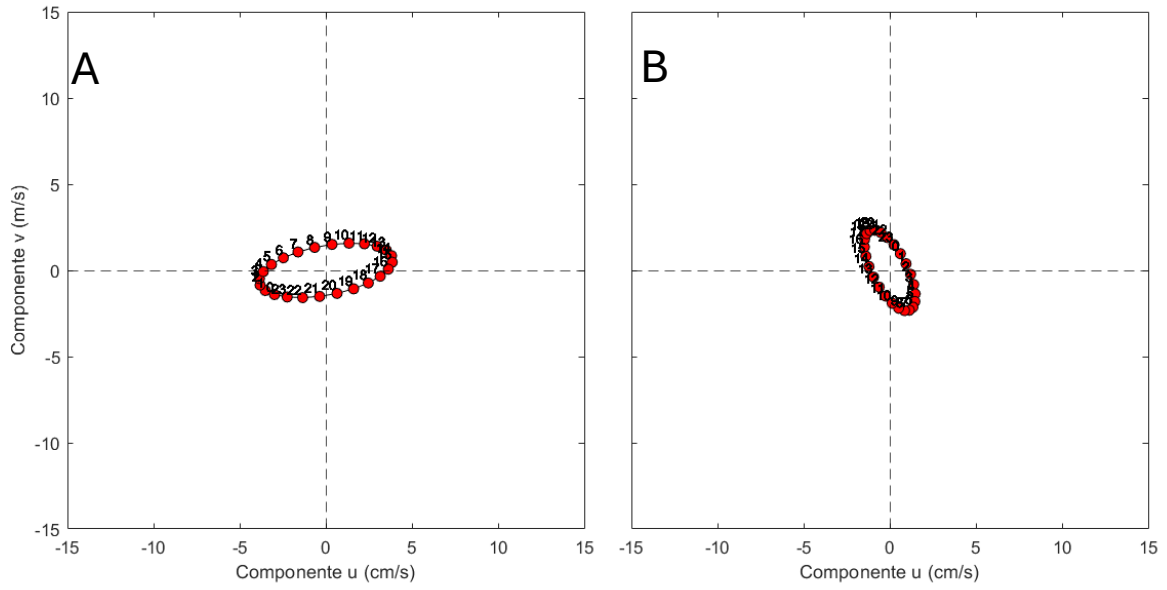
**Boca Chica:** El ajuste por mínimos cuadrados de un armónico de 24 horas (Fig. 18) mostró que la amplitud del ciclo diario de las corrientes en la componente meridional fue mayor que en la componente zonal en la superficie (4 m); sin embargo, esta relación se invirtió a mayor profundidad (23 m). En la componente zonal, la amplitud fue de 3.70 m/s en la superficie y disminuyó a 2.34 m/s a 23 m. Por su parte, en la componente meridional, la amplitud fue de 1.06 m/s en la superficie y aumentó ligeramente a 1.47 m/s a mayor profundidad.

La fase presentó diferencias notables entre ambas componentes. En la componente zonal, la fase fue de 181.23° en la superficie y aumentó a 294.46° a 23 m. Mientras tanto, en la componente meridional, la fase pasó de 265.39° en la superficie a 65.35° en profundidad, evidenciando un cambio significativo en esta última componente.

En cuanto a los porcentajes de varianza explicada, el ciclo diario explicó el 4.37 % de la variabilidad de la componente zonal en la superficie, aumentando a un 7.46 % a 23 m. En la componente meridional, los porcentajes fueron considerablemente menores, con un 0.28 % en la superficie y un 8.16 % a profundidad (Tabla 4).

Tabla 4: Resultados del ajuste de un armónico de 24 h a la serie temporal de las corrientes horarias utilizando mínimos cuadrados. Boca Chica. Febrero y marzo de 2022.

<b>Componente zonal</b>	<b>Amplitud (cm/s)</b>	<b>Fase (grados)</b>	<b>% de varianza explicada</b>
Superficie (4 m)	3.70	181.23	4.37
Profundidad (23 m)	2.34	294.46	7.46
<b>Componente meridional</b>	<b>Amplitud (cm/s)</b>	<b>Fase (grados)</b>	<b>% de varianza explicada</b>
Superficie (4 m)	1.06	265.39	0.28
Profundidad (23 m)	1.47	65.35	8.16



**Figura 18:** Ajuste de un armónico de 24 h por mínimos cuadrados para superficie (A), y fondo (B). Sector Boca Chica.

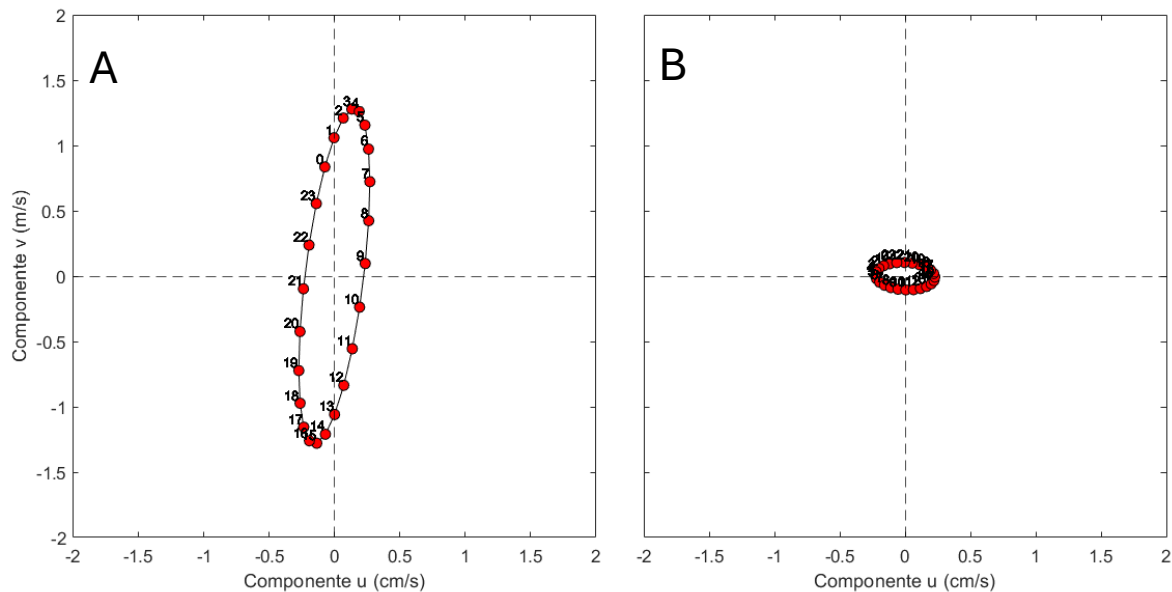
**Punta Delicada:** El ajuste por mínimos cuadrados de un armónico de 24 horas (Fig. 19) mostró que la amplitud del ciclo diario de las corrientes en la componente meridional fue mayor que en la componente zonal, tanto en la superficie (4 m) como en profundidad (39 m). En la superficie, la amplitud de la componente meridional alcanzó 0.27 m/s, mientras que la componente zonal presentó un valor significativamente mayor de 1.28 m/s. En profundidad, estas amplitudes se redujeron a 0.22 m/s y 0.10 m/s, respectivamente.

En términos de fase, las diferencias fueron notables entre las componentes. En la superficie, la componente zonal presentó una fase de  $49.31^\circ$ , mientras que la meridional alcanzó  $105.43^\circ$ . A mayor profundidad (39 m), la fase de la componente zonal cambió drásticamente a  $333.86^\circ$ , mientras que la componente meridional registró  $238.79^\circ$ , indicando un desfase significativo entre ambas.

En cuanto al porcentaje de varianza explicada, los valores fueron muy bajos en ambas componentes, lo que sugiere un impacto limitado del ciclo diario en las corrientes. En la superficie, apenas el 1.09 % de la variabilidad zonal fue explicado por el ciclo diario, mientras que en profundidad este porcentaje disminuyó a un insignificante 0.02 %. Para la componente meridional, los valores también fueron bajos, con un 0.08 % de varianza explicada en la superficie y un 0.04 % en profundidad. Estos resultados destacan la limitada influencia del ciclo diario en la dinámica de las corrientes en Punta Delicada durante los meses de febrero y marzo de 2022 (Tabla 5).

Tabla 5: Resultados del ajuste de un armónico de 24 h a la serie temporal de las corrientes horarias utilizando mínimos cuadrados. Punta Delicada. Febrero y marzo de 2022.

<b>Componente zonal</b>	<b>Amplitud (cm/s)</b>	<b>Fase (grados)</b>	<b>% de varianza explicada</b>
Superficie (4 m)	1.28	49.31	1.09
Profundidad (39 m)	0.10	333.86	0.02
<b>Componente meridional</b>	<b>Amplitud (cm/s)</b>	<b>Fase (grados)</b>	<b>% de varianza explicada</b>
Superficie (4 m)	0.27	105.43	0.08
Profundidad (39 m)	0.22	238.79	0.04



**Figura 19:** Ajuste de un armónico de 24 h por mínimos cuadrados para superficie (A), y fondo (B). Sector Punta Delicada.

### 3.2.6 Ciclos diarios de la corriente

La prominencia relativa de la variabilidad de periodo diurno es evidente en el estrés del viento promedio y en las corrientes de periodo diurno (Fig. 20A). En el caso de Arauco, presentó corrientes superficiales de 20 cm/s fluyendo hacia el oeste a última hora de la tarde (20:00 pm), coincidiendo con el mínimo de viento, y revirtiéndose por la mañana temprano (02:00 am) (Fig. 20B). En Boca Chica, la respuesta de las corrientes fue levemente más débil (Fig. 20C), mientras que en Punta Delicada se observó que las corrientes de periodo diurno fueron las más débiles, con velocidades promedio que no superaron los 2 cm/s (Fig. 20D).

La estructura vertical de las corrientes de periodo diurno mostró una estructura de velocidad de corriente en dos capas, intensificada en la superficie. La capa inferior presentó un movimiento desfasado respecto al movimiento de la capa superficial descrito anteriormente. En Arauco se observaron velocidades hacia el oeste que alcanzaron su máximo en la tarde y hacia el este en torno a las 00:00–04:00 am (Fig. 20B). En la componente meridional, el flujo superficial tendió a dirigirse hacia el norte en la mañana (08:00 am) hasta media tarde (20:00 pm), y hacia el sur comenzando al anochecer y durante la noche (Fig. 20E). En Boca Chica, el flujo superficial se dirigió hacia fuera del golfo durante la noche hasta la mañana (00:00-10:00 am), y hacia el interior del golfo durante casi todo el día (11:00 am -21:00 pm) (Fig. 20C). En la componente meridional, hubo velocidades hacia el norte durante la tarde, y hacia el sur durante la madrugada (Fig. 20F). La fuerte diferencia de fase en la capa inferior comparado con la capa superior implica, por lo tanto, un flujo de intercambio en escalas de tiempo diurno, mientras la capa superficial se desplaza en una dirección, la capa inferior se mueve en sentido contrario. Este patrón se observó tanto en Arauco como en Boca Chica. Sin embargo, en Punta Delicada, la variabilidad diurna del viento era más débil y las corrientes de periodo diurno eran significativamente menores, los datos mostraron una respuesta más compleja, con una separación menos marcada entre las capas superior e inferior y una estructura vertical más compleja (Fig. 20D, 20G). Los ciclos diurnos para dos profundidades representativas se muestran en la Fig. 20H, 20I, 20J para los tres ADCP.

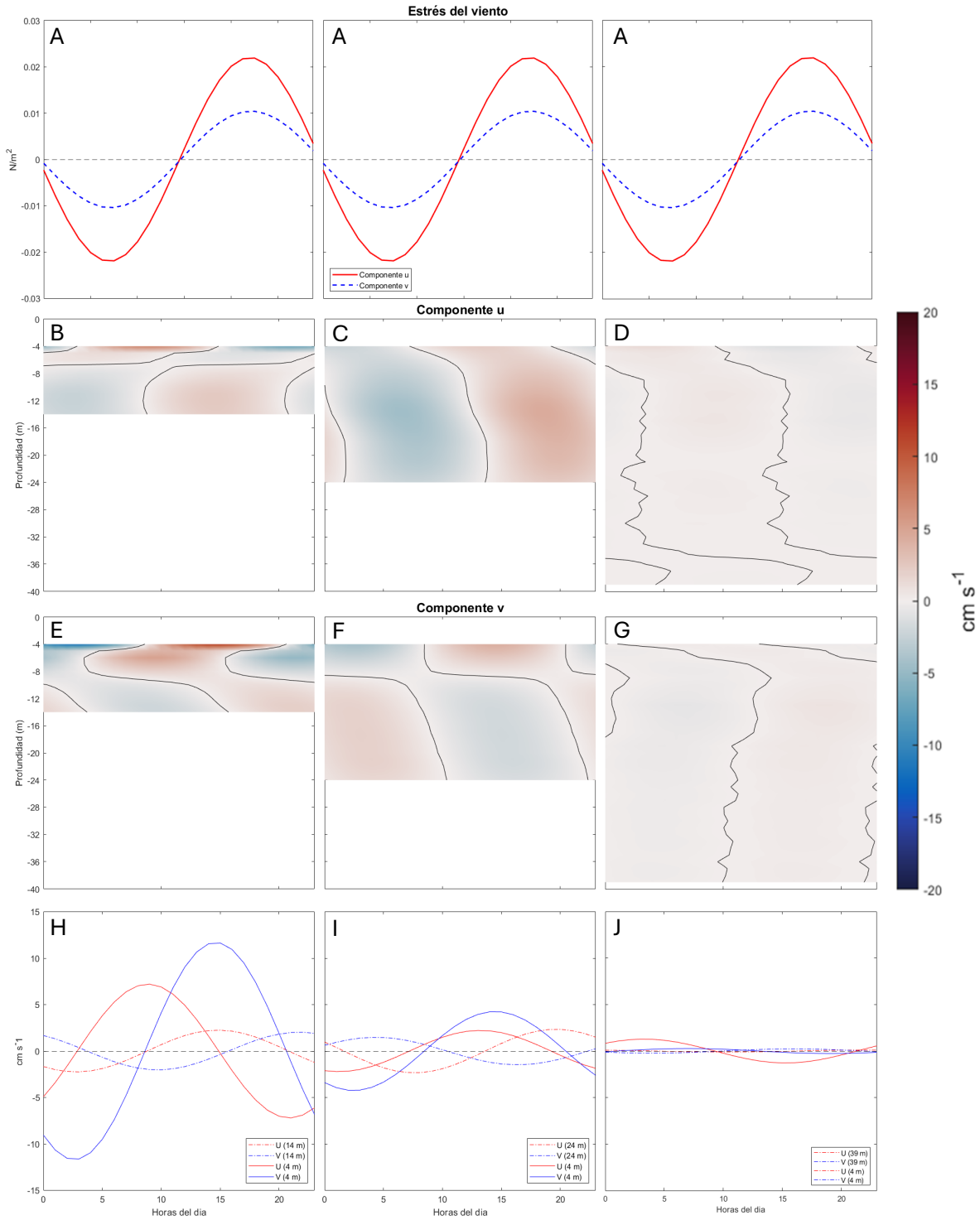


Figura 20: Ciclo diario de las corrientes filtradas Promedio del estrés del viento en la componente u y v durante el período diurno (A), la velocidad en la componente u (B, C, D), la velocidad de la componente v (E, F, G) y la velocidad de u y v en la superficie y cerca del fondo (H, I, J) para los 3 ADCP; Arauco (paneles de la izquierda), Boca chica (paneles del centro) y Punta Delicada (paneles de la derecha).

### 3.3. Coherencia cuadrada y fase entre el viento y las corrientes

#### 3.3.1. Coherencia cuadrada y fase de la componente zonal

El análisis de coherencia cuadrada y fase reveló la relación espectral entre las componentes ortogonales del viento y de las corrientes en función de la frecuencia. En el gráfico de coherencia cuadrada en superficie para la componente zonal, se observó un máximo cercano a 0.0417 cpd (23.98 h) en los sectores de Arauco y Boca Chica, que superó el umbral del 95% de nivel de confianza, por lo que se consideró significativo (Fig. 21A, 21C). En contraste, en Punta Delicada (Fig. 21E), la respuesta espectral mostró una respuesta diferente, sin un máximo significativo en la escala diurna

Por otro lado, los desfases en la frecuencia diurna indican qué variable adelanta o retrasa a la otra. Un desfase negativo significa que las corrientes siguen al viento, es decir, los cambios en las corrientes ocurren después de los cambios en el viento. En Arauco, se observó un desfase de  $-52^\circ$  (equivalente a 3:28 horas), lo que indica que las corrientes responden con ese retraso al forzamiento del viento. En Punta Delicada, el desfase fue de  $-120^\circ$  (8 horas), sugiriendo un retraso aún mayor, pero no significativo. En contraste, un desfase positivo, como el de Boca Chica ( $11^\circ$ , equivalente a 44 minutos), indica que las corrientes preceden ligeramente a los cambios en el viento, lo que podría estar asociado a una dinámica particular del área o a una influencia externa.

En el fondo, para el sector de Arauco (Fig. 22A), se destacó un máximo significativo en las frecuencias semidiurnas, mientras que en Boca Chica no se observó un máximo significativo en las frecuencias de interés (Fig. 22C). En cambio, en Punta Delicada, se observó una mayor dominancia en la banda diurna (Fig. 22E). En cuanto a la fase, se destacaron valores cercanos a  $-50^\circ$  (3:30 horas) para Arauco,  $100^\circ$  (7 Horas) para Boca Chica y  $\sim -25^\circ$  para Punta Delicada (Fig. 22B, 22D, 22F).

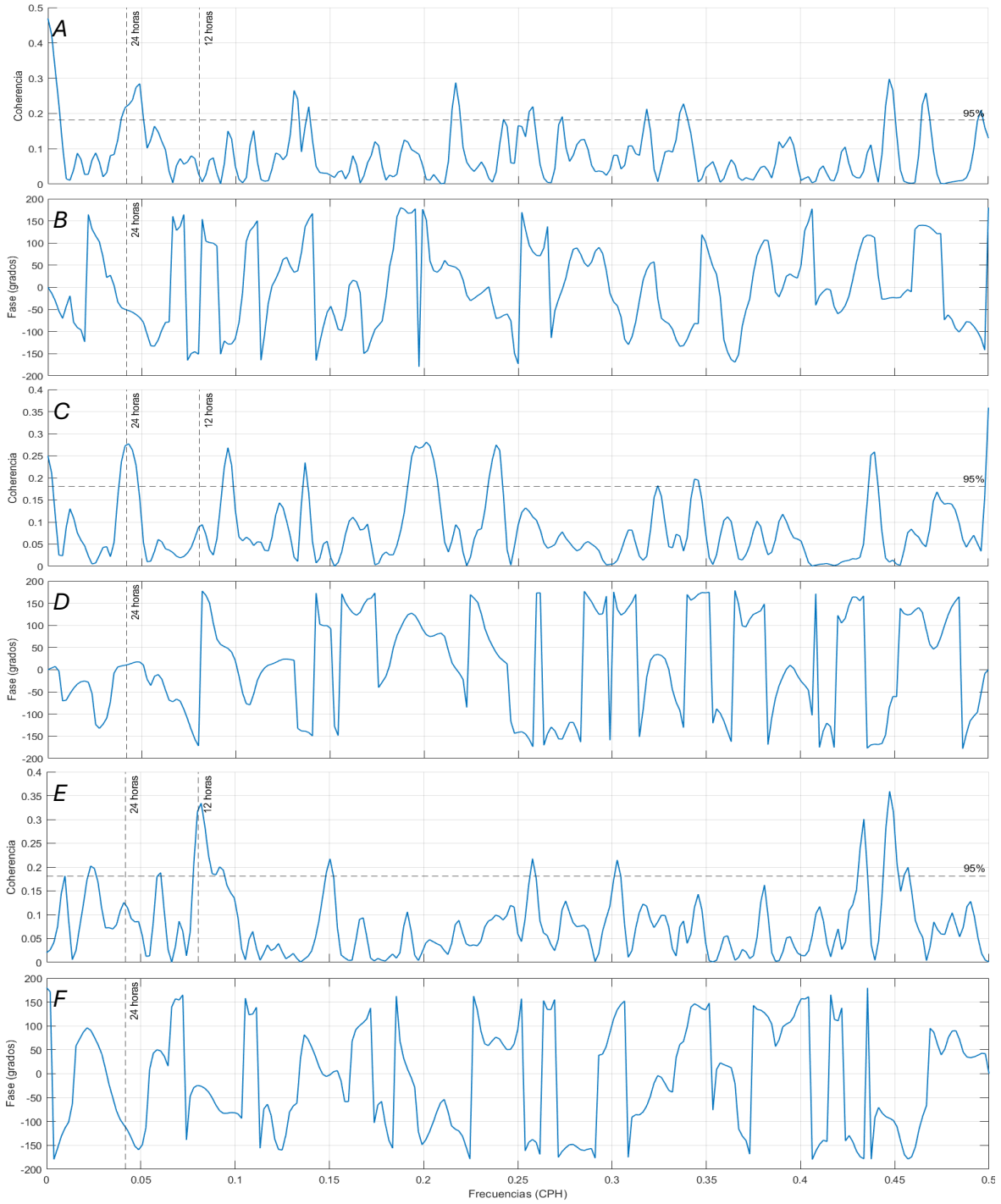


Figura 21: Coherencia cuadrada y fase entre el viento y las corrientes superficiales en la componente zonal en Arauco (A), Boca Chica (C) y Punta Delicada (E). Fase de la coherencia cuadrada (B, D, F respectivamente).

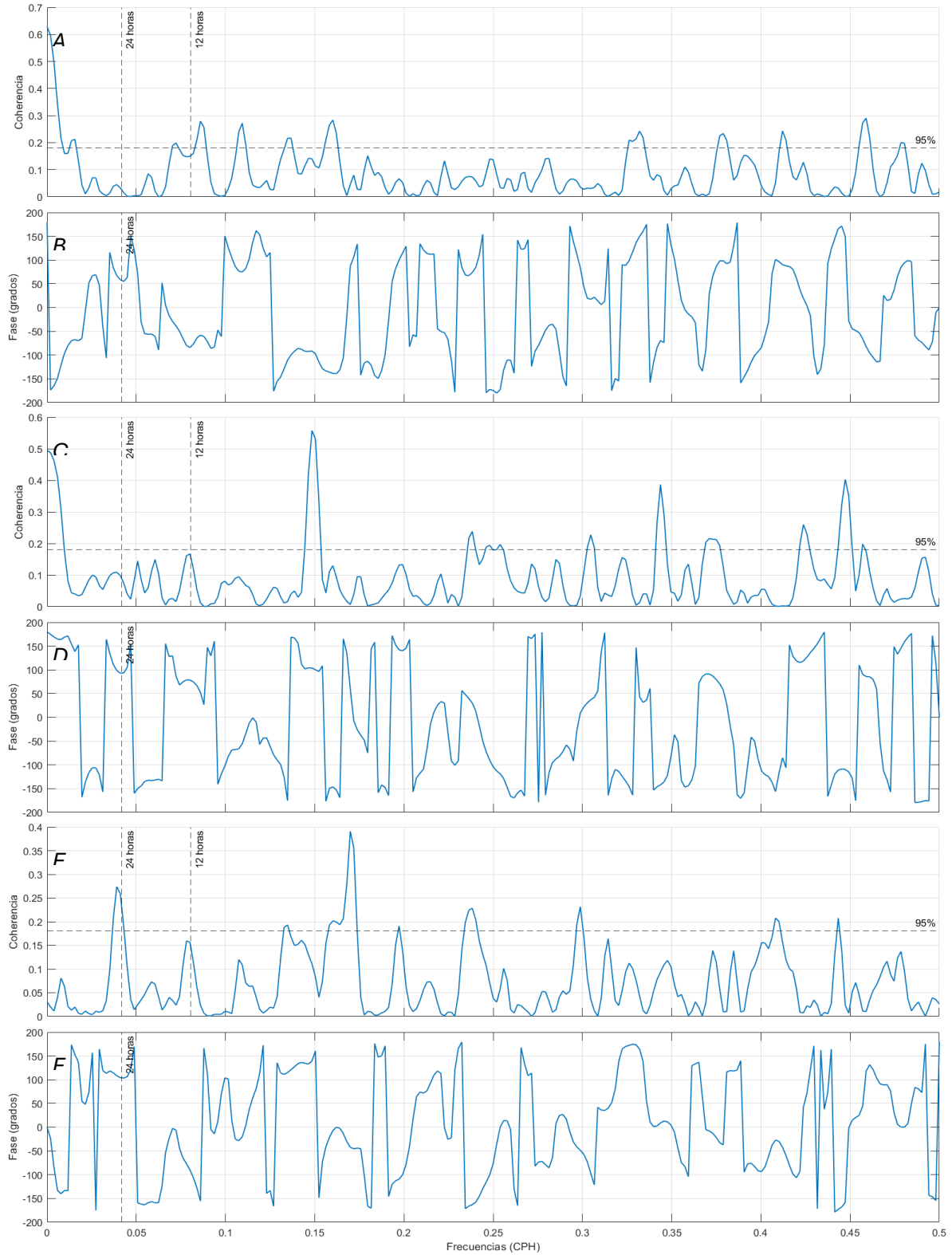


Figura 22: Coherencia cuadrada entre el viento y las corrientes de fondo en la componente zonal en Arauco (A), Boca Chica (C) y Punta Delicada (E). Fase de la coherencia cuadrada (B, D, F respectivamente).

### 3.3.2. Coherencia cuadrada y fase de la componente meridional

En la componente meridional, la coherencia cuadrada en superficie no mostró un máximo significativo en Arauco ni en Boca Chica (Fig. 23A, 23C), lo que indica que el viento no es el principal forzante de las corrientes en estos sectores. En Punta Delicada, en cambio, se observó un máximo significativo en la escala diurna (Fig. 23E). Sin embargo, el análisis de fase mostró valores superiores a  $100^\circ$  en todas las localidades, con desfases de  $150^\circ$  (10 horas) en Arauco,  $125^\circ$  (8:30 horas) en Boca Chica y  $110^\circ$  (7:30 horas) en Punta Delicada (Fig. 23B, 23D, 23F). Estos valores de fase sugieren que las corrientes meridionales no están directamente forzadas por el viento en ninguna de las tres localidades.

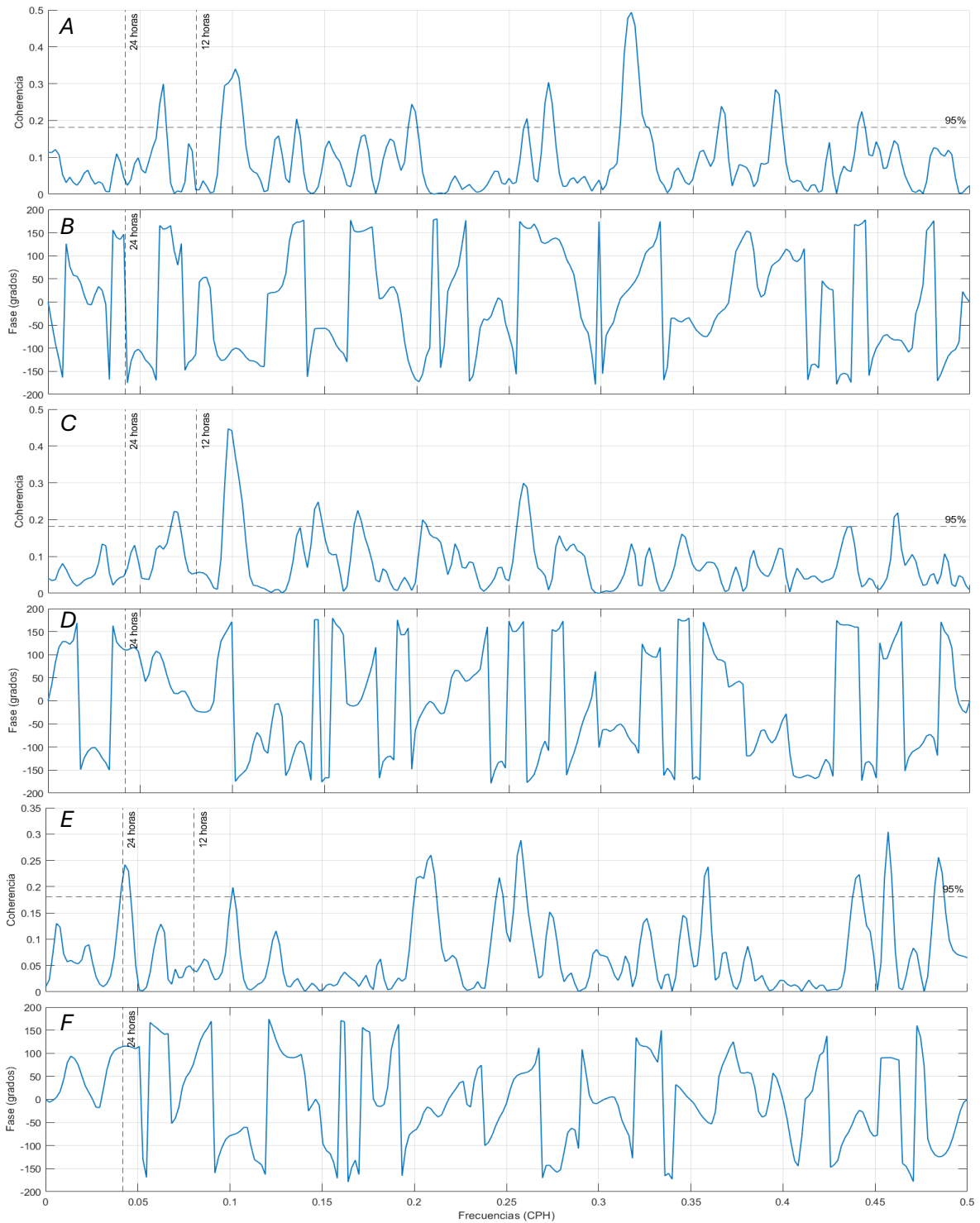


Figura 23: Coherencia cuadrada entre el viento y las corrientes superficiales en la componente meridional para los sectores de Arauco (A), Boca Chica (C) y Punta Delicada (E). Fase de la coherencia cuadrada (B, D, F respectivamente).

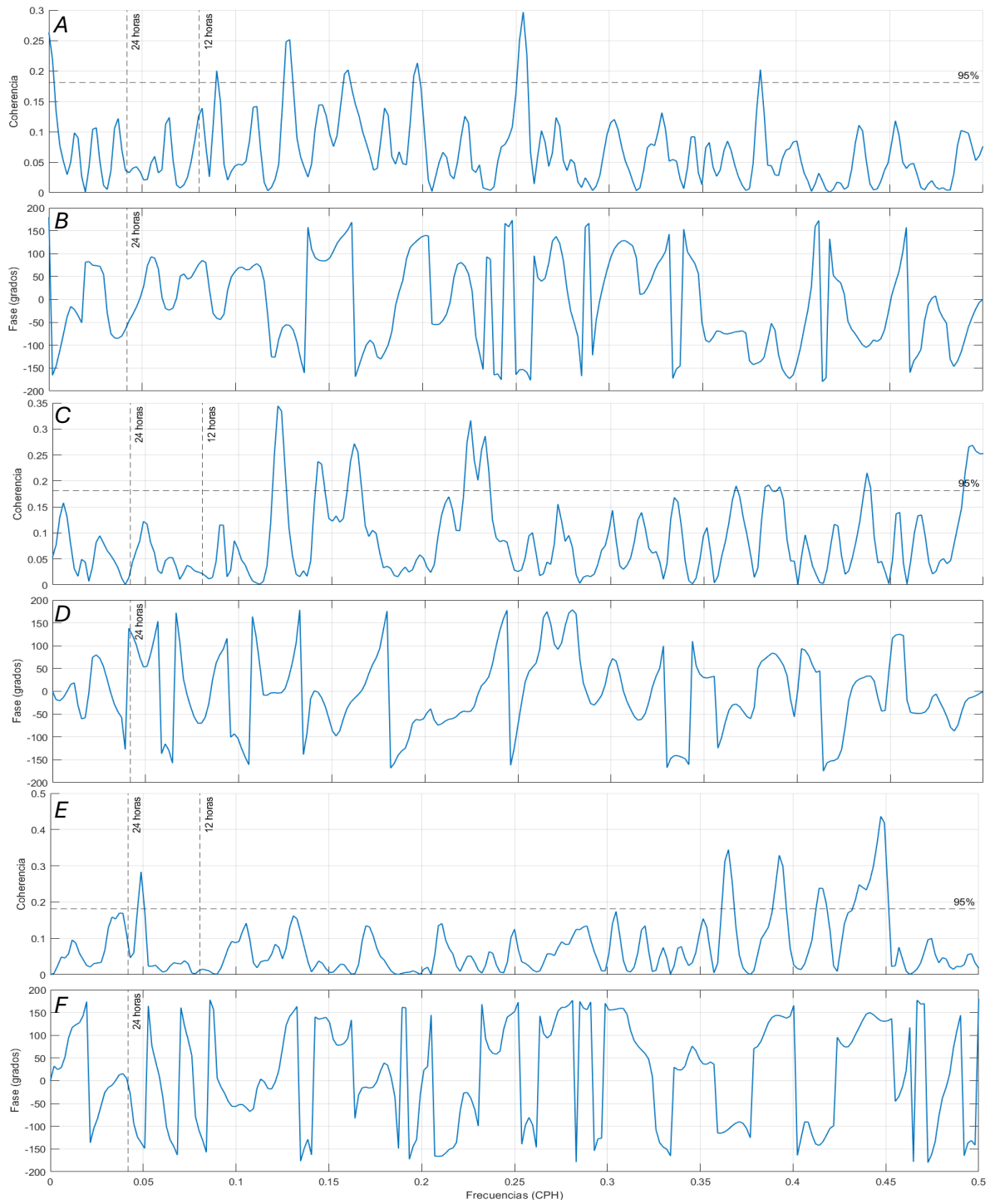


Figura 24: Coherencia cuadrada entre el viento y las corrientes de fondo en la componente meridional para los sectores de Arauco (A), Boca Chica (C) y Punta Delicada (E). Fase de la coherencia cuadrada (B, D, F respectivamente).

## Capítulo 4

### Discusión

#### 4.1. Contraste de resultados con estudios previos

El estudio sobre la influencia de la brisa marina (BM) en la circulación costera del golfo de Arauco ha revelado patrones complejos en la dinámica de corrientes y su estrecha relación con la variabilidad diurna del viento. Estos hallazgos son cruciales, no solo para comprender los procesos que gobiernan la circulación local, sino también para evaluar el transporte y dispersión de contaminantes en una de las zonas más productivas y con mayor actividad humana en el borde costero de Chile.

Los resultados obtenidos confirman que la BM es un factor clave en la dinámica costera, particularmente en áreas expuestas como Arauco, donde modula significativamente las corrientes superficiales y subsuperficiales. En Arauco, las amplitudes de observadas en la superficie fueron de 7.2 cm/s y 11.7 cm/s para las componentes zonal y meridional, respectivamente, lo que explica hasta un 7.9% de la varianza. Este comportamiento disminuye en profundidad (12 m), con amplitudes de 2.3 cm/s y 2.0 cm/s, pero todavía refleja una influencia destacada de la BM, con un 21.0 % de varianza explicada en la componente zonal. Este patrón subraya la importancia de la BM en la circulación superficial, aunque su influencia disminuye con la profundidad, un fenómeno ya documentado en otros estudios.

En contraste, en Boca Chica, la influencia de la BM sobre las corrientes superficiales fue menos pronunciada, con amplitudes de 3.7 cm/s y 1.1 cm/s para las componentes zonal y meridional, explicando una proporción más baja de la varianza (4.4% y 0.3%). A mayor profundidad (23 m), las amplitudes disminuyeron aún más, a 2.3 cm/s y 1.5 cm/s, lo que sugiere que, aunque la BM sigue siendo un factor relevante, su influencia está modulada por otros factores como las características geomorfológicas y las corrientes inducidas por mareas, que podrían atenuar los efectos de la BM en este sector.

Por otro lado, Punta Delicada mostró una dinámica aún más débil, con amplitudes de 1.28 cm/s (zonal) y 0.27 cm/s (meridional) en la superficie (4 m), y valores aún más bajos a 39 m de profundidad. Estos resultados, junto con la baja proporción de varianza explicada, resaltan el papel dominante de la geomorfología en la atenuación de los efectos de la BM, lo que implica que las características locales de cada sitio pueden influir de manera significativa en la dinámica costera.

La comparación con los resultados de Sobarzo et al. (2010) permite una evaluación más detallada de los patrones observados. En la superficie, las amplitudes en Itata (2007) fueron menores (4.20 cm/s), mientras que en Arauco las amplitudes fueron superiores, con un promedio de 7.20 cm/s en la componente zonal. Sin embargo, las amplitudes registradas en Itata a mayor profundidad (20 m) se acercan a las observadas en Boca Chica, lo que sugiere una mayor similitud en la influencia de la BM en zonas más profundas (Tabla 6). Estas diferencias podrían explicarse por la intensidad de los vientos locales y las variaciones en las características geomorfológicas de cada sitio, lo que refuerza la necesidad de considerar las particularidades locales en el estudio de la dinámica costera.

Tabla 6: Comparativa entre los resultados obtenidos en el estudio y los datos previos obtenidos por Sobarzo et al. (2010).

<b>Área de estudio</b>	<b>Componente</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Amplitud (cm/s)</b>
Arauco	Zonal	4	7.20
	Zonal	12	2.25
	Meridional	4	11.69
	Meridional	12	2.02
Boca Chica	Zonal	4	3.70
	Zonal	23	2.34
	Meridional	4	1.06
	Meridional	23	1.47
Punta Delicada	Zonal	4	1.28
	Zonal	39	0.10
	Meridional	4	0.27
	Meridional	39	0.22
<b>Estudio previo de Sobarzo et al. (2010)</b>			
<b>Área de estudio</b>	<b>Componente</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Amplitud (cm/s)</b>
Itata	Zonal	4	4.20
	Zonal	20	0.97-1.32
	Meridional	4	2.39
	Meridional	20	0.88

## 4.2. Hallazgos Principales

1. **Respuesta diurna de las corrientes:** El análisis ha evidenciado una respuesta significativa de las corrientes costeras al ciclo diurno del viento, particularmente en la componente zonal en localidades como Arauco, donde el 7,9 % de la varianza superficial de las corrientes fue explicada por la BM. Este fenómeno genera una estructura de doble capa, con un flujo superficial hacia el noreste (velocidades de hasta 100 cm/s) y un flujo de fondo hacia el suroeste. En contraste, localidades como Punta Delicada, y Boca Chica presentaron un impacto limitado del ciclo diurno, con porcentajes de varianza explicada menores al 5 % y amplitudes superficiales que no superaron los 10 cm/s. Además, se observa un porcentaje de varianza explicada mayor en la capa de fondo para las localidades de Arauco (21.0%), y Boca Chica (7.46%).
2. **Coherencia viento-corriente y desfase:** La coherencia cuadrada entre el viento y las corrientes fue significativa únicamente en Arauco para la componente zonal, alcanzando valores superiores a 0.7 en frecuencias diurnas y mostrando un desfase negativo de hasta 3 horas y 30 minutos. En Boca Chica y Punta Delicada, la coherencia fue mucho menor, lo que indica que el forzamiento del viento no explica directamente la variabilidad de las corrientes en estos sectores.
3. **Dinámica local y contaminación marina:** Los patrones de circulación costera observados son fundamentales para entender el transporte de contaminantes. En áreas como Arauco, la brisa marina favorece la dispersión hacia el norte durante el día y la acumulación en la costa durante la noche, con velocidades de 16.2 cm/s.

### 4.3. Implicaciones para la gestión ambiental y pesquera

La conexión entre los patrones de circulación costera y la dispersión de contaminantes es fundamental para la gestión ambiental del golfo de Arauco. En áreas expuestas como Arauco, las corrientes diurnas intensificadas por la influencia de la BM facilitan el transporte de contaminantes hacia zonas más alejadas, aumentando su dispersión. Sin embargo, estas eventuales partículas que viajan hacia el noreste durante el día podrían alcanzar las bahías de Lota y Coronel, acumulándose en ese sector, a unos 20 km de distancia. Estas diferencias subrayan la necesidad de desarrollar estrategias específicas para mitigar los impactos ambientales, considerando las características particulares de la circulación en cada zona del golfo.

Este estudio refuerza la hipótesis de que la BM actúa como un forzante clave en la circulación costera y la mezcla vertical en sistemas semi-cerrados como el golfo de Arauco. Además de confirmar la relevancia de este fenómeno, se ha profundizado en la comprensión de sus variaciones espaciales, evidenciando cómo la interacción entre la BM y las condiciones geomorfológicas modula la dinámica local. Estos hallazgos no solo complementan estudios previos, sino que también establecen un punto de referencia crucial para futuras investigaciones en áreas de alta productividad biológica, donde la gestión integrada del ambiente marino es esencial. Para lograr esto, habría que combinar mediciones de corrientes con mediciones de alta frecuencia de variables biológicas y químicas en toda la columna de agua en sectores costeros claves dentro del golfo de Arauco.

#### 4.4. Evaluación de la calidad del método utilizado

El método empleado para analizar la variabilidad diurna del viento y las corrientes es robusto y adecuado para los objetivos del estudio. El uso de datos obtenidos mediante ADCP RDI Workhorse con alta resolución temporal y la aplicación de análisis espectrales rotatorios permitieron identificar las frecuencias dominantes y evaluar la energía asociada a la variabilidad diurna. Además, el ajuste armónico de 24 horas facilitó la cuantificación precisa de la amplitud y la fase del ciclo diurno.

#### 4.5. Evaluación de las limitaciones y proyecciones del estudio

Este estudio, aunque aporta información valiosa sobre la influencia de la brisa marina (BM) en la circulación costera del golfo de Arauco, presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas para contextualizar los resultados y orientar futuras investigaciones.

Una de las principales limitaciones es la corta duración de las mediciones, realizadas entre febrero y marzo de 2022. Un mejor estudio debería incorporar otras mediciones de primavera-verano para comparar este fenómeno en distintos años. Este único periodo, aunque representativo del verano austral, no permite capturar las variaciones interanuales en el viento del suroeste que podrían influir significativamente en la dinámica diurna del golfo.

Adicionalmente, el análisis no incluyó mediciones de parámetros complementarios como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nivel del mar, los cuales son fundamentales para comprender la influencia de la variabilidad diurna sobre otras variables. Estas variables podrían proporcionar una visión más integral de la interacción entre el viento, la columna de agua y los factores hidrográficos que modulan la circulación costera.

Por último, la lejanía de la estación meteorológica es otro aspecto importante que destacar en el desarrollo de este análisis. Esto se debe a que las mediciones de viento en estaciones alejadas pueden no reflejar con precisión las condiciones

locales del viento en la zona de estudio. Factores como la topografía, la brisa marina y otros procesos locales pueden generar patrones de viento significativamente diferentes, limitando la representatividad espacial de los datos utilizados.

Además, las diferencias espaciales y temporales introducidas por la distancia pueden causar desfases o errores en la correlación entre el viento y las corrientes, sesgando los resultados.

#### 4.6. Cumplimiento de la hipótesis planteada

La hipótesis inicial de este estudio proponía que la BM es un forzante dominante en la dinámica de la circulación costera del GA, modulando la estructura y magnitud de las corrientes diurnas. Los resultados obtenidos respaldan esta hipótesis en gran medida, pero con importantes matices según la localidad analizada:

1. **Arauco:** La coherencia cuadrada entre el viento y las corrientes en la frecuencia diurna alcanzó valores significativos superiores a 0.7 para la componente zonal, lo que, junto con los altos porcentajes de varianza explicada por el ciclo diario, respalda que la BM es el principal forzante en esta zona. En particular, la amplitud de la componente zonal en la superficie fue de 7.20 cm/s, mientras que en la componente meridional no se observó una relación significativa con el viento. Estos resultados indican que la influencia de la BM en la circulación de esta localidad se manifiesta principalmente en la componente zonal.
2. **Boca Chica:** Aunque la influencia de la BM es notable, especialmente en la componente zonal superficial, donde la amplitud alcanzó 3.70 cm/s, la coherencia cuadrada en profundidad fue menor, con valores por debajo de 0.5. Además, la dispersión en las fases, que variaron desde  $75.99^\circ$  en la superficie hasta  $257.92^\circ$  en profundidad, sugiere que otros procesos locales, como la interacción con la batimetría y la mezcla inducida por mareas, podrían contribuir a la circulación.

3. **Punta Delicada:** Los bajos porcentajes de varianza explicada (1.09 % para la componente zonal superficial y 0.08 % para la componente meridional superficial), junto con la predominancia de la señal semidiurna y las débiles amplitudes (1.28 cm/s en la componente zonal y 0.27 cm/s en la componente meridional en la superficie), indican que la BM tiene un efecto limitado en esta localidad. La coherencia cuadrada fue también baja, con valores menores a 0.3, reflejando una menor relación entre el viento y las corrientes. Esto contrasta con la hipótesis inicial, subrayando la relevancia de las condiciones geomorfológicas y la influencia de otros factores.

## Capítulo 5

### Conclusión

El estudio realizado sobre la influencia de la brisa marina (BM) en la circulación del golfo de Arauco ha evidenciado una respuesta diurna de las corrientes costeras a la variabilidad del viento, caracterizada por una estructura de doble capa en la columna de agua. Los vientos predominantes, con intensidades de 3 a 5 m/s entre las 15:00 y las 20:00 horas, generan un flujo superficial hacia el noreste y un flujo de fondo hacia el suroeste en sectores como Arauco. Las velocidades máximas en la superficie alcanzaron hasta 100 cm/s, mientras que en Punta Delicada no superaron los 20 cm/s, evidenciando la influencia moduladora de la geomorfología del golfo.

Los análisis de coherencia cuadrada mostraron una relación significativa entre el viento y las corrientes en la frecuencia diurna, alcanzando valores de coherencia superiores a 0.7 en Arauco, con desfases de hasta 3:30 horas. En Boca Chica, se observó una menor coherencia en profundidad, mientras que, en Punta Delicada, esta fue limitada debido a la geomorfología y la baja energía diurna de las corrientes.

La amplitud y la fase del ciclo diurno también variaron significativamente entre localidades. En Arauco, la componente meridional presentó una amplitud de 1.65 m/s en la superficie, mientras que la componente zonal fue menor, con 0.22 m/s. En contraste, en Punta Delicada las amplitudes fueron considerablemente más bajas, con valores de 0.32 m/s para la componente meridional y 0.11 m/s para la zonal en la superficie. Los porcentajes de varianza explicada por el ciclo diurno alcanzaron el 7.9 % en la componente zonal superficial en Arauco, mientras que en Punta Delicada fueron menores al 10 % en ambas componentes. Estos bajos valores pueden deberse a la naturaleza episódica de la BM.

Estos resultados destacan la importancia de la BM en la dinámica costera del GA, especialmente en sectores como Arauco, donde su influencia es predominante. Sin embargo, en áreas más protegidas como Punta Delicada, el efecto de la BM es

atenuado por factores geomorfológicos, subrayando la importancia de considerar las características locales en estudios de dinámica costera.

La dispersión de contaminantes en zonas costeras, como el golfo de Arauco, está estrechamente relacionada con la dinámica de las corrientes generadas por la brisa marina. Los patrones de circulación en la columna de agua influyen directamente en la distribución de sustancias en el medio marino, ya que los vientos predominantes generan flujos superficiales y de fondo que transportan contaminantes a lo largo de la costa. La doble capa observada en la circulación del golfo puede favorecer la acumulación de contaminantes en determinadas zonas, especialmente en áreas cercanas a la costa como Arauco, donde las corrientes superficiales hacia el noreste pueden arrastrar materiales hacia zonas sensibles. En cambio, en zonas más protegidas como Punta Delicada, la menor velocidad de las corrientes y los efectos geomorfológicos limitan la dispersión de contaminantes, demostrando la importancia de comprender las variaciones locales en la circulación costera para evaluar los riesgos ambientales asociados a la dispersión de contaminantes en el golfo.

# Bibliografía

Ahumada, R. 1995. Bahías: Áreas de uso múltiple un enfoque holístico del problema de la contaminación. *Ciencia y Tecnología del Mar*, Número Especial, págs. 59–68.

Ahumada, R. 1989. Producción y destino de la biomasa Fito planctónica en un sistema de bahías en Chile central: una hipótesis. *Biología Pesquera (Chile)* 18: 53-66.

Alarcón, E. 1970. Descripción oceanográfica preliminar del golfo de Arauco. Instituto de Fomento Pesquero.

Ancapichún, S. and Garcés-Vargas, J. 2015. Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre la temperatura superficial del mar frente a la costa centro-norte de Chile. *Ciencias marinas*, 41(1):1–20

Arcos, D., Furet, L., Carrasco, F., Núñez, S., & Vargas, F. 1993. Eutroficación en el ambiente marino de Chile Central: Efectos inducidos por la evacuación de residuos industriales líquidos. *Investigaciones Marinas (Chile)* 21: 51-74.

Arnos Sampedro, J. 1996. Modelización y evaluación de efectos indirectos sobre las mareas terrestres en el área de las Islas Canarias (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid).

Arrizaga, A., Chong, J., and Oyarzún, C. 1991. Evolución de las principales pesquerías de la VIII Región: la pesquería del Golfo de Arauco. In: *Gestión Ambiental de los Recursos Hídricos Continentales y Marinos, y Planificación Territorial*. v.A. Gallardo (Ed.). Proyecto EULA, pages 27–29.

Barros Atuesta, Y. Y. 2021. Efectos del caudal, la marea, el viento y la aceleración de Coriolis en la intrusión salina y circulación estuarina en un delta tropical de gran escala.

Benavent Merchán, M. T. 2011. Estudio metodológico del efecto oceánico indirecto y desarrollo de modelos de carga oceánica: aplicaciones geodésicas para la Península Ibérica y Canarias. Universidad Complutense.

Casado-Martinez, M. C., Forja, J. M., & DelValls, T. A. 2007. Direct comparison of amphipod sensitivities to dredged sediments from Spanish ports. *Chemosphere*, 68(4), 677-685.

Castro, L., Quiñones, R., Arancibia, H., Figueroa, D., Roa, R., Sobarzo, M., & Retamal, M. 1997. Áreas de desove de anchoveta y sardina común en la zona central. Informe Final Proyecto Fondo de Investigación Pesquera No. 96-11. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 115 pp. + figuras.

Castro, L. R., Troncoso, V. A., and Figueroa, D. R. 2007. Fine-scale vertical distribution of coastal and offshore copepods in the Golfo de Arauco, central Chile, during the upwelling season. *Progress in Oceanography*, 75(3):486–500.

Castro, L., Quiñones, R., Arancibia, H., Figueroa, D., Roa, R., Sobarzo, M., and Retamal, M. 1997. Áreas de desove de anchoveta y sardina común en la zona central. Final Report Project FIP, 96.

Chorley, R. J., & Barry, R. G. 1980. *Atmósfera, tiempo y clima*. Omega SA, Barcelona.

Contreras Rojas, J. 2017. Circulación del Golfo de Arauco y patrones de dispersión y residencia de contaminantes asociados a emisarios submarinos [Habilitación profesional para optar al título de Geofísico, Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica].

Daneri, G., Dellarossa, V., Quiñones, R., Jacob, B., Montero, P., and 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.

Djurfeldt, L. 1989. Circulation and mixing in a coastal upwelling embayment; Gulf of Arauco, Chile. *Continental Shelf Research*, 9(11):1003–1016.

Faundez-Baez , P., Morales , C., y Arcos , D. 2001. Variabilidad espacial y temporal en la hidrografía invernal del sistema de bahías frente a la VIII región (Chile centro-sur). *Revista Chilena de Historia Natural*, 74:817–831.

Fortt, A. and de Oceana, I. A. 2007. Emisarios submarinos: El mar no es un retrete. *OCEANA. Freshwater Biology*, 51(1):1–11.

Hernández-Miranda, E., Quiñones, R., Aedo, G., Valenzuela, A., Mermoud, N., Román, C., and 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.

Garau, G. A. 2013. Las brisas marinas y su significación geográfica. El caso de Mallorca. *Sémata: Ciencias sociais e humanidades*, (25).

Garreaud, R., Rutllant, J., and Fuenzalida, H. 2002. Coastal lows along the subtropical west coast of South America: Mean structure and evolution. *Monthly Weather Review*, 130(1):75–88.

Hernández, A., Cubillos, L., y Quiñones, R. 2011. Evaluación 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.

Hyder, P., Simpson, J. H., & Christopoulos, S. 2002. Sea-breeze forced diurnal surface currents in the Thermaikos Gulf, North-west Aegean. *Continental Shelf Research*, 22(4), 585-601

Landaeta, M. y Castro, L. 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.

Letelier, J., Pizarro, O., y Nuñez, S. 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C12).

Leth, O. and Middleton, J. F. 2006. A numerical study of the upwelling circulation off central Chile: Effects of remote oceanic forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C12).

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: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(8).

McCready, S., Spyrikis, G., Greely, C., Birch, G., y Long, E. 2004. Toxicity of surficial sediments from Sydney Harbour and vicinity, Australia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96(1):53–83.

Mesias, J., Matano, R., y Strub, T. 2003. Dynamical analysis of the upwelling circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C3).

Mesias, J., Matano, R., y Strub, T. 2001. A numerical study of the upwelling circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C9).

NOAA: National Weather Service cited 2011: The Sea Breeze. [Available online at <http://www.srh.weather.gov/srh/jetstream/ocean/seabreezes.htm>]

Parada, C., Sobarzo, M., Figueroa, D., Castro, C., et al. 2001. Circulación del Golfo de Arauco en un período de transición estacional: Un nuevo enfoque. *Investigaciones Marinas*, 29(1):11–23.

Parada, CE. 1999. Influencia de factores físicos en la variabilidad interdiaria de la distribución de estados tempranos de *Engraulis ringens* en el Golfo de Arauco , Tesis de maestría, 98 pp., Univ. Concepción, Concepción, Chile.

Peñailillo Azócar, C. S. 2023. Influencia del viento en la distribución de partículas al interior del Golfo de Arauco [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

Peredo Núñez, E. 2010. Contaminación del agua en la región del Maule y Biobío. *RIAT Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 6(1):61–68.

Pokhrel, R., & Lee, H. 2011. Estimation of the effective zone of sea/land breeze in a coastal area. *Atmospheric Pollution Research*, 2(1), 106–115. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.013>

Pradenas, E., & Rudolph, A. 1989. Comparación del impacto ambiental en la Bahía de Concepción producido por los residuos de las plantas de harina, aceite y congelados. *Revista de Biología Marina (Chile)* 18: 115-122.

Rahn, D. A. and Garreaud, R. D. 2014. A synoptic climatology of the nearsurface wind along the west coast of South America. *International Journal of Climatology*, 34(3):780–792.

Renault, L., Dewitte, B., Marchesiello, P., Illig, S., Echevin, V., Cambon, G., Ramos, M., Astudillo, O., Minnis, P., and Ayers, J. K. 2012. Upwelling response to atmospheric coastal jets off central Chile: A modeling study of the October 2000 event. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C2).

Rudolph, A., Ahumada, R., y Pérez, C. 2002. Dissolved oxygen content as an index of water quality in San Vicente Bay, Chile (36° s). *Environmental Monitoring and Assessment*, 78(1):89–100.

Saavedra, N., 1980. La presión y la dirección del viento en Concepción, *Tralka* 1, 153 – 162.

Schink, B., & Room, C. H. (2012). The effect of crop orientation on the inland sea breeze and convective initiation. Doctoral dissertation, University of North Dakota.

Simpson, J.E.; Mansfield, D.A.; Milford, J.R. 1977. Inland Penetration of Sea Breeze Fronts, *Journal Royal Meteorological Society*, vol. 103.

Simpson, J.H., Hyder, P., Rippeth, T.P., 2002. Forced oscillations near the critical latitude for diurnal- inertial resonance. *Journal of Physical Oceanography* 32,177–187.

Sobarzo, M., Figueroa, M., y Djurfeldt, L. 2001. Upwelling of subsurface water into the rim of the Biobio submarine canyon as a response to surface winds. *Continental Shelf Research*, 21(3):279–299.

Sobarzo, M., & Djurfeldt, L. 2004. Proceso de surgencia costera en una plataforma continental limitada por cañones submarinos, Concepción, Chile central. *Journal of Geophysical Research*, **109** (C12), 1-20. <https://doi.org/10.1029/2004JC002350>

Sobarzo, M., Bravo, L., & Moffat, C. 2010. Diurnal-period, wind-forced ocean variability on the inner shelf off Concepción, Chile. *Continental Shelf Research*, 30(20), 2043-2056.

Sobarzo, M., E. Sansone, A. de Maio, D. Arcos, M. Salamanca & J. Henríquez 1993. Variabilidad espacio temporal de la estructura hidrográfica de las aguas del golfo de Arauco. Monografías científicas Vol. 4. Oceanografía física del golfo de Arauco. Eds. F. Faranda y O. Parra. 60 páginas más figuras. Santiago de Chile.

Sobarzo, M., Shearman, K., Lentz, S., 2007. Near-inertial motions over the continental shelf off Concepción, central Chile. *Progress in Oceanography* 75, 348–362.

Sobarzo, M., Tapia, F., & Saldías, G. 2016. Avances en el estudio oceanográfico del golfo de Arauco. *Versión Diferente*, 13(24), 81-83.

Sprovieri, M., Feo, M. L., Prevedello, L., Manta, D. S., Sammartino, S., Tamburrino, S., & Marsella, E. 2007. Heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Naples harbour (southern Italy). *Chemosphere*, 67(5), 998-1009.

Strub P, J Mesías, V Montecino, J Rutlland & S Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off Western South America. En: Robinson A & K Brink (eds). *The Sea* 10(B): 273-314. John Wiley, New York.

Urrutia, A., Contreras, M., Herrera, M., & Arcos, D. 1996. La brisa marina superficial en el golfo de arauco, Chile. *Ciencia y Tecnología*, 19-35.

Valle-Levinson, A., Atkinson, LP, Figueroa, D. y Castro, L. 2003. Flujo inducido por vientos ascendentes en una bahía orientada hacia el Ecuador: Golfo de Arauco, Chile *Journal of Geophysical Research*. **108** (C2). <https://doi.org/10.1029/2001JC001272>

Vargas, C. A. and Castro, L. R. 2001. Spawning of the chilean hake (*Merluccius gayi*) in the upwelling system off Talcahuano in relation to oceanographic features. *Scientia Marina*, 65(2):101–110.

Villagrán, M., Gómez, M., and Martínez, C. 2022. Coastal Erosion and the Characterization of the Morphological Dynamics of Arauco Gulf Beaches under Dominant Wave Conditions. *Water*, 15(1):23.

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(3), e2020JC016194. <https://doi.org/10.1029/2020JC016194>

Yannicelli, B., Castro, L. R., Valle-Levinson, A., Atkinson, L., and Figueroa, D. 2006. Vertical distribution of decapod larvae in the entrance of an equatorward facing bay of central Chile: implications for transport. *Journal of Plankton Research*, 28(1):19–37.