



Universidad
de Concepción



DEPARTAMENTO DE
OCEANOGRAFÍA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN



**Biología
Marina**
UdeC

**“EFECTOS DE EL NIÑO Y LA NIÑA EN LAS CONDICIONES
HIDROGRÁFICAS EN LAS ZONAS NORTE, CENTRO, SUR Y AUSTRAL DE
CHILE.”**

MARÍA TERESA GÁTICA PÉREZ

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

Para optar al Título de
BIOLOGA MARINA

Concepción, Chile.

Diciembre 2023

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA

Este Seminario de Título ha sido realizado en el Departamento de Oceanografía
de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas.

Profesor(a) Guía

Dr. Diego Narváez

Ha sido aprobada por la

Siguiente Comisión

Evaluadora

Dr. Fabian Tapia

Dr. Marcus Sobarzo

Jefe de Carrera

Dr. Ariel Valenzuela

DEDICATORIA

“A mis padres, que siempre me dieron alas y herramientas para ser lo que yo quisiera”

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su apoyo en todos los momentos de mi vida, principalmente a lo largo de mi carrera universitaria. A mi madre María Teresa y mi padre Nicolás por su apoyo incondicional. A mis hermanas Milena y Camila, a mis abuelas Otilia y Adriana y mi abuelo Camilo, a mi familia de Santiago y Buin por el amor que me entregan día a día. A Manuel por su amor, apoyo y ser un compañero incondicional. A mis amigas de la vida que nos hemos acompañado en cada etapa vivida. A las amigas y amigos que realicé en este camino universitario y que espero conservar.

A mi profesor guía, Dr. Diego Narváez, por su consideración hacia mi interés en la realización de esta investigación, así como por su orientación, guía y por proporcionarme el espacio en su laboratorio a lo largo de todo el proceso. A los miembros de mi comisión Dr. Fabián Tapia y Dr. Marcus Sobarzo, y Nicolás Mayorga, por su colaboración y ayuda en los momentos en que necesité.

Al Centro de Investigación Oceanográfica COPAS Coastal y al equipo del Laboratorio de Oceanografía Física Aplicada a Ecosistemas Costeros (LOFEC).

INDICE

INDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCION	13
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	20
2.1 Hipótesis	20
2.2 Objetivos	20
2.2.1 Objetivo General.....	20
2.2.2 Objetivos específicos.....	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1 Área de estudio.....	21
3.2 Datos utilizados.....	22
3.2.1 ARGO.....	22
3.2.2 <i>Reanálisis de Temperatura Superficial del Mar Satelital</i>	22
3.2.3 <i>Temperatura Superficial del Mar Costera (datos del SHOA)</i>	23
3.3 Procesamiento y Análisis de datos.....	23
3.3.1 <i>Identificación de períodos ENOS</i>	23
3.3.2 <i>Procesamiento de Datos ARGOS</i>	27
3.3.3 <i>Procesamiento de datos de TSM de reanálisis</i>	29
3.3.4 <i>Procesamiento Datos SHOA</i>	¡Error! Marcador no definido.
4. RESULTADOS	30
4.1 Disponibilidad de datos.....	30
4.2 Perfiles hidrográficos promedios.....	30
4.4.1 <i>Análisis Condiciones Promedio</i>	38
4.4.2 <i>Análisis Condiciones Anómalas</i>	44
4.5 Efecto de ENOS en la temperatura superficial del mar.....	52
4.5.1 <i>Condiciones promedio</i>	52
4.5.2 <i>Efecto de El Niño en las condiciones promedio</i>	55
4.5.3 <i>Efecto de La Niña en las condiciones promedio</i>	58
4.5.4 <i>Temperatura superficial del mar en la costa</i>	60

5. DISCUSIÓN	63
6. CONCLUSIONES	74
7. BIBLIOGRAFÍA.....	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imagen satelital promedio de temperatura superficial del mar para a) Océano Pacífico para el periodo 2003-2014 y b) zona frente a Chile para el periodo 2006-2022. Imágenes provenientes del satélite Terra, sensor MODIS.	21
Figura 2: Índices ENOS, a) Índice Oceánico El Niño 3.4 (ONI) b) ONI vs. ICEN: Compara el Índice Oceánico El Niño 3.4 (ONI) con el Índice Costero El Niño 1+2 (ICEN), evaluando cómo se relacionan estos dos índices a lo largo del tiempo y permite identificar patrones de relación entre estos índices.	24
Figura 3: Índice Oceánico El Niño 3.4 (ONI) las áreas sombreadas indican los periodos entre noviembre a febrero. Los sombreados en rojo corresponden a los años seleccionados como eventos El Niño, en azul los eventos La Niña y el gris los periodos neutros	26
Figura 4: Mapa del Área de Estudio con los perfiles disponibles para cada Zona. El panel a) representa la posición de la totalidad de perfiles para cada zona de estudio. El panel b) presenta estos perfiles y su posición diferenciados por colores, el rojo corresponde a eventos EN, el azul a eventos LN y el negro a periodos neutro.	27
Figura 5: Posición geográfica de los perfiles correspondientes a los periodos ENSO para cada zona de estudio. En la figura, cada punto corresponde a un perfil de una boya ARGO	28
Figura 6 : Posición geográfica de los perfiles correspondientes a los periodos ENSO para las nuevas subáreas de estudio. Cada punto corresponde a un perfil de una boya ARGO.	29
Figura 7 : Cantidad de perfiles ARGOS disponibles en las cuatro zonas de estudio. Panel a) cantidad de perfiles totales disponibles por mes para cada año. Panel b) número de perfiles disponibles por año para cada una de las zonas de estudio.	32
Figura 8: Perfiles de a) Temperatura y b) Salinidad para cada zona de estudio mostrada en Figura 4. Líneas azules y rojas representan el perfil promedio para la temperatura y salinidad respectivamente.	33
Figura 9: Diagramas T/S para el Periodo 2004-2022 en Cada Zona de Estudio. Línea negra representa el promedio. Las principales masas de agua se representan en rojo: Agua Subtropical (AST), Agua Equatorial Subsuperficial (ESSW), Agua Subantártica (SAAW) y Agua Intermedia Antártica (AAIW).	34
Figura 10: Climatología mensuales de temperatura para cada zona de estudio. Cada gráfico presenta los datos de 0 a 100 metros y luego de 100 a 900 metros de profundidad.	36
Figura 11: Climatología mensuales de salinidad para cada zona de estudio.	37
Figura 12: Perfiles de temperatura promedio para eventos ENOS y condiciones normales en el período de Noviembre a Febrero en cuatro zonas de estudio. Los valores de referencia de normalidad, basados en la desviación estándar, se muestran en gris.	40
Figura 13: Perfiles de salinidad para eventos ENOS y condiciones normales en el período de Noviembre a Febrero en Cuatro Zonas de Estudio. Los valores de referencia de normalidad, basados en la desviación estándar, se muestran en gris.	43
Figura 14: Anomalías de temperatura para eventos ENOS calculadas a partir de los perfiles promedios en Figura 12.	47
Figura 15: Anomalías de salinidad para eventos ENOS calculadas a partir de los perfiles promedios en Figura 13.	50
Figura 16: Boxplots de las anomalías de temperatura en profundidad en las cuatro zonas durante periodos ENOS.	51
Figura 17: Boxplots de las anomalías de salinidad en profundidad en las cuatro zonas durante periodos ENOS.	52
Figura 18: Temperatura superficial del mar durante periodos neutros (d), EN (a,b,c) y LN (e,f,g) analizados. Los rectángulos marcan las subáreas descritas anteriormente.	54

Figura 19: Anomalías de la temperatura superficial del mar durante períodos neutros (d), EN (a,b,c) y LN (e,f,g) analizados.	55
Figura 20: Anomalías de la temperatura superficial del mar para 3 eventos de El Niño promediados para los meses de Noviembre a Febrero.....	57
Figura 21: Anomalías de la temperatura superficial del mar para 3 eventos de La Niña.....	59
Figura 22: Series de tiempo de promedios mensuales de TSM para el periodo 2000-2022 en cuatro estaciones a lo largo de Chile.	60
Figura 23: Promedios mensuales de la TSM de estaciones costeras a lo largo de la costa, líneas grises representan años neutros y colores representan años EL y LN. Años están centrados en enero.	62

RESUMEN

El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es uno de los eventos de interacción océano-atmósfera más importantes y dominantes en el mundo, es una oscilación climática tropical que repercute en todo el planeta a través de teleconexiones atmosféricas. Su ciclo oscila entre dos fases; la fase cálida, El Niño y la fase fría, La Niña. La variabilidad de ENOS se ha incrementado en la década de los 2000 y su estudio es esencial para comprender y mitigar los impactos del cambio climático, mejorar la resiliencia de las comunidades ante eventos climáticos extremos y avanzar en la sostenibilidad ambiental y socioeconómica. Este fenómeno tiene impactos significativos en los patrones climáticos y las condiciones meteorológicas en diversas partes del mundo, lo que impacta en diferentes áreas de interés para el ser humano, como el clima global, la pesca y agricultura, los recursos hídricos y los ecosistemas marinos y terrestres. La región norte de Chile (18-24°S) está sujeta a una gran variabilidad interanual debido a ENOS y la surgencia costera permanente debido a la presencia del anticiclón del Pacífico Sur-Oriental. Chile centro-sur (35°-41°S) se caracteriza por una fuerte surgencia costera estacional, donde ENOS fuerza cambios en la oceanografía regional, modulando la intensidad de la surgencia. La región austral del Pacífico Sur (45°-56°S) se ve influenciada tanto por ENOS como por otras oscilaciones climáticas, por lo que ENOS podría no ser el principal impulsor de las anomalías anuales de la temperatura superficial del mar (TSM) en esta zona. Esta investigación tuvo como objetivo principal analizar la intensidad de los cambios en las condiciones hidrográficas de la columna de agua durante eventos ENOS a lo largo de Chile. El estudio se basa en el análisis de perfiles de temperatura y salinidad hasta los 900 metros de profundidad en la columna de agua, utilizando datos provenientes de boyas ARGO recopilados durante los últimos 22 años en las zonas norte (18-28°S), centro (28-38°S), sur (38-48°S) y austral (48-56°S) de Chile. Se llevaron a cabo análisis comparativos de tres periodos El Niño y tres periodos La Niña, evaluando los cambios en perfiles de temperatura y salinidad en profundidad para las cuatro zonas definidas. Este

análisis se complementó con la revisión de series de tiempo de TSM mediante datos recolectados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), así como con el análisis de imágenes satelitales de TSM para toda el área de estudio. Los resultados destacan cambios más intensos en la zona norte, con una disminución gradual hacia las zonas centro, sur y austral. Se concluye que ENOS impacta la columna de agua hasta al menos los 300 metros de profundidad en la zona oceánica de Chile, aunque la magnitud y la naturaleza de estos impactos pueden variar según el evento específico y la región geográfica. La contribución crucial de las boyas ARGO en esta investigación ha permitido comprender el impacto de ENOS a diversas profundidades, subrayando su importancia para estudios futuros en áreas oceanográficas y de interés, como el cambio climático.

ABSTRACT

The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is one of the most important and dominant ocean-atmosphere interaction events globally. It is a tropical climate oscillation that affects the entire planet through atmospheric teleconnections. Its cycle oscillates between two phases: the warm phase, El Niño, and the cold phase, La Niña. The variability of ENSO has increased in the 2000s, and its study is essential for understanding and mitigating the impacts of climate change, improving community resilience to extreme weather events, and advancing environmental and socioeconomic sustainability. This phenomenon has significant impacts on climate patterns and weather conditions in various parts of the world, affecting different areas of human interest such as global climate, fishing and agriculture, water resources, marine and terrestrial ecosystems. The northern region of Chile (18-24°S) experiences considerable interannual variability due to ENSO and the permanent coastal upwelling caused by the presence of the Southeastern Pacific Anticyclone. Central-southern Chile (35°-41°S) is characterized by strong seasonal coastal upwelling, where ENSO forces change in regional oceanography, modulating the intensity of the upwelling. The southern region of the South Pacific (45°-56°S) is influenced by both ENSO and other climate oscillations, suggesting that ENSO may not be the primary driver of annual sea surface temperature anomalies in this zone. The main objective of this research was to analyze the intensity of changes in hydrographic conditions in the water column during ENSO events along the coast of Chile. The study was based on the analysis of temperature and salinity profiles down to 900 depths in the water column, collected by the ARGO floats over the past 22 years in the northern (18-28°S), central (28-38°S), southern (38-48°S), and austral (48-56°S) zones of Chile. Comparative analyses were conducted for three El Niño periods and three La Niña periods, evaluating changes in temperature and salinity at depth for the four defined zones. This analysis was complemented by reviewing sea surface temperature time series collected by SHOA, as well as analyzing satellite images of sea surface temperature for the entire study area. The results highlight more

intense changes in the northern zone, with a gradual decrease towards the central, southern, and austral zones. It is concluded that ENSO impacts the water column to depths of at least 300 meters in the oceanic zone of Chile, although the magnitude and nature of these impacts may vary depending on the specific event and geographical region. The crucial contribution of ARGO floats in this research has allowed understanding the impact of ENSO at various depths, emphasizing their importance for future studies in oceanographic and related areas, such as climate change.

1. INTRODUCCION

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es uno de los eventos climáticos de interacción océano-atmósfera más importantes y dominantes en el mundo (Lu, 2019). Consiste en una oscilación climática en la región del Océano Pacífico Tropical que repercute en todo el planeta a través de teleconexiones atmosféricas (Fogt, 2011). Los efectos remotos del ENOS se dejan sentir en el Pacífico Norte y Sur, en todas las demás cuencas oceánicas, en los siete continentes y en la estratosfera (McPhaden *et al.*, 2006). Ocurre en intervalos irregulares que oscilan aproximadamente entre 3 y 7 años, contribuyendo a la variabilidad interanual, con una duración promedio de 6 a 12 meses (Maturana *et al.*, 1997).

En condiciones normales, los vientos alisios se mueven predominantemente de este a oeste, reuniendo aguas cálidas en la superficie del Océano Pacífico occidental, impulsando aguas frías por debajo de la superficie a lo largo del Ecuador (McPhaden *et al.*, 2006), desplazando las masas de agua cálidas hacia el oeste, por lo que la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el Océano Pacífico Oeste es relativamente mayor que en el lado oriental (Morales, 2020). En un estudio de Morales (2020) se menciona que la termoclina en el lado oeste del Pacífico está a una profundidad promedio de 100 m, notoriamente por debajo de la termoclina en el lado este. Así, las aguas frías del lado este que afloran debido a la surgencia costera a lo largo de la corriente de Humboldt sustituyen las masas de agua cálidas que se transportan hacia el oeste, por lo que la zona este permanece con TSMs relativamente más bajas (Morales, 2020).

El ciclo de ENOS oscila entre una fase cálida y una fase fría (Flores, 2016). La fase cálida, conocida como El Niño (EN), comienza con un debilitamiento o inversión de los vientos alisios en el Pacífico ecuatorial. (Yang, 2021), a medida que la presión atmosférica aumenta en el Pacífico occidental y disminuye en el Pacífico oriental (McPhaden *et al.*, 2006). Esto conlleva el cambio en la dirección de los vientos, por lo cual la presión atmosférica aumenta de forma inusual en las costas de Oceanía, provocando un calentamiento inusual en las zonas centro y

este del Pacífico (Maturana *et al.*, 1997). Estos cambios llevan a que las aguas cálidas presente en el oeste del Océano Pacífico Ecuatorial se desplacen hacia el este, causando un aumento en la TSM cerca de las costas de América del Sur (Morales, 2002). Consecuentemente, la termoclina en el lado este se profundiza, debido a que las aguas cálidas bloquean el afloramiento de las aguas frías provenientes de la corriente de Humboldt (Morales, 2002). En respuesta a este calentamiento asociado a EN, los estados insulares del Pacífico central y la costa occidental de Sudamérica suelen inundarse con altas precipitaciones, mientras que en las costas de Australia, Indonesia y países vecinos suelen experimentar condiciones de sequía y bajas precipitaciones (McPhaden *et al.*, 2006).

Por otro lado, cuando los vientos alisios se intensifican en el este del Océano Pacífico se produce la fase fría de ENOS conocida como La Niña (LN). El fortalecimiento de los vientos alisios también provoca una mayor surgencia de aguas frías y nutrientes desde las profundidades del océano en la región oriental del Pacífico, provocando TSM más frías en las costas de América del Sur (Villarreal *et al.*, 2014). Debido al aumento en la intensidad de los vientos alisios, éstos ejercen un mayor arrastre sobre la superficie del océano, ocasionando un aumento en la diferencia del nivel del mar entre ambos extremos del Océano Pacífico Ecuatorial, por lo que en las costas de América Central y Sur disminuye el nivel del mar, mientras que en el lado oeste aumenta (Villarreal *et al.*, 2014). Este cambio en la presión del nivel del mar y el aumento de la TSM en las costas del Pacífico oeste provoca un aumento en la evaporación de estas aguas, desarrollando mayor nubosidad y precipitaciones más intensas. Por el lado opuesto, en las costas de América Central y del Sur se presentan periodos de sequía, baja nubosidad y bajas precipitaciones. Las anomalías que se presentan durante la fase fría de ENOS son menores que las que se pueden producir por la fase cálida de este (Villarreal *et al.*, 2014).

La fluctuación entre eventos cálidos y fríos muestra una considerable irregularidad en amplitud, duración, evolución temporal y estructura espacial, y es importante considerar que las anomalías en la TSM que produce ENOS se

manifiestan típicamente a fines de año calendario, marcando la importancia del ciclo estacional (McPhaden *et al.*, 2006). La aparición de sequías, inundaciones, huracanes y otros fenómenos meteorológicos en todo el mundo se han asociado con los periodos El Niño (Larkin & Harrison, 2002).

Los efectos directos de este fenómeno se hacen sentir principalmente en la zona intertropical de la cuenca del océano Pacífico, así como en los alrededores del océano Indico. Entre las consecuencias se pueden encontrar sequías en el norte de Australia e Indonesia, déficits de lluvias en India y Etiopía, así como en los altos Andes de Bolivia y del sur de Perú, precipitaciones excepcionales en la costa norte de Perú y altas precipitaciones en Chile central (Ortlieb, 1994). Además, El Niño y La Niña afectan la frecuencia, intensidad y distribución espacial de las tormentas tropicales. En el Atlántico, por ejemplo, el número y la intensidad de los huracanes tienden a reducirse y ser moderados en presencia de El Niño, pero son más fuertes y numerosos durante La Niña (McPhaden *et al.*, 2006).

La variabilidad de ENOS se ha incrementado en la década de los 2000 (Crespo *et al.*, 2022). El impacto de ENOS en los ecosistemas del Pacífico se extiende desde el océano abierto hasta las costas occidentales de América del Norte y del Sur y afecta tanto a las comunidades bentónicas como a las pelágicas (McPhaden *et al.*, 2006). Se ha registrado la acción de ENOS impactando drásticamente los ecosistemas marinos a lo largo de la costa Oeste de Norte América, afectando diversos organismos, como por ejemplo en zonas de mínimo oxígeno (ZMO), donde en el talud continental superior de Perú (12°S) se espera que ENOS se manifieste en una ligera oxigenación de la parte superior (300 m) y en un menor aporte de materia orgánica lábil (Levin *et al.*, 2002). Quetin & Ross (2003) mencionan que diversos autores han demostrado que mediante teleconexiones atmosféricas ENOS afecta a la abundancia y distribución del krill, una especie clave en el ecosistema marino antártico. Además, se sabe que las elevadas temperaturas asociadas a fuertes episodios de El Niño provocan el blanqueamiento de los corales tropicales. Los efectos de El Niño y La Niña se

han documentado en entornos tan diversos como selvas tropicales, manglares, bosques boreales, desiertos y matorrales semiáridos (McPhaden *et al.*, 2006). En una investigación de Ohman y colaboradores (2017) se estudió el impacto del ENOS en los indicadores de los ecosistemas del Sistema de Corrientes de California, encontrando efectos sobre la producción primaria, diatomeas como *Pseudo-nitzschia* sp, comunidades de copépodos, eufáusidos subtropicales y de aguas frías, cangrejos rojos, sardina del Pacífico, anchoveta del norte, salmones juveniles y adultos, comunidades de peces mesopelágicos de aguas cálidas, Mérgulo común y en la reproducción, abundancia y distribución de depredadores tope. Todos estos cambios pueden afectar de muchas maneras al ser humano, como por ejemplo reduciendo la producción de plancton y peces, modificando drásticamente las áreas de distribución de muchas especies protegidas y sobreexplotadas, lo que conlleva a que los recursos pesqueros tradicionales sean inaccesibles, aumentando la proliferación de algas nocivas, alterando el oxígeno y el pH de las aguas utilizadas en acuicultura y favoreciendo la proliferación de agentes patógenos. (Ohman *et al.*, 2017)

El océano costero del norte de Chile (18-24°S) se caracteriza por una fuerte influencia de la surgencia costera y por su alta productividad biológica. Esta región es parte del sistema de corrientes Perú-Chile (Blanco *et al.*, 2002). El Anticiclón Subtropical del Pacífico (SPSA por sus siglas en inglés), junto con el contraste térmico regional tierra-mar fuerzan los vientos hacia el ecuador todo el año en el norte de Chile (Montecinos & Gómez, 2010). En esta zona, el promedio mensual de los vientos es desde el sur- suroeste durando todo el año con velocidades de 3 a 6 m/s, donde el máximo se produce en el verano austral. Esta región está sujeta a una gran variabilidad interanual debido a ENOS (Escribano, 2004). Y los cambios que se atribuyen a EN incluyen un mayor transporte hacia el polo de agua cálida y salina de origen ecuatorial en la superficie, lo que profundiza la termoclina y la nutriclina, reduciendo así la productividad primaria. TSM y niveles de mar más elevados y bajas concentraciones de oxígeno (Montecinos & Gómez, 2010). Los periodos de EN tienden a coincidir con una

reducción de biomasa pesquera (Blanco *et al.*, 2002). Los principales procesos físicos que conectan a ENOS con las zonas de surgencia en el norte de Chile están relacionados con las perturbaciones y los cambios en la termoclina en las corrientes litorales forzadas por las ondas ecuatoriales de Kelvin (Montecinos & Gómez, 2010).

Chile centro-sur (35°-41°S) se caracteriza por una fuerte surgencia costera estacional, donde ENOS fuerza cambios en el clima mediante teleconexiones atmosféricas, modulando el inicio y fin de la temporada de surgencia. (Montecinos & Gómez, 2010). En esta zona, la estacionalidad de los vientos se relaciona con la migración norte-sur del SPSA (Montecinos & Gómez, 2010). Entre 30°S-41°S, en presencia de EN existe una tendencia al aumento de las precipitaciones por encima del promedio; entre 30°S y 35°S en los meses de junio, julio y agosto y entre 35°S y 38°S en los meses de octubre y noviembre. Mientras que el déficit de lluvia se observa típicamente desde alrededor de 38°S a 41°S durante el verano siguiente, en los meses de enero, febrero y marzo (Montecinos *et al.*, 2003). Las zonas oceánicas del Pacífico sureste durante un evento ENOS son fundamentales para explicar las condiciones de lluvia en invierno, además de evidenciar que son las mismas anomalías de circulación las que explican las condiciones de lluvias en primavera en los 35°S-38°S (Montecinos *et al.*, 2003).

En latitudes altas la señal estacional del viento es más intensa (Fogt, 2011). Un estudio de Narváez y colaboradores (2019) muestra que el evento ENSO 2015-16 tuvo un claro impacto en la TSM en la región de los Lagos y Aysén, región que es particularmente sensible a los cambios interanuales en el forzamiento ambiental, debido a la posición latitudinal y la complejidad topográfica de la costa. La región del Pacífico Sur (45°-70°S, 150°-70°W) se ve influenciada tanto por el Modo Anular del Hemisferio Sur (SAM por sus siglas en inglés), como por ENOS (Fogt, 2011). Los resultados de la investigación de Fogt (2011) demuestra que la magnitud en la teleconexión de ENOS del Pacífico Sur están significativamente ligadas a la fase y magnitud de SAM durante los últimos 50 años. La combinación

de SAM y ENSO influye en el período de retroceso y avance de hielo marino regional (Fogt, 2011).

La distribución de poblaciones de peces correspondientes a recursos marinos responde a los incrementos y disminuciones de temperatura del mar, por lo que, en las costas del norte de Chile, ante el aumento de la TSM, la anchoveta (un importante recurso pesquero) cambia su comportamiento y distribución latitudinal, longitudinal y en profundidad, quedando así menos disponible para la captura por la flota pesquera (Aguilar, 2020). ENOS altera el patrón de desembarque mostrando incrementos en los inicios del evento para luego de transcurrido un corto periodo, descender abruptamente pudiendo llegar a cero, como en EN 1982/83. En general, transcurrido un evento e iniciado el retorno a la normalidad ambiental se produce recuperación de los desembarques (Aguilar, 2020). Así mismo, se han evidenciado cambios en la estructuración de las poblaciones bentónicas estructuradoras de comunidades (Segovia, 2020).

El Niño-Oscilación del Sur ha sido objeto de creciente interés en las áreas de estudio del clima y el océano. Numerosos estudios se han enfocado en examinar sus manifestaciones en la atmósfera y en la superficie oceánica, así como sus impactos, tanto para el ecosistema marino, terrestre, efectos sociales y económicos. Sin embargo, es notable que aún se conozca poco los impactos de ENOS en las condiciones hidrográficas de la columna de agua en profundidad a lo largo de Chile. Esta investigación tiene como objetivo abordar esta interrogante al analizar los efectos de ENOS en las condiciones hidrográficas en profundidad de la zona oceánicas de Chile, la cual corresponde desde la costa hasta 5° de longitud, a lo largo de Chile, en cuatro regiones con mayor disponibilidad de datos: norte, centro, sur y austral. Para llevar a cabo este análisis, se emplearon datos principalmente de temperatura y salinidad recopilados por boyas ARGO durante el periodo 2000 – 2022, además de datos de reanálisis de TSM y datos de estaciones costeras del SHOA. Así, esta investigación busca aportar en conocimiento sobre un aspecto crucial de este fenómeno climático y su influencia en una ubicación geográfica particularmente relevante, proporcionando así una

contribución significativa al entendimiento integral de ENOS y sus potenciales impactos.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis

Debido al gradiente latitudinal y las diferencias en los procesos físicos a lo largo de Chile, los efectos de las oscilaciones ENOS debiesen ser más intensos en la zona norte y disminuir en intensidad hacia las zonas centro, sur y austral.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Estudiar los efectos de El Niño y La Niña sobre las condiciones hidrográficas en la columna de agua a lo largo de la zona oceánica (80°O-70°O) de Chile.

2.2.2 Objetivos específicos

2.2.2.1 Determinar la intensidad de los cambios de temperatura y salinidad en la columna de agua en presencia de eventos ENOS en la zona oceánica de Chile norte, centro, sur y austral.

2.2.2.2 Determinar si existen diferencias latitudinales y meridionales en los cambios en las condiciones hidrográficas producidos por ENOS entre las zonas norte, centro, sur y austral de Chile.

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El área de estudio abarca la zona oceánica a lo largo de todo Chile (Fig. 1), subdividida en cuatro zonas: Norte, Centro, Sur y Austral. Cada cuadrante abarca una extensión de 10° de latitud y 5° de longitud, a excepción de la zona Austral (8° de latitud). Las zonas son: Zona Norte: Longitud (-75°O, -70°O), Latitud (-28°S, -18°S). Zona Centro: Longitud (-78°O, -73°O), Latitud (-38°S, -28°S). Zona Sur: Longitud (-79.6°O, -74.6°O), Latitud (-48°S, -38°S). Zona Austral: Longitud (-80°O, -75°O), Latitud (-56°S, -48°S).

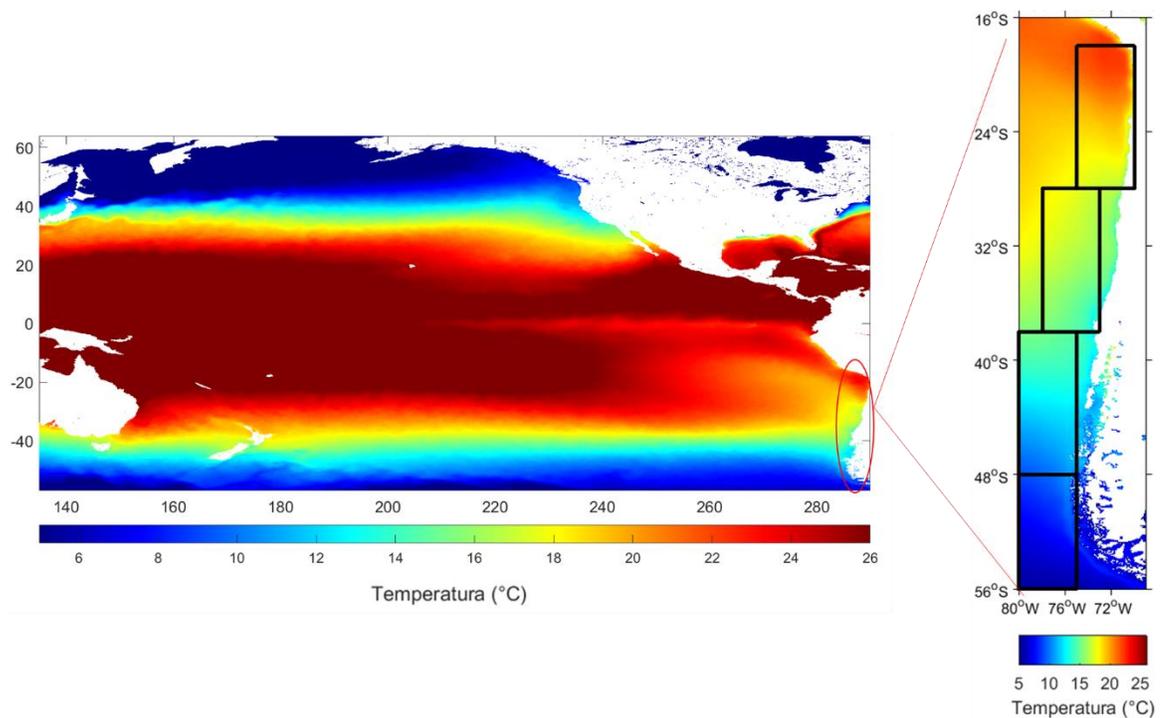


Figura 1: Imagen satelital promedio de temperatura superficial del mar para a) Océano Pacífico para el periodo 2003-2014 y b) zona frente a Chile para el periodo 2006-2022. Análisis SST a Escala Multi-resolución Ultra-Alta (MUR) fv04.2, Global, 0.25°, 2002-presente, Mensual, Lon0360.

3.2 Datos utilizados

3.2.1 ARGO

Datos de temperatura y salinidad fueron obtenidos a través del programa internacional ARGO (<https://argo.ucsd.edu/data/>). Este programa consiste en el despliegue de instrumentos oceanográficos, montados en una boya/flotador (de aquí en adelante boyas ARGO) que derivan con las corrientes y cambian su profundidad para medir verticalmente las condiciones hidrográficas de la columna de agua. Las boyas ARGO registran perfiles de temperatura y salinidad del agua de mar con una resolución vertical de 1-5 metros entre 0- 200 metros y de 25 metros bajo los 200 metros, cada 9 días. Estas boyas ARGOS, en su fase ascendente, registran los datos de la columna de agua en un periodo aproximado de 6 horas, dependiendo de la profundidad a la que se encuentre, transmitiendo la información vía satélite al llegar a la superficie. Cada boya tiene la capacidad de recopilar datos durante 3 a 5 años. El programa está respaldado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI). La descarga de datos se realizó de manera segmentada por zonas de estudio mediante funciones disponibles en R. Se obtuvieron datos desde el año 2004 para las zonas norte, centro y sur, y desde el año 2003 para la zona austral. En consecuencia, el período de estudio considerado abarca desde 2004 hasta 2022 para las cuatro zonas.

3.2.2 *Reanálisis de Temperatura Superficial del Mar Satelital*

Se utilizaron datos mensuales provenientes del reanálisis MUR (Multi-scale Ultra-high Resolution SST fv04.1, Global, 0.01°, 2002-presente), que incorpora información de temperatura superficial del mar (TSM) y anomalías de TSM (datos mensuales menos el promedio de todos los datos disponibles). Estos datos se derivan de una combinación de modelos y observaciones, incluyendo imágenes satelitales. Cubren toda la región de Chile (Longitud: -80 a -69, Latitud: -56 a -16)

con una resolución aproximada de 0.01 grados de arco, equivalente a alrededor de 1 kilómetro en latitud y longitud.

3.2.3 Temperatura Superficial del Mar Costera (datos in situ)

Datos de temperatura superficial del mar de la costa fueron obtenidos de sensores de estaciones oceanográficas desplegadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Se utilizaron los datos de estaciones a lo largo de la costa de Chile. Los datos de varias estaciones fueron revisados por valores escapados y brechas de datos faltantes. Finalmente se decidió utilizar las series de tiempo con más información, las cuales correspondieron las estaciones de: Subárea Norte: Estación Caldera (Lat: 27° 3' 52.63" S, Lon: 70° 49' 29.00" W). Subárea Centro: Estación Talcahuano (Lat: 36° 42' 3.36" S, Lon: 73° 6' 21.57" W). Subárea Sur: Estación Chacabuco (Lat: 45° 28' 1.50" S, Lon: 72° 49' 12.15" W). Subárea Austral: Estación Pto Williams (Lat: 54° 55' 58.35" S, Lon: 67° 36' 29.58" W). A los datos seleccionados se les removieron los datos escapados y se realizaron promedios mensuales para analizar la estacionalidad de la TSM.

3.3 Procesamiento y Análisis de datos

3.3.1 Identificación de períodos ENOS

Para la identificación de períodos ENOS (El Niño (EN), La Niña (LN)) y condiciones neutras (N) se utilizaron datos de anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) mensuales para el período 2000-2023 provenientes de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov>), específicamente estos datos se basan en el conjunto de datos "Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 4" (ERSSTv4). Estos datos se obtuvieron de dos regiones distintas: la región El

Niño 3.4 y la región El Niño 1+2, con el propósito de comparar ambos índices ENSO (Fig. 2).

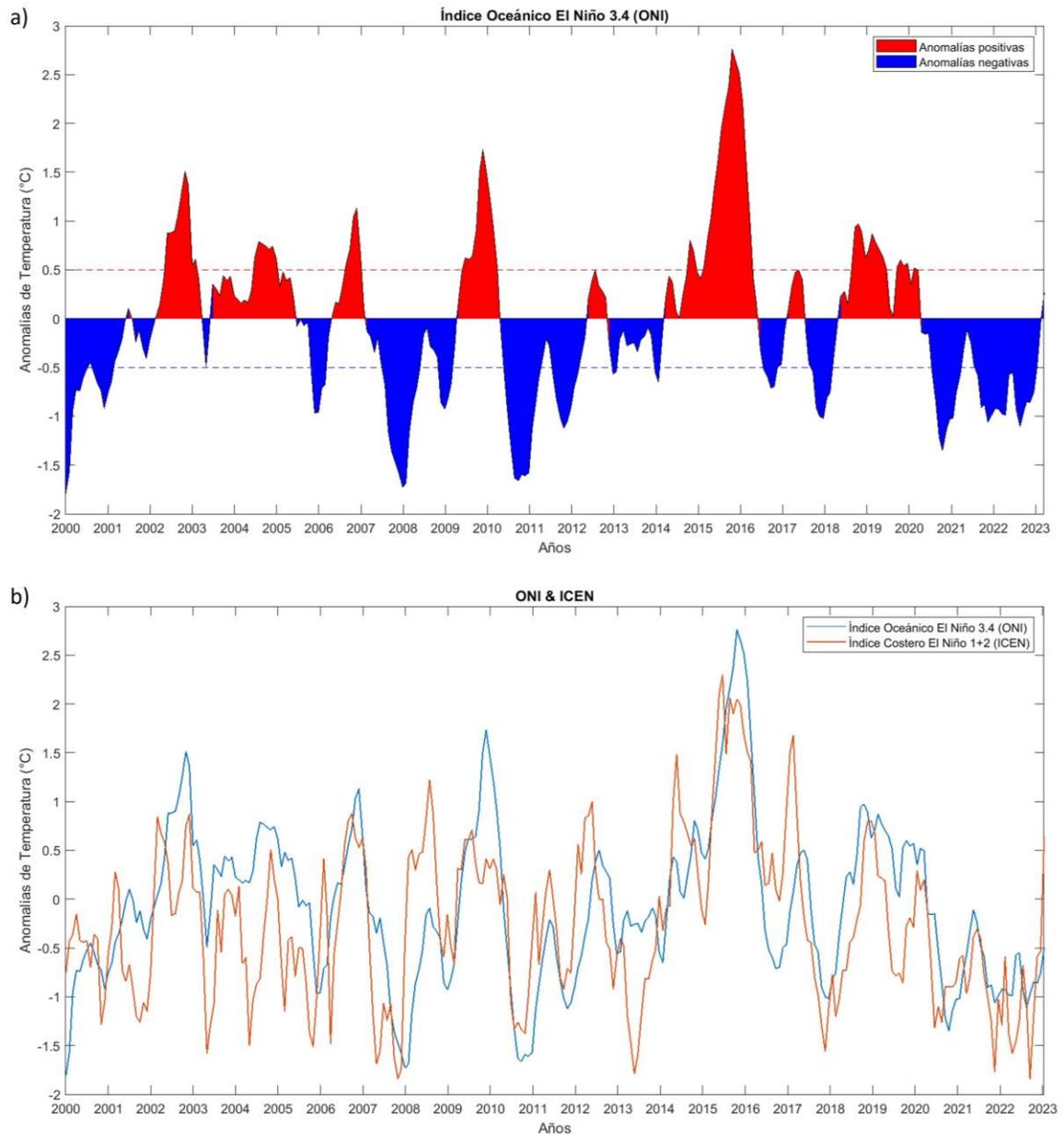


Figura 2: Índices ENOS, a) Índice Oceánico El Niño 3.4 (ONI) b) ONI vs. ICEN: Compara el Índice Oceánico El Niño 3.4 (ONI) con el Índice Costero El Niño 1+2 (ICEN), evaluando cómo se relacionan estos dos índices a lo largo del tiempo y permite identificar patrones de relación entre estos índices.

Para efectos de esta investigación se denomina eventos ENOS (El Niño y La Niña) a aquellos que presentaron una anomalía superior a $\pm 1^\circ\text{C}$ durante los meses de noviembre a febrero según el Índice Oceánico El Niño 3.4 (ONI). Se considera como condiciones neutras (N) aquellas que estaban entre -1 y 1°C . Esta denominación es 0.5 grados mayor que la utilizada por la NOAA, lo cual permite definir sólo los eventos más intensos del ENSO que puedan ocurrir en el Pacífico Sur-Oriental. Esto resultó en la identificación de tres periodos El Niño, tres periodos La Niña y 13 Neutros (Fig. 3, Tabla 1).

Tabla 1: Identificación periodos ENOS

Periodos El Niño	Periodos La Niña	Periodos Neutros
EN 2006/07	LN 2007/08	N 2004/05 N 2005/06 N 2008/09
EN 2009/10	LN 2010/11	N 2011/12 N 2012/13 N 2013/14
EN 2015/16	LN 2020/21	N 2016/17 N 2018/19 N 2019/20 N 2021/22

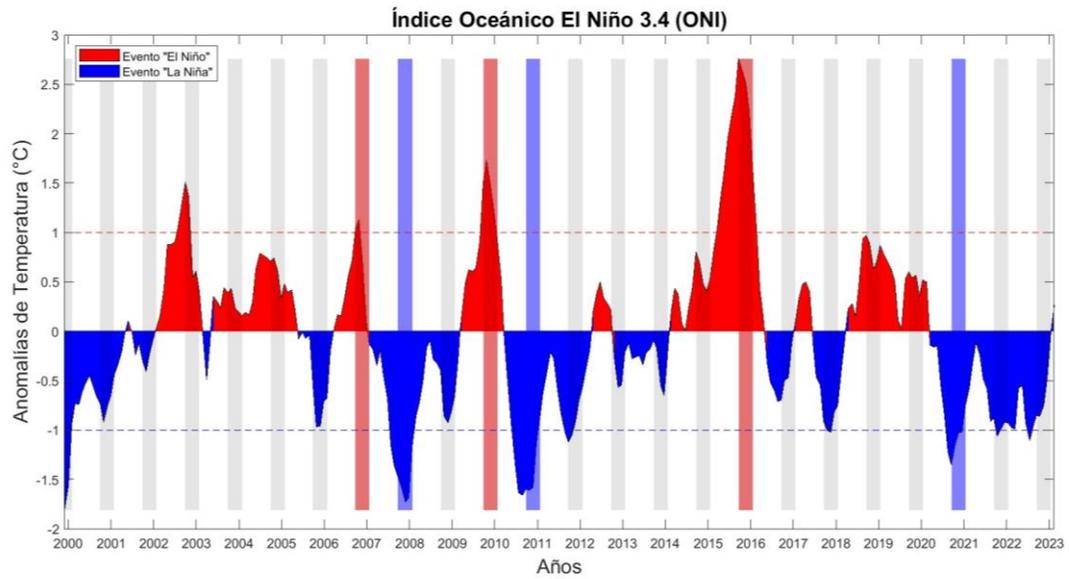


Figura 3: Índice Oceánico El Niño 3.4 (ONI) las áreas sombreadas indican los periodos entre noviembre a febrero. Los sombreados en rojo corresponden a los años seleccionados como eventos El Niño, en azul los eventos La Niña y el gris los períodos neutros

3.3.2 Procesamiento de Datos ARGOS

A partir de la totalidad de los datos obtenidos para cada una de las cuatro zonas del área de estudio, se extrajeron todos perfiles disponibles para cada mes en cada año, en el periodo 2004-2022, lo cual permitió obtener una visión general de la cantidad de perfiles disponibles para el análisis (Fig. 4a).

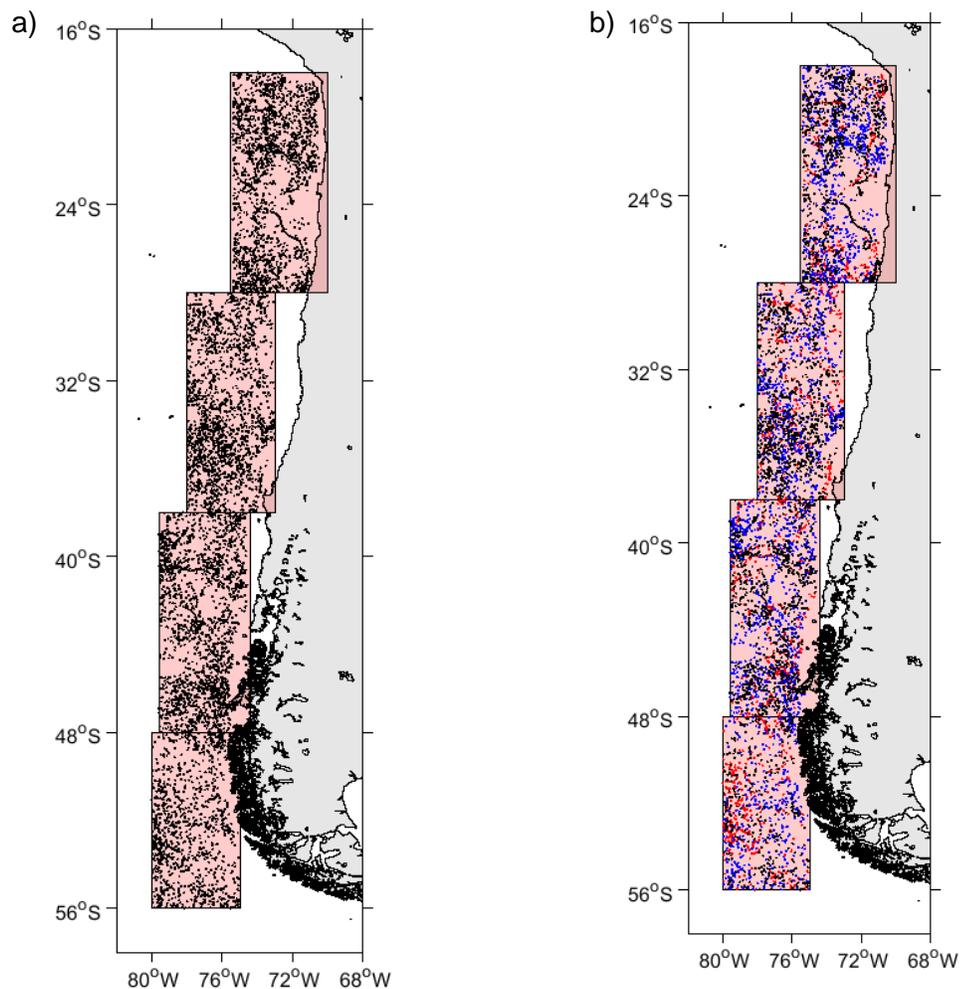


Figura 4: Área de Estudio con los perfiles disponibles para cada Zona. El panel a) representa la posición de la totalidad de perfiles para cada zona de estudio. El panel b) presenta estos perfiles y su posición diferenciados por colores, el rojo corresponde a eventos EN, el azul a eventos LN y el negro a

Los datos de cada perfil obtenidos para cada zona presentaban diferencias en las profundidades en las que fueron registrados. Por esta razón, se llevó a cabo una estandarización de las profundidades interpolando todos los datos a intervalos de 1 metro de profundidad, en el rango de 0 a 900 metros. Esta elección se fundamenta en que el perfil con menor profundidad alcanzaba hasta los 900 metros, y asumiendo además que no hay efecto del ENOS a mayor profundidad.

Posteriormente se calcularon los promedios y desviaciones estándar utilizando todos los datos disponibles por zona y profundidad y una climatología mensual para obtener un año promedio para cada área. Con esta información se realizaron perfiles promedio de temperatura, salinidad y diagramas T/S en las áreas de estudio. Los promedios calculados mostraron alta variabilidad en las áreas seleccionadas (Fig. 5), principalmente latitudinal en la zona norte. Con el fin de reducir esta variabilidad, se seleccionaron cuatro nuevas subáreas de menor tamaño (Fig. 6):

- Subárea Norte: Longitud (-75, -78), Latitud (-30, -26).
- Subárea Centro: Longitud (-78, -73), Latitud (-39, -36).
- Subárea Sur: Longitud (-79.6, -74.6), Latitud (-49, -45).
- Subárea Austral: Longitud (-80, -75), Latitud (-56, -51).

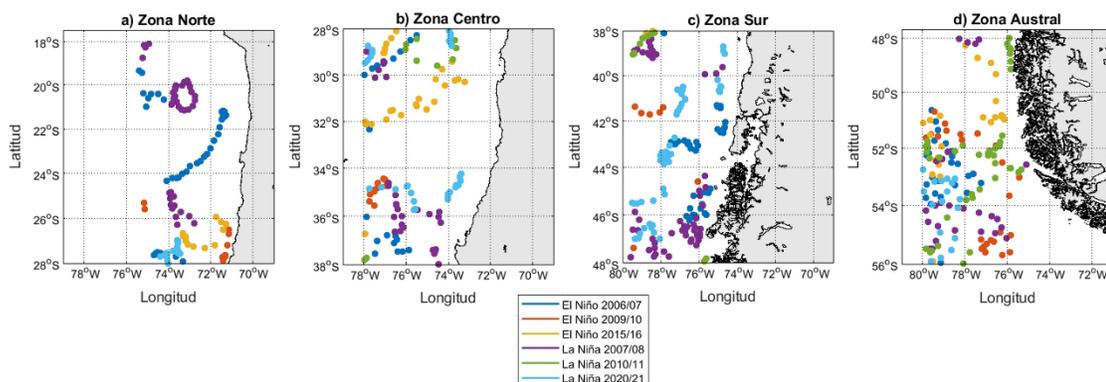


Figura 5: Posición geográfica de los perfiles correspondientes a los periodos ENSO para cada zona de estudio. En la figura, cada punto corresponde a un perfil de una boya ARGO

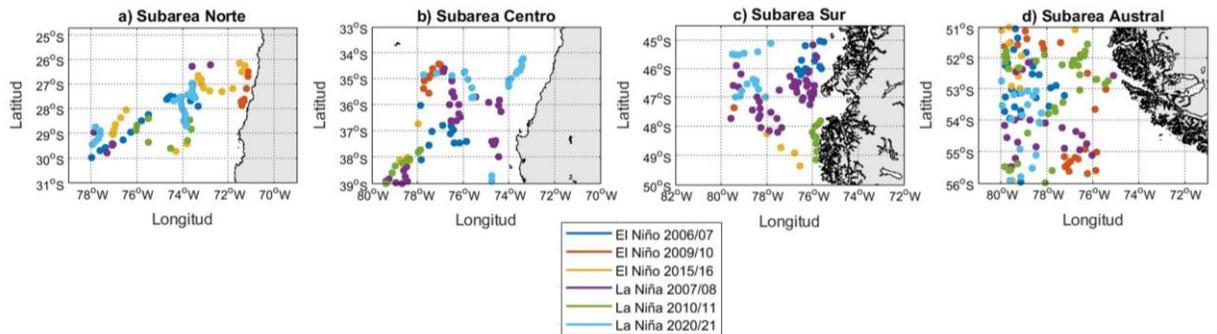


Figura 6 : Posición geográfica de los perfiles correspondientes a los periodos ENSO para las nuevas subáreas de estudio. Cada punto corresponde a un perfil de una boya ARGO.

En las nuevas subáreas se realizaron nuevamente promedios de temperatura y salinidad, considerando los eventos seleccionados como EN y LN y Neutros, calculándose la anomalía de temperatura y salinidad con respecto al periodo de eventos Neutros (Tabla 1). Para calcular los promedios y desviación estándar de temperatura y salinidad por zona se utilizaron los datos recopilados de noviembre a febrero en el período 2004-2022, La elección de este período tuvo el fin de reducir la estacionalidad y enfocarse en los meses donde se esperan cambios hidrográficos debido al ENSO en Chile. En el promedio se excluyeron los 6 años identificados como eventos ENOS. Las anomalías fueron calculadas en base a este mismo promedio.

3.3.3 Procesamiento de datos de TSM de reanálisis

Se utilizaron sólo datos mensuales y anomalías correspondientes a cada uno de los 6 periodos ENOS definidos (Tabla 1) para los meses de noviembre a febrero, los cuales fueron comparados a un periodo neutro en este mismo periodo de meses correspondiente a los años 2013/14.

4. RESULTADOS

4.1 Disponibilidad de datos

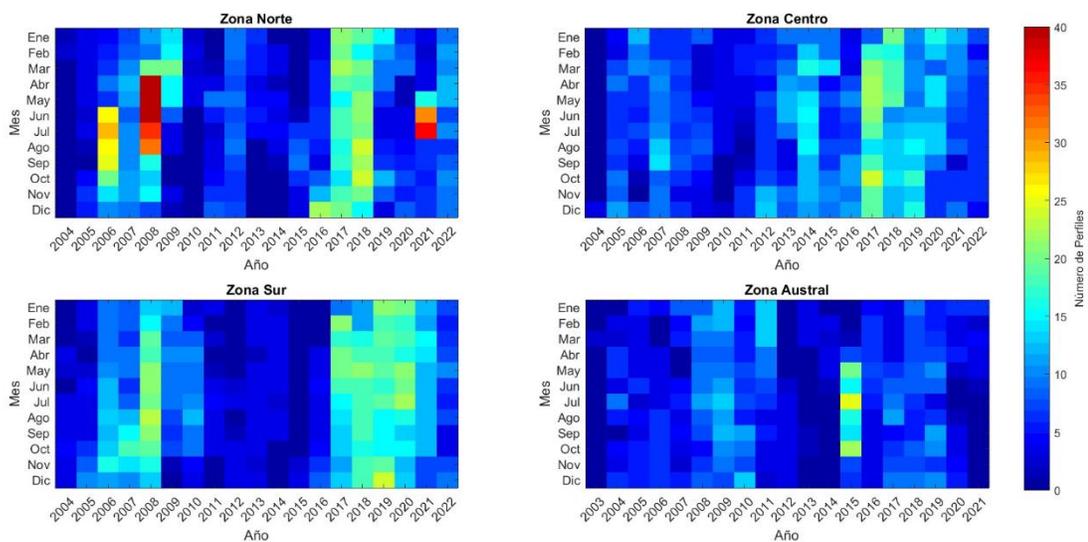
Para obtener una visión general de la cantidad de datos disponibles en cada zona, se llevó a cabo un recuento de los perfiles registrados por las boyas ARGO en cada zona de estudio (Fig. 7). La zona norte incluye 1894 perfiles, de los cuales 274 corresponden a perfiles EN, 756 a perfiles LN y 864 N. En la zona centro se contabilizaron 1817 perfiles, con 316 perfiles EN, 629 perfiles LN y 872 perfiles N. En la zona sur se registraron 1880 perfiles los cuales se dividen en 336 perfiles EN, 706 perfiles LN, y 838 perfiles N. En la zona austral se han registrado 1106 perfiles: 363 perfiles EN, 355 perfiles LN, y 388 perfiles N. La separación de estos totales en EL, LN y neutro es mostrada en la Figura 4b, se puede apreciar que la cantidad de perfiles para cada fase de ENOS no es uniforme tanto dentro de cada zona como entre ellas. La Figura 7 muestra la cantidad de perfiles disponibles para cada mes (Fig. 7a) y en cada año (Fig. 7b), en las cuatro áreas de estudio. En general hay menos de 10 perfiles por mes con pocas variaciones mensuales (Fig. 7a), anualmente (Fig. 7b) se observan valores entre 10 y 300 con máximos en el año 2008, 2017 y 2018 en la zona norte, 2017 y 2018 en la zona centro 2008, 2019 y 2020 en la zona sur y 2015 en la zona austral. Y mínimos de alrededor 10 a 30 perfiles especialmente entre 2009 y 2017, con la menor disponibilidad de datos en la zona austral.

4.2 Perfiles hidrográficos promedio.

El total de los perfiles promedio (Fig. 8) mostró diferencias entre las distintas zonas, particularmente en los primeros 300 metros. Además, se observan rangos de temperatura diferentes para cada zona. En los primeros 300 metros de profundidad, se observan variaciones en la zona norte entre 10-27.4°C; de 8-20.3°C en la zona centro. Entre 5-21.6°C en la zona sur y entre 4.3-13.9°C en la zona austral. Estos resultados evidencian diferencias térmicas notables entre las

zonas norte y austral, con diferencias menos marcadas entre las zonas centro y sur. A profundidades mayores, las diferencias de temperatura entre zonas son menos evidentes y oscilan entre 3°C y 6°C. Además, se observa que en las zonas norte y centro se desarrolla una termoclina alrededor de los 200 metros, en la zona sur alrededor de los 180 metros, y en la zona austral, la termoclina es menos pronunciada y se ubica aproximadamente a los 100 metros de profundidad. En las zonas norte y centro el promedio va desde los 20°C en superficie hasta los 5°C a 900 metros de profundidad. En la zona sur varía entre los 4-10°C y en la zona austral desde los 8°C en la superficie hasta los 3°C en profundidad.

a)



b)

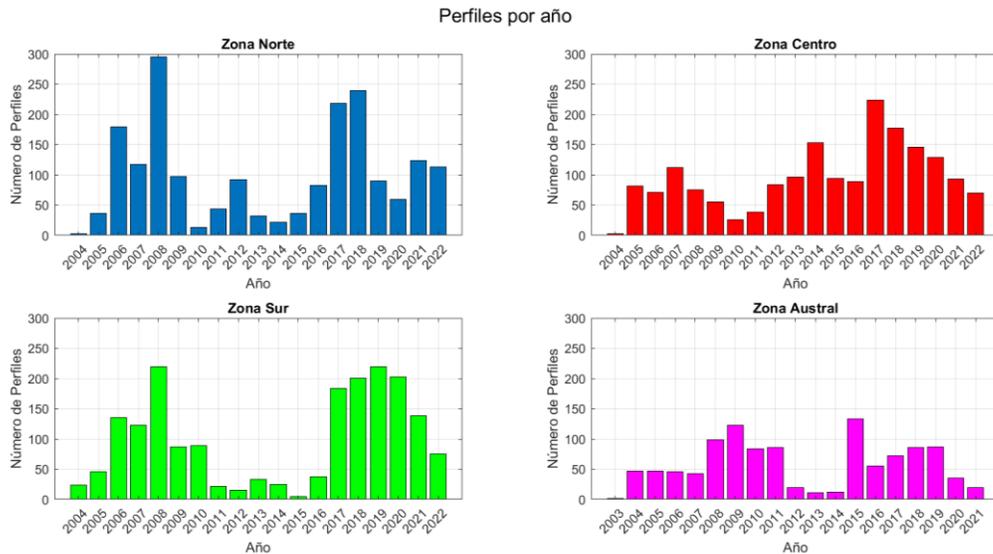


Figura 7 : Cantidad de perfiles ARGOS disponibles en las cuatro zonas de estudio. Panel a) cantidad de perfiles totales disponibles por mes para cada año. Panel b) número de perfiles disponibles por año para cada una de las zonas de estudio.

La figura 8b muestra marcadas diferencias en el comportamiento de la salinidad en la columna de agua entre las distintas zonas, especialmente en los primeros 100 metros de profundidad. En la zona norte, la salinidad fluctúa entre 33.9 - 35.7. En la zona sur, las variaciones de salinidad se encuentran entre 33.2 - 34.9. La zona centro muestra fluctuaciones de salinidad entre 30.8 - 34.7, mientras que, en la zona austral, las salinidades oscilan entre 28.5 - 34.4. A partir de los 300 metros de profundidad, estas diferencias se vuelven menos evidentes. La línea roja representa el perfil promedio de salinidad para cada zona, los cuales no muestran diferencias notables, oscilando alrededor de los 34 en las cuatro zonas. La zona austral presenta salinidades más bajas en los primeros 50 metros de la columna de agua en comparación con las otras zonas, pero similares a la zona

sur. Mientras que las diferencias entre las zonas norte y centro son menos pronunciadas en términos de salinidad.

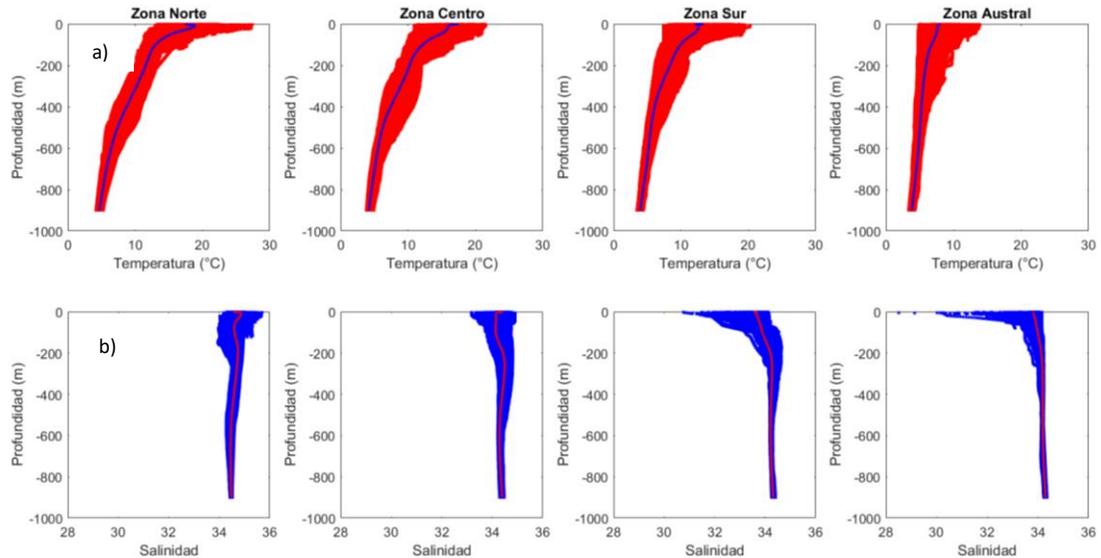


Figura 8: Perfiles de a) Temperatura y b) Salinidad para cada zona de estudio mostrada en Figura 4. Líneas azules y rojas representan el perfil promedio para la temperatura y salinidad respectivamente.

Las masas de agua que corresponden al Océano Pacífico son; Agua Subtropical (AST), Agua Equatorial Subsuperficial (ESSW), Agua Subantártica (SAAW) y Agua Intermedia Antártica (AAIW). Los diagramas T/S muestran que la zona norte se destaca una masa de agua con la mayor temperatura y la mayor salinidad en comparación con las demás zonas (Fig. 9). Esta región se encuentra influenciada por la Corriente de Humboldt, evidenciando la presencia de STW y ESSW. En cuanto a la zona centro, también está influenciada por la Corriente de Humboldt, pero esta corresponde a una zona de transición entre aguas más frías y salinas por el lado sur, y más cálidas y menos salinas por el lado norte, por lo que se percibe la presencia de las masas de agua STW, ESSW y SAAW. Se observan variaciones en la temperatura y salinidad que sugieren condiciones características de una masa de agua ESSW, mientras que a temperaturas más bajas se relacionan con masas de agua SAAW.

Por otro lado, en la zona austral, se aprecia una masa de agua con las temperaturas más bajas y una amplia variación en los valores de salinidad, lo que indica una mayor diversidad de condiciones en esta región, por lo que podría corresponder a masas de agua SAAW y AAIW.

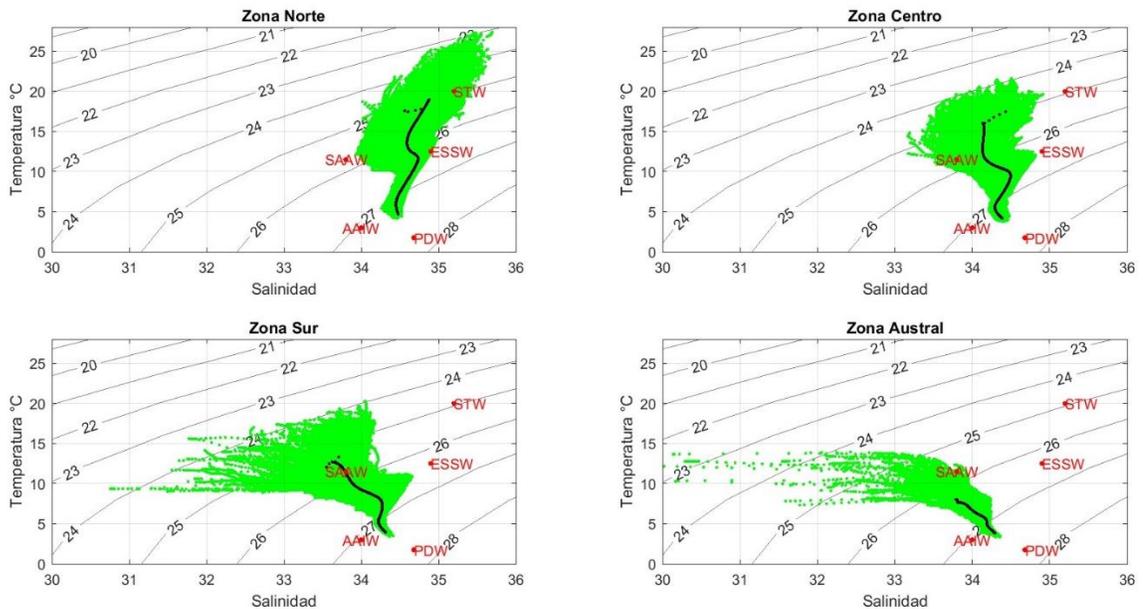


Figura 9: Diagramas T/S para el Periodo 2004-2022 en Cada Zona de Estudio. Línea negra representa el promedio. Las principales masas de agua se representan en rojo: Agua Subtropical (AST), Agua Equatorial Subsuperficial (ESSW), Agua Subantártica (SAAW) y Agua Intermedia Antártica (AAIW).

4.3 Climatología mensual

Las climatologías mensuales de temperatura permiten comprender las variaciones estacionales y patrones climáticos para cada zona de estudio (Fig. 10). En las zonas norte, centro y sur, se destaca una estacionalidad más marcada que en la zona austral, lo que indica mayores temperaturas durante el verano y temperaturas más bajas durante el invierno en los primeros 100 metros de la columna de agua. De las cuatro zonas, en la zona austral se observa el menor cambio en temperatura en función de la profundidad. En la zona norte se destaca

una marcada estacionalidad, con temperaturas durante el verano mayores a 25°C en los primeros 30 m de profundidad. Durante los meses de invierno, las temperaturas en la capa superficial son más bajas comparada a las otras estaciones del año. A partir de los 60 metros, la temperatura presenta menos variabilidad. A partir de los 200 metros la temperatura no presenta una variabilidad significativa tanto en profundidad como en relación con las estaciones del año.

En la zona centro se evidencia una marcada estacionalidad en las temperaturas. Durante los meses de verano y otoño, se registran las mayores temperaturas en los primeros 30 metros de profundidad, mientras que en los meses de agosto, septiembre y octubre se presentan las temperaturas más bajas en la misma franja. A partir de los 100m de profundidad, las temperaturas muestran una menor variabilidad tanto en la escala temporal como en la profundidad.

En la zona sur se observa una marcada estacionalidad en las temperaturas con menor variabilidad que en las zonas anteriores. Durante los meses de enero febrero y marzo se registran las mayores temperaturas en los primeros 30 metros de profundidad, mientras que en los meses de julio, agosto y septiembre se presentan las temperaturas más bajas en la misma franja. En este caso las mayores temperaturas apenas superan los 20°C. A partir de los 70 metros de profundidad las temperaturas se estabilizan a lo largo de los meses y muestran una menor variabilidad tanto en la escala temporal como en la profundidad.

En la zona austral, a diferencia de las zonas anteriores, la estacionalidad en las temperaturas es menos marcada, sin embargo, se puede ver un leve aumento en los primeros 40m en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, mientras que en el resto de los meses la variabilidad es menor. En este caso las mayores temperaturas oscilan entre los 10 y los 12°C. A partir de los 80 metros de profundidad las temperaturas se estabilizan a lo largo de los meses y en profundidad, lo que demuestra una menor variabilidad tanto en la escala temporal como en la profundidad.

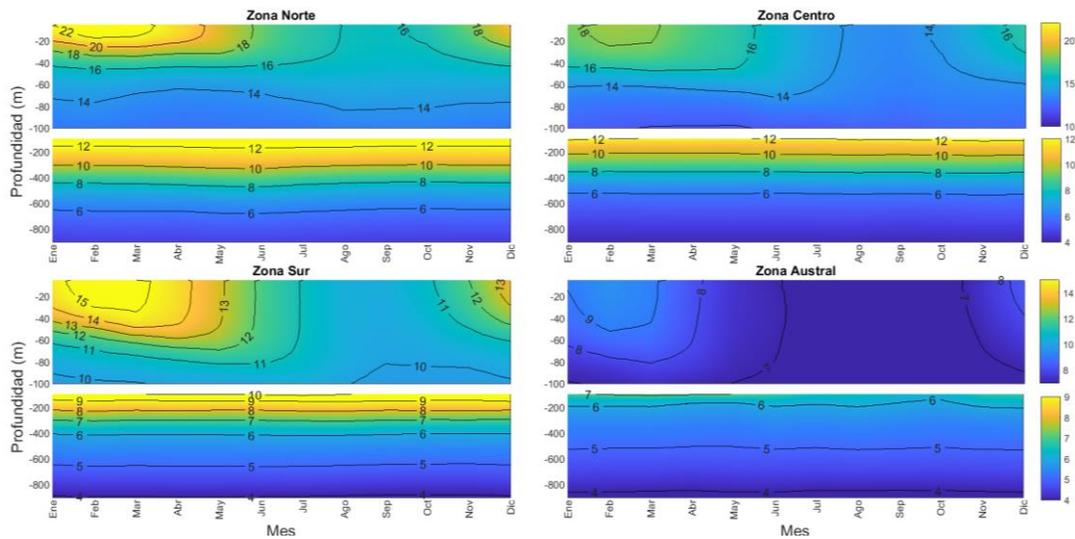


Figura 10: Climatología mensuales de perfiles de temperatura para cada zona de estudio. Cada gráfico presenta los datos de 0 a 100 metros y luego de 100 a 900 metros de profundidad.

Con respecto a la climatología mensual de la salinidad (Fig. 11), en cada zona se evidencian las masas de agua más salinas en mayores profundidades, y en la capa superficial se observan aguas menos salinas, para las cuatro zonas de estudio. Sin embargo, en la zona norte se evidencian salinidades más altas que en las tres zonas restantes. Se puede apreciar la variabilidad regional, donde la salinidad va disminuyendo según el gradiente latitudinal, bajo la capa superficial del mar.

Para la zona norte, en los primeros 20 metros de profundidad, se observa una mayor salinidad entre febrero a junio. A partir de los 30 metros de profundidad, la salinidad disminuye y se estabiliza en la escala estacional. Entre los 100 y 300 metros de profundidad, la salinidad aumenta de manera casi homogénea a lo largo del año. Sin embargo, a partir de los 400 metros, la salinidad vuelve a disminuir y se mantiene estable en la escala temporal y en profundidad hasta los 900 metros.

En la zona centro, los primeros 100m no se presenta mayor variabilidad vertical y temporal, con valores alrededor de los 34. Entre los 200 y 400 m de profundidad

la salinidad aumenta, superando los 34.5. Y luego, después de los 400 m la salinidad disminuye estabilizándose tanto para la escala temporal y en profundidad. En el caso de la zona centro no se presenta mayor variabilidad estacional para todas las profundidades.

En la zona sur de estudio a escala estacional, en los primeros 200 metros de profundidad no se observa una mayor variabilidad, manteniéndose los valores alrededor de 33.5. A partir de los 200 metros de profundidad, la salinidad experimenta un aumento significativo, superando los 34.5. Como resultado, no se observa una mayor variabilidad estacional en todas las profundidades.

Para la zona austral a escala estacional, se observa un leve aumento de salinidad en los primeros 200 metros de profundidad durante los meses de otoño, con valores fluctuando alrededor de 34 y 34.5. A partir de los 200 metros de profundidad, la salinidad experimenta un incremento, superando los 34.5. Sin embargo, no se observa una variabilidad temporal significativa más allá de los 200 metros de profundidad.

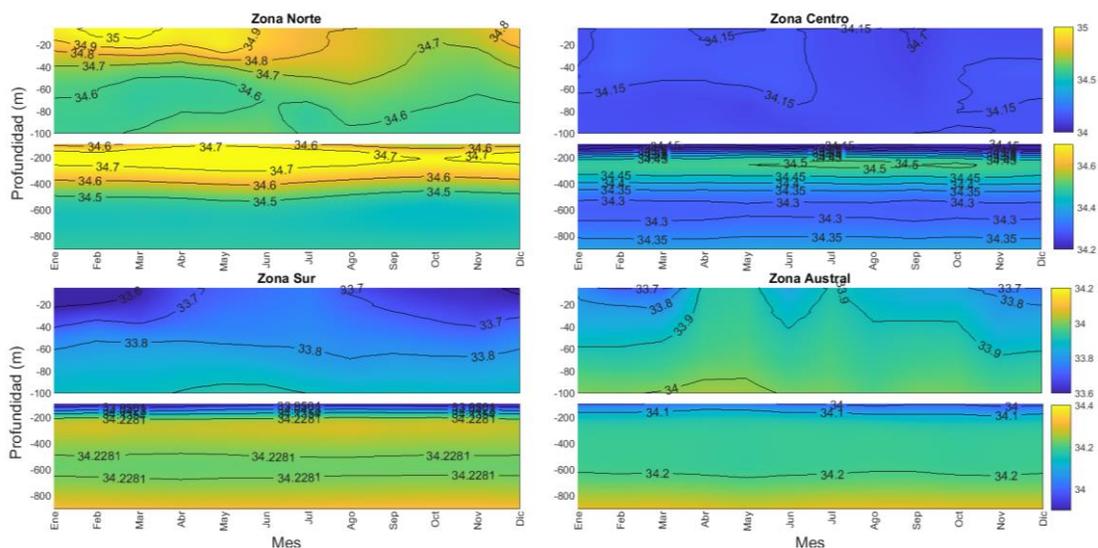


Figura 11: Climatología mensual de perfiles de salinidad para cada zona de estudio.

4.4 Cambio en las condiciones hidrográficas debido a periodos ENSO

Para analizar los cambios durante periodos ENSO y neutros se utilizaron las subáreas definidas en la metodología (Fig. 6) debido a la gran variabilidad observada en los promedios de las áreas más grandes (Figs. 7,8,9).

4.4.1 Análisis Condiciones Promedio

Temperatura

La figura 12a exhibe el comportamiento de los perfiles de temperatura promedio para los 6 eventos en la zona norte, en relación con el promedio. Se evidenció que el evento EN 2006/07 mostró temperaturas más elevadas que el perfil promedio en los primeros 100 metros de la columna de agua. Sin embargo, a partir de esta profundidad, la temperatura comenzó a descender, acercándose al perfil promedio. En contraste, el evento EN 2009/10 presentó las temperaturas más bajas en los primeros 100 metros de la columna de agua en la zona norte. No obstante, entre los 100 y 200 metros, la temperatura se estabilizó y luego, a partir de los 200 metros, este evento exhibió las temperaturas más elevadas en esta área. Respecto al evento EN 2015/16, considerado como el EN más intenso, se observó que las temperaturas se mantuvieron muy cercanas al promedio, pero ligeramente más cálidas para toda la columna de agua en esta zona. Por otro lado, el evento LN 2007/08 exhibió temperaturas más bajas que el perfil promedio solo en los primeros 50 metros de profundidad, pero aún dentro de los límites normales; posteriormente, las temperaturas en profundidad se ajustaron al promedio. En el evento LN 2010/11, la temperatura promedio fue consistentemente menor entre los 50 y 150 metros en comparación con el promedio. Finalmente, el evento LN 2020/21 presentó un comportamiento muy similar al promedio, con temperaturas ligeramente inferiores a lo largo de la columna de agua.

Para la zona centro (Fig. 12b), se observó que durante los primeros 200 metros, el evento EN 2006/07 exhibió temperaturas superiores al promedio, aunque aún dentro de los límites normales de la zona. Por otro lado, el evento EN 2009/10 mostró las temperaturas más elevadas, superando la normalidad de la zona en los primeros 200 metros de profundidad. En contraste, el evento EN 2015/16 presentó temperaturas similares al perfil promedio, incluso levemente inferiores a este. En cuanto a los tres eventos de La Niña (LN), mostraron temperaturas más frías en los primeros 200 metros de profundidad en comparación con el perfil promedio de la zona.

Durante los eventos en la zona sur (Fig. 12b), el evento de El Niño (EN) 2006/07, los primeros metros de la columna de agua mostraron temperaturas dentro de la normalidad de la zona, muy cercanas al promedio. Por otro lado, el EN 2009/10 es el evento que exhibió las temperaturas más bajas a lo largo de la columna de agua en la zona sur, apenas superando los 10°C en los primeros metros y descendiendo a menos de 7°C a partir de los 100 metros de profundidad (Fig. 12). Estas temperaturas son inferiores al promedio y se sitúan fuera de los rangos normales de la zona. En contraste, el EN 2015/16 presentó temperaturas ligeramente superiores al promedio en los primeros 50 metros de la columna de agua, dentro de la normalidad de la zona. Sin embargo, a partir de los 100 metros, las temperaturas disminuyeron con respecto al promedio, aunque aún se mantuvieron dentro de los rangos normales. Respecto a los eventos de La Niña, LN 2007/08 mostró temperaturas ligeramente superiores al promedio en los primeros metros, pero a partir de los 50 metros de profundidad, las temperaturas fueron inferiores al promedio. LN 2010/11 tiene un comportamiento de temperatura similar a EN 2009/10, presentó temperaturas inferiores al promedio a lo largo de toda la columna de agua. El evento de LN 2020/21 es el que presentó un comportamiento de temperatura más similar al promedio, ajustándose a él en toda la columna de agua.

La figura 12d muestra el comportamiento de temperatura durante los eventos en la zona austral. En todos los eventos, los valores de temperatura oscilaron entre

6 y 8°C, y tanto en eventos de El Niño como La Niña, se situaron dentro de la normalidad de temperatura de la zona. El evento EN 2006/07 en la zona austral presentó temperaturas ligeramente más altas que el promedio. EN 2009/10 fue el evento que mostró las anomalías de temperatura más bajas durante los primeros metros de la columna de agua. En el caso del evento EN 2015/16, se observaron valores de temperatura inferiores al promedio entre los 50 y 100 metros de profundidad, pero a partir de esta profundidad, la temperatura se ajustó conforme aumentó la profundidad. Respecto a LN 2007/08, presentó temperaturas ligeramente más cálidas que el promedio en los primeros metros de la columna de agua. Sin embargo, a medida que se acercó a los 100 metros de profundidad, las temperaturas disminuyeron acercándose al perfil promedio. En contraste, los eventos LN 2010/11 y LN 2020/21 mostraron un patrón inverso, con temperaturas ligeramente más frías en los primeros 100 metros de profundidad, pero que a medida que aumentó la profundidad, la temperatura se ajustó al perfil promedio.

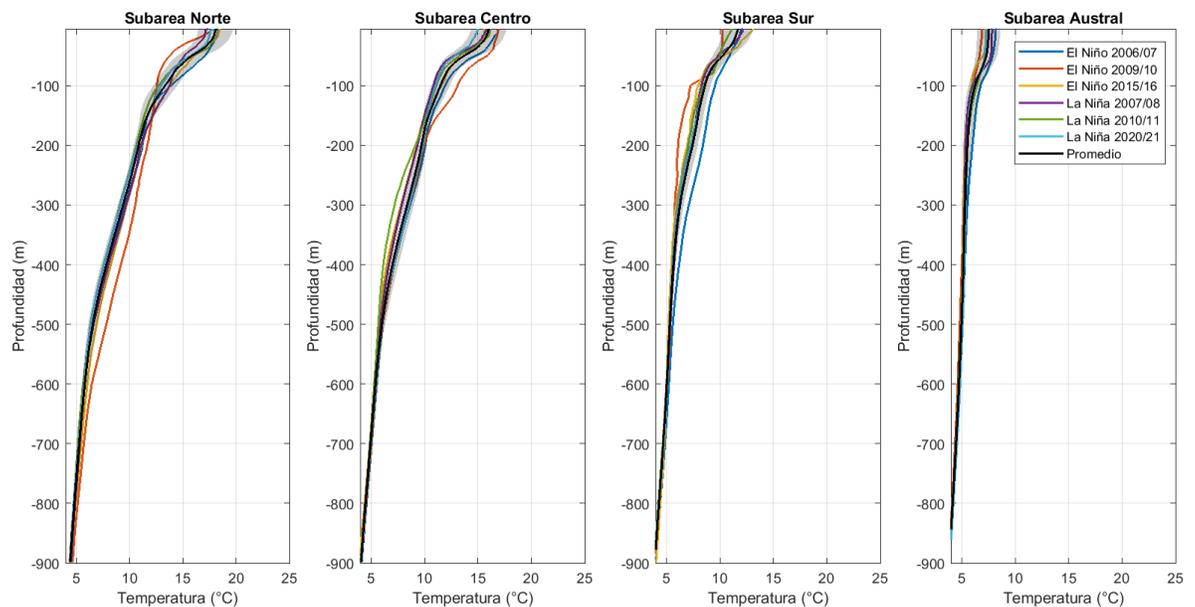


Figura 12: Perfiles de temperatura promedio para eventos ENOS y condiciones normales en el período de Noviembre a Febrero en cuatro zonas de estudio. Los valores de referencia de normalidad, basados en la desviación estándar, se muestran en gris.

Salinidad

La figura 13a muestra el comportamiento de la salinidad en profundidad durante los eventos en la zona norte. Durante el evento EN 2006/07, se observaron valores de salinidad inferiores al promedio en los primeros 100 metros, ubicándose en los límites normales en términos de desviación estándar negativa. No obstante, estas salinidades aumentaron a medida que se profundizaba, alcanzando valores cercanos al promedio alrededor de los 200 metros. En el caso de EN 2009/10, se registraron los valores más altos en comparación con los otros cinco eventos en la zona. Durante los primeros metros de la columna de agua, se mantuvieron cerca del promedio; sin embargo, después de superar los 100 metros de profundidad, los valores de salinidad fueron mayores que el promedio de la zona y esta tendencia continuó en profundidad. EN 2015/16 exhibió valores superiores al promedio en los primeros 150 metros de profundidad, dentro de los rangos normales para la zona. Sin embargo, a partir de esta profundidad, la salinidad se estabilizó y se ajustó al promedio. El evento LN 2007/08 presentó valores de salinidad inferiores al promedio en toda la columna de agua, los cuales se ajustaron a los valores normales de la zona en profundidades mayores de 50 metros. Los eventos LN 2010/11 y LN 2020/21 mostraron comportamientos similares en términos de salinidad, presentando valores inferiores al promedio durante los primeros 100 metros y ajustándose a la normalidad de la zona. Sin embargo, se observó una notable disminución en la salinidad alrededor de los 100 y 200 metros, donde luego las salinidades se ajustaron nuevamente al promedio.

La figura 13b muestra el análisis de los perfiles de salinidad promedio para la zona centro. El evento EN 2006/07 presentó las salinidades más bajas entre los seis eventos durante los primeros 150 metros de profundidad, ajustándose apenas al rango promedio. En contraste, en el evento EN 2009/10 se observaron salinidades más altas en los primeros metros de la columna de agua, alcanzando condiciones promedio de la zona. Sin embargo, a partir de los 150 metros de

profundidad, estos valores se ajustaron al promedio. Por otro lado, el evento EN 2015/16 mostró un ajuste cercano al promedio, con valores levemente mayores al perfil promedio durante los primeros 60 metros de la columna de agua, para luego estabilizarse al promedio. LN 2007/08 mostró valores inferiores al promedio en los primeros 50 metros, pero luego se ajustaron a los valores normales de la zona a profundidades mayores. LN 2010/11, en los primeros 150 metros de la columna de agua, presentó valores levemente mayores al perfil promedio. Sin embargo, a partir de esta profundidad, el perfil promedio mostró un aumento significativo de salinidad, lo cual no ocurrió para este evento, manteniendo sus valores significativamente inferiores al promedio, incluso fuera de los rangos de normalidad hasta los 400 metros de profundidad. Por último, LN 2020/21 fue superior al promedio durante los primeros 50 metros de profundidad, pero dentro de los límites de normalidad. Sin embargo, a partir de los 60 metros de profundidad, se observó un aumento significativo que superó los rangos de normalidad hasta los 400 metros de profundidad, para luego ajustarse al perfil promedio.

La figura 13c presenta los perfiles de salinidad promedio para la zona sur. Los eventos EN 2006/07 y EN 2015/16 mostraron un comportamiento que se ajustó al promedio a lo largo de toda la columna de agua, desde los 0 hasta los 900 metros. EN 2009/10 registró las salinidades más elevadas en los primeros 150 metros de profundidad, superando significativamente los valores normales y aproximándose a salinidades de alrededor de 34. A partir de los 100 metros, las salinidades se ajustaron al promedio. LN 2007/08 presentó valores levemente inferiores al perfil promedio en los primeros 30 metros de profundidad, manteniéndose en los límites negativos de normalidad. A partir de esta profundidad, las salinidades se ajustaron al promedio. LN 2010/11, en los primeros 10 metros de profundidad, presentó valores significativamente más bajos que el promedio de la zona, alcanzando valores de 32.5 en superficie. A partir de esta profundidad, los valores tendieron a acercarse a los límites inferiores de la normalidad de la zona, pero aún se mantuvieron por debajo de la

norma. Desde los 100 metros de profundidad, los valores de salinidad se ajustaron al promedio, dentro del rango de normalidad. En el evento LN 2020/21, la salinidad mostró un comportamiento que excedió ligeramente la normalidad de la zona en los primeros 100 metros de profundidad, pero luego se ajustó al promedio en profundidad.

En la zona austral (Fig. 13b), los valores de salinidad en todos los eventos ENOS se ajustaron mayormente al promedio y se mantuvieron dentro del rango esperado de la zona. La única excepción es el evento EN 2006/07, que presentó salinidades inferiores al promedio durante los primeros 150 metros de profundidad. En esta misma profundidad, LN 2020/21, EN 2015/16, LN 2007/08, LN 2010/11 y EN 2009/10 mostraron valores superiores al promedio. Sin embargo, a partir de los 150 metros, la salinidad en todos los eventos se estabilizó y se ajustó al valor promedio en profundidad.

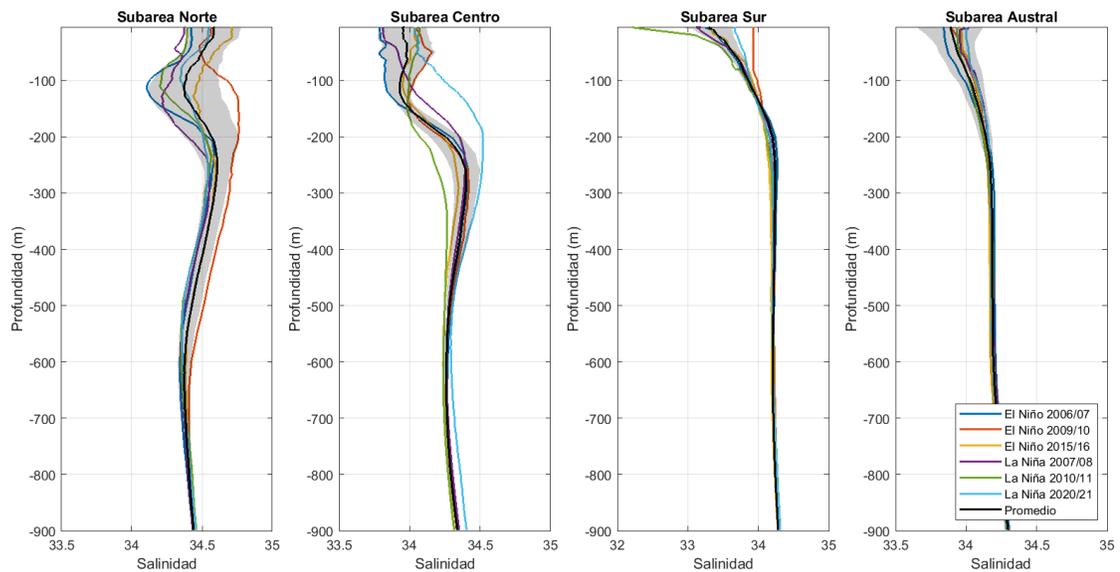


Figura 13: Perfiles de salinidad para eventos ENOS y condiciones normales en el período de Noviembre a Febrero en Cuatro Zonas de Estudio. Los valores de referencia de normalidad, basados en la desviación estándar, se muestran en gris.

4.4.2 Análisis de Condiciones Anómalas.

Temperatura

La figura 14a refleja el análisis de las anomalías de temperatura con respecto al promedio para la zona norte. En el evento EN 2006/07 se observó que las mayores anomalías se encontraron en los primeros 100 metros, alcanzando valores que superaron 1°C. Bajo los 200 metros, las anomalías se mantuvieron cerca de 0°C. En contraste, el evento EN 2009/10 mostró anomalías negativas de hasta -2°C en los primeros 30 metros, las cuales aumentaron en profundidad, hasta alcanzar valores de más de 1°C por debajo de los 300 metros de profundidad. En el caso del evento EN 2015/16, las anomalías de temperatura oscilaron entre 0°C y 0.5°C en los primeros 100 metros de la columna de agua y luego se estabilizaron en valores positivos en profundidad. Para el evento LN 2007/08, en los primeros 100 metros, las anomalías de temperatura oscilaron entre -1°C y 0.5°C, y se mantuvieron alrededor de 0.5°C hasta los 200 metros. A mayor profundidad, las anomalías disminuyeron, aproximándose a 0°C. El evento LN 2010/11 presentó anomalías de temperatura levemente positivas en los primeros 50 metros de profundidad, que luego disminuyeron hasta alcanzar valores de -0.5°C. A medida que aumentó la profundidad, las anomalías se mantuvieron en este rango, lo que resultó en temperaturas por debajo del promedio a lo largo de la columna de agua. Finalmente, el evento de LN 2020/21 presentó anomalías de temperatura que fluctuaron entre 0°C y -0.5°C en los primeros 100 metros, y más allá de los 200 metros, las anomalías se mantuvieron cercanas a 0°C y estables.

La figura 14b muestra el análisis de las anomalías de temperatura para la zona central con respecto al promedio. El evento EN 2006/07 registró anomalías de hasta 1°C en los primeros 50 metros; a medida que se profundizó, estas anomalías tendieron a disminuir progresivamente y se acercaron a valores cercanos a 0°C a partir de los 300 metros. En el caso de EN 2009/10, se observaron anomalías positivas desde la superficie, alcanzando hasta 2°C en su

punto máximo, alrededor de los 50 metros. Posteriormente, los valores disminuyeron a medida que aumentó la profundidad, estabilizándose a partir de los 200 metros y alcanzando valores cercanos a 0°C. Por otro lado, durante el evento EN 2015/16, las anomalías oscilaron entre -0.5°C y 0.2°C en los primeros 100 metros de profundidad. Sin embargo, a partir de esa profundidad, las anomalías disminuyeron y superaron los -0.5°C, aproximándose a valores cercanos a 0°C en profundidades mayores, alrededor de los 500 metros. En el evento LN 2020/21, se observaron anomalías negativas que alcanzaron 1°C en los primeros metros de la columna de agua. No obstante, a partir de los 200 metros, las anomalías fueron cercanas a 0°C. En contraste, los eventos LN 2007/8 y 2010/11 presentaron anomalías negativas que superaron los -0.5°C y -1°C, respectivamente. Estas anomalías mostraron valores más negativos a partir de los 200 metros, hasta los 500 metros de profundidad, donde se estabilizaron en 0°C.

La figura 14c muestra las anomalías de temperatura para los 6 eventos en la zona sur. Durante el evento EN 2006/07, se observaron anomalías positivas de hasta 0.5°C en los primeros metros, las cuales aumentaron a partir de los primeros 50 metros de profundidad, alcanzando valores de hasta 2°C de anomalía de temperatura. Esta tendencia se mantuvo hasta los 250 metros de profundidad, donde luego las anomalías comenzaron a descender y se estabilizaron cerca del promedio a partir de los 500 metros. En EN 2009/10, por otro lado, se presentaron anomalías de temperatura negativas en profundidad, superando -1°C en los primeros metros y acercándose a 0°C en los primeros 50 metros. Sin embargo, las anomalías volvieron a disminuir drásticamente, alcanzando valores de hasta -1.5°C hasta los 200 metros. A partir de esta profundidad, las anomalías aumentaron y se estabilizaron alrededor de 0°C a mayores profundidades. EN 2015/16 mostró anomalías de temperatura positivas en los primeros metros, superando 1°C, que disminuyeron rápidamente a valores negativos, llegando a -0.5°C entre los 100 y 300 metros, hasta estabilizarse cerca de 0°C en profundidades mayores. LN 2007/08 exhibió una anomalía positiva de

alrededor de 0.5°C en los primeros metros, que disminuyó a medida que aumenta la profundidad. Entre los 100 y 200 metros, las anomalías volvieron a ser positivas, pero cercanas al valor de 0°C . LN 2010/11 tuvo un comportamiento similar a EN 2009/10, con anomalías inicialmente negativas, inferiores a -0.5°C , las cuales aumentaron rápidamente. Antes de los 100 metros de profundidad, las anomalías superaron 0°C . A mayores profundidades, superando los 100 metros, las anomalías disminuyeron y se estabilizaron cerca de 0°C a partir de los 300 metros de profundidad. LN 2020/21 presentó anomalías que oscilaron alrededor del valor 0 en toda la columna de agua.

La figura 14d muestra las anomalías de temperatura para la zona austral. Durante EN 2006/07, se registraron anomalías positivas que superaron los 0.5°C en los primeros metros de la columna de agua. Estas anomalías disminuyeron a medida que aumentaba la profundidad y se estabilizaron a partir de los 300 metros. EN 2009/10 destacó por mostrar las anomalías de temperatura más bajas durante los primeros metros de la columna de agua, con valores inferiores a -0.5°C . Sin embargo, estas anomalías se estabilizaron a partir de los 100 metros de profundidad. Para el evento EN 2015/16, se observaron valores de anomalías negativas, ligeramente por debajo de 0°C en los primeros 50 metros, que luego disminuyeron y superaron los -0.5°C hasta los 100 metros de profundidad. A partir de esta profundidad, las anomalías se estabilizaron a medida que aumentaba la profundidad. En el caso de LN 2007/08, se presentaron anomalías de temperatura positivas que alcanzaron los 0.5°C en los primeros metros de la columna de agua. Sin embargo, a medida que se acercaban a los 100 metros de profundidad, estas anomalías disminuyeron y se volvieron negativas. A mayores profundidades, las anomalías se estabilizaron con valores ligeramente negativos cercanos a 0°C . Por otro lado, LN 2010/11 mostró un patrón inverso, con anomalías inicialmente negativas en los primeros metros de la columna de agua, que aumentaron y superaron ligeramente los 0°C hasta los 100 metros de profundidad. Luego, estas anomalías se estabilizaron en profundidad con valores que oscilaron alrededor de 0°C . El mismo patrón se repitió en LN 2020/21, con

anomalías ligeramente negativas en los primeros metros de la columna de agua, que superaron levemente los 0°C antes de los 100 metros de profundidad, y luego se estabilizaron en profundidad con anomalías cercanas a 0°C.

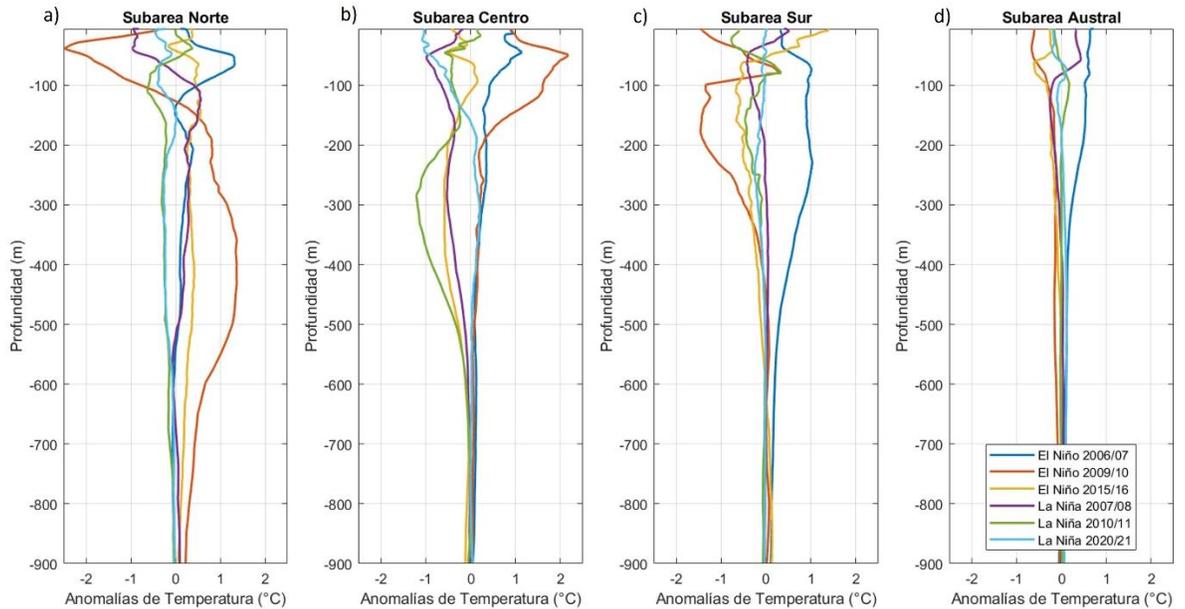


Figura 14: Anomalías de temperatura para eventos ENOS calculadas a partir de los perfiles promedios en Figura 12.

Salinidad

La figura 15a presenta el análisis de las anomalías de salinidad para los eventos en la zona norte. En el caso de EN 2006/07, se observaron anomalías negativas en los primeros 100 metros desde la superficie, con un máximo de -0.25 entre los 80 y 180 metros, donde luego aumentaron hasta los 200 metros, estabilizándose en 0. EN 2009/10 presentó anomalías cercanas a 0 en los primeros 50 metros, pero luego aumentaron hasta los 120 metros de profundidad, alcanzando valores de hasta 0.45. Posteriormente, disminuyeron en profundidad, manteniendo anomalías positivas hasta los 700 metros. En el caso de EN 2015/16, se observaron anomalías positivas cercanas a 0.2 desde la superficie hasta los 150 metros. A partir de esta profundidad, la salinidad presentó anomalías cercanas a 0. LN 2007/08 mostró anomalías negativas en los primeros metros que

aumentaron a medida que se profundizaba, con la excepción de un máximo de baja salinidad entre los 120 y 220 metros de profundidad. Luego, a mayor profundidad, la salinidad se estabilizó y las anomalías se acercaron a cero en profundidad. Los eventos LN 2010/11 y LN 2020/21 presentaron anomalías negativas en toda la columna de agua, donde LN 2010/11 presentó anomalías más bajas que LN 2020/21. Sin embargo, a partir de los 200 metros de profundidad, ambas anomalías llegaron a 0.

La figura 15b muestra las anomalías de salinidad durante los eventos en la zona centro. EN 2006/07 presentó anomalías negativas desde profundidad hasta los 200 metros, oscilando entre 0.15 y 0, donde a partir de los 200 metros se estabilizan en el valor 0. EN 2009/10 mostró anomalías levemente positivas desde la superficie hasta los 100 metros, alcanzando el valor 0 y manteniéndose en profundidad. EN 2015/16 presentó valores de anomalías ligeramente positivas en el rango de 0.1 en los primeros 60 metros de la columna de agua. Sin embargo, a partir de dicha profundidad, los valores oscilan alrededor del valor 0 en profundidad. LN 2007/08 presentó anomalías de salinidad negativas en los primeros metros que aumentan a medida que se profundiza. Entre los 100 y 200 metros, las anomalías se vuelven ligeramente positivas, pero a mayor profundidad la salinidad se estabiliza y las anomalías se acercan a cero en profundidad. LN 2010/11, en los primeros 100 metros de la columna de agua, presentó valores de anomalía levemente positivos, pero luego disminuyeron drásticamente, alcanzando anomalías de hasta -0.25 entre los 200 y 300 metros, para luego volver a aumentar y oscilar alrededor del valor 0 en profundidad. LN 2020/21 presentó anomalías que alcanzaron valores de 0.45 entre los 100 y 200 metros. Luego, las anomalías disminuyeron y a partir de los 300 metros de profundidad, presentó valores ligeramente positivos.

La figura 15c muestra el análisis de las anomalías de salinidad en la zona sur. EN 2006/07, presentó anomalías de valor 0 a lo largo de toda la columna de agua. En cambio, EN 2009/10 mostró los valores de anomalías más altos, cercanos a 0.5 en los primeros metros de profundidad, disminuyó rápidamente a medida que

aumentó la profundidad hasta aproximadamente los 200 metros. A partir de esta profundidad, las anomalías oscilaron alrededor del valor 0, ajustándose al promedio. EN 2015/16 presentó un comportamiento similar a EN 2006/07, ya que se ajustó mayormente al promedio de salinidad de la zona y las anomalías oscilaron alrededor de 0. Se observó un leve aumento en las anomalías de salinidad entre los 30 y 120 metros de profundidad, pero luego oscilaron alrededor del valor 0 en profundidad. LN 2007/08 mostró anomalías de salinidad ligeramente negativas en los primeros 30 metros de profundidad. A partir de esta profundidad, las anomalías oscilaron alrededor de 0 en toda la columna de agua. LN 2010/11 mostró anomalías de salinidad en los primeros metros de la columna de agua alcanzaron valores tan bajos como -1. A medida que aumentó la profundidad, estas anomalías aumentaron ligeramente, llegando a alrededor de -0.15 en el rango de 30 a 100 metros de profundidad, y a partir de los 100 metros, las anomalías oscilaron alrededor de 0. LN 2020/21 presentó anomalías que alcanzaron hasta 0.4 en los primeros metros de la columna de agua, pero a medida que se profundizó, estas disminuyeron hasta llegar a los 100 metros, donde los valores de salinidad se ajustaron al promedio y las anomalías oscilaron alrededor de 0.

La figura 15d muestra el análisis de las anomalías de salinidad en la zona austral. En esta zona, todos los eventos presentaron anomalías que oscilaron alrededor de 0 desde la superficie a la profundidad, con excepción de EN 2006/07, que presentó valores ligeramente negativos en los primeros 100 metros de la columna de agua.

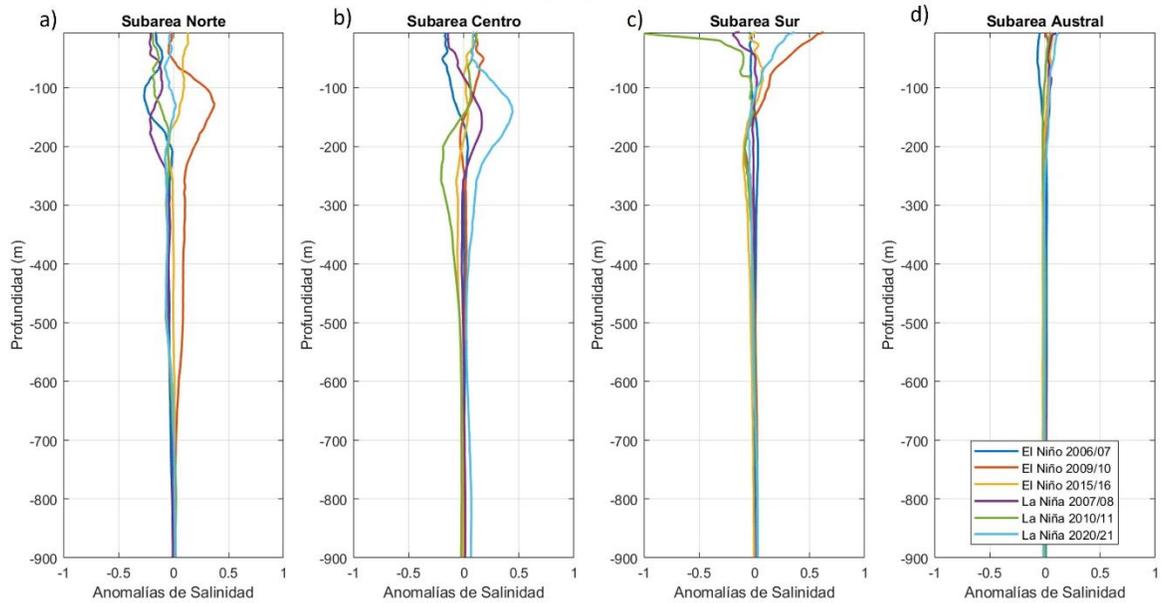


Figura 15: Anomalías de salinidad para eventos ENOS calculadas a partir de los perfiles promedios en Figura 13.

Para obtener una visión general de cómo varían las anomalías tanto de temperatura como de salinidad en profundidad, se realizó un Boxplot para cada evento, agrupando las anomalías cada 50 metros de profundidad para ambas variables (Figs. 16, 17). Las anomalías de temperatura exhibieron una variabilidad más pronunciada en los primeros 100 metros de la columna de agua (Fig. 16). Esta variabilidad disminuyó de norte a sur, siendo más destacada en la zona norte, seguida por la zona centro, luego la zona sur, y finalmente la zona austral, donde se observó la menor variabilidad en las anomalías en los primeros metros. Tanto para las zonas norte, centro y sur, EN 2009/10 fue el evento que presentó la mayor variabilidad en las anomalías de temperatura en los primeros 50 metros de profundidad.

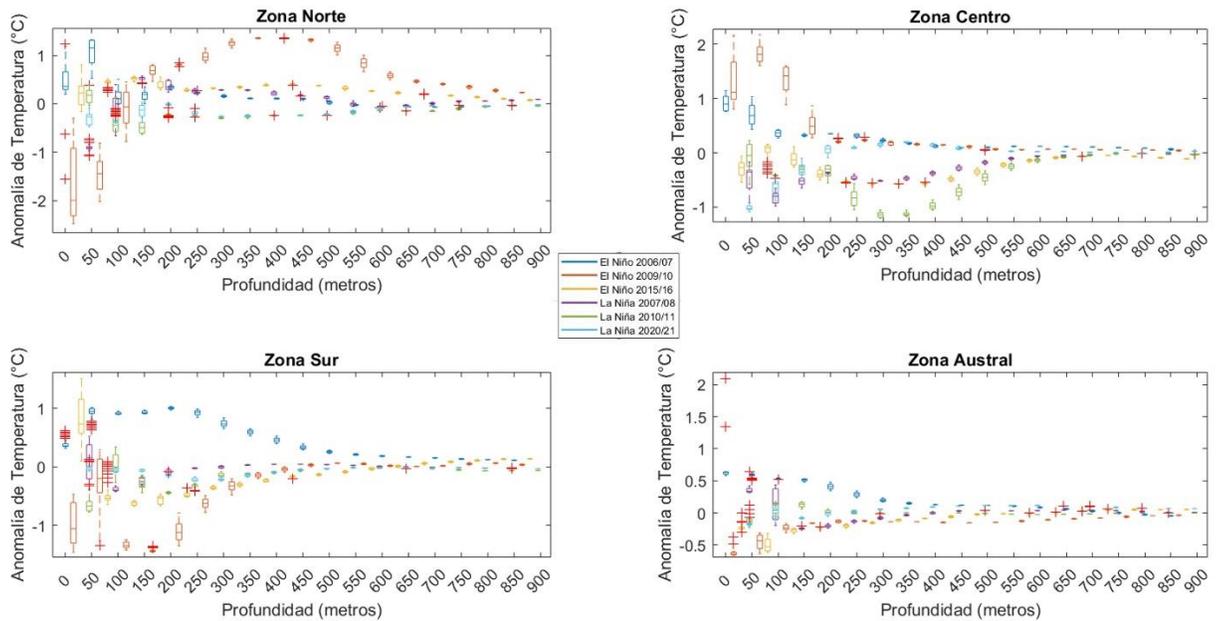


Figura 16: Boxplots de las anomalías de temperatura en profundidad en las cuatro zonas durante períodos ENOS.

La salinidad evidenció que las zonas norte y centro fueron las que presentaron mayor variabilidad en los primeros 250 metros de profundidad para los diferentes eventos (Fig. 17). La zona sur presentó una variabilidad excepcional en los primeros 50 metros para LN 2010/11; para el resto de los eventos, la variabilidad se redujo a medida que aumentó la profundidad. La zona austral presentó una pequeña variabilidad en los primeros 100 metros de profundidad para todos los eventos, pero a medida que aumentó la profundidad, esta variabilidad se redujo

a 0. En la zona norte, el evento que presentó mayor variabilidad correspondió a EN 2009/10 y en la zona centro, LN 2020/21.

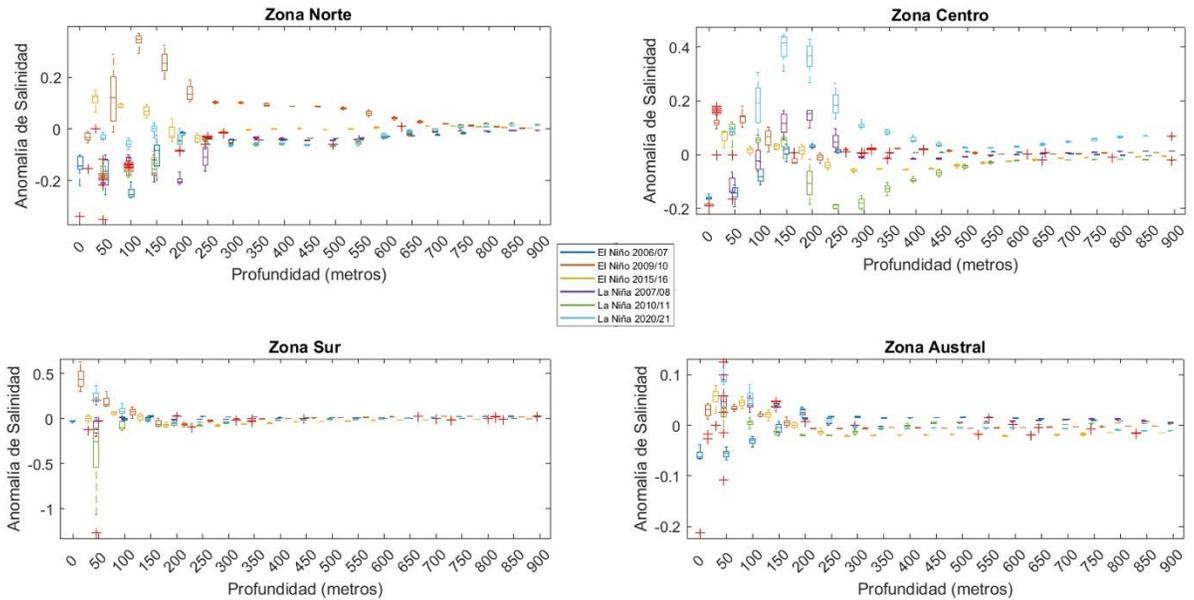


Figura 17: Boxplots de las anomalías de salinidad en profundidad en las cuatro zonas durante períodos ENOS.

4.5 Efecto de ENOS en la temperatura superficial del mar

4.5.1 Condiciones promedio

Con los datos MUR (Fig. 18) se comparan los 6 eventos ENOS definidos, junto con un evento neutro en el mismo periodo de meses. El evento EN 2015/16 (Fig. 18c) muestra TSM más elevadas, con isotermas de 20 y 15°C en latitudes más altas en comparación con los otros eventos. En contraste, el evento LN 2020/21 presenta las temperaturas más bajas a lo largo de las latitudes, con sus isotermas ubicadas en latitudes menores en comparación con los demás eventos. Los cambios más significativos en TSM a lo largo de Chile se observan en la zona

norte (18° a 28° S) y las temperaturas más altas se registran en los eventos EN 2006/07 y EN 2015/16 con valores de 25.5 y 25.8 respectivamente.

La isoterma de 20° C osciló entre las latitudes 22° S y 25° S para el evento EN 2006/07, mientras que para EN 2015/16 esta isoterma se ubicó en un rango de latitudes entre 24° S y 27° S. Para los eventos EN 2009/10, Neutro 2013/14, LN 2007/08, LN 2010/11 y LN 2020/21 la isoterma de 20° C se mantuvo entre las latitudes 18° S y 24° S. Se apreció un comportamiento similar en la posición de esta isoterma en todos los eventos, con diferencias sutiles, siendo la temperatura ligeramente más baja en el caso de LN 2020/21. La isoterma de 15° C no cambió mucho su posición latitudinal a lo largo de los 7 periodos analizados. Generalmente, fluctuó entre los 34° S y los 40° S, extendiéndose ocasionalmente hacia latitudes más bajas, especialmente cerca de la costa. Cabe destacar que esta isoterma se desplazó hacia latitudes más altas durante el evento EN 2015/16 y el período neutro, mientras que se situó en latitudes más bajas en el evento EN 2009/10.

La isoterma de 10° C presentó un comportamiento consistente en cuanto a su ubicación latitudinal, manteniéndose generalmente entre los 48° S y los 52° S. Sin embargo, se observaron variaciones notables durante el evento EN 2015/16, donde esta isoterma se desplazó hacia latitudes más altas, y en los eventos EN 2009/10 y LN 2020/11, donde se situó en latitudes ligeramente más bajas.

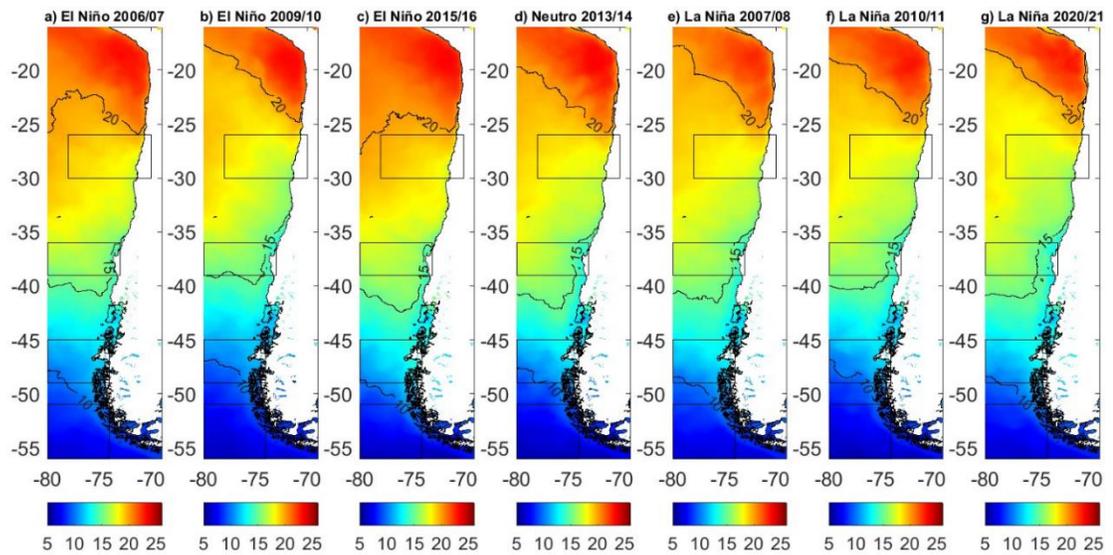


Figura 18: Temperatura superficial del mar durante períodos neutros (d), EN (a,b,c) y LN (e,f,g) analizados. Los rectángulos marcan las subáreas descritas anteriormente.

La figura 19 muestra las anomalías de temperatura superficial del mar de los seis periodos ENOS definidos junto con el periodo neutro. En la figura 19a, se evidenció que durante el evento EN 2006/07, las anomalías fueron principalmente positivas en las zonas norte y centro. En la zona sur, estas anomalías disminuyeron y se volvieron negativas, pero en la zona austral, aumentaron nuevamente, presentando anomalías cercanas a 0°C . La figura 19b muestra que el evento EN 2009/10 presentó anomalías mayormente negativas a lo largo de la zona oceánica de Chile. Hacia la costa de la zona norte, entre los 18°S a los 25°S , presentó anomalías levemente positivas, y, por el contrario, tanto para la zona oceánica como costera de la zona sur, entre los 40°S a los 48°S , mostró anomalías levemente negativas. En la figura 19c se evidencia que el evento EN 2015/16 fue el que presentó anomalías más positivas, con su valor promedio más alto en la zona costera alrededor de los 32°S . Los cuatro meses presentaron valores negativos y en torno a 0°C en la zona austral.

La figura 19e muestra que durante el evento LN 2007/08 se observaron anomalías ligeramente negativas en las zonas norte y centro, siendo las

anomalías más bajas en la zona costera alrededor de los 16°S a 19°S. Sin embargo, entre los 22° y 32°S, las anomalías fueron cercanas a 0°C. En las zonas sur y austral, predominaron las anomalías en torno a 0°C, con algunas excepciones positivas en la zona oceánica. En la figura 19f, el evento LN 2010/11 exhibió las anomalías más consistentes a lo largo de las latitudes, ya que sus valores mostraron cambios mínimos en toda la extensión de Chile. Mantuvo prácticamente el mismo nivel de anomalías negativas en toda la región, con la excepción de la zona norte, donde las anomalías permanecieron en torno a 0°C entre los 18°S y los 25°S. La figura 19g evidencia que durante el evento LN 2020/21, las anomalías variaron significativamente, presentando valores negativos en las zonas norte y centro, mientras que en las zonas sur y austral predominaron las anomalías positivas y las cercanas a 0°C.

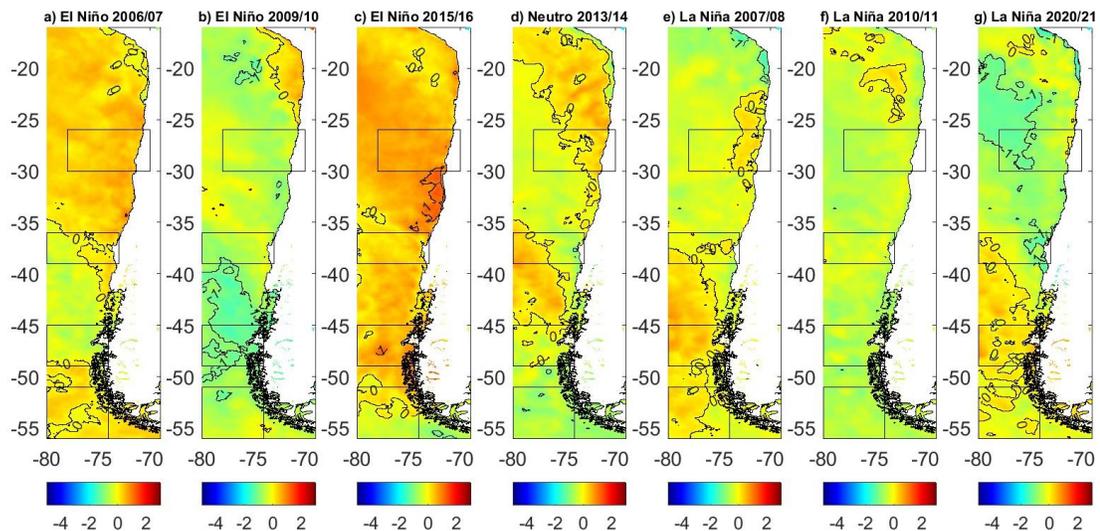


Figura 19: Anomalías de la temperatura superficial del mar durante períodos neutros (d), EN (a,b,c) y LN (e,f,g) analizados.

4.5.2 Efecto de El Niño en las condiciones promedio

La figura 20 muestra el análisis de los valores de anomalías de TSM para los cuatro meses (noviembre, diciembre, enero y febrero) para los eventos El Niño EN 2006/07, EN 2009/10 y EN 2015/16. En el evento EN 2006/07, en noviembre

(figura 20a), la zona norte mostró anomalías positivas cercanas a 1°C, incluso llegando a 1°C en la zona oceánica. A medida que nos desplazamos hacia el sur, las anomalías disminuyeron y se mantuvieron principalmente alrededor de 0°C, pero después de los -48°S, volvieron a aumentar, aunque sin alcanzar el 1°C. Diciembre (figura 20b) presentó un comportamiento muy similar, pero con la diferencia de que, en la costa hacia la zona oceánica, entre los -18° y los -24°S, se observaron anomalías de 0°C. Lo mismo ocurrió en enero (figura 20c), pero en la costa entre los -24° y los -33°S, donde las anomalías llegaron a 1°C. Febrero (figura 20d) mostró un patrón similar al de noviembre. En este evento, las anomalías que se observaron a lo largo de los cuatro meses mostraron una notable consistencia y similitud entre ellos.

En el caso de EN 2009/10, los meses de noviembre (figura 20e), enero (figura 20f) y febrero (figura 20g) presentaron anomalías que variaron entre -1 y -2°C, con la anomalía más negativa en febrero en la zona oceánica alrededor de los -44°S. Los cuatro meses presentaron anomalías positivas en la zona costera entre los -18 y -24°C, y noviembre presentó anomalías excepcionalmente positivas en la zona oceánica entre los -24° y -33°S.

Los cuatro meses del evento EN 2015/16 presentaron diferencias entre sí. En enero (figura 20k), se evidenciaron anomalías excepcionalmente altas, entre los -22° y los -38°S, con valores que iban desde 1°C para la zona oceánica hasta los 2°C para la zona más costera. En este mes, en la zona sur también se presentaron anomalías positivas de hasta 1°C. Febrero (figura 20l) también presentó anomalías positivas que superaron el 1°C en zonas costeras en las zonas norte y centro. Diciembre (figura 20j) fue el mes que presentó los menores valores de anomalías positivas en las zonas norte y centro.

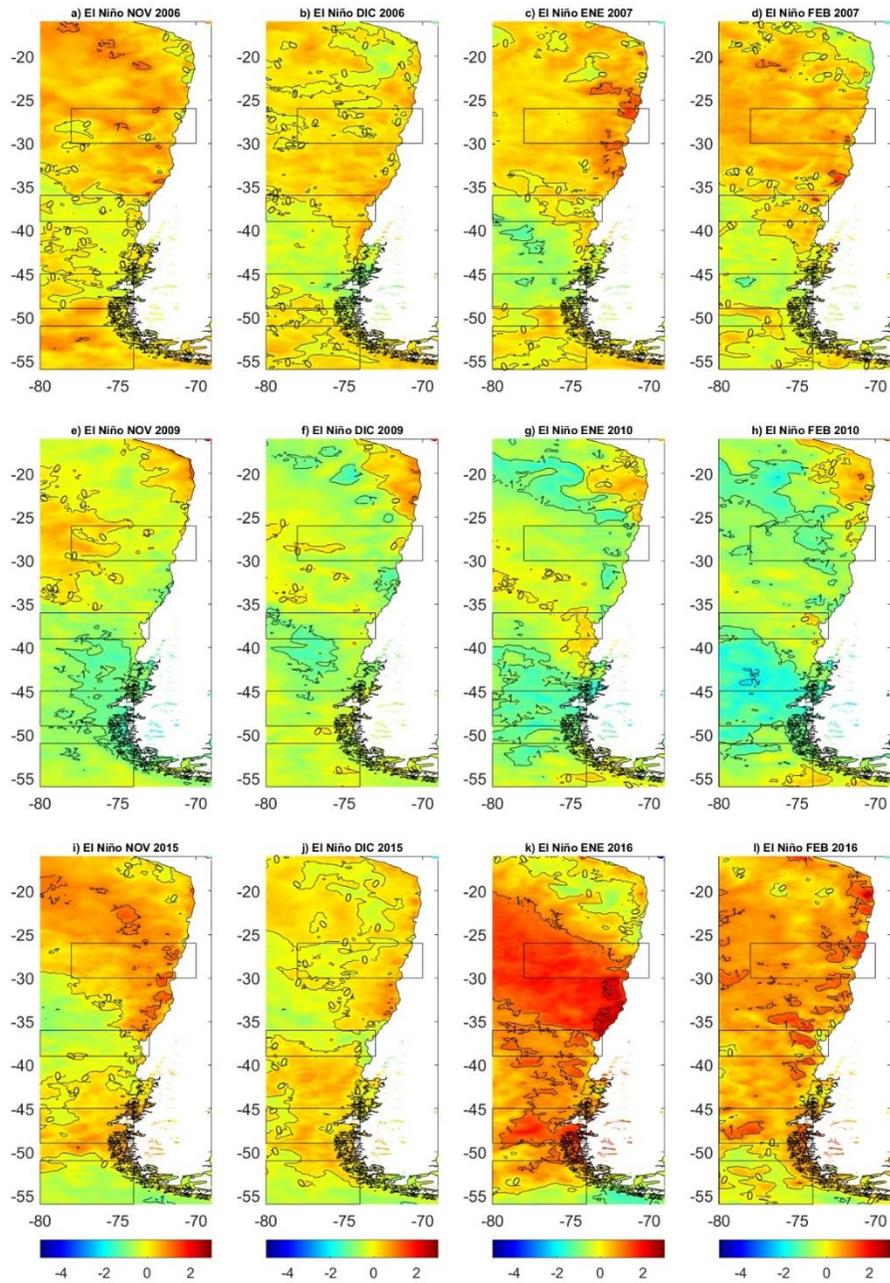


Figura 20: Anomalías de la temperatura superficial del mar para 3 eventos de El Niño promediados para los meses de Noviembre a Febrero.

4.5.3 Efecto de La Niña en las condiciones promedio

La figura 21 muestra el análisis de los valores de anomalías de TSM para los cuatro meses (noviembre, diciembre, enero y febrero) para los tres eventos La Niña; LN 2007/08, LN 2010/11, y LN 2020/21. En LN 2007/08, las anomalías no fueron consistentes a lo largo de los meses. Los meses de noviembre (figura 21a) y diciembre (figura 21b) presentaron anomalías principalmente negativas en la zona norte hasta los 24°S, extendiéndose más hacia la zona oceánica en noviembre, y en diciembre se extendieron hasta la zona costera. Ambos meses presentaron anomalías positivas y alrededor de 0°C en las zonas sur y austral. Sin embargo, en el mes de enero (figura 21c), este evento presentó anomalías positivas hacia la costa entre los 22 y los 30°S y hacia la zona oceánica desde los 34°S, acercándose a la costa a partir de los 46°S. El mes de febrero (figura 21d) fue el que presentó anomalías más altas, alcanzando valores de hasta 2°C. En la zona costera, esto ocurrió entre los 24°S y los 38°S, y en la zona oceánica, entre los 38°S y los 48°S. En este mes se presentaron anomalías excepcionalmente negativas en la costa entre los 18 y los 19°S, alcanzando anomalías de hasta -1°C.

Para LN 2010/11 se evidenció que diciembre (figura 21f) fue el mes que presentó las anomalías más negativas. Entre los 18°S y los 23°S, y en la zona sur austral, estas anomalías se presentaron cercanas a la costa, pero en la zona centro, estas anomalías fueron más oceánicas. El mes de febrero (figura 21h) mostró, en la zona norte y hacia la costa, anomalías principalmente positivas y en torno al valor 0°C.

En el evento LN 2020/21, se evidenciaron anomalías negativas en la zona oceánica entre las latitudes 19°S y 28°S, pero también afectaron a la costa, alcanzando valores de hasta -2°C entre los 18° y 20°S en el mes de febrero (figura 21l), y entre los 36°S y 38°S en enero (figura 21k). Por otro lado, alrededor de los 48°S, el mes de febrero presentó anomalías positivas de hasta 1°C en la zona costera. La figura 21l evidencia que febrero fue el mes que mostró la mayor

variación en las anomalías de TSM, mientras que noviembre fue el mes con la menor variación, aunque siguió el patrón de anomalías negativas en las zonas norte y centro, y positivas en las zonas sur y austral.

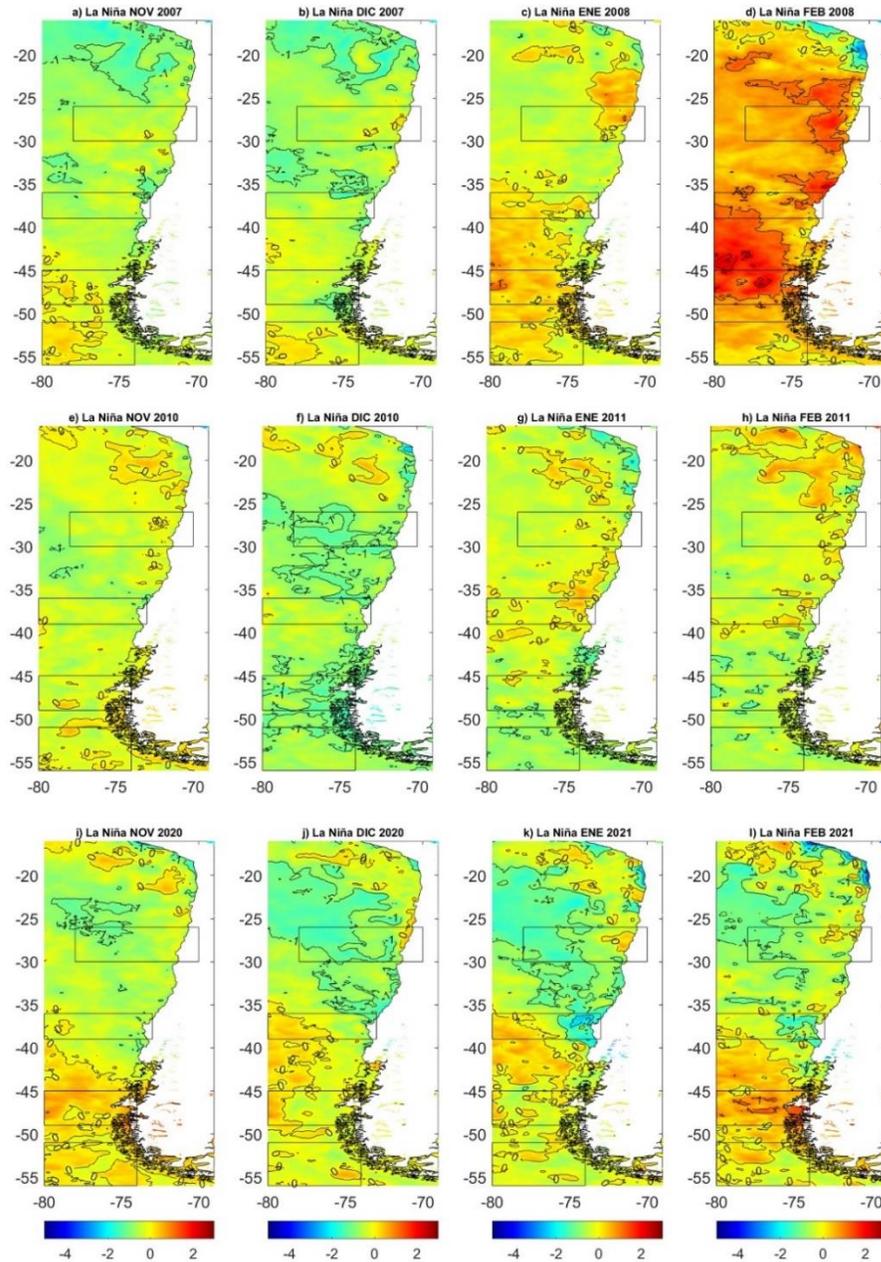


Figura 21: Anomalías de la temperatura superficial del mar para 3 eventos de La Niña.

4.5.4 Temperatura superficial del mar en la costa

Para complementar el análisis y comparar con datos costeros de TSM, se utilizó información de cuatro estaciones del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) elegidas adentro de cada una las zonas de estudio (Fig. 22). El promedio mensual a lo largo de las cuatro series de tiempo muestra que Puerto Chacabuco es la zona con el mayor rango de variación de temperaturas, oscilando entre 5 y 15°C, seguida por la estación de Caldera, que muestra un rango de variación entre 14 y 20°C. Luego se encuentra Puerto Williams, con temperaturas que varían entre 4 y 10°C. Finalmente, Talcahuano es la estación que presenta el menor rango de variación, con temperaturas que fluctúan entre 10 y 15°C. Estos promedios mensuales resaltan el ciclo estacional que se ha observado a lo largo del período de 22 años, siendo Talcahuano la estación con el ciclo estacional más suave y Puerto Chacabuco la que muestra el ciclo estacional más pronunciado.

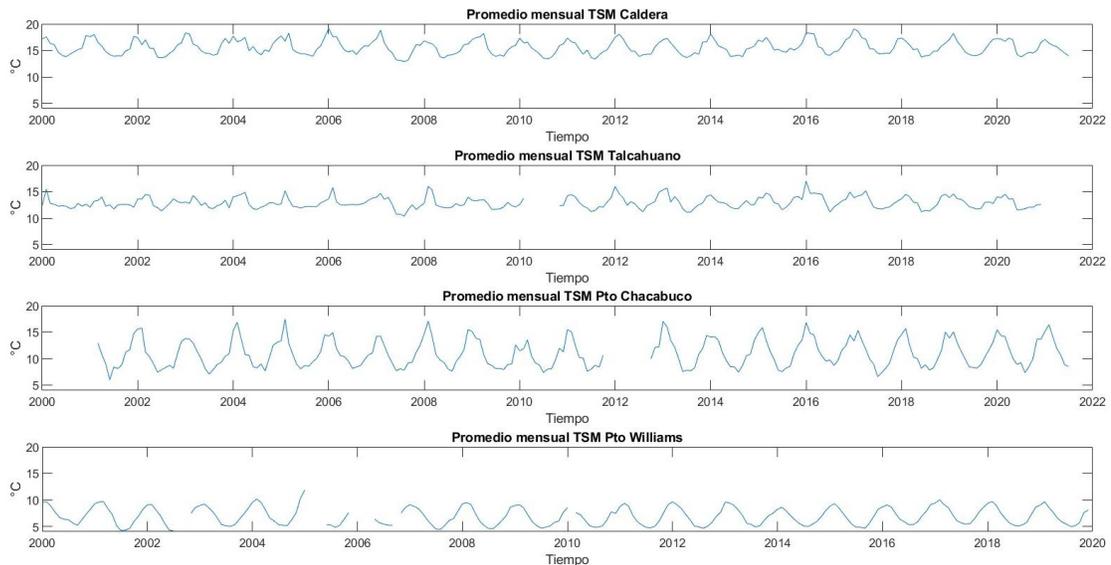


Figura 22: Series de tiempo de promedios mensuales de TSM para el periodo 2000-2022 en cuatro estaciones a lo largo de Chile.

La figura 23 muestra cómo ENOS impacta la costa de Chile en las cuatro zonas diferentes a través de una climatología anual para el periodo julio a junio del año siguiente, destacando los años ENOS. La figura 23a muestra que, para los meses de invierno y verano de los años correspondientes, los eventos EN 2006/07 y EN 2015/16 presentaron temperaturas elevadas, superiores a los otros eventos y a la mayoría de los años, aunque no correspondieron a las temperaturas más elevadas en general. Por otro lado, los eventos La Niña presentaron temperaturas bajas; LN 2007/08 y 2010/11 mostraron las temperaturas más bajas en los meses de invierno y fueron constantes a lo largo de la climatología.

En la figura 23b, se destaca que EN 2015/16 tuvo un gran impacto en la zona centro, presentando las temperaturas más elevadas para los meses de noviembre y enero, y manteniéndose a lo largo de la climatología con altas temperaturas. Por otro lado, LN 2007/08 presenta bajas temperaturas durante los meses de julio a enero, pero es en febrero que aumenta su temperatura significativamente, superando incluso la mayoría de los años.

La figura 23c evidencia el comportamiento de la TSM para la zona sur, donde el evento EN 2015/16 presentó temperaturas elevadas durante los meses de invierno, pero al comenzar los meses de verano, las temperaturas disminuyeron en relación con los demás eventos y años. EN 2006/07 fue el que presentó temperaturas elevadas en los meses de verano. En el caso de los eventos La Niña, solo se tienen datos para el total de meses para LN 2007/08, la cual presentó temperaturas cálidas en los meses de primavera.

La figura 23d evidencia que todos los eventos se encontraron dentro de la normalidad de la zona en términos de temperatura superficial del mar.

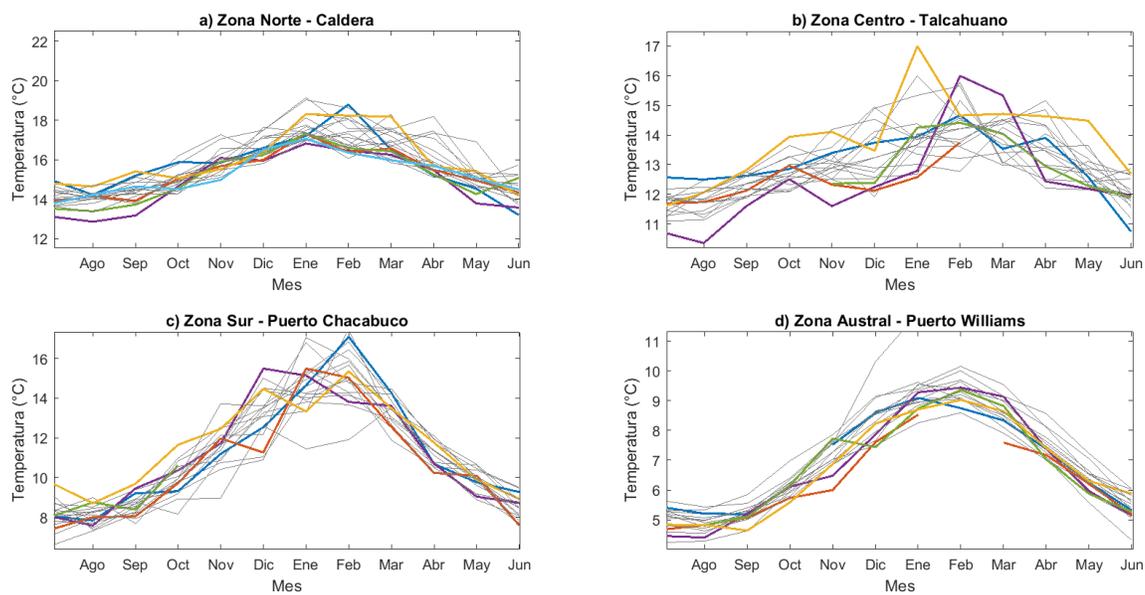


Figura 23: Promedios mensuales de la TSM de estaciones costeras a lo largo de la costa, líneas grises representan años neutros y colores representan años EL y LN. Años están centrados en enero.

5. DISCUSIÓN

El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) se ha convertido en un área de gran interés para el estudio de la relación océano-atmósfera y sus consecuencias e impactos en una variedad de ámbitos, ya que ENOS no solo afecta el océano y la atmósfera, sino que también tiene un impacto significativo en la economía, la vivienda, la agricultura, la biodiversidad y muchos otros aspectos de la vida en diferentes regiones del mundo (Ohman *et al.*, 2017). Comprender cómo ENOS influye en estas áreas es crucial para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación frente a sus efectos (Ortlieb, 1994).

La pregunta científica que orientó esta investigación se centró en entender cómo varían las condiciones hidrográficas a lo largo de Chile en respuesta a los eventos de El Niño y La Niña en comparación a eventos normales o neutros. Para abordar este objetivo, se estableció la hipótesis de que, debido al gradiente latitudinal y las diferencias en los procesos físicos a lo largo de la costa chilena, como oscilaciones climáticas y corrientes oceánicas, los cambios más intensos en las condiciones hidrográficas se observarían en la zona norte, con una disminución progresiva de la intensidad hacia las zonas centro, sur y austral. Los objetivos generales y específicos de este estudio se orientaron hacia la determinación de la intensidad de los cambios en temperatura y salinidad en la columna de agua en presencia de eventos ENOS identificando posibles diferencias latitudinales y meridionales en la hidrografía.

Variabilidad de las condiciones hidrográficas en respuesta a ENOS

En este estudio se encontró variaciones en las temperaturas y salinidades en la columna de agua en las cuatro zonas de estudio (norte, centro, sur y austral) durante los eventos de El Niño (EN) y La Niña (LN).

El Niño 2006/07:

Los resultados de esta investigación indican que durante el evento de El Niño 2006/07 se observó un aumento en las temperaturas para las zonas norte, centro y sur, superando las temperaturas promedio en cada región. Para las zona norte y centro este aumento se evidencia en los primeros 100 metros de la columna de agua y las anomalías de temperatura alcanzaron valores que superaron 1°C en esta capa superficial, lo que refleja un calentamiento significativo. Sin embargo, a partir de los 100 metros de profundidad, la temperatura comenzó a descender y se acercó al perfil promedio. Esto coincide con un estudio de Yang et al. (2010), donde, además, se señala que este evento fue inusualmente débil y de corta duración en relación con el promedio de los eventos El Niño ocurridos hasta la fecha. Además, señala que las anomalías cálidas de temperatura se establecen entre finales del año 2006 hasta febrero de 2007, siguiendo un estudio de Mcphaden et al. (2008), donde se analiza por una parte la profundidad de la isoterma 20°C para este evento en la zona ecuatorial (5°N-5°S, 80°W-120°E) El estudio de McPhaden evidencia una profundización de la termoclina, y por otra parte las anomalías de TSM, las cuales alcanzan 1°C entre los meses de noviembre 2006 a febrero 2007, presentan una fase de decadencia desde finales de enero 2007. Un comportamiento similar se observa en los resultados presentados en este estudio, donde las anomalías de TSM hasta los 34°S son positivas de hasta 1°C en los meses de noviembre 2006, y enero y febrero 2007. A diferencia de las otras zonas, no se observaron cambios significativos en las temperaturas superficiales en la zona austral. Esto podría deberse a la dinámica general de la región austral, que puede estar influenciada por otros factores climáticos y oceánicos.

En cuanto a la salinidad, el estudio de Yang et al. (2010) también analiza datos ARGO para las regiones El Niño 3 y El Niño 4, analizando el promedio mensual de mayo 2006 hasta 300 metros de profundidad. Donde se evidencia para ambas

regiones un aumento de salinidad entre los 50 a los 200 metros, además se menciona que la salinidad desempeña un papel crucial en la mezcla vertical y el desplazamiento de las masas de aguas cálidas hacia el Pacífico Occidental en presencia de El Niño. En el estudio de Mcphaden (2008) se analizan las anomalías de salinidad superficial para el mes de noviembre 2006 en la zona ecuatorial (10°N - 10°S , 140°E - 100°O) encontrando anomalías que oscilan entre los -0.6 a los 0-6 PSU, presentando anomalías más positivas hacia la zona oeste, lo que contrasta con nuestros resultados, donde para el evento EN 2006/07 se presentan anomalías negativas entre los 50 a 200 metros en la zona norte, pero coincide con las anomalías de salinidad encontradas en las zonas centro, sur y austral.

El Niño 2009/10:

Para el evento de El Niño 2009/10 se presentan diferentes comportamientos en las cuatro zonas. En la zona norte, sur y austral es el evento que presenta las menores temperaturas en profundidad, mientras que para la zona centro es el evento que presenta temperaturas más altas. Un estudio de Gierach et al (2012) muestra las anomalías de temperatura superficial del mar promedio para los meses de noviembre, diciembre y enero en el periodo 2009-2010, para la zona ecuatorial (16°N - 16°S , 120°E - 80°O), donde en el ecuador entre los 160°O y 120°O alcanzan valores de hasta 2°C , las cuales disminuyen hacia el sureste. Por otro lado, Kim et al. (2012) mencionan que este evento corresponde a un evento intenso de El Niño, que se caracterizó por una gran anomalía de la TSM limitada al Pacífico ecuatorial central (región Niño 4, 5°S - 5°N , 160°E - 150°O), no así máxima, como lo fueron los eventos EN 1982/83 y EN 1997/98. En general, se puede decir que este evento tuvo un efecto hasta los 100 metros.

En esta tesis también se analizan las anomalías de TSM para la región 20°N - 20°S , 120°E - 80°O , con resultados distintos a los de Gierach et al. (2012), sugiriendo que las bajas temperaturas obtenidas en la zona norte para este evento pueden estar relacionadas con la posición de las boyas que obtuvieron

los datos de temperatura y salinidad, las cuales se encuentran cercanos a la costa, entre los 26 y 28°S, esta región se caracteriza por la constante presencia de vientos que favorecen la surgencia costera durante todo el año (Montecinos & Gómez, 2010), por lo que los datos podrían estar más influenciados por la surgencia costera regional que por el efecto de ENOS en la zona. Esta diferencia se puede apreciar para la zona centro, donde a pesar de ser una zona con fuerte surgencia estacional en primavera, los datos fueron recopilados a distancias más lejanas de la costa que en la zona norte, los cuales, si presentan anomalías positivas de temperatura tanto en superficie como en profundidad, alcanzando los 2°C alrededor de los 50 metros de la columna de agua. Para la zona sur, sólo se cuenta con una medición, la cual puede verse influenciada por más factores y procesos físicos que afectan a la zona. Para la zona austral, hay evidencia de que el efecto de ENOS se ve disminuido en relación a otras oscilaciones climáticas y oceánicas (Valdés, 2014).

A pesar de que los estudios anteriormente mencionados indican que el evento EN 2009/10 fue de mayor intensidad que el EN 2006/07, los datos satelitales de anomalías de TSM indican un calentamiento en las costas de Chile mayor para el evento EN 2006/07. En el caso de EN 2009/10 se presentan anomalías levemente positivas sólo en ciertas zonas de la región norte de Chile, principalmente para el mes de noviembre 2009, y a medida que avanzan los meses las anomalías se vuelven menores, alcanzando valores negativos, lo que podría también explicar los valores negativos de anomalías en los perfiles de temperaturas. Además, la zona centro es la que presenta anomalías positivas y más estables a lo largo de los cuatro meses.

En un estudio de Zheng et al (2014) se analizó el comportamiento de la salinidad y la temperatura en profundidad hasta 120 metros, en la zona ecuatorial central (2°S–2°N, 175°E–175°W), también utilizando datos de boyas ARGO. La relación que existe entre temperatura y salinidad es inversa, es decir, a medida que la temperatura disminuye, la salinidad aumenta, hasta cierto punto, donde la salinidad comienza a descender. Esta relación se evidencia en las cuatro zonas,

donde sólo en la zona centro, la salinidad disminuye entre los 50 a los 150 metros, y luego comienza a aumentar hasta estabilizarse. Además, en un estudio de Zheng y Zhang (2012) sugiere que las anomalías de salinidad que son inducidas por eventos ENOS son un factor significativo en la modulación de las variaciones de la capa de mezcla para el pacífico ecuatorial, lo cual se ve reflejado en los perfiles de las zonas norte, centro y sur.

El Niño 2015/16:

Diversos autores como Brainard et al. (2018), Newman et al. (2018) y Zhai et al. (2016), se refieren a este evento como intenso y fuerte. Zhai et al. (2016), se refieren a este evento como uno de los tres más intensos registrados hasta la fecha, y uno de los más largos registrados, ya que las condiciones anómalas cálidas comenzaron en el hemisferio norte en primavera de 2014, hasta fines de otoño de 2016. Además, en dicho estudio se menciona que este episodio alcanzó su máxima fuerza durante los meses de noviembre y diciembre de 2015. La alta intensidad de este evento se ve reflejada en los resultados de las imágenes TSM, donde se evidencia que este evento corresponde al más cálido de los tres episodios EN analizados, especialmente presentando anomalías de TSM positivas de hasta 2°C en las zonas norte y centro para los meses de noviembre, enero y febrero. En complemento, un estudio de Nava (2021) menciona que el ONI alcanzó un nivel de 2,93 durante noviembre de 2015.

Sin embargo, este calentamiento inusual no se ve reflejado en los perfiles de temperatura obtenidos a partir de los datos ARGO para las cuatro zonas. La zona norte presenta anomalías positivas, pero no las mayores de la zona, como era de esperarse. La zona centro a lo largo de la columna de agua presenta anomalías principalmente negativas. Sólo es el caso de la zona sur donde se presentan anomalías positivas en los primeros 20 metros de la capa superficial, pero que luego estas anomalías disminuyen drásticamente en profundidad. Con estos resultados nuevamente entra en discusión la posición en que se tomaron los datos, con respecto a la distancia hacia la costa, y la cantidad de datos

obtenidos, la cual no es uniforme para las cuatro zonas, ni en el mismo periodo de tiempo. Para la zona norte se cuenta con la mayor cantidad de datos correspondientes a este evento, con un total de 18 boyas que tomaron mediciones en un cuadrante de 6° de longitud, lo cual podría significar una gran variabilidad en términos de temperatura. Para las zonas centro y sur sólo se cuenta con datos de cuatro boyas, alejadas de la costa para la zona centro, y cercanas a la costa para la zona sur, lo que podría explicar las diferencias de comportamiento de las anomalías esperadas en este evento ENOS.

A pesar de tratarse de un evento intenso, el patrón de salinidad no se ve notablemente afectado en ninguna de las cuatro zonas de estudio. Las zonas centro, sur y austral muestran anomalías de salinidad cercanas a 0 en toda la columna de agua, mientras que solo en la zona norte se observa un leve aumento de salinidad entre la superficie y los 150 metros de profundidad. Esto podría indicar una disminución en el aporte de agua dulce durante el evento, a pesar de las expectativas contrarias, dadas las condiciones de aumento de precipitaciones y el calentamiento atmosférico asociado a un evento El Niño intenso. Se analizó el reporte anual climatológico para el periodo 2015-2016 de la Dirección Meteorológica de Chile, donde se indica que el año 2016 presentó anomalías negativas de precipitación significativas desde La Serena, hasta Punta Arenas, lo cual podría explicar los resultados obtenidos en salinidad para las cuatro zonas.

La Niña 2007/08:

Los resultados de esta investigación arrojaron que el evento LN 2007/08 presenta anomalías negativas hasta los 100 metros de profundidad en las zonas norte y centro, junto con los resultados del análisis de anomalías de TSM de datos satelitales, donde las anomalías para estas zonas oscilan entre 0 y valores negativos para los meses de noviembre y diciembre de 2007, sin embargo, para los meses de enero y febrero de 2008, este evento presenta anomalías principalmente positivas para las cuatro zonas de estudio, alcanzando hasta los

2°C en la zona sur en el mes de febrero, lo cual se ve reflejado en los primeros 20 metros de los perfiles de temperatura analizados en esta zona. Wheeler (2008) menciona que este evento corresponde al episodio La Niña más fuerte desde 1988 hasta la fecha, además de que en el verano de 2007-08 también cabe destacar una extensión de hielo marino muy anómala alrededor de la Antártida, siendo la mayor anomalía positiva de la extensión del hielo marino desde que comenzaron los registros por satélite en 1979.

Zheng y Zhang (2012) cuantificaron las contribuciones relativas de las variaciones interanuales de salinidad y temperatura sobre procesos físicos en el Pacífico ecuatorial centro-occidental durante La Niña 2007/08. En este trabajo se destaca la relación entre anomalías negativas de TSM y positivas de SSM (salinidad superficial del mar) durante la evolución de La Niña 2007/08, además de una anomalía negativa del flujo de agua dulce inducida durante el evento de La Niña en las regiones centro-occidentales tiende a aumentar la densidad oceánica, reducir la estabilidad de la estratificación y reforzar la mezcla vertical.

Las anomalías de salinidad, tanto en superficie como en profundidad encontradas en la presente investigación son principalmente negativas para las zonas norte, centro y sur, lo cual no se ajusta a la relación indirecta salinidad-temperatura. Según lo mencionado por otros autores entonces se espera la salinidad presentara valores anómalos principalmente positivos, esta diferencia se puede deber a la cantidad de lluvia.

En un estudio realizado por Hope y Watkins (2008), se examinaron las anomalías de la TSM en la primavera del año 2007, tomando como referencia el período 1961-1990. Los resultados revelaron un patrón de comportamiento característico para el Pacífico Este y Central, con anomalías de TSM que oscilaban entre -1 y -2 °C a lo largo de las costas de Sudamérica. Sin embargo, los datos obtenidos a partir de imágenes satelitales en este estudio mostraron un panorama interesante: las anomalías en las regiones norte y centro presentaron una ligera tendencia negativa en los meses de noviembre y diciembre de 2007.

Contrariamente, en enero y febrero de 2008, se observó un significativo calentamiento, con anomalías que alcanzaron hasta 2°C en febrero en varias áreas de las zonas norte, centro y sur.

La Niña 2010/11

El estudio realizado por Boening *et al* (2012) califica el evento de LN 2010/11 como “fuerte e intenso”, además de ser el fenómeno ENOS más frío de las últimas ocho décadas, lo que provocó un descenso de las temperaturas oceánicas superiores en el Pacífico oriental y un aumento de las temperaturas en el Pacífico tropical occidental.

Adicionalmente, Zhang *et al.* (2013) señalan que el punto máximo de este evento ocurrió en octubre de 2010. Durante ese período, se observaron notables anomalías negativas en las temperaturas de las aguas subsuperficiales, que fueron transportadas por la capa de mezcla en la región ecuatorial central. Estas anomalías persistieron en esta área durante 2010-11, y tuvieron como consecuencia una disminución de la TSM hacia el este en los meses de julio y agosto de 2011.

Los resultados de la TSM de esta tesis reflejan claramente estas anomalías negativas de TSM en el evento LN 2010/11. Las temperaturas superficiales en gran parte de la zona oceánica de Chile mostraron anomalías inferiores a 0°C, con la excepción de una región en la zona norte. Es importante destacar que diciembre de 2010 fue el mes más frío durante este evento, con anomalías de hasta -1°C en áreas cercanas a la costa a lo largo de todo Chile.

Los perfiles de anomalías de temperatura para el evento LN 2010/11 indican que las anomalías negativas se manifestaron a diferentes profundidades en distintas regiones. En la zona norte, estas anomalías se hicieron evidentes a partir de aproximadamente los 30 metros de profundidad. En la zona central, se observaron desde los 10 metros de profundidad. Sin embargo, en la zona sur, se evidencian desde superficie, pero se produjo un aumento excepcional en las anomalías entre los 70 y 90 metros, donde luego vuelven a descender. En las

dos primeras zonas, las anomalías negativas persistieron hasta los 500 metros de profundidad, mientras que en la zona sur se extendieron hasta los 300 metros. Vale la pena señalar que, en la zona austral, las anomalías en su mayoría fueron positivas, lo que indica que el efecto de LN 2010/11 no alcanzó latitudes altas.

En cuanto a la salinidad en las tres primeras zonas, también se registraron valores por debajo del promedio. En la zona norte, las anomalías de salinidad fueron ligeramente negativas hasta alcanzar los 200 metros de profundidad. Mientras que en la zona centro las anomalías salinas apenas superaron el valor 0 hasta una profundidad de 100 metros, a partir de la cual disminuyeron de manera significativa y se tornaron negativas. Este patrón de comportamiento en las zonas norte y centro sugiere que, si bien el evento LN 2010/11 pudo haber tenido una ligera influencia en términos de salinidad en estas regiones, es posible que otros factores y fenómenos climáticos estén ejerciendo una influencia más marcada en estos patrones de salinidad.

Por otro lado, en la zona sur, las anomalías de salinidad mostraron valores significativamente inferiores en la superficie. Sin embargo, es importante señalar que esta disminución de la salinidad en la superficie se debió a la ubicación de las boyas oceanográficas desde donde se recopilaban los datos. En particular, la boya oceanográfica se desplazó muy cerca de la costa en la región entre los 48° y 49° S. Esta zona está fuertemente influenciada por la presencia de fiordos, lo que resulta en una mayor afluencia de agua dulce en comparación con otras áreas. Por lo tanto, las anomalías negativas en la salinidad en superficie en esta región se pueden atribuir a esta particularidad geográfica y a la influencia del agua dulce proveniente de los fiordos. En la zona austral no se ven anomalías significativas, lo que indica nuevamente que los efectos de ENSO no alcanzan esta región.

La Niña 2020/21:

En un estudio realizado por Zheng *et al.* (2022), el evento LN 2020/21 se describe como de intensidad moderada. Sin embargo, en otro estudio llevado a cabo por

Li *et al.*, (2022), se califica este evento como intenso, situándolo en la sexta posición en el ranking de los eventos de La Niña más fuertes desde 1982 hasta la fecha. Este evento se inició en agosto de 2020 y concluyó en mayo de 2021, alcanzando su punto máximo en octubre de 2022 (Li *et al.*, 2022). Su fase madura tuvo lugar durante el verano del hemisferio sur en 2020/21, según lo reportado por Zheng *et al.* (2022).

En la investigación de Li *et al.* (2022), se examinó la evolución de las anomalías, tanto oceánicas como atmosféricas, en el Pacífico ecuatorial durante el evento LN 2020/21. Este análisis se comparó con eventos históricos de La Niña que fueron catalogados como intensos. Durante el período comprendido entre octubre de 2020 y febrero de 2021, se observaron anomalías de TSM que se mantuvieron en valores negativos. Estas anomalías oscilaron en un rango que varió desde -0.5°C hasta -1.5°C en la región del Pacífico Ecuatorial (entre las latitudes 2°N y 2°S , y entre las longitudes 150°E y 90°O). Sin embargo, en algunas áreas excepcionales, se registraron anomalías de TSM que alcanzaron valores tan bajos como -2°C .

Lo anterior coincide con las anomalías de TSM encontradas en los datos satelitales analizados en esta investigación. A lo largo de las zonas norte y centro, predominan las anomalías negativas, llegando a alcanzar valores de hasta -1°C en ciertas áreas, tanto oceánicas en el norte como costeras en el centro. Sin embargo, en las zonas sur y austral, las anomalías de TSM presentan valores en su mayoría positivos. Este patrón latitudinal en las anomalías de temperatura se refleja en el análisis mensual de este evento, donde se aprecia una clara diferencia entre las zonas norte y centro, donde predominan las anomalías negativas, y las zonas sur y austral, donde predominan las anomalías positivas.

Este gradiente latitudinal que se mencionó antes se refleja claramente en los perfiles de temperatura en profundidad. Durante este evento, las anomalías de temperatura en la zona norte son negativas hasta aproximadamente los 600 metros, lo que indica un enfriamiento en las aguas subsuperficiales, y desde la

superficie. En la zona centro, se observa un patrón similar, aunque en este caso, el enfriamiento se extiende hasta los 300 metros de profundidad. Por otro lado, las anomalías de temperatura en las zonas sur y austral oscilan alrededor del valor 0, lo que sugiere que estas áreas no experimentaron un enfriamiento inusual durante el evento y que la influencia de este no llegó a latitudes más altas.

En lo que respecta al patrón de salinidad, solo se observa un aumento en los niveles de salinidad entre los 100 y 200 metros de profundidad en la zona centro, lo cual concuerda con lo esperado debido a las condiciones de sequía y la disminución de aportes de agua dulce. Sin embargo, este aumento no se refleja en la zona norte, donde las anomalías de salinidad permanecen alrededor de 0, sugiriendo que la salinidad no experimentó cambios significativos en respuesta a este evento. Un patrón similar se observa en las zonas sur y austral, donde en la zona sur hay un ligero aumento de salinidad en la superficie, pero luego se estabiliza en torno a 0. En la zona austral, el comportamiento es similar al de la zona sur, con anomalías de salinidad cercanas a 0.

El uso de boyas ARGO en esta investigación sobre El Niño-Oscilación del Sur en la zona oceánica de Chile ha sido fundamental para comprender el impacto de este fenómeno a diversas profundidades. Estas boyas han permitido la identificación de patrones regionales y la detección de anomalías en temperatura y salinidad durante los eventos ENOS. Su contribución futura es crucial, ya que, desde 2014, no solo registran datos de temperatura y salinidad, sino también datos biogeoquímicos. Esta expansión en la capacidad de recopilación de datos es de gran importancia para estudios oceanográficos, incluidos aquellos sobre el cambio climático y sus implicaciones, proporcionando información valiosa para abordar desafíos futuros. El despliegue global de estas boyas brinda una visión integral del comportamiento oceánico y destaca su relevancia para la comprensión de la vida.

6. CONCLUSIONES

La hipótesis de que los cambios más intensos en las condiciones hidrográficas se observarían en la zona norte, con una disminución progresiva hacia las zonas centro, sur y austral, se rechaza, ya que no se puede respaldar en todos los casos. Se observa un leve gradiente latitudinal en la respuesta de la temperatura oceánica a los eventos de ENOS. Las zonas norte y centro experimentan mayores cambios en comparación con las zonas sur y austral, sólo en algunos eventos, ya que la magnitud de los impactos pueden variar según el evento específico y la región geográfica. Este gradiente destaca la importancia de considerar la latitud al analizar los impactos de ENOS en la zona oceánica de Chile. A pesar de encontrar pocos cambios y poca influencia para todos los eventos en la zona austral, se conoce que ENOS puede impactar altas latitudes, por lo que la variabilidad encontrada en las respuestas hidrográficas sugiere que otros factores regionales pueden influir en los patrones observados durante los eventos ENOS.

Los efectos de ENOS no se limitan a las capas superficiales; se observan cambios significativos en la temperatura y salinidad a diferentes profundidades, por lo que se puede afirmar que ENOS impacta la columna de agua hasta al menos los 100 metros de profundidad en la zona oceánica de Chile, aunque la magnitud y la naturaleza de estos impactos pueden variar según el evento específico y la región geográfica. La distancia desde la costa y la presencia de fiordos pueden modular las respuestas oceánicas, generando variaciones locales en las anomalías observadas.

Es importante considerar que las discrepancias con estudios previos indican la necesidad de considerar factores regionales y condiciones específicas al evaluar el impacto de ENOS en las condiciones hidrográficas. Además, la distribución desigual de datos y la ubicación de las boyas pueden haber influido en los

resultados, destacando la importancia de una recopilación de datos más uniforme y representativa.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar M., (2020) Influence of El Niño on anchovy landings in Northern Chile. NIÑO-OSCILACION, E. L., & TELECONEXION, D. S. E. Y. EL NIÑO Y CAMBIO CLIMATICO SUS EFECTOS EN CHILE.
- Brainard, R. E., Oliver, T., McPhaden, M. J., Cohen, A., Venegas, R., Heenan, A., ... & Hunter, S. A. (2018). Ecological impacts of the 2015/16 El Niño in the central equatorial Pacific. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(1), S21-S26.
- Blanco, J. L., Carr, M. E., Thomas, A. C., & Strub, P. T. (2002). Hydrographic conditions off northern Chile during the 1996–1998 La Nina and El Nino events. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C3), 3-1.
- Boening, C., Willis, J. K., Landerer, F. W., Nerem, R. S., & Fasullo, J. (2012). The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell. *Geophysical Research Letters*, 39(19).
- Dirección Meteorológica de Chile. (2015). Reporte Climatológico 2015. Meteochile.
<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/documentoPdf/reporteClimatologico/reporteClimatologico-2015.pdf>
- Escribano, R., Daneri, G., Farías, L., Gallardo, V. A., González, H. E., Gutiérrez, D., ... & Braun, M. (2004). Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(20-21), 2389-2411.
- Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Gutierrez, D., Graco, M., ... & Quispe-Ccalluari, C. (2019). Oxygen variability during ENSO in the tropical South Eastern Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 5, 526.
- Flores, P. I. A. D. (2016). Evaluación del impacto tecno-económico de El Niño-Oscilación del Sur en el recurso eólico de Chile (Doctoral dissertation).
- Fogt, R. L., Bromwich, D. H., & Hines, K. M. (2011). Understanding the SAM influence on the South Pacific ENSO teleconnection. *Climate dynamics*, 36(7), 1555-1576.
- Gierach, M. M., Lee, T., Turk, D., & McPhaden, M. J. (2012). Biological response to the 1997–98 and 2009–10 El Niño events in the equatorial Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 39(10).
- Hope, P., & Watkins, A. B. (2008). Seasonal climate summary southern hemisphere (spring 2007): La Niña finally takes hold. *Australian Meteorological Magazine*, 57(3).

- Kim, H. J., Hyeong, K., Yoo, C. M., Khim, B. K., Kim, K. H., Son, J. W., ... & Kim, D. (2012). Impact of strong El Niño events (1997/98 and 2009/10) on sinking particle fluxes in the 10 N thermocline ridge area of the northeastern equatorial Pacific. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 67, 111-120.
- Larkin, N. K., & Harrison, D. E. (2002). ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: Ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries, and implications. *Journal of climate*, 15(10), 1118-1140.
- Levin, L., Gutiérrez, D., Rathburn, A., Neira, C., Sellanes, J., Muñoz, P., ... & Salamanca, M. (2002). Benthic processes on the Peru margin: a transect across the oxygen minimum zone during the 1997–98 El Niño. *Progress in Oceanography*, 53(1), 1-27.
- Li, X., Hu, Z. Z., Tseng, Y. H., Liu, Y., & Liang, P. (2022). A historical perspective of the La Niña event in 2020/2021. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(7), e2021JD035546.
- Lu, B., & Ren, H. L. (2019). ENSO features, dynamics, and teleconnections to East Asian climate as simulated in CAMS-CSM. *Journal of Meteorological Research*, 33(1), 46-65.
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (1997). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *El Niño-La Niña, 2000*, 13-27.
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. *science*, 314(5806), 1740-1745.
- Mcphaden, M. J. (2008). Evolution of the 2006–2007 El Niño: the role of intraseasonal to interannual time scale dynamics. *Advances in Geosciences*, 14, 219-230.
- McPhaden, M. J., Vera, C. S., & Guingla, R. M. (2010). Climate Variability and Change in South America: ENSO, Decadal Variability and Climate Change in South America: Trends, Teleconnections, and Potential Impacts; Guayaquil, Ecuador, 12–14 October 2010.
- Morales Carreño, A. N. (2020). Una aproximación a la dinámica no lineal por medio del estudio del fenómeno meteorológico y climático “El Niño”.
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of climate*, 16(2), 281-296.
- Narváez, D. A., Vargas, C. A., Cuevas, L. A., García-Loyola, S. A., Lara, C., Segura, C., ... & Broitman, B. R. (2019). Dominant scales of subtidal variability in coastal hydrography of the Northern Chilean Patagonia. *Journal of Marine Systems*, 193, 59-73.

- Nava, H., López, N., Ramírez-García, P., & Garibay-Valladolid, E. (2021). Contrasting effects of the El Niño 2015–16 event on coral reefs from the central pacific coast of Mexico. *Marine Ecology*, 42(2), e12630.
- Newman, M., Wittenberg, A. T., Cheng, L., Compo, G. P., & Smith, C. A. (2018). The extreme 2015/16 El Niño, in the context of historical climate variability and change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(1), S16-S20.
- Ohman, M. D., Mantua, N., Keister, J., Garcia-Reyes, M., & McClatchie, S. (2017). ENSO impacts on ecosystem indicators in the California Current System. *Variations. CLIVAR & OCB Newsletter*, 15(1), 8-15.
- Pizarro Pereyra, L., Ferrer, C., & Piotrowicz, S. (2016). Despliegue de boyas ARGO para el estudio y monitoreo del fenómeno El Niño.
- Poveda, G., & Mesa, Ó. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1), 21-37.
- 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.
- Segovia M., (2020) Variability in landings Urchin (*Loxechinus albus*) at the northern end of Chile and its relationship with ENSO events. NIÑO-OSCILACION, E. L., & TELECONEXION, D. S. E. Y. EL NIÑO Y CAMBIO CLIMATICO SUS EFECTOS EN CHILE.
- Valdes, R. (2014). Analysis of long-term changes in annual and seasonal precipitation in Chile and related large-scale atmospheric circulation patterns. The University of Arizona.
- Villarreal, A., Aguirre, W., & Hoyos, L. (2014). Fenómeno de la niña: impacto en la producción de uchuva en Cundinamarca, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(1), 118-127.
- Qi, L. (2007). Seasonal climate summary southern hemisphere (spring 2006): a weak El Niño in the tropical Pacific–warm and dry conditions in eastern and southern Australia. *Australian Meteorological Magazine*, 56(3).
- Quetin, L. B., & Ross, R. M. (2003). Episodic recruitment in Antarctic krill *Euphausia superba* in the Palmer LTER study region. *Marine Ecology Progress Series*, 259, 185-200.
- Wheeler, M. C. (2008). Seasonal climate summary southern hemisphere (summer 2007-08): mature La Niña, an active MJO, strongly positive SAM, and highly anomalous sea-ice. *Australian Meteorological Magazine*, 57(4).

- Yang, S. C., Rienecker, M., & Keppenne, C. (2010). The impact of ocean data assimilation on seasonal-to-interannual forecasts: A case study of the 2006 El Niño event. *Journal of climate*, 23(15), 4080-4095.
- Zhai, P., Yu, R., Guo, Y., Li, Q., Ren, X., Wang, Y., ... & Ding, Y. (2016). The strong El Niño of 2015/16 and its dominant impacts on global and China's climate. *Journal of Meteorological Research*, 30(3), 283-297.
- Zhang, R. H., Zheng, F., Zhu, J., & Wang, Z. (2013). A successful real-time forecast of the 2010–11 La Niña event. *Scientific Reports*, 3(1), 1108.
- Zheng, F., & Zhang, R. H. (2012). Effects of interannual salinity variability and freshwater flux forcing on the development of the 2007/08 La Niña event diagnosed from Argo and satellite data. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 57, 45-57.
- Zheng, F., Zhang, R. H., & Zhu, J. (2014). Effects of interannual salinity variability on the barrier layer in the western-central equatorial Pacific: A diagnostic analysis from Argo. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31, 532-542.
- Zheng, F., Yuan, Y., Ding, Y., Li, K., Fang, X., Zhao, Y., ... & Jia, X. (2022). The 2020/21 extremely cold winter in China influenced by the synergistic effect of La Niña and warm Arctic.