

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y BIOGEOQUÍMICA DE PERÍODOS CON Y SIN REMOLINOS FRENTE A VALPARAÍSO ($\sim 33^{\circ}\text{S}$)

Por: Matías Ariel Castillo Alveal

Habilitación Profesional para optar al Título de Geofísico.

Marzo 2022

Concepción, Chile

Profesora Guía: Dra. Marcela Cornejo D'Ottone

Profesora Co-guía: Dra. Carolina Parada Véliz

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y BIOGEOQUÍMICA DE PERÍODOS CON Y SIN REMOLINOS FRENTE A VALPARAÍSO ($\sim 33^{\circ}\text{S}$)

Por: Matías Ariel Castillo Alveal

Habilitación Profesional para optar al Título de Geofísico.

Marzo 2022

Concepción, Chile

Profesora Guía: Dra. Marcela Cornejo D'Ottone

Profesora Co-guía: Dra. Carolina Parada Véliz

Comisión:

Sebastián Cornejo Guzmán, Samuel Hormazabal Fritz

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi madre, Amelia Gloria Alveal Jiménez, y hermana, Yerikza Fernanda Castillo Alveal por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, sin ellas no podría haber llegado hasta aquí. A mis profesoras Marcela Cornejo D'Ottone y Carolina Parada Véliz, por todo el apoyo y ayuda para mejorar como profesional y en todo el proceso de tesis. Al profesor Oscar Pizarro Arriagada por estar siempre dispuesto a ayudar.

Agradezco a mis amistades de años, Camila Martínez Saldías, Marcelo Carrasco Pincheira, Scarlette Pino Contreras, Carla Farfa Hernández, Camila Rivera Torres y Felisa Romero Fica, por estar siempre ahí. A mis tías, primas y primos. Gracias a todas mis amistades de la universidad, sin su apoyo los años universitarios pudieron haber sido más duros. Además, agradezco al colectivo sumatoria de fuerzas por ayudarme a crecer en aspectos que la universidad no me podía entregar. A mis tías, primas y primos.

Quiero agradecer a la comisión, Sebastián Cornejo Guzmán, Samuel Hormazabal Fritz, por la ayuda y darse el tiempo de leer este trabajo.

Este trabajo fue posible gracias a los proyectos de investigación FONDECYT 1171895 (Dr. Samuel Hormazábal), 11130418 (Dra. Marcela Cornejo) y 1171324 (Dra. Verónica Molina), en conjunto con IMO (Instituto Milenio de Oceanografía), IFOP (Instituto de Fomento Pesquero), y los laboratorios de Oceanografía Física (PUCV), Biogeoquímica Marina (PUCV), Biogeoquímica de Gases de Efecto Invernadero (PUCV) y Observatorio de Ecología Microbiana (UPLA).

Resumen

El Sistema de Corrientes Perú-Chile es uno de los cuatro mayores Sistemas de Borde Oriental (EBUS) el cual se extiende desde 5°S hasta 42°S. Esta región se caracteriza por mantener una Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) permanente con concentraciones $<45 \mu M$. Además, en esta zona los eventos de surgencia transportan agua de la capa subsuperficial fría, rica en nutrientes, pero baja en concentraciones de oxígeno hacia la superficie. En esta región se encuentran presentes 5 masas de agua: la Agua Subtropical (AST), Agua Subantártica (ASAA), Agua Subsuperficial del Pacífico (AESS), Agua Intermedia Antártica (AIAA), y Agua Profunda del Pacífico (APP). Los remolinos de mesoescala son un fenómeno que afecta fuertemente al Pacífico Sur Oriental (PSO), los cuales desempeñan un papel importante en la transferencia de energía y propiedades físicas y biogeoquímicas del agua hacia fuera de la costa. Específicamente, los remolinos intratermoclina (ITEs) se presentan frecuentemente en el PSO, sin embargo, en particular su impacto en la biogeoquímica ha sido poco estudiado. Estos remolinos se caracterizan por presentar propiedades biogeoquímicas de la subsuperficie formando núcleos de alta salinidad ($>34,5$) y baja concentración de oxígeno disuelto ($<45 \mu M$) en forma de “lente”. En el presente trabajo se estudia la presencia de remolinos intratermoclina y sus características físicas y biogeoquímicas frente a la costa de Valparaíso ($\sim 33^\circ S$). Se usa la información recolectada en la estación 5 de la Serie de Tiempo Oceanográfico de Valparaíso (STOV) (~ 32 km fuera de la costa). La participación de masas de agua se determinó por el método del triángulo de mezcla. La detección y seguimiento de remolinos se realizó mediante imágenes satelitales por AVISO+. Además, para comparar las características físicas y biogeoquímicas de los remolinos en relación a las condiciones normales en la zona de estudio, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) y de componentes principales (ACP).

Los resultados muestran que en la capa subsuperficial hay núcleos de alta salinidad y bajo contenido de oxígeno, los que se intensificaron en primavera y verano. Además, ASAA, AESS y AIAA son las tres masas de agua predominantes en la zona de estudio hasta los 1000 m, y que en presencia de remolinos de mesoescala la participación de AESS supera el 75 %. Nueve remolinos anticiclónicos fueron detectados en el periodo entre 2015 y 2020 en la zona de estudio. Estos remolinos

fueron diferentes física y biogeoquímicamente respecto a las condiciones de la zona de estudio, caracterizándose por una menor concentración de oxígeno disuelto, pero más concentración de CO_2 y N_2O ; junto con un mayor déficit de nitrógeno.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1. Introducción	1
2. Objetivos e hipótesis	8
2.1. Objetivo general	8
2.2. Objetivos específicos	8
2.3. Hipótesis	9
3. Metodología	10
3.1. Área y periodo de estudio	10
3.2. Datos	11
3.3. Masa de agua	12
3.4. Detección de remolinos	12
3.5. Análisis estadístico	13
4. Resultados	14
4.1. Variabilidad de la columna de agua	14
4.2. Masa de agua	18
4.3. Relación entre variables físicas y biogeoquímicas	24
4.4. Remolinos de mesoescala	30
4.5. Diferencia en la columna de agua con y sin remolinos	35
5. Discusión	45
5.1. Características oceanográficas	46
5.2. Meteotsunami	49
5.3. Presencia de remolinos de mesoescala	49
5.4. Biogeoquímica de los remolinos de mesoescala	52
6. Conclusión	58
Referencias	68
Apéndices	68

A.

68

B.

69

Índice de tablas

3.1.1. Detalle de muestreo de la Serie de Tiempo Oceanográfico de Valparaíso (STOV).	10
4.2.1. Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g/L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nitroso ($n\text{M}$), N^* , C:N, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g/L}$) de agua subantártica (ASAA), agua ecuatorial subsuperficial (AESS) y agua intermedia antártica (AIAA).	23
4.3.1. Correlación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g/L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nitroso, metano ($n\text{M}$), N^* , C:N, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g/L}$), utilización aparente de oxígeno (AOU), saturación de dióxido de carbono (%), saturación de óxido equivalente, producción de óxido nitroso de agua subantártica (ASAA) con p-value $<0,05$. Las marcadas con rojo son aquellas correlaciones estadísticamente significativas $>0,5$	26
4.3.2. Correlación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g/L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nitroso, metano ($n\text{M}$), N^* , C:N orgánica, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g/L}$), utilización aparente de oxígeno (AOU), saturación de dióxido de carbono (%), saturación de óxido equivalente, producción de óxido nitroso de agua ecuatorial subsuperficial (AESS) con p-value $<0,05$. Las marcadas con rojo son aquellas correlaciones estadísticamente significativas $>0,5$	27
4.3.3. Correlación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g/L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nitroso, metano ($n\text{M}$), N^* , C:N orgánica, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g/L}$), utilización aparente de oxígeno (AOU), saturación de dióxido de carbono (%), saturación de óxido equivalente, producción de óxido nitroso de agua intermedia antártica (AIAA) con p-value $<0,05$. Las marcadas con rojo son aquellas correlaciones estadísticamente significativas $>0,5$	28

4.3.4. Correlación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g}/\text{L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nitroso ($n\text{M}$), N^* , C:N orgánica, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g}/\text{L}$), utilización aparente de oxígeno (AOU), saturación de dióxido de carbono (%), saturación de óxido equivalente, producción de óxido nitroso en la zona de remolinos ($\text{O}_2 < 1 \text{ mL}^{-1}$ & salinidad $> 34,6$) con p-value $< 0,05$. Las marcadas con rojo son aquellas correlaciones estadísticamente significativas $> 0,5$	29
4.4.1. Inicio y final de la señal de remolino anticiclónico que pasan por la estación; inicio y final de la detección del remolino anticiclónico. Además del período de desfase en días entre la señal del remolino en la estación y la detección de este mismo mar adentro.	30
B.0.1 ANOVA de bloque de 0 a 100 m de las variables de temperatura, salinidad, oxígeno, fluorescencia, dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) fosfato (PO_3^{-4}), ácido silícico ($\text{Si}(\text{OH})_4^-$) y amonio (NH_4^+). $H_0: \mu_{\text{remolino}} = \mu_{\text{noremolino}}$; $H_a: \mu_{\text{remolino}} \neq \mu_{\text{noremolino}}$	71
B.0.2 ANOVA de bloque de 100 a 400 m de las variables de temperatura, salinidad, oxígeno, fluorescencia, dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) fosfato (PO_3^{-4}), ácido silícico ($\text{Si}(\text{OH})_4^-$) y amonio (NH_4^+). $H_0: \mu_{\text{remolino}} = \mu_{\text{noremolino}}$; $H_a: \mu_{\text{remolino}} \neq \mu_{\text{noremolino}}$	72
B.0.3 ANOVA de bloque de 400 a 900 m de las variables de temperatura, salinidad, oxígeno, fluorescencia, dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) fosfato (PO_3^{-4}), ácido silícico ($\text{Si}(\text{OH})_4^-$) y amonio (NH_4^+). $H_0: \mu_{\text{remolino}} = \mu_{\text{noremolino}}$; $H_a: \mu_{\text{remolino}} \neq \mu_{\text{noremolino}}$	73

Índice de figuras

1.0.1. Esquema general de las corrientes superficiales en el Pacífico Sur Oriental, se muestra la Deriva del Viento del Oeste (WWD), la Corriente de Humboldt (HC, de Perú-Chile), la Corriente de Cabo de Hornos (CHC), la Corriente Costera de Chile (CCC), la Corriente Costera de Perú (PCC), la Contracorriente Perú-Chile (PCCC), la Corriente Ecuatorial del Sur (SEC). Extraído de Thiel et al., 2007.	3
1.0.2. Distribución vertical de los porcentajes de masas de agua de la sección longitudinal de las costas fuera de Perú y Chile (10°-52°S) de las expediciones KRILL, SCORPIO y PIQUERO. Agua Subtropical (AST; STW), Agua Subantártica (ASAA; SAAW), Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS; ESSW), Agua Intermedia Antártica (AIAA; AAIW), y Agua Profunda del Pacífico (APP; PDW). Extraído de Silva et al., 2009.	4
1.0.3. Desplazamiento de la isopicna de acuerdo a cada remolino. a) Ciclónico, b) Anticiclónico y c) Intratermoclina (ITEs). Una línea representa la termoclina estacional (ρ_1) y la otra la termoclina principal (ρ_2). Extraída de McGillicuddy et al., 1999.	5
3.1.1. Área de estudio de la Serie de Tiempo Oceanográfica de Valparaíso (STOV), frente a Punta Ángeles. El triángulo negro marca la estación 5.	11
4.1.1. Series de tiempo de la estación 5 de temperatura (°C), salinidad, sigma-t (kg/m^3) y oxígeno disuelto (μM) desde 2015 hasta enero del 2020 entre la superficie y 1000 m de profundidad.	15
4.1.2. Series de tiempo de la estación 5 de fluorescencia ($\mu g/L$), carbono y nitrógeno orgánico, amonio y nitrito (μM) desde 2015 hasta enero del 2020 entre la superficie y 1000 m de profundidad.	16
4.1.3. Series de tiempo de la estación 5 de N*, amonio, nitrito, nitrato, fosfato y ácido silícico (μM) desde 2015 hasta enero del 2020 entre la superficie y 1000 m de profundidad.	17

4.1.4.Series de tiempo de la estación 5 de Utilización Aparente de Oxígeno (AOU), C:N, dióxido de carbono (μM), óxido nítrico (nM), porcentaje de saturación de dióxido de carbono y producción aparente de óxido nítrico, desde 2015 hasta enero del 2020 entre la superficie y 1000 m de profundidad.	18
4.2.1.Porcentaje de masa de agua desde la superficie hasta 1000 m de la estación 5 desde 2015 hasta enero del 2020. Agua subantártica (SAAW; ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW; AESS) y Agua Intermedia Antártica (AIWW; AIAA).	19
4.2.2.Diagrama T-S de la estación 5 de oxígeno disuelto, nitrato, nitrito, fosfato y ácido silícico (μM). Los triángulos negros marcan los núcleos del Agua Subantártica (SAAW; ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW; AESS) y Agua Intermedia Antártica (AAIW; AIAA).	20
4.2.3.Diagrama T-S de la estación 5 de amonio, dióxido de carbono, óxido nítrico y déficit de nitrógeno. Los triángulos negros marcan los núcleos del Agua Subantártica (SAAW; ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW; AESS) y Agua Intermedia Antártica (AAIW; AIAA).	21
4.2.4.Diagrama T-S de la estación 5 de la razón de Redfield (C:N), carbono y nitrógeno orgánico de la materia orgánica ($\mu g/L$). Los triángulos negros marcan los núcleos del Agua Subantártica (SAAW; ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW; AESS) y Agua Intermedia Antártica (AAIW; AIAA).	22
4.2.5.Porcentaje de masa de agua de la estación 5 aplicado el criterio para detectar remolinos, oxígeno <45 (μM) y salinidad $>34,6$. Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS).	24
4.4.1.Imágenes satelitales de anomalías del nivel del mar con velocidad geostrófica. El triángulo negro indica la estación y las líneas azules indica la detección de remolinos anticiclónicos. IS indica el inicio de la señal del RA en la estación y ID el inicio de la detección del RA para el período 2015.	31
4.4.2.Imágenes satelitales de anomalías del nivel del mar con velocidad geostrófica. El triángulo negro indica la estación y las líneas azules indica la detección de remolinos anticiclónicos. IS indica el inicio de la señal del RA en la estación y ID el inicio de la detección del RA para el período 2017.	31
4.4.3.Imágenes satelitales de anomalías del nivel del mar con velocidad geostrófica. El triángulo negro indica la estación y las líneas azules indica la detección de remolinos anticiclónicos. IS indica el inicio de la señal del RA en la estación y ID el inicio de la detección del RA para el período 2018.	32

4.4.4. Imágenes satelitales de anomalías del nivel del mar con velocidad geostrofica. El triángulo negro indica la estación y las líneas azules indica la detección de remolinos anticiclónicos. IS indica el inicio de la señal del RA en la estación y ID el inicio de la detección del RA para el período 2019.	32
4.4.5. Series de tiempo de anomalías del nivel del mar (cm ; negro), anomalías climatológicas de EKE (morado; cm^2/s^2), temperatura (naranja; $^{\circ}C$) salinidad (rojo), oxígeno (azul; μM), nitrato (celeste; μM), dióxido de carbono (verde; μM) y óxido nítrico (amarillo; nM) a 200 m en los períodos de 2015, 2016 y 2017. Además se señalan el inicio de la señal (IS), el final de la señal (FS) de los remolinos en la estación; el inicio de la detección (ID) y final de la detección (DF) de los remolinos.	33
4.4.6. Series de tiempo de anomalías del nivel del mar (cm ; negro), anomalías climatológicas de EKE (morado; cm^2s^{-2}), temperatura (naranja; $^{\circ}C$) salinidad (rojo), oxígeno (azul; μM), nitrato (celeste; μM), dióxido de carbono (verde; μM) y óxido nítrico (amarillo; nM) a 200m en los períodos de 2018, 2019 y 2020. Además se señalan el inicio de la señal (IS), el final de la señal (FS) de los remolinos en la estación; el inicio de la detección (ID) y final de la detección (DF) de los remolinos.	34
4.5.1. Perfil vertical temperatura ($^{\circ}C$), salinidad y oxígeno (μM). La línea roja representa el promedio de los períodos sin remolinos y la línea azul los períodos con remolinos.	36
4.5.2. Perfil vertical de fluorescencia, carbono y nitrógeno orgánico de materia orgánica oxígeno ($\mu g/L$) y nitrito y amonio (μM). La línea roja representa el promedio de los períodos sin remolinos y la línea azul los períodos con remolinos.	36
4.5.3. Perfil vertical de (a) dióxido de carbono (μM), óxido nítrico y producción aparente de óxido nítrico (nM) y C:N, (b) N^* , nitrato, nitrito, fosfato, amonio y ácido silícico (μM). La línea roja representa el promedio de los períodos sin remolinos y la línea azul los períodos con remolinos.	38
4.5.4. Porcentaje de varianza contenida en las primeras 9 componentes principales de las masas de agua ASAA, AESS y AIAA.	39
4.5.5. Primera y segunda componente principal de la masa de agua ASAA. Los números de cada punto indican las fechas y la profundidad de la muestra, siendo los últimos dígitos la profundidad. (a) Los círculos azules son los períodos sin remolinos y los triángulos rojos son cuando hay remolinos. (b) describe por profundidad.	41
4.5.6. Primera y segunda componente principal de la masa de agua AESS. Los números de cada punto indican las fechas y la profundidad de la muestra, siendo los últimos dígitos la profundidad. (a) Los círculos azules son los períodos sin remolinos y los triángulos rojos son cuando hay remolinos. (b) describe por profundidad.	42

4.5.7. Primera y segunda componente principal de la masa de agua AIAA. Los números de cada punto indican las fechas y la profundidad de la muestra, siendo los últimos dígitos la profundidad. (a) Los círculos azules son los períodos sin remolinos y los triángulos rojos son cuando hay remolinos. (b) describe por profundidad.	43
A.0.1. Primeras y segunda componente principal de la masa de agua AESS. Los números de cada punto indican las fechas y la profundidad de la muestra, siendo el los últimos dígitos la profundidad.	68

Capítulo 1

Introducción

El Sistema de Corrientes de Perú-Chile (PCCS) corresponde a uno de los cuatro mayores Sistema de Borde Oriental (EBUS) del mundo (Strub et al., 1998), extendiéndose desde 5°S hasta el sur de Chile ($\sim 42^{\circ}\text{S}$; Karstensen & Ulloa., 2009). El Sistema de Corriente de Perú-Chile (Figura 1.0.1), también llamado Sistema de Corriente de Humboldt (HCS; Czeschel et al., 2011), entre 18°S y $\sim 40^{\circ}\text{S}$, presenta una compleja oceanografía costera, en la que la corriente principal, hacia el Ecuador, está envuelta por un conjunto de contracorrientes y subcorrientes, cuya anchura, localización e intensidad también varían en el tiempo. El flujo principal de la corriente está localizado entre 75° y 85°W (Thiel et al., 2007).

Esta región se caracteriza por ser uno de los sistemas marinos más productivos, y de mantener una de las zonas de mínimo oxígeno (ZMO) más extensa e intensa del océano global (Morales & Lange, 2004). Estas ZMOs son relativamente pobres en oxígeno (Czeschel et al., 2011) y están caracterizadas por concentraciones $< 45 \mu\text{M}$ (Morales et al., 2012). Estas regiones de bajo contenido de oxígeno son conocidas por desempeñar un papel esencial en el ciclo global del nitrógeno, específicamente asociadas con la desnitrificación (Paulmier & Ruiz-Pino, 2009), y por los procesos biogeoquímicos que se producen en condiciones subóxicas y anóxicas (Escribano et al., 2003).

El forzamiento del viento en el Pacífico Sur Oriental (PSO) está dominado por la influencia del anticiclón Subtropical del Pacífico Sur Oriental, que genera vientos favorables a la surgencia (Thiel et al., 2007). Durante los eventos de surgencia agua más fría, rica en nutrientes y pobre en oxígeno (Strub et al., 1998) es

transportada desde la capa subsuperficial hacia la superficie. La surgencia costera, impulsada por el viento (entre 18 y 40°S), lleva Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) a la superficie en la zona costera, generando una ZMO poco profunda y persistente (Escribano et al., 2003). Además de los vientos en dirección al Ecuador, la estratificación de la columna de agua, la topografía costera y la dependencia de la latitud del parámetro de Coriolis desempeñan un papel importante en la surgencia (Chavez & Messié, 2009). En general, las zonas de surgencia están asociadas a alta productividad y altas concentraciones de Clorofila-a (Chl-a; Morales et al., 2001). A lo largo de la costa chilena varias zonas son reconocidas por fuertes eventos de surgencia, como Antofagasta (23°S), Coquimbo (30°S), Valparaíso (33°S) y Concepción (37°S), que suelen producirse principalmente en verano y primavera (Figuroa & Moffat, 2000).

El Sistema de Borde Oriental (EBUS) está influenciado por El Niño/La Niña-Oscilación del Sur (ENSO), uno de los modos más fuertes de variabilidad interanual en el sistema global océano/atmósfera. El Niño y La Niña se refieren, respectivamente, a las fases oceánicas cálidas y frías de la superficie del Océano Pacífico central y oriental (Llanillo et al., 2013). La surgencia se reduce durante las fases cálidas del ENSO, provocando, una importante reducción de la producción primaria y un dramático empobrecimiento de todo el ecosistema marino (Escribano et al., 2004). Así, durante El Niño, se observan isotermas de agua fría en la franja costera, que están asociadas a procesos locales como surgencia, caracterizándose por ser más cálidas que un período normal y reportar menores gradientes de temperatura. Durante La Niña, los vientos hacia el Ecuador se intensifican, generando que los eventos de surgencia sean más frecuentes y con una mayor extensión longitudinal desde la costa hacia el océano (Bello et al., 1997).

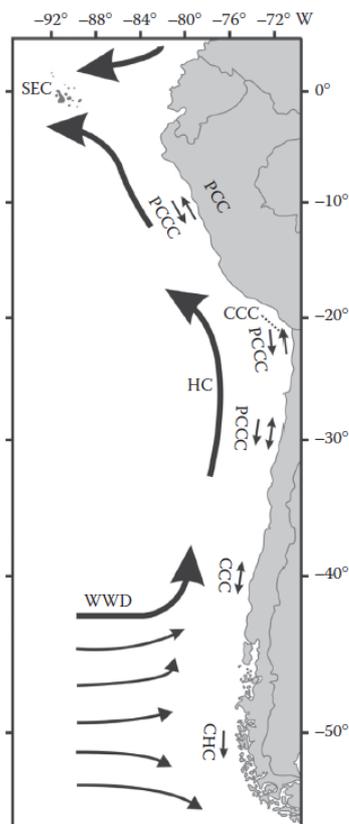


Figura 1.0.1: Esquema general de las corrientes superficiales en el Pacífico Sur Oriental, se muestra la Deriva del Viento del Oeste (WWD), la Corriente de Humboldt (HC, de Perú-Chile), la Corriente de Cabo de Hornos (CHC), la Corriente Costera de Chile (CCC), la Corriente Costera de Perú (PCC), la Contracorriente Perú-Chile (PCCC), la Corriente Ecuatorial del Sur (SEC). Extraído de Thiel et al., 2007.

A lo largo del PSO, se distinguen verticalmente 5 masas de agua distintas (Figura 1.0.2), que según Silva & Konow (1975) son: Agua Subtropical (AST), Agua Subantártica (ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS), Agua Intermedia Antártica (AIAA), y Agua Profunda del Pacífico (APP). De estas, las AST y ASAA son superficiales; la primera es encontrada al norte ($<18^{\circ}\text{S}$) y la segunda al sur (Carr & Kearns, 2003). La AST se localiza en la capa superficial, sobre 50 m entre 10°S a 24°S , con temperatura de 20°C y salinidad de 35,2. Mientras que, el ASAA se encuentra predominantemente ($>50\%$) desde 52°S a 28°S , con temperatura media de $11,5^{\circ}\text{C}$ y salinidad de 33,8. En cuanto a la AESS, se localiza bajo la AST y ASAA, en el norte y sur de la región, respectivamente; Esta masa de agua presenta una salinidad de 34,9 y temperatura $\sim 12,5^{\circ}\text{C}$. La AIAA se encuentra entre 400 y 1200 m de profundidad con una salinidad de 34,0 y temperatura de

3°C. Por último, la APP se localiza bajo la AIAA, a profundidades entre 1000 y 1200 m, hasta el fondo marino, con temperaturas 1,75°C y salinidad de 34,68. Además, el contenido de oxígeno disuelto de los núcleos de las AST, ASAA, AESS, AIAA y APP es 240,65, 268,2, 13,6, 238,2 y 105.2 μmolkg^{-1} (Llanillo et al, 2013), junto con otras especies biogeoquímicas.

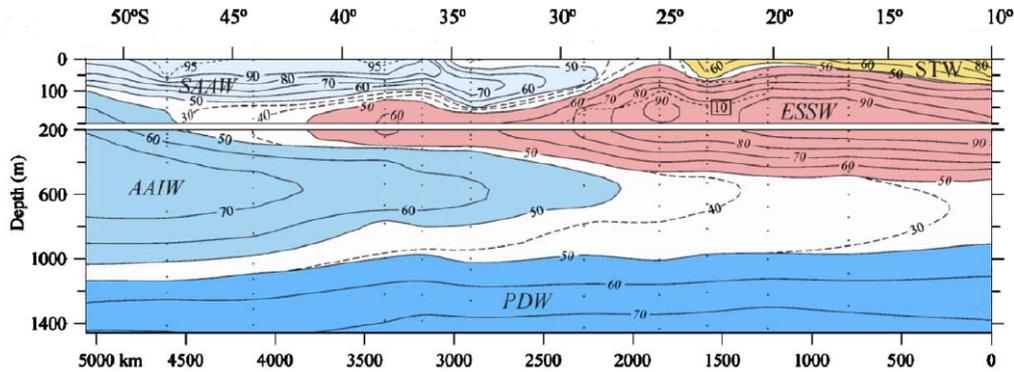


Figura 1.0.2: Distribución vertical de los porcentajes de masas de agua de la sección longitudinal de las costas fuera de Perú y Chile (10°-52°S) de las expediciones KRILL, SCORPIO y PIQUERO. Agua Subtropical (AST; STW), Agua Subantártica (ASAA; SAAW), Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS; ESSW), Agua Intermedia Antártica (AIAA; AAIW), y Agua Profunda del Pacífico (APP; PDW). Extraído de Silva et al., 2009.

Los EBUS, por otra parte, también son conocidos por ser ambientes altamente dinámicos donde los procesos de submesoescala (10 km) y mesoescala (100 km), contribuyen a intensas interacciones entre la surgencia costera y las aguas del océano abierto (Morales et al., 2012). Esta zona, se caracteriza por una alta EKE ($>40 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$) extendiéndose desde la costa hasta 600-800 km mar adentro (Hormazabal et al., 2004).

La variabilidad a mesoescala se produce en forma de ondas lineales de Rossby y vórtices no lineales o remolinos (Chelton et al., 2007; Stramma et al., 2013, 2014). Los remolinos de mesoescala son estructuras presentes en todos los océanos, y desempeñan un papel importante en la transferencia de energía y propiedades del agua a través de diferentes escalas espaciales y temporales. Entre estas propiedades las más estudiadas son las propiedades físicas, que son transportadas por grandes distancias de su región de formación, pero también influyen en la distribución de las propiedades químicas y biogeoquímicas (Chaigneau et al., 2009; Frenger et al., 2018; Karstensen & Ulloa, 2009; Morales et al., 2017). El transporte de nitrógeno

y carbono por los remolinos afectan al balance biogeoquímico, pero este ha sido difícil de evaluar a partir de las mediciones disponibles hasta ahora (Mahadevan, 2014). En general, pocos estudios se han concentrado en el impacto biogeoquímico de los remolinos de mesoescala (Xiu & Chai, 2011).

En el PSO los remolinos de mesoescala son generados, principalmente, por inestabilidades de las corrientes a lo largo de la costa (Colas et al., 2012; Hormazabal et al., 2004; Contreras et al., 2019). Se reconocen tres tipos de remolinos de mesoescala: Ciclónicos, Anticiclónicos y remolinos intratermoclina, el sentido de giro de estos últimos es el mismo que los anticiclones normales (McGillicuddy et al., 2007), siendo en contra del reloj en el hemisferio sur (HS), mientras que, los remolinos ciclónicos rotan en sentido del reloj. Los remolinos intratermoclina afectan la subsuperficie y también son denominados en la literatura como remolinos subtermoclina. Los remolinos intratermoclina (por sus siglas en inglés ITEs) suelen afectar a una mayor parte de la columna de agua y provocan desplazamientos en ambas termoclinas (Morales et al., 2012), produciendo una forma de lente en la subsuperficie (Figura 1.3c). Los remolinos ciclónicos (anticiclónicos) superficiales, por otra parte, desplazan verticalmente la termoclina estacional hacia arriba (abajo; Figura 1.0.3; Cornejo-Guzman, 2017). Una característica de las trayectorias de los remolinos es la fuerte tendencia a la propagación hacia el oeste, los remolinos ciclónicos tienden a desviarse hacia el polo, mientras que, los anticiclónicos hacia el Ecuador (Chelton et al., 2007).

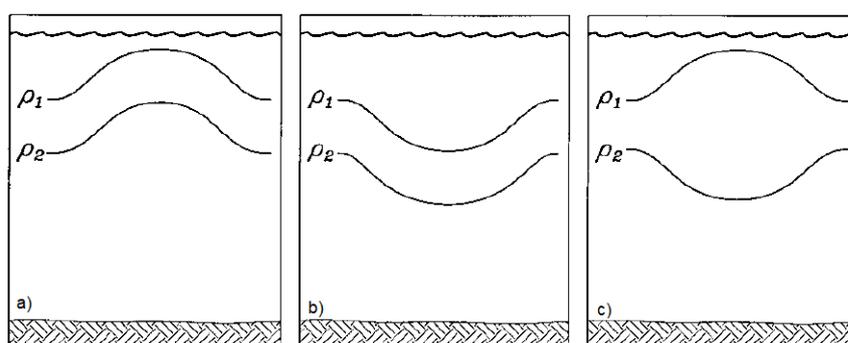


Figura 1.0.3: Desplazamiento de la isopicna de acuerdo a cada remolino. a) Ciclónico, b) Anticiclónico y c) Intratermoclina (ITEs). Una línea representa la termoclina estacional (ρ_1) y la otra la termoclina principal (ρ_2). Extraída de McGillicuddy et al., 1999.

Los remolinos intratermoclina se desprenden de la corriente Perú-Chile,

desplazándose mayoritariamente hacia el oeste a velocidades medias de $\sim 2 \text{ km d}^{-1}$ (Hormazabal et al., 2013) y producen un transporte de $\sim 1 \text{ Sv}$ (Andrade et al., 2014). Estos remolinos presentan su núcleo en la subtermoclina y contienen anomalías del AESS (Chaigneau et al., 2011). Presentan variaciones estacionales (Chaigneau et al., 2009), un período de aproximadamente 120 días al pasar por puntos fijos (Hormazabal et al., 2004) e interanuales, disminuyendo el número de remolinos en los años de El Niño (Combes et al., 2015), con un diámetro horizontal del orden de 100-200 km en la horizontal (Chaigneau & Pizarro, 2005a) y un espesor de $\sim 500 \text{ m}$ (Hormazabal et al., 2013). En esta región los ITEs contienen aguas con alta salinidad (>34.5) y bajo oxígeno disuelto ($<1 \text{ mL}^{-1}$, equivalente a $44,6 \mu\text{mol kg}^{-1}$), características asociadas a AESS (Andrade et al., 2014; Auger et al., 2021; Hormazabal et al., 2013; Stramma et al., 2014; Thomsen et al., 2016). Así, los ITEs transportan agua con bajo contenido de oxígeno disuelto, lo cual conduce a que sean un punto de pérdida de nitrógeno, vía desnitrificación (Arévalo-Martínez et al., 2016; Cornejo-D'Ottone et al., 2016). Además, se estudia que los remolinos de mesoescala podrían ser clave en transporte de nutrientes hacia el océano abierto (McGillicuddy et al., 1998) de tal forma, que incluso, podrían afectar a la distribución de peces pelágicos (Correa-Ramirez et al., 2007). Por otra parte, las condiciones biogeoquímicas en la zona de origen de los ITEs, como el bajo contenido de oxígeno, alta concentración de nutrientes y bajo pH características del PSO, podrían resultar en una modificación de las condiciones biogeoquímicas a lo largo del transporte de estos hacia afuera de la costa, a través de la remineralización y mayor consumo de oxígeno en sus aguas subsuperficiales.

A partir de lo señalado anteriormente, los remolinos intratermoclina impactarían no solo las características físicas de las aguas oceánicas, sino que también las biogeoquímica en la región. La magnitud de este impacto dependerá, entre otros factores, de las condiciones de origen de los ITEs. Si bien existen estudios sobre los ITEs en el PSO, no se ha estudiado profundamente cómo afectan a las zonas de mayor surgencia de las costas de Chile, como la región de Valparaíso ($\sim 33^\circ\text{S}$), y su impacto en la biogeoquímica. De aquí nace la inquietud de ¿Cómo afectan los ITEs a la columna de agua en las costas de Valparaíso?, ¿Tienen alguna relación las variables físicas con el comportamiento biogeoquímico en los remolinos? ¿Cuán diferente es la estructura vertical en la zona con y sin la presencia de estos remolinos? Este estudio pretende explorar estas interrogantes en base al análisis

de datos oceanográficos en el periodo de 2015-2020. Los resultados permitirán, además, definir las condiciones físicas y biogeoquímicas de los ITEs en la zona de origen, contribuyendo a los modelos de proyección de la evolución biogeoquímica de estos hacia afuera de la costa.

Capítulo 2

Objetivos e hipótesis

2.1. Objetivo general

Determinar la dinámica biogeoquímica en la zona de generación de remolinos de mesoescala frente a Valparaíso, comparando las características entre períodos de presencia y ausencia de remolinos.

2.2. Objetivos específicos

1. Describir la variabilidad física y biogeoquímica de la columna de agua en la zona de generación de remolinos intratermoclina de mesoescala frente a Valparaíso.
2. Determinar la distribución de masas de agua en la columna de agua en la zona de generación de remolino de mesoescala frente a Valparaíso.
3. Establecer la relación entre variables físicas y biogeoquímicas a lo largo de la columna de agua en la zona de generación de remolinos de mesoescala frente a Valparaíso.
4. Determinar la presencia de remolinos de mesoescala en la estación frente a Valparaíso.
5. Comparar la estructura vertical de la columna de agua, en términos físicos y biogeoquímicos en períodos con y sin presencia de remolinos de mesoescala.

2.3. Hipótesis

En la zona de generación de remolinos intratermoclina frente a Valparaíso ($\sim 33^{\circ}\text{S}$), en el momento que se forman estos remolinos, se produce una intensificación del aporte de Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS), haciendo que los remolinos intratermoclina inicien su transporte hacia afuera de la costa con una señal biogeoquímica caracterizada por mayores concentraciones de CO_2 , déficit de nitrógeno, y menores concentraciones de N_2O (dado por la mayor remineralización de materia orgánica por desnitrificación), en relación a las condiciones generales de la región.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Área y periodo de estudio

El área de estudio se localiza frente a Punta Ángeles ($\sim 33^\circ\text{S}$), donde entre el año 2015 y enero 2020 se desarrolló la Serie de Tiempo Oceanográfica de Valparaíso (STOV) dirigida por la Escuela de Ciencias del Mar (PUCV) y la Universidad de Playa Ancha, financiada por los proyectos FONDECYT # 1171895 (Dr. Samuel Hormazábal), 11130418 (Dra. Marcela Cornejo) y 1171324 (Dra. Verónica Molina), en conjunto con IMO (Instituto Milenio de Oceanografía), IFOP (Instituto de Fomento Pesquero), y los laboratorios de Oceanografía Física (PUCV), Biogeoquímica Marina (PUCV), Biogeoquímica de Gases de Efecto Invernadero (PUCV) y Observatorio de Ecología Microbiana (UPLA). STOV contempla 6 estaciones localizadas en una transecta perpendicular a la costa, con una extensión total de ~ 32 km.

Tabla 3.1.1: Detalle de muestreo de la Serie de Tiempo Oceanográfico de Valparaíso (STOV).

Estación	Latitud ($^\circ\text{S}$)	Longitud ($^\circ\text{O}$)	Profundidad (m)
1	$32^\circ 53.00'$	$71^\circ 56.00'$	110
2	$32^\circ 55.00'$	$71^\circ 52.00'$	135
3	$35^\circ 57.00'$	$71^\circ 48.00'$	160
4	$32^\circ 58.75'$	$71^\circ 44.00'$	630
5	$33^\circ 00.00'$	$71^\circ 42.00'$	1300
6	$33^\circ 01.00'$	$71^\circ 40.00'$	2000

La serie de tiempo cuenta con datos mensuales entre enero de 2015 y noviembre de 2016 y entre febrero de 2018 y enero del 2020, faltando data de todo el 2017.

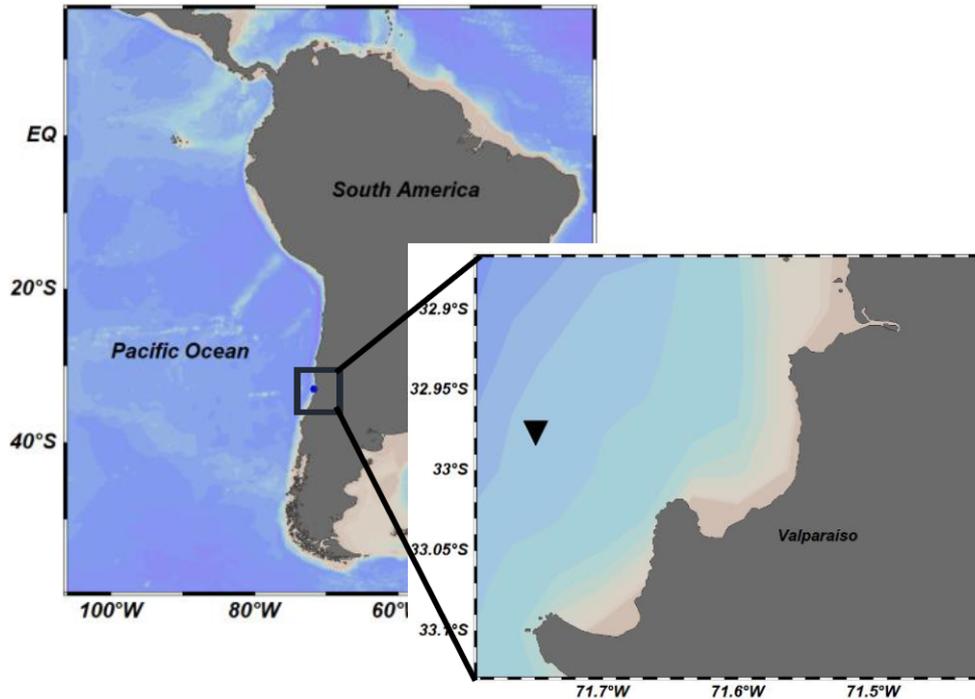


Figura 3.1.1: Área de estudio de la Serie de Tiempo Oceanográfica de Valparaíso (STOV), frente a Punta Ángeles. El triángulo negro marca la estación 5.

3.2. Datos

En la Serie de Tiempo Oceanográfica de Valparaíso (STOV) se muestreó la columna de agua de forma continua con un CTD-OF (SeaBird 25 Plus) obteniendo las variables de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia desde la superficie hasta ~ 900 - 1000 m. Además, se tomaron muestras biogeoquímicas y microbiológicas con botellas Niskin de 5 L a profundidades oceanográficas estándar (0, 5, 10, 15, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750 y 900 m). Las muestras de agua de mar obtenidas desde las botellas fueron para la determinación de oxígeno disuelto; gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O); nutrientes como nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) fosfato (PO_4^{3-}), ácido silícico ($Si(OH)_4^-$) y amonio (NH_4^+) y nitrógeno y carbono de la materia orgánica particulada.

3.3. Masa de agua

La distribución de la masa de agua de la zona de estudio se analizó mediante diagramas T-S y el método del triángulo de mezcla (Mamayev, 1975). Fue necesario definir 3 puntos que marcan los núcleos de cada masa de agua estudiada, de acuerdo a la definición de Silva & Konow (1975) para los meses que se analizaron. Finalmente, para el cálculo del porcentaje de masa de agua (PMA) se utilizó el código en Matlab generado por Reyes (2004).

3.4. Detección de remolinos

La combinación de imágenes satelitales y datos in situ son necesarios para caracterizar las estructuras en tres dimensiones (Hormazábal et al., 2013) de los remolinos intratermoclina. Se consideraron 3 criterios para la identificación de remolinos intratermoclina en la zona frente a Valparaíso: i) Alta salinidad ($\geq 34,6$), ii) Bajas concentraciones de oxígeno disuelto ($< 1 \text{ mL}^{-1}$) y iii) estas variables distribuidas en forma de “lente” o “huevo” en la capa subsuperficial (Andrade et al., 2014; Auger et al., 2021; Hormazábal et al., 2013; McGillicuddy et al., 2007; Morales et al., 2012, 2017).

Para el análisis cualitativo de remolinos de mesoescala intratermoclina en formación frente a las costas de Valparaíso se utilizaron datos diarios de anomalías del nivel del mar (ANM) y velocidad geostrofica obtenidos de Copernicus (CMEMS, 2021) de una grilla de $0,25 \times 0,25^\circ$. Los remolinos pueden diferenciarse mediante el sentido de giro o polaridad. Los remolinos ciclónicos tienen un giro en el sentido de las agujas del reloj y afectan de forma superficial (Stramma et al., 2013). Los remolinos anticiclónicos, en cambio, tienen giro en contra del sentido del reloj y tienen actividad principalmente en la subsuperficie (Chaigneau et al., 2011; Colas et al., 2012; Johnson & McTaggart, 2010).

En cuanto a la detección cuantitativa de remolinos de mesoescala se utilizó la versión 2.0 y 3.2 del producto global de trayectorias de remolinos de mesoescala de AVISO+. Estos datos proporcionan de forma libre las trayectorias de los remolinos de mesoescala alrededor del mundo. La versión 2.0 está basada en campos DT-2014 daily (two-satellite merged) sea level anomaly (Schalax y Chelton., 2016), abarca el período desde 1993 hasta 2018, con un error de 1-45 cm y un mínimo de 28 días de

vida del remolino. La versión 3.2 basada en compos-2014 NRT daily (all-satellite merged) absolute dynamic topography (Mason et al., 2014; Pegliasco et al., 2021), abarca el periodo desde 2018 hasta 2021, con un error de 0,4 cm y un mínimo de 10 días de vida del remolino.

3.5. Análisis estadístico

Para comparar la estructura vertical de la columna de agua entre períodos con presencia y ausencia de remolinos intratermoclina, se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar si existían diferencias significativas de las condiciones biogeoquímicas bajo ambas condiciones. Además, se realizó un análisis de componentes principales (ACP), para encontrar la variabilidad y comportamiento entre las especies físicas y biogeoquímicas.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Variabilidad de la columna de agua

De acuerdo a la temperatura y salinidad (Figura 4.1.1), la columna de agua en la estación 5 presenta un comportamiento esperado, de acuerdo a lo descrito previamente por Silva et al. (2009). En la capa superficial se observan las mayores temperaturas en verano formando núcleos de aguas más cálidas que en el resto del año. En la capa subsuperficial, las isotermas de 12° y 13°C en general presentan levantamientos y profundización en los mismos periodos del año. Sin embargo, en algunos meses se observa un levantamiento de la isoterma de 12°C mientras que una profundización de la isoterma de 13°C (e.g., enero 2015, julio 2015, noviembre 2016). En cuanto a la salinidad, las aguas de la capa superficial presentan los menores valores asociados a aguas de menor densidad, mientras que en la capa subsuperficial se puede apreciar un centro de alta salinidad entre 100 y 400 m. Estas aguas más salinas están asociadas a bajas concentraciones de oxígeno disuelto ($<45 \mu M$). Tanto el comportamiento de la salinidad como el del oxígeno presentan núcleos en forma de lente en los periodos de separación de las isotermas de 12° y 13°C, como el que se busca identificar en los remolinos intratermoclina.

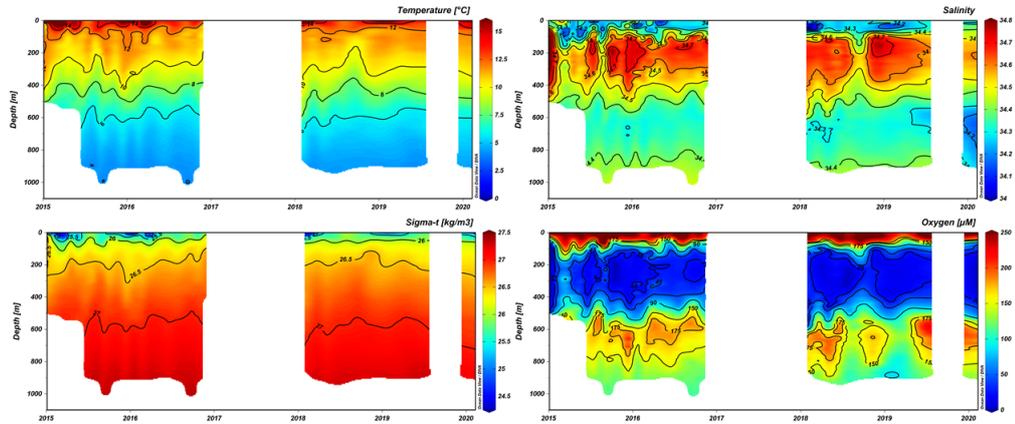


Figura 4.1.1: Series de tiempo de la estación 5 de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, sigma-t (kg/m^3) y oxígeno disuelto (μM) desde 2015 hasta enero del 2020 entre la superficie y 1000 m de profundidad.

Con respecto a la fluorescencia, en la zona de estudio se presentan las mayores concentraciones en los primeros 40 m (Figura 4.1.2), con máximos cada primavera y verano de los años analizados ($>2 \mu\text{g}/\text{L}$). Asimismo, las mayores concentraciones de nitrito y amonio se presentan principalmente en los primeros 100 m, en períodos donde la fluorescencia fue menor. El desarrollo de máximos para ambos nutrientes coincidió en el tiempo. Sin embargo, estos máximos fueron más intensos para el amonio, donde las concentraciones son $>0,4 \mu\text{M}$ y tienen una mayor extensión vertical que las aguas con mayor concentración de nitrito. Bajo los 100 m, en general no se detectaron concentraciones de nitrito ($0 \mu\text{M}$). Sin embargo, durante la primavera 2015 se presentan concentraciones de nitrito de $0,1 \mu\text{M}$ a lo largo de toda la columna de agua. En el caso del amonio, en el verano del 2015 los máximos no solo se presentan en la zona superficial sino que se extienden por la columna de agua con concentraciones $>0,3 \mu\text{M}$ hasta 500 m. Estas concentraciones están presentes a lo largo de casi toda la primera mitad del 2015 disminuyendo a $<0,2 \mu\text{M}$ en la primavera del 2015 (Figura 4.1.3). En este periodo, además, se presenta un máximo a 1000 m de profundidad con valores $>0,2 \mu\text{M}$ de amonio.

La concentración de carbono y nitrógeno orgánico presenta valores máximos en la capa superficial (>200 y $30 \mu\text{g}/\text{L}$, respectivamente; Figura 4.1.2) y tiene una variabilidad similar a lo largo del período de estudio en los primeros 100 m.

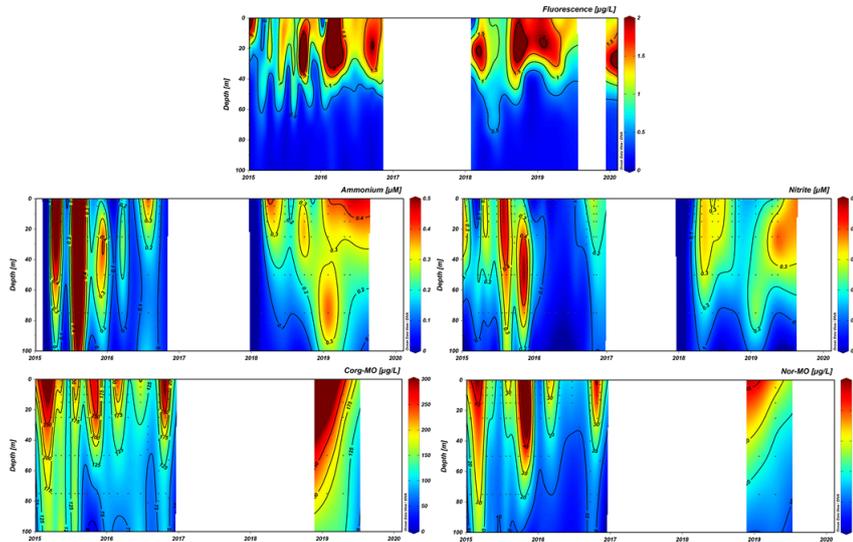


Figura 4.1.2: Series de tiempo de la estación 5 de fluorescencia ($\mu\text{g}/\text{L}$), carbono y nitrógeno orgánico, amonio y nitrito (μM) desde 2015 hasta enero del 2020 entre la superficie y 1000 m de profundidad.

Con respecto al resto de los nutrientes analizados (nitrato, fosfato y ácido silícico; Figura 4.1.3), las menores concentraciones se encuentran en la superficie, coincidente con las mayores concentraciones de fluorescencia. Bajo este mínimo, las concentraciones de nutrientes aumentan con la profundidad presentando máximos que varían dependiendo del nutriente. El nitrato presenta un aumento de concentración hasta 300 m, bajo el cual las concentraciones fueron casi homogéneas, con concentraciones de $\sim 35 \mu\text{M}$ a lo largo de todo el periodo analizado. Sin embargo, en la primavera del año 2015 se observa una anomalía en toda la columna de agua con concentraciones menores a $25 \mu\text{M}$. En cuanto al fosfato, en la superficie se observan concentraciones $< 1,5 \mu\text{M}$, aumentando rápidamente bajo ~ 100 m, con concentraciones superiores a $2,5 \mu\text{M}$ en toda la columna de agua durante el período de tiempo estudiado. A diferencia del nitrato, la distribución vertical de fosfato presenta un máximo ($> 2,8 \mu\text{M}$) entre ~ 100 y 400 m y a 1000 m. El máximo de la capa subsuperficial presenta mayores acumulaciones en algunos períodos asociados a los núcleos de alta salinidad y bajo contenido de oxígeno. Por último, el ácido silícico, al igual que los otros nutrientes, contiene las menores concentraciones en superficie ($< 7,5 \mu\text{M}$), aumentando rápidamente bajo 100 m. Entre 100 y 700 m se encuentran centros de alta concentración ($25 \mu\text{M}$), atípicamente a lo visto, en otoño del 2015 se presentan concentraciones menores

a $17 \mu M$ concordando en la misma fecha en que en el amonio se ven conductas atípicas. Bajo 700 m, el ácido silícico es cuasi homogéneo y con las concentraciones máximas observadas del orden de $30 \mu M$.

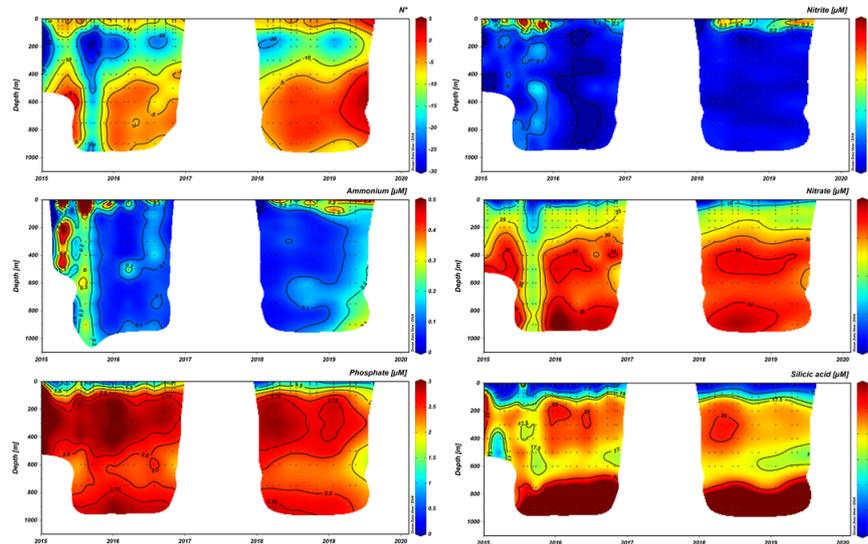


Figura 4.1.3: Series de tiempo de la estación 5 de N^* , amonio, nitrito, nitrato, fosfato y ácido silícico (μM) desde 2015 hasta enero del 2020 entre la superficie y 1000 m de profundidad.

Los gases de efecto invernadero (GEI), óxido nitroso y dióxido de carbono, presentan las menores concentraciones en los primeros metros de la columna de agua, con concentraciones menores a $15 nM$ y $40 \mu M$, respectivamente (Figura 4.1.4). Las mayores concentraciones de dióxido de carbono se presentan entre 100 y 500 m, con valores $>90 \mu M$. Las mayores concentraciones de óxido nitroso están entre 400 y 700 m con concentraciones $>35 nM$. En el año 2019, a diferencia del resto del período de estudio, el óxido nitroso presenta concentraciones de $\sim 35 nM$ a 150m. En cuanto al porcentaje de saturación de dióxido de carbono y producción aparente de óxido nitroso, se presentan los mayores valores ($>400\%$ y $>27,5 nM$, respectivamente), de manera lógica, en la mismas zonas donde se presentan las mayores concentraciones de óxido nitroso y dióxido de carbono.

Las mayores concentraciones de Utilización Aparente de Oxígeno (AOU, por sus siglas en inglés) se localizan entre 150 y 600 m, mientras que en esta zona se presentan los menores valores de N^* ($<20 \mu M$; Figura 4.1.3), un trazador de la deficiencia de nitrógeno y de la activación de la desnitrificación en la zona. Particularmente, en la primavera del 2015 el déficit de nitrógeno se extiende en

gran parte de la columna de agua, incluso bajo 600 m. Por otro lado, la razón de Redfield de la materia orgánica particulada (C:N) varía entre 5 y 16. Los menores valores se presentan en la superficie, aumentando con la profundidad. A excepción de la primavera del 2015 donde se extiende en toda la columna de agua valores <5 .

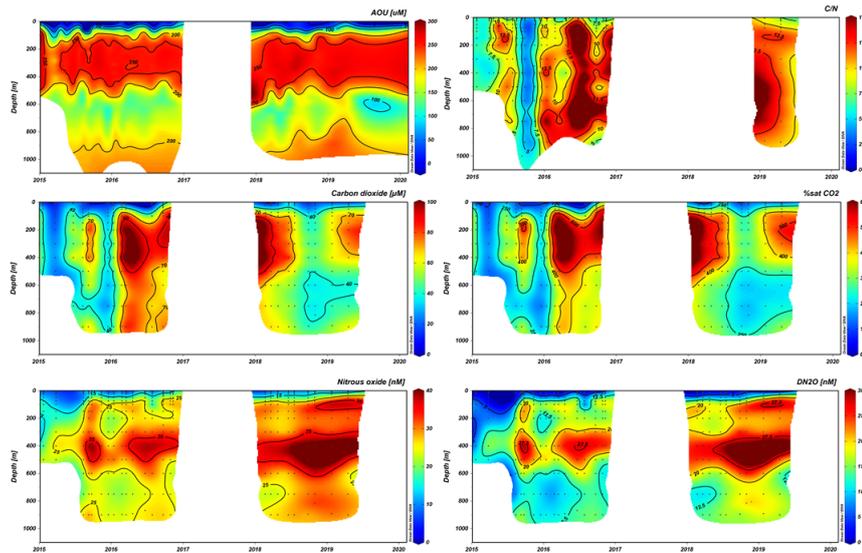


Figura 4.1.4: Series de tiempo de la estación 5 de Utilización Aparente de Oxígeno (AOU), C:N, dióxido de carbono (μM), óxido nítrico ($n\text{M}$), porcentaje de saturación de dióxido de carbono y producción aparente de óxido nítrico, desde 2015 hasta enero del 2020 entre la superficie y 1000 m de profundidad.

4.2. Masa de agua

A partir de la Figura 4.2.1 se puede establecer que las masas de agua predominantes en la región de estudio son la Agua Subantártica (ASAA) en los primeros ~ 100 m, seguida de la Agua Ecuatorial Subsuperficial (AEES) localizada entre ~ 100 y 400 m. La presencia de AEES es mayor en periodos en donde se observa un comportamiento diferente de las isotermas de 12° y 13° C (ascenso y hundimiento, respectivamente). Bajo 400 m se encuentra la Agua Intermedia Antártica (AIAA) llegando hasta ~ 1000 m.

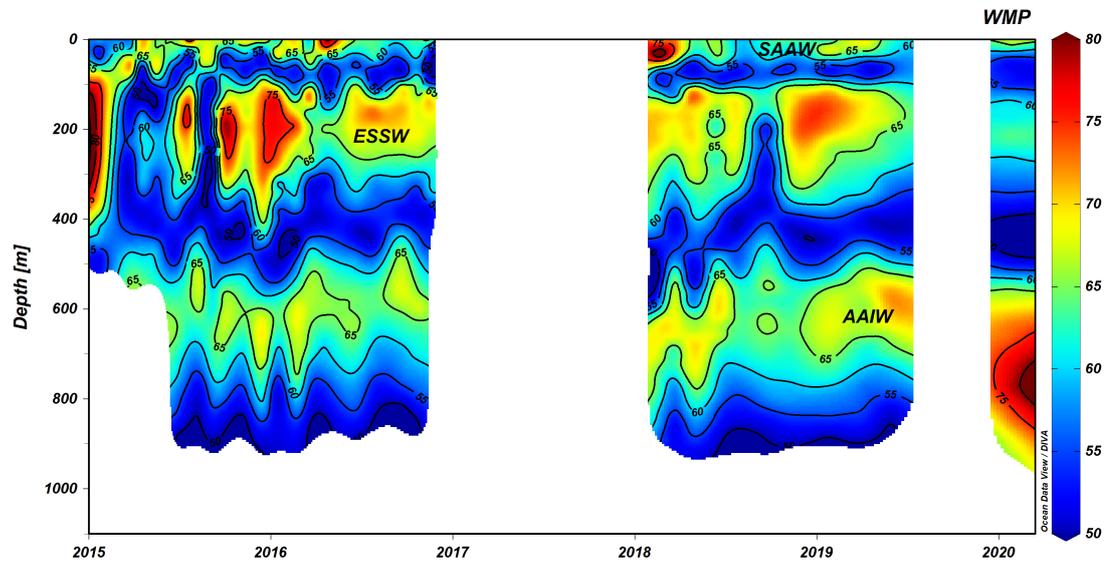


Figura 4.2.1: Porcentaje de masa de agua desde la superficie hasta 1000 m de la estación 5 desde 2015 hasta enero del 2020. Agua subantártica (SAAW; ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW; AESS) y Agua Intermedia Antártica (AAIW; AIAA).

El análisis de las componentes biogeoquímicas (Figura 4.2.2, 4.2.3) asociadas a las masas de agua muestra que las menores concentraciones de oxígeno disuelto se encuentran en la AESS, junto con un mayor déficit de nitrógeno, teniendo los valores de N^* más bajos en esta capa (i.e., mayores déficit de nitrógeno). La ASAA, en cambio, presenta las mayores concentraciones de oxígeno, al ser la masa de agua más cercana a la superficie. A su vez, en esta última masa de agua se encuentran las menores concentraciones de nitrato, fosfato y ácido silícico, mientras que presenta las mayores concentraciones de nitrito. En cuanto a los gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono y óxido nítrico presentan bajas concentraciones en la ASAA, en tanto que en la AIAA se presentan concentraciones homogéneas. El amonio presenta concentraciones homogéneas en la AESS y AIAA, mientras que, en la ASAA presenta concentraciones mayores.

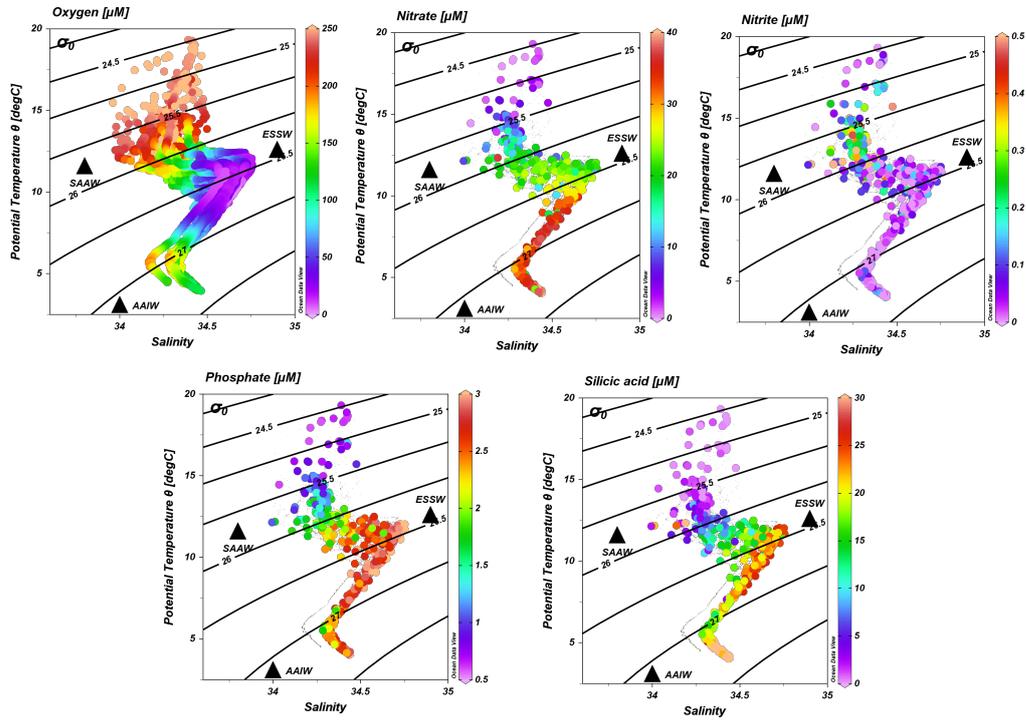


Figura 4.2.2: Diagrama T-S de la estación 5 de oxígeno disuelto, nitrato, nitrito, fosfato y ácido silícico (μM). Los triángulos negros marcan los núcleos del Agua Subantártica (SAAW; ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW; AESS) y Agua Intermedia Antártica (AAIW; AIAA).

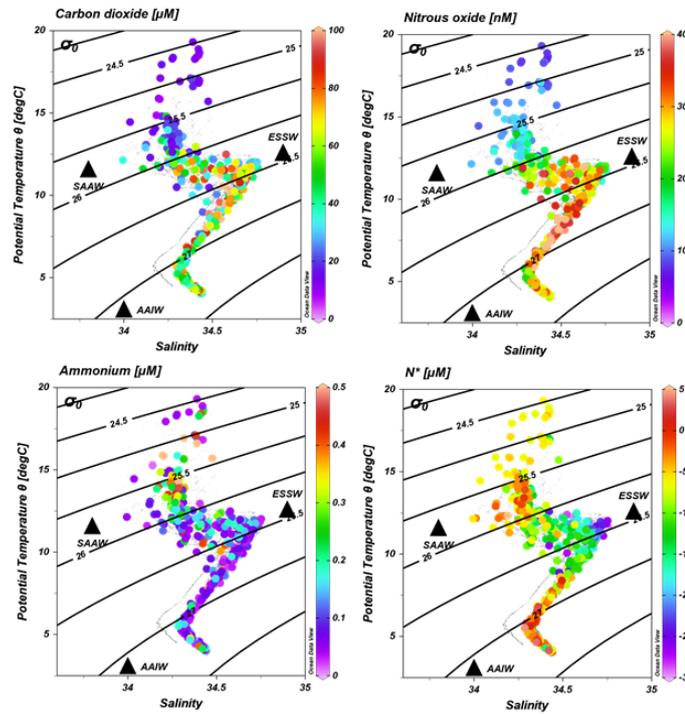


Figura 4.2.3: Diagrama T-S de la estación 5 de amonio, dióxido de carbono, óxido nítrico y déficit de nitrógeno. Los triángulos negros marcan los núcleos del Agua Subantártica (SAAW; ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW; AESS) y Agua Intermedia Antártica (AAIW; AIAA).

De los diagramas T-S de la razón de Redfield de la materia orgánica particulada (C:N) se puede apreciar, en general, homogeneidad en las masas de aguas, con valores más cercanos a 16 en AESS y AIAA (Figura 4.2.4), mientras que, en ASAA presenta valores $<7,5$. La concentración de carbono y nitrógeno orgánico de la materia orgánica es mayor en la ASAA, mientras que en las otras dos masas, AESS y AIAA, las concentraciones disminuyen y son relativamente homogéneas <100 y $<10 \mu\text{g}/L$, respectivamente (Figura 4.2.4).

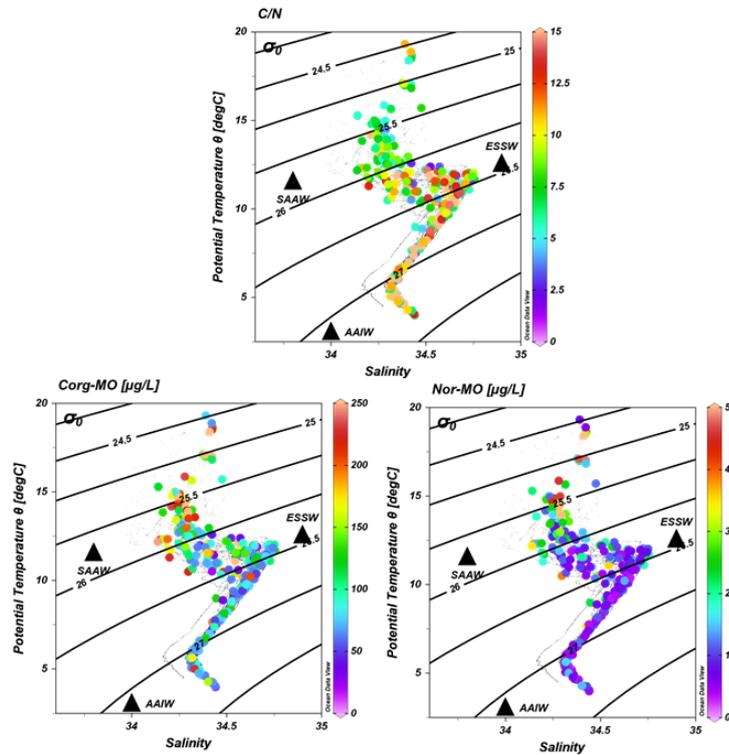


Figura 4.2.4: Diagrama T-S de la estación 5 de la razón de Redfield (C:N), carbono y nitrógeno orgánico de la materia orgánica ($\mu\text{g/L}$). Los triángulos negros marcan los núcleos del Agua Subantártica (SAAW; ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW; AESS) y Agua Intermedia Antártica (AAIW; AIAA).

La tabla 4.2.1 muestra la estadística descriptiva de las características biogeoquímicas de las masas de agua presentes en la zona de estudio. Esta información confirma lo descrito anteriormente, donde la AESS presenta los valores promedio más bajos (altos) de oxígeno (salinidad), $32 \pm 23,17 \mu\text{M}$ ($34,6 \pm 0,07$), junto con un máximo y mínimo de 196,5 y 1,29 ($34,76$ y $34,4$), respectivamente. Asimismo, en AESS se presenta el valor promedio más bajo de déficit de nitrógeno ($-16,87 \mu\text{M}$), siendo la masa de agua con mayor déficit de nitrógeno en el período de estudio, (tan bajo como $-33,26 \mu\text{M}$). Al contrario, en AESS se encuentran las concentraciones más altas de dióxido de carbono, con valor promedio de $66,61 \pm 38,35 \mu\text{M}$. Las concentraciones promedios de los nutrientes (nitrato, fosfato, ácido silícico y amonio) presentan los menores valores en ASAA, concordando con lo anteriormente encontrado. En cuanto al promedio de concentración de carbono y nitrógeno orgánico disminuyen en las masas de agua más profundas como se aprecia en la tabla 4.2.1.

Tabla 4.2.1: Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g}/L$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrato, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nítrico (nM), N^* , $\text{C}:\text{N}$, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g}/L$) de agua subantártica (ASAA), agua ecuatorial subsuperficial (AESS) y agua intermedia antártica (AIAA).

	ASAA					AESS					AIAA				
	Max	Min	mean	std		Max	Min	mean	std		Max	Min	mean	std	
Temperatura	19,34	11,21	13,55	1,62		12,98	8	10,36	1,09		8	4,33	5,81	1,03	
Salinidad	34,47	33,96	34,26	0,08		34,76	34,4	34,6	0,07		34,5	34,16	34,36	0,05	
Fluorescencia	3,99	0,05	0,99	0,65		0,56	0,03	0,11	0,05		0,22	0	0,08	0,04	
Densidad	26,14	24,47	25,7	0,33		26,89	25,94	26,57	0,17		27,27	26,78	27,06	0,11	
Oxígeno	298,52	114,89	226,31	36,3		196,5	1,29	32	23,17		215,03	37,42	140,53	34,31	
Nitrato	36,88	0	9,92	6,82		36,78	8,78	24,98	5,73		40,78	15,8	32,39	5,84	
Nitrato	1,07	0	0,21	0,18		0,39	0	0,05	0,06		0,31	0	0,04	0,07	
Fosfato	2,5	0,56	1,2	0,42		3,48	1,79	2,79	0,29		3,23	1,75	2,51	0,26	
Ácido silícico	45,11	0	3,43	5,22		27,26	1,77	20,35	5,33		47,61	2,63	23,06	8,53	
Amonio	1,44	0,01	0,28	0,25		0,99	0,02	0,11	0,13		0,83	0,01	0,13	0,16	
Dióxido de Carbono	68,4	2,1	22,12	13,95		127,27	16,68	66,61	28,35		90,02	20,35	51,61	20,38	
Óxido nítrico	36,23	0,08	12,57	4,4		45,48	0,67	27,76	6,69		50,9	14,68	28,64	7,32	
Metano	68,16	0,36	12,52	12,87		115,03	2,41	18,79	22,25		103,03	0,71	21,69	25,68	
N^*	13,09	-15,62	-6,48	3,39		0,16	-33,26	-16,87	6,67		4,71	-26,21	-5	6,85	
$\text{C}:\text{N}$	20,87	3,62	7,51	2,83		26,26	2,3	10,14	4,95		28,79	2,17	10,84	5,5	
$\delta^{13}\text{C}$	-18,3	-29,05	-24,5	2,25		15,51	-30,82	-25,09	5,52		-19,29	-30,82	-26,68	2,7	
$\delta^{15}\text{N}$	28,4	-22,65	5,7	5,32		18,08	-24,79	3,44	7,02		22,46	-7,34	4,68	5,9	
Carbono orgánico	706,16	55,66	171,71	112,11		326,32	17,48	90,67	52,26		228,34	10,82	82,32	45,69	
Nitrógeno orgánico	133,37	3,51	25,99	20,69		35,61	3,14	10,33	6,19		32,88	3,07	8,86	6,2	

Al aplicar los criterios de alta salinidad ($>34,6$) y baja concentración de oxígeno disuelto ($<45 \mu M$) en la columna de agua para definir la presencia de remolinos intratermoclina, las aguas que cumplen estas características corresponden a AESS (Figura 4.2.5), concordante con la literatura (Thomsen et al., 2016). Además, en esta misma zona se presentan los centros con forma de lentes de salinidad y oxígeno (Figura 4.1.1). Bajo este criterio, se encontraron 13 remolinos durante el período de estudio.

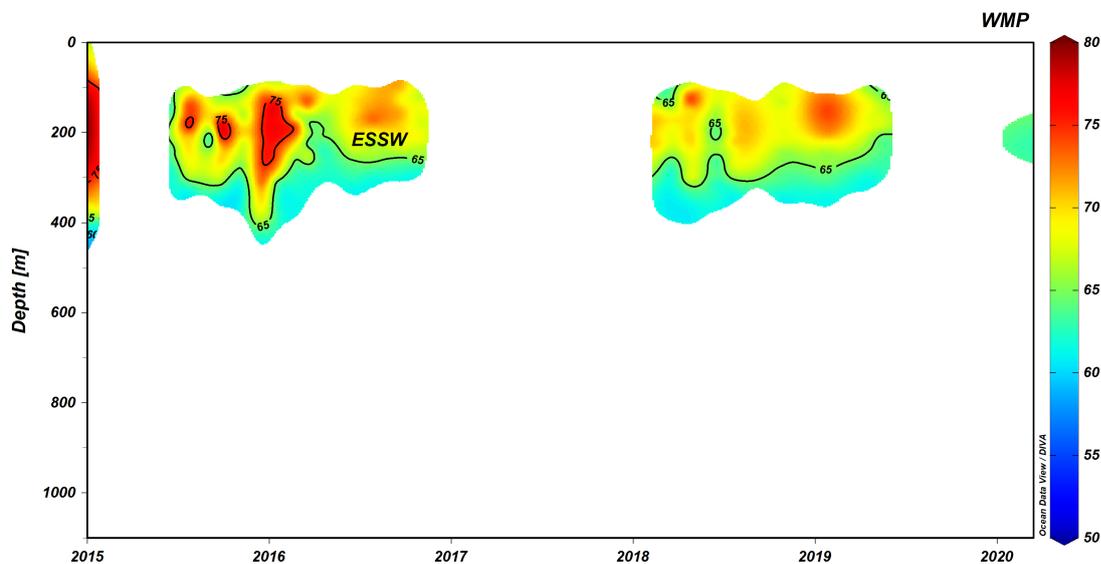


Figura 4.2.5: Porcentaje de masa de agua de la estación 5 aplicado el criterio para detectar remolinos, oxígeno $<45 \mu M$ y salinidad $>34,6$. Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS).

4.3. Relación entre variables físicas y biogeoquímicas

En la ASAA, existe una correlación estadísticamente significativa entre el oxígeno (AOU) y las especies de nitrato y óxido nítrico, $-0,57$ y $-0,62$ ($0,71$ y $0,71$), respectivamente, dan cuenta del proceso de nitrificación (tabla 4.3.1). Además, el coeficiente de correlación lineal inversa (positiva) entre el oxígeno (AOU) y el fósforo es de $-0,59$ ($0,71$) dando cuenta de procesos de producción primaria que ocurren en esta masa de agua superficial. También, el dióxido de carbono presenta una relación estadísticamente significativa con el oxígeno (AOU), teniendo un coeficiente de correlación de $-0,53$ ($0,61$). La relación entre la temperatura y

oxígeno (0,51) y nitrato (-0,79), y la densidad con oxígeno (-0,52) y nitrato (0,79) dan cuenta de la importancia de los distintos procesos físicos sobre su distribución, e.g., la solubilidad.

Por otra parte, en la AESS las variables físicas tienen una menor relación con las variables biogeoquímicas (tabla 4.3.2). La relación entre el nitrato y fosfato es baja (0,19), pero significativa, lo cual se debería a la activación de la desnitrificación, la cual sería el proceso de remineralización dominante bajo las condiciones ambientales de la AESS en la región. La relación entre el oxígeno (AOU) y fosfato es de -0,63 (0,61). Además, la correlación entre el oxígeno (AOU) y ácido silícico es de -0,7 (0,72).

Finalmente, en la AIAA el oxígeno (AOU) mantiene una correlación estadísticamente significativa con el fosfato, -0,56 (0,57). Aun cuando debido a las condiciones biogeoquímicas se esperaría una relación significativa entre el nitrato y fosfato, esto no fue observado. Sin embargo, existe una relación entre el oxígeno (AOU) y óxido nitroso -0,57 (0,52) sugiriendo procesos activos del ciclo del nitrógeno en esta masa de agua (tabla 4.3.3)

Así, se puede apreciar que hay diferencias biogeoquímicas entre las tres masas de agua presentes en la zona de estudio, así como en los procesos que en ellas ocurren. Junto al estudio de las tres masas de agua, se establecieron las correlaciones estadísticamente significativas en la capa de agua en donde se presentarían los remolinos intratermoclina de acuerdo a las condiciones de $O_2 < 1 \text{ mL}^{-1}$ y salinidad $> 34,6$ (tabla 4.3.4). En esta capa, el AOU tiene una correlación de 0,54 con el nitrato. Asimismo, el N^* presenta correlaciones altas con el óxido nitroso y la razón de Redfield (C:N) (0,53 y 0,61, respectivamente). Igualmente, en esta zona tienen relevancia las variables físicas, temperatura y salinidad, presentando correlaciones significativas entre ellas.

Tabla 4.3.1: Correlación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g/L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nítrico, metano ($n\text{M}$), N^* , C:N , carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g/L}$), utilización aparente de oxígeno (AOU), saturación de dióxido de carbono (%), saturación de óxido equivalente, producción de óxido nítrico de agua subantártica (ASAA) con p-value $<0,05$. Las marcadas con rojo son aquellas correlaciones estadísticamente significativas $>0,5$.

ASAA	Temperatura	Salinidad	Fluorescencia	Densidad	Oxígeno	NO_3	NO_2	PO_4	$\text{SiO}(\text{OH}_4)$	NH_4	CO_2	N_2O	N^*	C:N	C org	N org	AOU	%sat CO_2	%sat N_2O	DN20
Temperatura	1	0,39	0,35	-0,99	0,51	-0,79	-0,36	-0,77	-0,48		-0,51	-0,65			0,2			-0,66	-0,45	-0,56
Salinidad	0,39	1		-0,23	-0,27			-0,15	-0,24		-0,21		-0,26					-0,11		
Fluorescencia	0,35		1	-0,34	0,46	-0,23		-0,22				-0,18		-0,3				-0,48		-0,17
Densidad	-0,99	-0,23	-0,34	1	-0,52	0,79	0,36	0,8	0,45		0,51	0,66		-0,36	-0,22			0,66	0,45	0,57
Oxígeno	0,51	-0,52	0,46	-0,52	1	-0,57		-0,59	-0,22	0,2	-0,53	-0,62		-0,36		0,22		-0,98	-0,51	-0,62
NO_3	-0,79	-0,27	-0,23	0,79	-0,57	1	0,25	0,88	0,72	-0,21	0,71	0,76	0,25	0,22		-0,22		0,71	0,67	0,69
NO_2	-0,36			0,36		0,25	1	0,28	0,35	0,44				-0,21						0,71
PO_4	-0,77	-0,15	-0,22	0,8	-0,59	0,88	0,28	1	0,61		0,67	0,76	-0,22		-0,21	-0,22		0,71	0,63	0,71
$\text{SiO}(\text{OH}_4)$	-0,48	-0,24		0,45	-0,22	0,72	0,35	0,61	1		0,68	0,65	0,24					0,32	0,65	0,6
NH_4					0,2	-0,21	0,44			1	-0,21							-0,2	-0,22	
CO_2	-0,51	-0,21	-0,18	0,51	-0,53	0,71		0,67	0,68	-0,21	1	0,7				-0,3		0,61	1	0,68
N_2O	-0,65			0,66	-0,62	0,76		0,76	0,65		0,7	1						0,71	0,67	0,99
N^*		-0,26				0,25		-0,22	0,24				1							
C:N			-0,3		-0,36	0,22	-0,21							1				0,33		
C org	0,2			-0,22	0,22	-0,22		-0,21							1	0,84				
N org					0,22	-0,22		-0,22							0,84	1		-0,24	-0,29	
AOU	-0,66	-0,11	-0,48	0,66	-0,98	0,71		0,71	0,32	-0,2	0,61	0,71		0,33		-0,24	1	0,58	0,68	0,69
%sat CO_2	-0,45			0,45	-0,51	0,67		0,63	0,65	-0,22	1	0,67				-0,29		0,58	1	0,66
%sat N_2O	-0,55			0,57	-0,61	0,69		0,71	0,6		0,68	0,99						0,68	0,66	1
DN20	-0,56		-0,17	0,58	-0,62	0,71		0,72	0,62		0,69	0,99						0,69	0,66	1

Tabla 4.3.2: Correlación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g}/\text{L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nítrico, metano ($n\text{M}$), N^* , C:N orgánica, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g}/\text{L}$), utilización aparente de oxígeno (AOU), saturación de dióxido de carbono (%), saturación de óxido equivalente, producción de óxido nítrico de agua ecuatorial subsuperficial (AESS) con p-value $< 0,05$. Las marcadas con rojo son aquellas correlaciones estadísticamente significativas $> 0,5$.

AESS	Temperatura	Salinidad	Fluorescencia	Densidad	Oxígeno	NO ₃	NO ₂	PO ₄	SiO(OH ₄)	NH ₄	CO ₂	N ₂ O	N*	C:N	C org	N org	AOU	%sat CO ₂	%sat N ₂ O	DN ₂ O
Temperatura	1	0,47	0,29	-0,95	0,2	-0,77		-0,19	-0,46			-0,5	-0,54			0,26	-0,46		-0,35	-0,46
Salinidad	0,47	1	-0,07	-0,17	-0,59			0,64	0,52			-0,21	-0,54				0,41		-0,19	-0,21
Fluorescencia	0,29	-0,07	1	-0,35	0,23			-0,35	-0,22								-0,29			
Densidad	-0,95	-0,17	-0,35	1	-0,44	0,73		0,41	0,64			0,42	0,36			-0,3	0,66		0,27	0,38
Oxígeno	0,2	-0,59	0,23	-0,44	1	-0,34		-0,63	-0,7			0,36	0,74			0,27	-0,96			
NO ₃	-0,77			0,73	-0,34	1		0,19	0,46					0,32		0,24	0,44		0,24	0,32
NO ₂						-0,24	1	0,19	0,25				-0,2	-0,34						
PO ₄	-0,19	0,64	-0,35	0,41	-0,63	0,19		1	0,57				-0,52				0,61			
SiO(OH ₄)	-0,46	0,52	-0,22	0,64	-0,7	0,46	-0,19	0,57	1					0,23		-0,32	0,72			
NH ₄							0,25			1										
CO ₂											1	0,42			-0,3		0,21		1	0,41
N ₂ O	-0,5	-0,21									0,42	1	0,41			-0,3	0,25	0,38	0,98	1
N*	-0,54	-0,54										0,41	1	0,36					0,33	0,39
C:N													0,36	1	0,24	-0,46				
C org														0,24	1	0,67				
N org	0,26													-0,46	0,67	1	-0,29		-0,28	-0,29
AOU	-0,46															-0,29	1			0,22
%sat CO ₂																			1	0,39
%sat N ₂ O	-0,35																		0,39	1
DN ₂ O	-0,46																		0,38	0,99
																			0,38	0,99

Tabla 4.3.3: Correlación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g}/\text{L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nítrico, metano ($n\text{M}$), N^* , C:N orgánica, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g}/\text{L}$), utilización aparente de oxígeno (AOU), saturación de dióxido de carbono (%), saturación de óxido equivalente, producción de óxido nítrico de agua intermedia antártica (AIAA) con p-value $<0,05$. Las marcadas con rojo son aquellas correlaciones estadísticamente significativas $>0,5$.

AIAA	Temperatura	Salinidad	Fluorescencia	Densidad	Oxígeno	NO_3	NO_2	PO_4	$\text{SiO}(\text{OH}_4)$	NH_4	CO_2	N_2O	N^*	C:N	C org	N org	AOU	%sat CO_2	%sat N_2O	DN20	
Temperatura	1	0,53	0,11	-0,96	-0,63			0,32	-0,6			0,53	-0,23			0,29	0,46		0,63	0,58	
Salinidad	0,53	1	-0,04	-0,28	-0,82			0,67				0,48	-0,29				0,8		0,53	0,5	
Fluorescencia	0,11	-0,04	1	-0,14	-0,14	0,33					0,27		0,34				0,13	0,26			
Densidad	-0,96	-0,28	-0,14	1	0,46				0,7			-0,48				-0,3	-0,28			-0,58	-0,53
Oxígeno	-0,63	-0,82	-0,14	0,46	1			-0,56				-0,57					-0,98		-0,63	-0,6	
NO_3			0,33			1	-0,26		0,3	-0,31			0,79	0,39							
NO_2						-0,26	1						-0,3	-0,34							
PO_4	0,32	0,67		-0,56				1				0,24	-0,5				0,57			0,27	0,25
$\text{SiO}(\text{OH}_4)$	-0,6			0,7		0,3			1			-0,26				-0,38				-0,31	-0,29
NH_4						-0,31				1			-0,24			0,45					
CO_2			0,27								1			-0,42	-0,45			0,99			
N_2O	0,53	0,48		-0,48	-0,57			0,24	-0,26			1					0,52			0,99	1
N^*	-0,23	-0,29	0,34			0,79	-0,3	-0,5		-0,24			1	0,53	0,35						
C:N						0,39	-0,34						0,53	1		-0,41		-0,43			
C org													0,35		1	0,64		-0,43			
N org	0,29			-0,3						0,45				-0,41	0,64	1		-0,45			
AOU	0,46	0,8	0,13	-0,28	-0,98				-0,38	0,45		0,52		-0,41	0,64	1	1		0,56	0,54	
%sat CO_2			0,26					0,57			0,99			-0,43	-0,45			1			
%sat N_2O	0,63	0,53		-0,58	-0,63			0,27	-0,31			0,99		-0,43	-0,45		0,56	1		1	1
DN20	0,58	0,5		-0,53	-0,6			0,25	-0,29			1		-0,43	-0,45		0,54			1	1

Tabla 4.3.4: Correlación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, Fluorescencia ($\mu\text{g}/\text{L}$), densidad (kg/m^3), oxígeno, nitrato, nitrito, fosfato, ácido silícico, amonio, dióxido de carbono (μM), óxido nítrico ($n\text{M}$), N^* , $\text{C}:\text{N}$ orgánica, carbono y nitrógeno orgánico ($\mu\text{g}/\text{L}$), utilización aparente de oxígeno (AOU), saturación de dióxido de carbono (%), saturación de óxido equivalente, producción de óxido nítrico en la zona de remolinos ($\text{O}_2 < 1 \text{ mL}^{-1}$ & salinidad $> 34,6$) con p-value $< 0,05$. Las marcadas con rojo son aquellas correlaciones estadísticamente significativas $> 0,5$.

	Temperatura	Salinidad	Fluorescencia	Densidad	Oxígeno	NO_3	NO_2	PO_4	$\text{SiO}(\text{OH}_4)$	NH_4	CO_2	N_2O	N^*	$\text{C}:\text{N}$	C^{org}	N^{org}	AOU	%sat CO_2	%sat N_2O	DN_2O
Temperatura	1	0,72	0,05	-0,98	0,28	-0,78						-0,32	-0,72					-0,65		-0,28
Salinidad	0,72	1	-0,09	-0,55	-0,08	-0,51		0,53			-0,41	-0,56	-0,72			0,46	-0,26	-0,38	-0,48	-0,53
Fluorescencia	0,05	-0,09	1	-0,1	0,06				0,26		0,49						-0,07	0,5		
Densidad	-0,98	-0,55	-0,1	1	-0,36	0,78							0,64				0,71			
Oxígeno	0,28	-0,08	0,06	-0,36	1	-0,29											-0,91			
NO_3	-0,78	-0,51		0,78	-0,29	1			0,37				0,76	0,46		0,56	0,54			
NO_2							1							-0,35						
PO_4		0,53						1		-0,43		-0,7	-0,68	-0,35		0,46			-0,68	-0,69
$\text{SiO}(\text{OH}_4)$			0,26			0,37			1	-0,28		-0,32							-0,34	-0,32
NH_4								-0,43	-0,28	1										
CO_2											1	0,45								
N_2O	-0,32	-0,56									0,45	1	0,53			-0,38				
N^*	-0,72	-0,72				0,76		-0,7	-0,32			0,53	1	0,61		-0,46	0,43			
$\text{C}:\text{N}$				0,64		0,46		-0,35					0,61	1	0,33	-0,59				
C^{org}														0,33	1	0,45				
N^{org}														-0,59	0,45	1			-0,37	-0,37
AOU	-0,65	-0,26	-0,07	0,71	-0,91	0,54		0,46					0,43	-0,59	0,45		1			
%sat CO_2		-0,38	0,5								1	0,44						1	0,44	0,44
%sat N_2O		-0,48						-0,68	-0,34		0,45	0,99	0,45			-0,37		0,44	1	1
DN_2O	-0,28	-0,53						-0,69	-0,32		0,45	1	0,5			-0,37		0,44	1	1

4.4. Remolinos de mesoescala

A partir del seguimiento de remolinos de los datos de AVISO+ se detectaron 9 Remolinos Anticiclónicos (RA), cuya señal pasó por la estación de estudio entre 2015 y 2020 (tabla 4.4.1). El periodo de desfase máximo y mínimo entre la detección y la señal en la estación de los remolinos anticiclónicos es de 75 y 3 días, respectivamente; mientras que el promedio de tiempo de desfase es de $28,8 \pm 24,4$ días.

Tabla 4.4.1: Inicio y final de la señal de remolino anticiclónico que pasan por la estación; inicio y final de la detección del remolino anticiclónico. Además del período de desfase en días entre la señal del remolino en la estación y la detección de este mismo mar adentro.

N°	Inicio de señal (IS)	Final de señal (FS)	Inicio detección (ID)	Final detección (FD)	Período de desfase (días)
1	13-may-15	28-may-15	30-may-15	15-oct-15	17
2	20-ago-15	12-sep-15	16-oct-15	19-ene-16	57
3	30-ene-17	28-feb-17	15-abr-17	31-dic-17	75
4	15-jun-17	04-jul-17	07-jul-17	06-ago-17	22
5	04-feb-18	01-mar-18	07-feb-18	05-mar-18	3
6	11-abr-18	08-may-18	04-may-18	16-dic-18	23
7	08-jul-18	19-jul-18	21-jul-18	14-sep-18	13
8	25-ene-19	02-feb-19	07-feb-19	05-mar-19	13
9	09-abr-19	18-abr-19	16-may-19	28-may-19	37

De los 9 remolinos detectados (Figura 4.4.1 a 4.4.4) 2 son del año 2017, en el cual no se tiene datos en la estación de estudio.

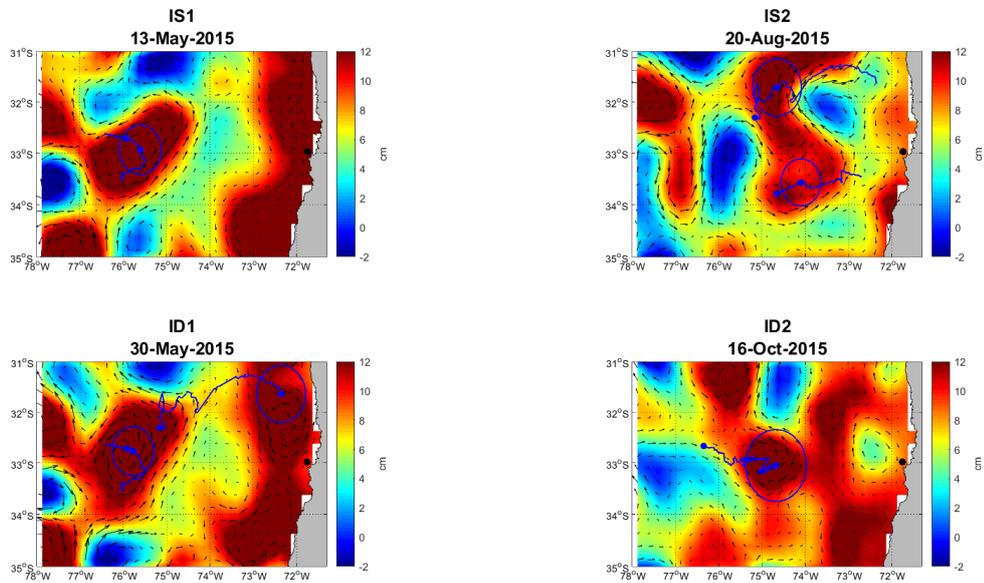


Figura 4.4.1: Imágenes satelitales de anomalías del nivel del mar con velocidad geostrofica. El triángulo negro indica la estación y las líneas azules indica la detección de remolinos anticiclónicos. IS indica el inicio de la señal del RA en la estación y ID el inicio de la detección del RA para el período 2015.

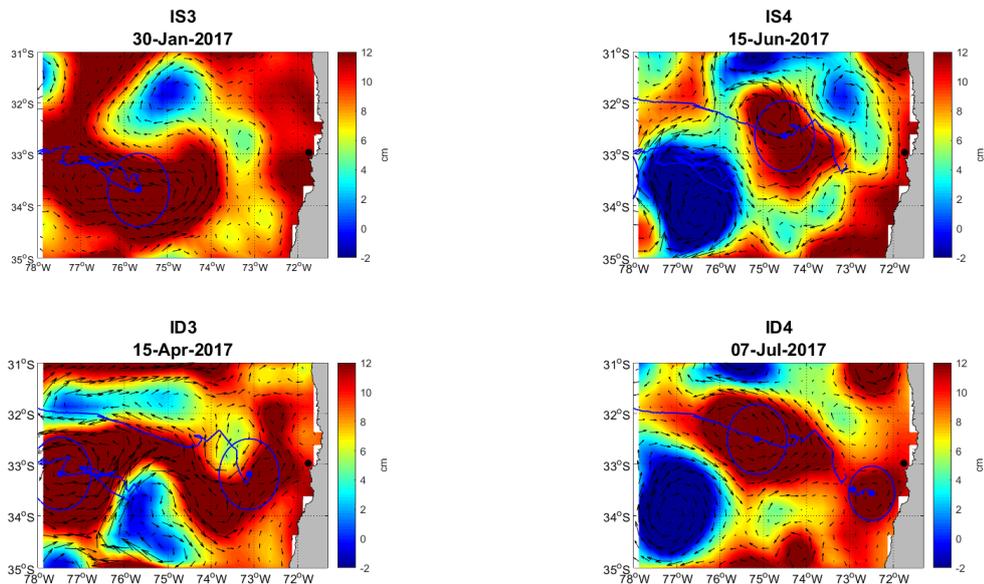


Figura 4.4.2: Imágenes satelitales de anomalías del nivel del mar con velocidad geostrofica. El triángulo negro indica la estación y las líneas azules indica la detección de remolinos anticiclónicos. IS indica el inicio de la señal del RA en la estación y ID el inicio de la detección del RA para el período 2017.

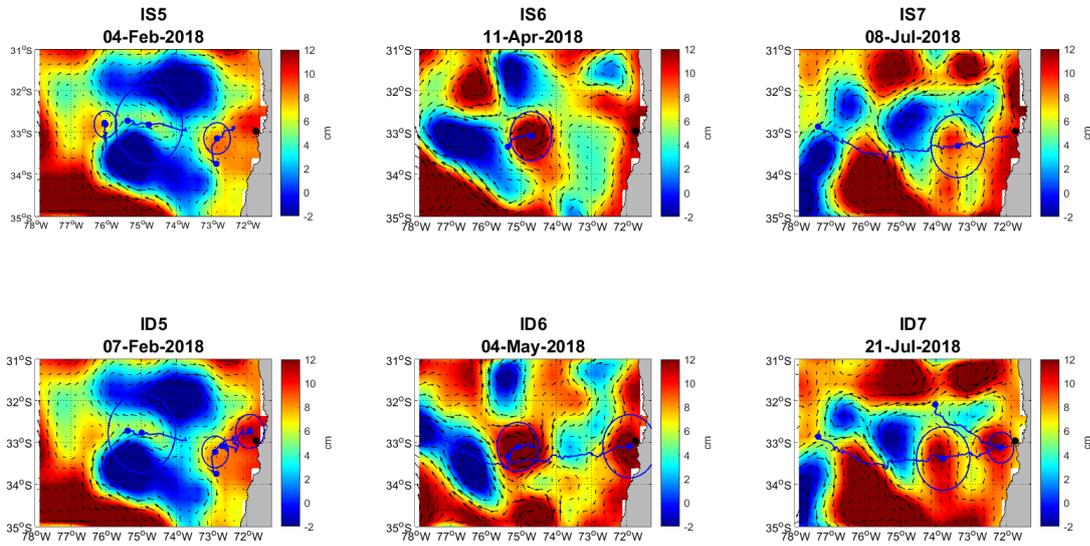


Figura 4.4.3: Imágenes satelitales de anomalías del nivel del mar con velocidad geostrofica. El triángulo negro indica la estación y las líneas azules indica la detección de remolinos anticiclónicos. IS indica el inicio de la señal del RA en la estación y ID el inicio de la detección del RA para el período 2018.

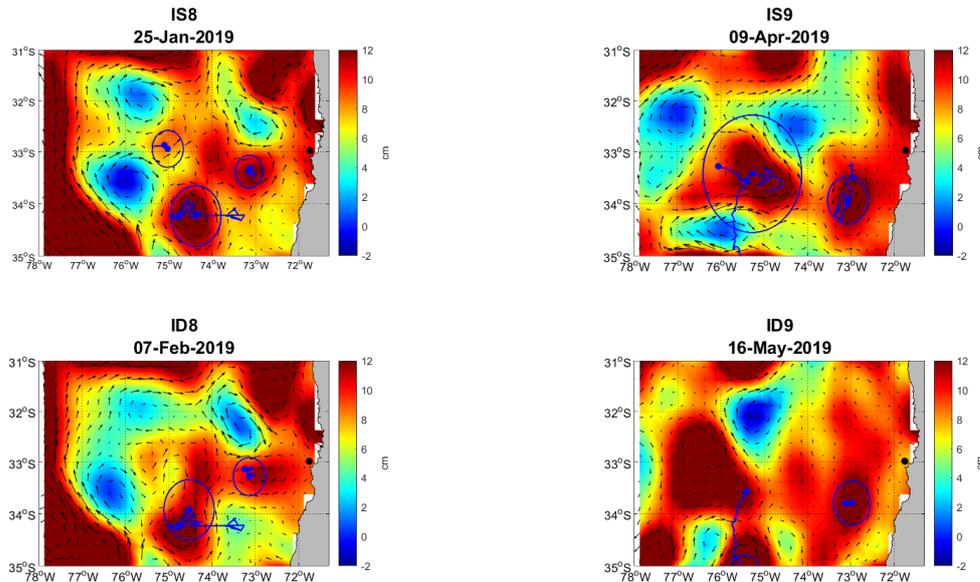


Figura 4.4.4: Imágenes satelitales de anomalías del nivel del mar con velocidad geostrofica. El triángulo negro indica la estación y las líneas azules indica la detección de remolinos anticiclónicos. IS indica el inicio de la señal del RA en la estación y ID el inicio de la detección del RA para el período 2019.

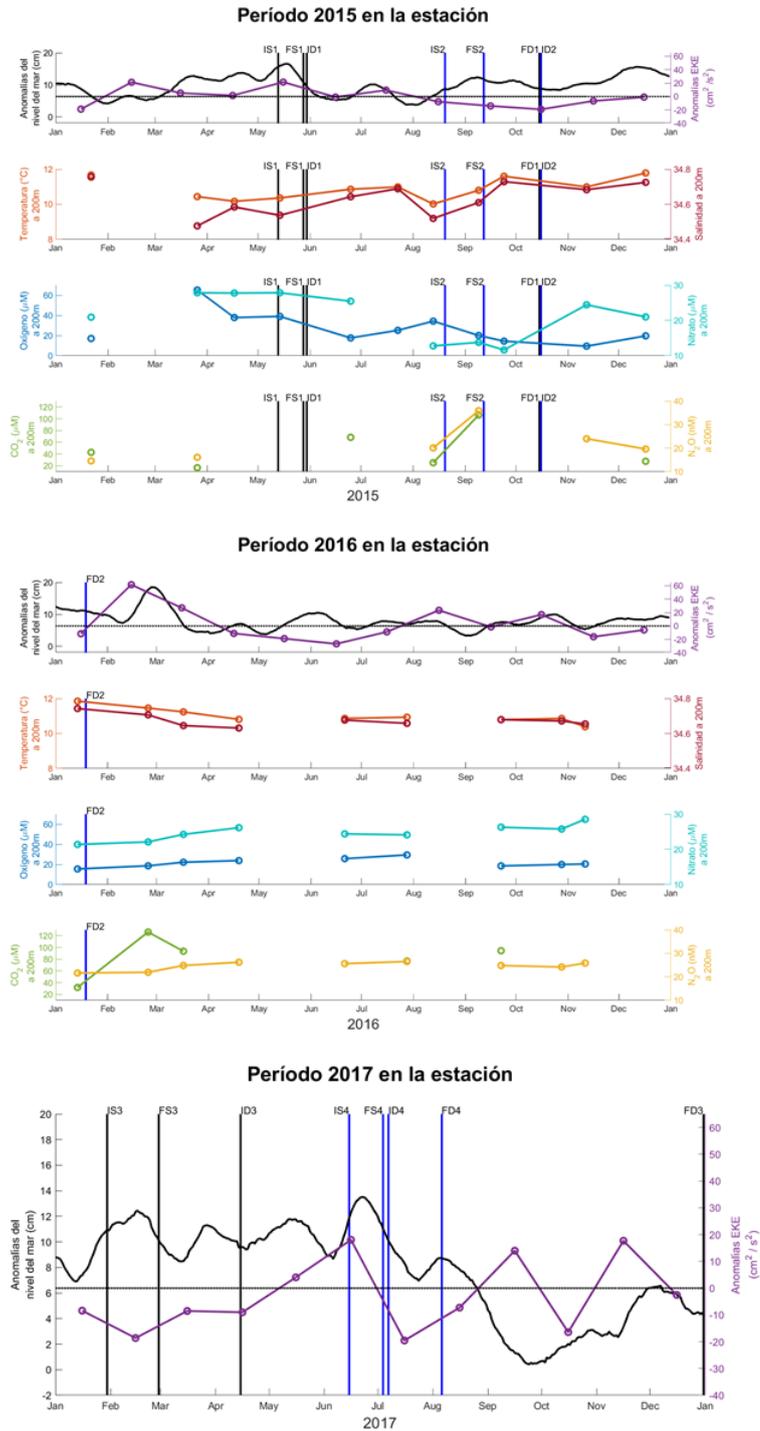


Figura 4.4.5: Series de tiempo de anomalías del nivel del mar (cm ; negro), anomalías climatológicas de EKE (morado; cm^2/s^2), temperatura (naranja; $^{\circ}C$) salinidad (rojo), oxígeno (azul; μM), nitrato (celeste; μM), dióxido de carbono (verde; μM) y óxido nítrico (amarillo; nM) a 200 m en los períodos de 2015, 2016 y 2017. Además se señalan el inicio de la señal (IS), el final de la señal (FS) de los remolinos en la estación; el inicio de la detección (ID) y final de la detección (DF) de los remolinos.

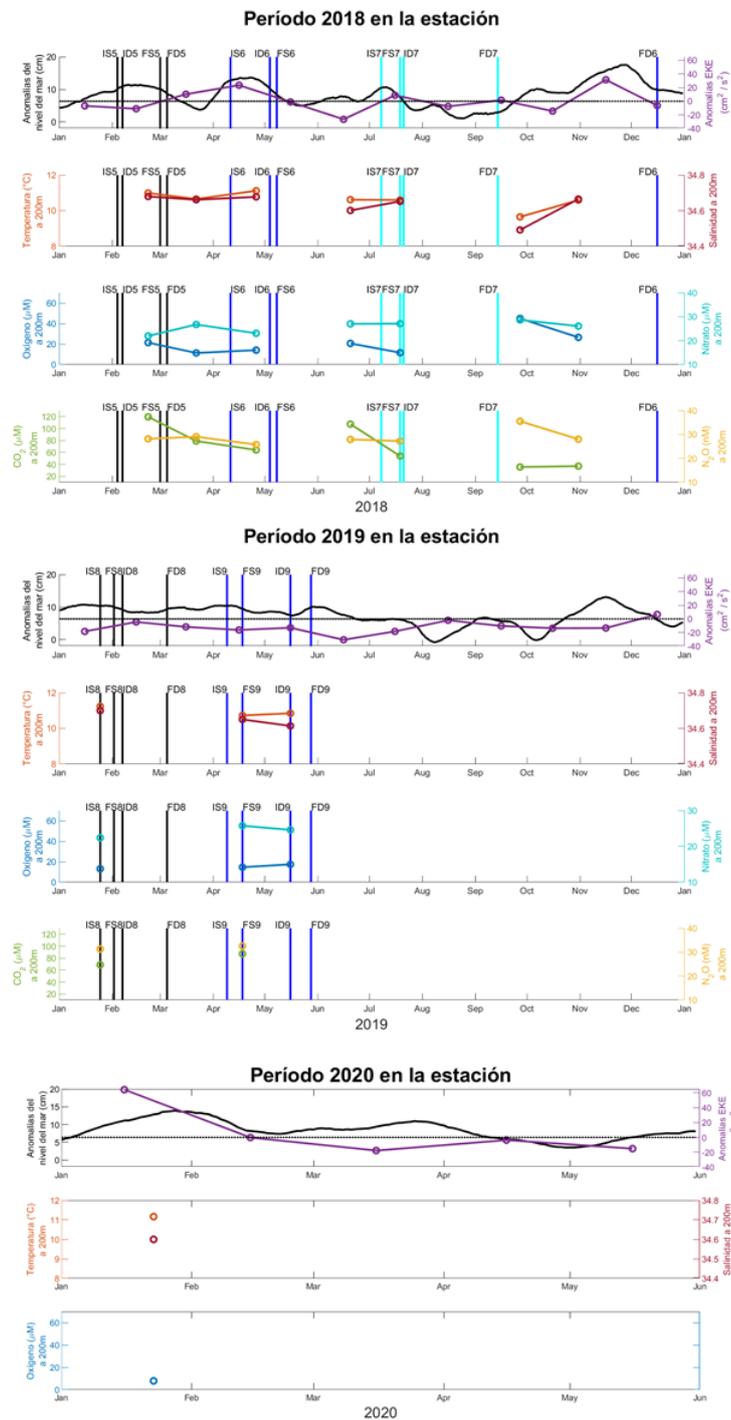


Figura 4.4.6: Series de tiempo de anomalías del nivel del mar (cm ; negro), anomalías climatológicas de EKE (morado; cm^2s^{-2}), temperatura (naranja; $^{\circ}C$) salinidad (rojo), oxígeno (azul; μM), nitrato (celeste; μM), dióxido de carbono (verde; μM) y óxido nítrico (amarillo; nM) a 200m en los períodos de 2018, 2019 y 2020. Además se señalan el inicio de la señal (IS), el final de la señal (FS) de los remolinos en la estación; el inicio de la detección (ID) y final de la detección (DF) de los remolinos.

De las Figuras 4.4.5 y 4.4.6 se observa un aumento en las anomalías del nivel del mar en presencia de remolinos anticiclónicos en los años 2017 y 2018. Del mismo modo, en el año 2018, la salinidad responde aumentando en presencia de remolinos; mientras que, se profundiza la termoclina y oxiclina cuando hay RA. En cambio, durante el año 2015, si bien hay RA y se ve un aumento en las anomalías del nivel del mar, la termoclina (oxiclina) se levantó (hundió) cuando la señal de los remolinos estaba en la estación. Por otra parte, la energía cinética (anomalías climatológicas de EKE) no es un indicador claro para los remolinos y no muestra similitud en el comportamiento con las otras variables estudiadas. En cuanto a los GEI, no se observa un patrón ante los remolinos para ninguno de los periodos estudiados. En el año 2016 no se detectó ningún remolino que pasara por la estación, a pesar de apreciarse aumentos en las anomalías del nivel del mar. Al contrario, durante el año 2017 se detectaron remolinos, pero no se realizaron muestreos durante ese periodo.

4.5. Diferencia en la columna de agua con y sin remolinos

Entre 50 y 100 m de profundidad se encuentra la termoclina, haloclina y oxiclina en períodos con y sin remolinos. La salinidad es la única de las tres variables (i.e., temperatura, salinidad y oxígeno; Figura 4.5.1) que presenta diferencias en los primeros 100 m. Mientras que, bajo 300 m, la salinidad y oxígeno presentan diferencias, donde los periodos con remolinos son menos (más) oxigenados (salinos) en comparación con los periodos sin remolinos. Bajo 600 m se produce un cambio, y los periodos con remolinos pasan a ser menos salinos que aquellos sin remolinos; mientras tanto, el oxígeno es menor en periodos con remolinos. Por otra parte, la temperatura no presenta mayores diferencias a lo largo de toda la columna de agua entre periodos con y sin remolinos.

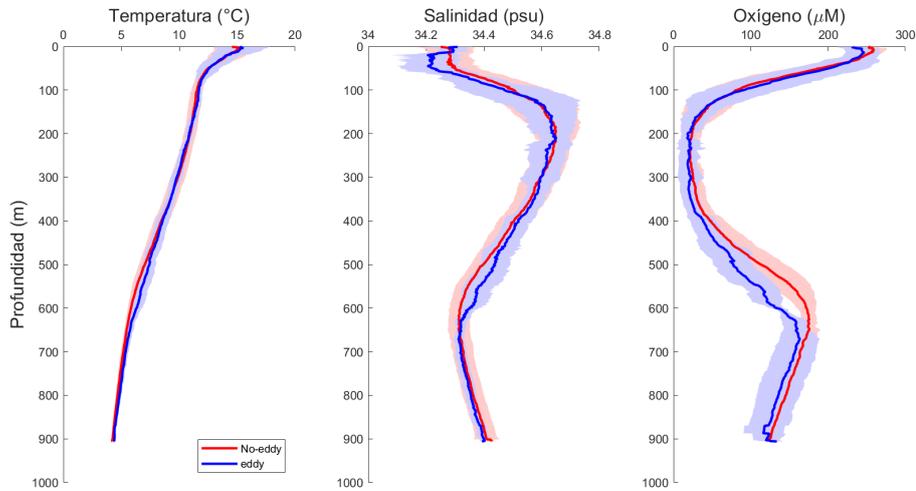


Figura 4.5.1: Perfil vertical temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad y oxígeno (μM). La línea roja representa el promedio de los periodos sin remolinos y la línea azul los periodos con remolinos.

En la capa superficial (Figura 4.5.2), también existen diferencias marcadas entre periodos con y sin remolinas en la fluorescencia y en la concentración de nitrito y amonio. En los periodos sin remolinos se observa mayor fluorescencia y concentración de amonio; de manera opuesta se observa menor concentración de nitrato en este periodo. En cuanto al carbono y nitrógeno orgánico, estos presentan diferencias, pero no existe una clara tendencia (mayor o menor concentración) a lo largo de los primeros 100 m de la columna de agua.

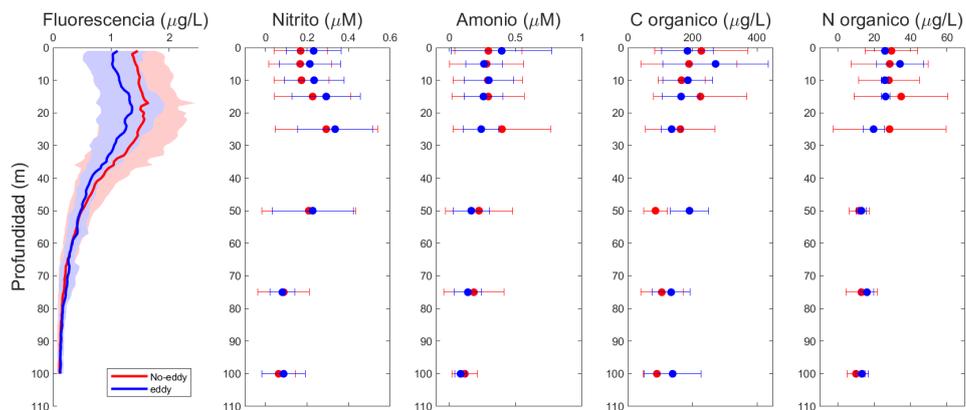
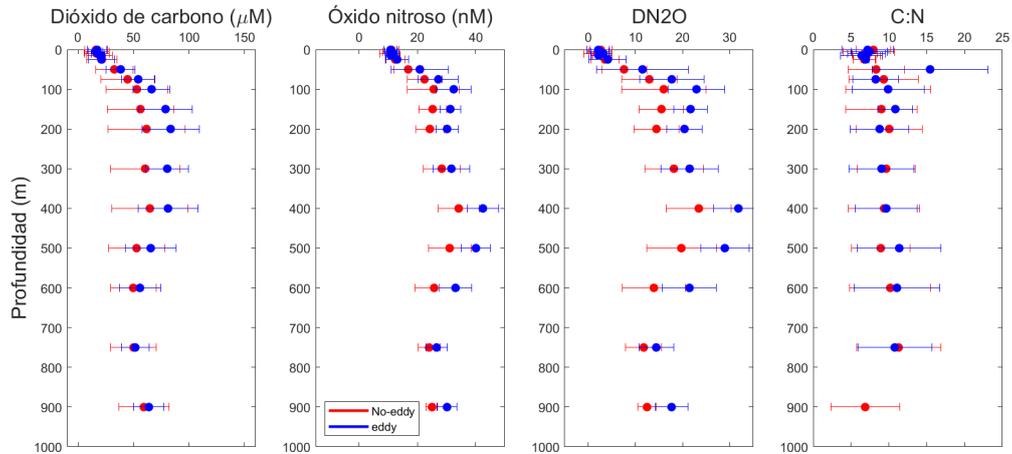


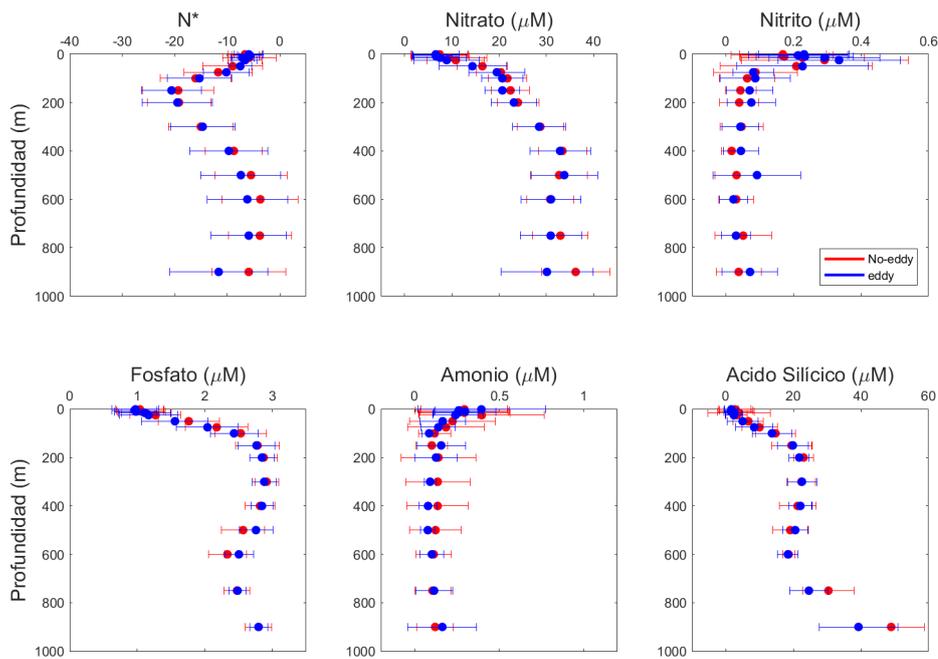
Figura 4.5.2: Perfil vertical de fluorescencia, carbono y nitrógeno orgánico de materia orgánica oxígeno ($\mu\text{g/L}$) y nitrito y amonio (μM). La línea roja representa el promedio de los periodos sin remolinos y la línea azul los periodos con remolinos.

En los GEI (CO_2 y N_2O) se puede observar que los periodos con presencia de remolinos tienen concentraciones mayores de estos gases entre 100 y 500 m. Bajo 500 m, dicha diferencia entre periodos disminuye. De igual forma que el carbono y nitrógeno orgánico de la materia orgánica particulada, la razón C:N no presenta diferencia persistente a lo largo de toda la columna de agua entre los periodos estudiados.

Los nutrientes presentan escasas diferencias entre los periodos con y sin remolinos a lo largo de la columna de agua. Las mayores diferencias se observan en la concentración de ácido silícico y nitrato bajo 600 m. Mientras que, entre 300 y 500 m se aprecian diferencias en el amonio. Por otra parte, el fosfato tiene un comportamiento parecido (opuesto) al perfil de salinidad (oxígeno). Si bien, el déficit de nitrógeno (N^*) presenta diferencia a lo largo de la columna de agua, estas se acentúan bajo 400 m.



(a)



(b)

Figura 4.5.3: Perfil vertical de (a) dióxido de carbono (μM), óxido nítrico y producción aparente de óxido nítrico (nM) y C:N, (b) N^* , nitrato, nitrito, fosfato, amonio y ácido silícico (μM). La línea roja representa el promedio de los períodos sin remolinos y la línea azul los períodos con remolinos.

En cuanto al análisis de componentes principales, las primeras dos componentes

explican 62,9, 63,8 y 58,3 porcentaje de varianza de las masas de agua ASAA, AEES y AIAA, respectivamente (Figura 4.5.4). La primera componente de ASAA es explicada principalmente por la temperatura, fosfato, nitrato y ácido silícico; en AEES por el ácido silícico, oxígeno, fosfato y salinidad; y en AIAA por la salinidad, oxígeno, temperatura y fosfato. Por otro lado, la segunda componente principal es explicada en ASAA por nitrito, amonio, fluorescencia y oxígeno; AEES por nitrato, temperatura y salinidad; y AIAA por ácido nitrato, amonio, ácido silícico y nitrito.

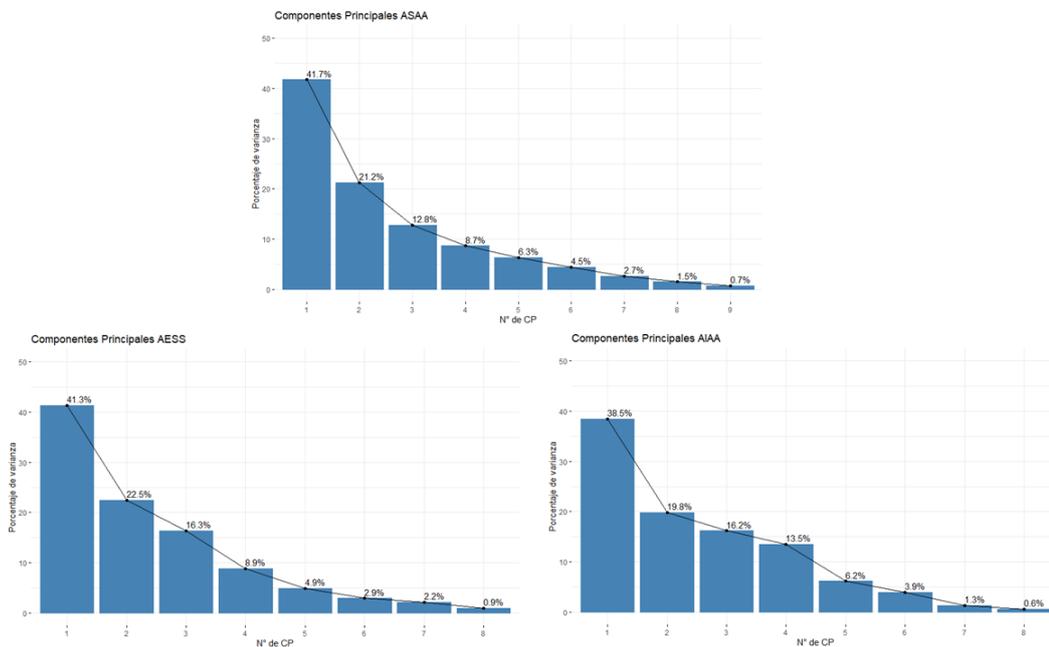


Figura 4.5.4: Porcentaje de varianza contenida en las primeras 9 componentes principales de las masas de agua ASAA, AEES y AIAA.

La Figura 4.5.5(a), muestra que no existe una diferencia clara entre periodos con y sin remolinos. Aún así, se aprecia el agrupamiento de algunos datos. Para la capa de agua con mayor participación de ASAA, se visualiza que en el primer cuadrante existe un conjunto de datos de los primeros metros explicados por la temperatura durante el muestreo en marzo del 2015, y un conjunto de datos de periodo con remolinos de enero y abril 2019 y mayo y septiembre 2015, donde la salinidad y temperatura explican su comportamiento. En el segundo cuadrante hay periodos con y sin remolinos explicados por el nitrato; la mayor parte de estos puntos corresponde a las mayores profundidades de la ASAA, donde existe una mayor influencia del AEES (Figura 4.5.5(b)). Por otra parte, el tercer cuadrante, tiene

presente principalmente periodos con presencia de remolinos correspondientes a abril 2018 y 2019 y junio 2018; son explicados por los nutrientes fosfato, ácido silícico y nitrito. En el cuarto cuadrante, cercano al tercero, hay un grupo de periodos sin remolinos, correspondientes a meses del año 2015, que es explicado por el amonio y el resto de periodos, con y sin remolinos, es explicado por el oxígeno. En el eje y, entre los cuadrantes 3 y 4, se encuentra un grupo de datos de distintas profundidades, pero de periodos sin remolino, que corresponde a agosto 2015, coincidiendo con el meteotsunami que se describe en la literatura.

En cuanto a la masa de agua AESS, los periodos sin y con remolinos están distribuidos en los cuatro cuadrantes, de manera heterogénea. Aun cuando, los periodos con remolinos se encuentran concentrados, mayoritariamente, en los cuadrantes 2, 3 y 4. Las muestras del primer cuadrante contribuyen a su comportamiento el oxígeno y en menor grado el amonio. En cuanto al segundo cuadrante, este es explicado por el nitrato y lo constituyen las mayores profundidades de esta masa de agua, es decir, entre 300 y 500 m (Figura 4.5.6(b)). En el tercer cuadrante las muestras son explicadas por la salinidad y el fosfato y son aquellas ubicadas a ~ 200 m; dado que son de esta profundidad, en este cuadrante se ubican las muestras con mayor salinidad ($>34,6$; Apéndice Figura A.0.1). Mientras que, en el cuarto cuadrante están las muestras más someras de la masa de agua, al igual que en el primer cuadrante.

Los periodos con remolinos están concentrados, principalmente, en los cuadrantes 1, 3 y 4 del análisis de componentes principales de la masa AIAA (Figura 4.5.7(a)). Las muestras del cuadrante 1 están explicadas por el oxígeno, mientras que las del cuarto cuadrante por el ácido silícico. Asimismo, en los últimos cuadrantes mencionados se encuentran las muestras de agua más profunda, ≥ 600 , de esta masa de agua (Figura 4.5.7(b)). Mientras que, las profundidades más someras están en los cuadrantes 2 y 3.



Figura 4.5.5: Primera y segunda componente principal de la masa de agua ASAA. Los números de cada punto indican las fechas y la profundidad de la muestra, siendo los últimos dígitos la profundidad. (a) Los círculos azules son los períodos sin remolinos y los triángulos rojos son cuando hay remolinos. (b) describe por profundidad.

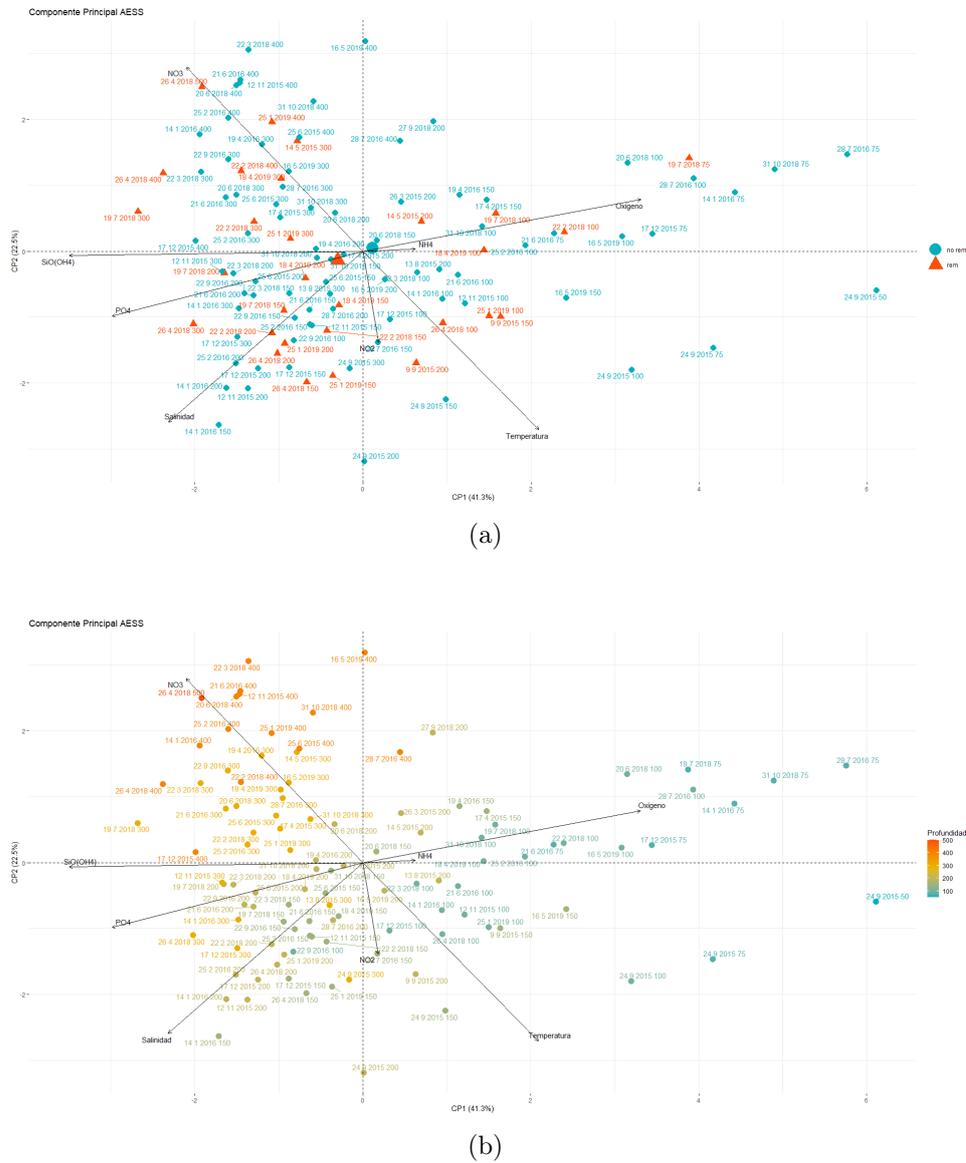


Figura 4.5.6: Primera y segunda componente principal de la masa de agua AESS. Los números de cada punto indican las fechas y la profundidad de la muestra, siendo los últimos dígitos la profundidad. (a) Los círculos azules son los períodos sin remolinos y los triángulos rojos son cuando hay remolinos. (b) describe por profundidad.

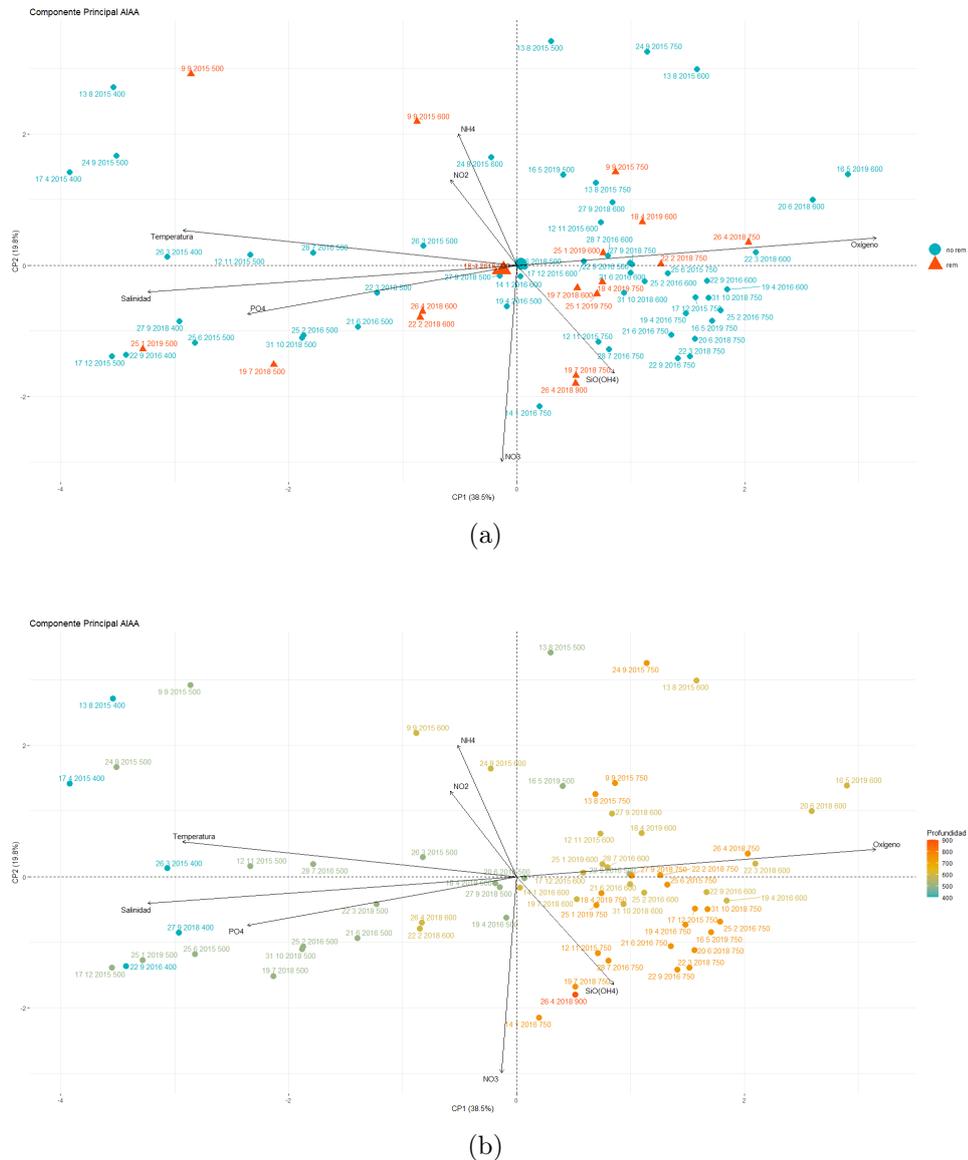


Figura 4.5.7: Primera y segunda componente principal de la masa de agua AIAA. Los números de cada punto indican las fechas y la profundidad de la muestra, siendo los últimos dígitos la profundidad. (a) Los círculos azules son los periodos sin remolinos y los triángulos rojos son cuando hay remolinos. (b) describe por profundidad.

De acuerdo a la ANOVA, en los primeros 100 m hay diferencias estadísticamente significativas ($<0,05$) entre los periodos con y sin remolinos en temperatura, salinidad, oxígeno y fluorescencia. De estas tres variables, la salinidad, oxígeno y fluorescencia, se aprecian diferencias en los perfiles de las Figuras 4.5.1 y 4.5.2. Asimismo, los nutrientes nitrato, nitrito, fosfato y ácido silícico son diferentes entre ambos periodos (Apendice tabla B.0.1), esto se puede observar en la Figura

4.5.3(b). Mientras que, entre 100 y 400 m (Apendice tabla B.0.2) hay diferencias en el oxígeno y nitrito, además, de los GEI, dióxido de carbono y óxido nitroso (Figura 4.5.3(a)). Por otra parte, entre 400 y 900 m la temperatura, salinidad, oxígeno, nitrito, N^* y el óxido nitroso son diferentes entre los dos periodos estudiados (Apendice tabla B.0.3). A partir de la Figura 4.5.1 se puede observar cómo existen diferencias entre las últimas tres variables mencionadas, en especial, entre 400 y 600 m.

Capítulo 5

Discusión

El Océano se caracteriza por la presencia de estructuras de mesoescala, las cuales moldean y afectan la dinámica de la zona. En el Pacífico Sur Oriental (PSO), uno de estos procesos de mesoescala es la surgencia (Carra & Kearns, 2003) la cual afecta estacionalmente a las costas de Chile central, y en específico, a la zona de estudio durante primavera y verano. En Chile central se han detectado remolinos y meandros de mesoescala en las cercanías de variaciones abruptas de topografía costera y en zonas de surgencia costera reconocidas (Villegas., 2020). Los remolinos intratermoclina elevan las isopícnas causando surgencia en las zonas eufóticas cuando se están formando o intensificando (Sweeney et al., 2003). En este estudio se evaluó la presencia de remolinos de mesoescala, en particular, los remolinos intratermoclina, frente a Valparaíso y su impacto biogeoquímico en la columna de agua. La topografía costera de Punta Ángeles (33°S) y los eventos de surgencia estacionales, sugieren que los ITEs en esta zona podrían formarse por la inestabilidad generada por la topografía. Además, de acuerdo con Silva & Konow (1975) para la latitud de la zona de estudio (33°S) los primeros 1000 m de la columna de agua se caracterizan por la presencia de tres masas de agua, Agua Subantártica (ASAA), Agua Ecuatorial Subsuperficial (AEES) y Agua Intermedia Antártica (AIAA). Cada una de estas masas de agua, además de presentar valores de temperatura y salinidad característicos que las diferencian claramente, presentan características biogeoquímicas particulares (e.g., oxígeno disuelto, nutrientes, etc). De esta forma, los procesos de mesoescala como los remolinos pueden distribuir las propiedades químicas y biogeoquímicas (Chaigneau et al., 2009; Frenger et al., 2018) de las masas de aguas presentes en la zona costera

hacia mar adentro.

5.1. Características oceanográficas

El análisis de masas de agua a lo largo del periodo de estudio, muestra que la estación STOV presenta tres masas de agua en los primeros 1000 m de columna de agua, ASAA, AESS y AIAA, con una variabilidad en el porcentaje de participación a lo largo del tiempo. Estos resultados son concordantes con lo reportado por Silva et al. (2009) para la región. ASAA se presenta en los primeros 100 m con mayor presencia en otoño-invierno. La AESS, en cambio, se presenta principalmente en primavera-verano entre 100 y 400 m, con un porcentaje de participación $>80\%$ a 200 m. Esta variabilidad es producto que esta masa de agua es transportada por la contracorriente Chile-Perú, la cual se caracteriza por transportar agua de bajo contenido de oxígeno hacia el polo (Auger et al., 2021) y alta salinidad, asociadas a esta variabilidad con señales desde el Ecuador (Shaffer et al., 1997; Pizarro et al., 2001). No obstante, en el año 2015 hubo dos ocasiones donde la presencia de esta masa de agua es $<60\%$. El primer evento, ocurrió en otoño, y se observó una disminución de salinidad ($<34,6$) y un aumento de oxígeno ($>45 \mu M$) (Figura 4.1.1); además, la concentración de nitrito aumentó a $0,1 \mu M$ a 200 m y la concentración de amonio aumentó ($>0,4 \mu M$) en toda la columna de agua muestreada (Figura 4.1.3). Este evento pudo haber sido causado por el desarrollo del intenso evento El Niño registrado el 2014-2016, teniendo su mayor impacto en esta fecha. Esto se observa como un incremento en la concentración del oxígeno en la AESS, característica asociada con un evento Niño (Espinoza-Morriberón et al., 2019). Sin embargo, el hecho de que esta oxigenación se presente solo en el otoño, sugiere que otros mecanismos podrían estar influyendo en los patrones observados, análisis que escapa de los objetivos del presente estudio. El segundo evento en donde se presentó una disminución de participación de la AESS fue en agosto de 2015, el cual se debería al desarrollo del meteotsunami que se describe más adelante. Por otra parte, la AIAA tiene presencia entre 500 y 800 m con porcentajes cercanos a 65% de participación a lo largo de toda la serie, exceptuando, en enero de 2020, donde la presencia de esta masa de agua sobrepasa 75% hasta los 1000 m.

En la capa superficial, la presencia de la ASAA se caracterizó por mayores

concentraciones de nitrito ($0,21 \pm 0,18 \mu M$) en los primeros metros de la columna de agua (tabla 4.2.1) en comparación con lo observado a mayor profundidad. De acuerdo a lo reportado para esta latitud por Silva et al. (2009), la concentración de nitrito en los primeros metros es $>0,1 \mu M$, disminuyendo con la profundidad hasta mantenerse constante bajo los 100 m a $<0,1 \mu M$, como se observa en la zona de estudio. La acumulación de nitrito en la capa superficial es denominada máximo primario de nitrito (MPN) y se asocia directa e indirectamente a la actividad fotosintética (Mackey et al., 2011). El MPN de la zona de estudio alcanza concentraciones $>0,3 \mu M$, asociado a este fenómeno se presentan altas concentraciones de amonio ($>0,3 \mu M$) y máximos de fluorescencia ($>2 \mu g/L$), esto también se presenta en el estudio de Santoro et al (2013), realizado en la corriente central de California en el Pacífico Norte oriental. Esta relación entre el nitrito y el amonio fluorescencia sugiere que los peaks de nitrito se producen por la incompleta reducción de nitrito del fitoplancton (Mackey et al., 2011). El fosfato presenta las menores concentraciones de toda la columna de agua en la ASAA ($1,2 \pm 0,42 \mu M$). Sin embargo, estas concentraciones son cercanas a las esperadas para la capa superficial de la zona de surgencia de Chile Central ($1 \mu M$; Silva et al., 2009). En ASAA el promedio de nitrato es el más bajo de toda la columna de agua. Los valores de fosfato y nitrato que en general se presentan en superficie concuerdan con lo planteado por Llanillo et al. (2013), quienes reportan concentraciones en promedio de 1,07 y 13,7 μM , respectivamente. En julio del 2015, a 15 m, se observa una excepción en las concentración de nitrato con valor de 36,88 μM ; en esta misma fecha se registra una concentración de 45,11 μM de ácido silícico, cuando el promedio es 3,43 μM ; y un valor positivo para N^* (13,09), cuando lo típico son valores negativos, con un promedio de -6,48, los cuales salen de los valores típicos observados, esto indica que no está ocurriendo desnitrificación, al no haber déficit de nitrógeno; al contrario, puede que se esté produciendo nitrificación, lo cual concuerda con las altas concentraciones de nitrato y valores positivo de N^* . De este modo, las menores concentraciones de nutrientes se encuentran en ASAA, debido al agotamiento por parte de los productores primarios que asimilan nutrientes, mientras que como resultado de esta actividad primaria se desarrollaron las mayores concentraciones de nitrito y amonio. La concentración de promedio de fosfato en ASAA presenta una correlación positiva, estadísticamente significativa con el ácido silícico promedio y nitrato promedio en ASAA, de 0,61 y 0,88, respectivamente; de esta forma el ácido silícico y nitrato

aumentando desde la superficie hacia la profundidad (Figura 4.2.2) presentando concentraciones del orden de $3,43 \pm 5,22 \mu M$ y $9,92 \pm 6,82 \mu M$, respectivamente.

Las aguas asociadas a la AESS generalmente presentan las mayores concentraciones de nutrientes. De acuerdo a Silva et al. (2009) esta masa de agua presenta concentraciones de nitrato que varían entre 12 y $32 \mu M$, lo cual concuerda con lo encontrado en este estudio (concentraciones promedio de $24,98 \pm 5,73 \mu M$). El fosfato, por otra parte, presenta en la zona de estudio concentraciones promedio de $2,79 \pm 0,29 \mu M$, superior a las concentraciones típicas reportadas de 2,2 y $2,6 \mu M$ para AESS (Silva et al., 2009). Sin embargo, se debe considerar que las mayores concentraciones de nutrientes se observan por lo general en estaciones cercanas a la costa, por lo que la mayor distancia de la costa de las estaciones consideradas por Silva et al (2009), podrían explicar las diferencias observadas. Esto no sería evidente en las concentraciones de nitrato, debido a que la heterogeneidad de la ocurrencia de procesos de remoción de nitrato como la desnitrificación genera que exista un mayor rango de concentración de este nutriente. Estas diferencias en las concentraciones de nitrato se muestran también como diferencias de acuerdo a lo reportado por Llanillo et al. (2013) para la AESS, quienes observaron a $86^\circ W$ cerca del Ecuador, concentraciones de nitrato de $32,7 \mu M$, mayores a las reportadas en el presente estudio. La concentración de oxígeno a estas bajas latitudes fue $13,6 \mu M$ para AESS, menos de la mitad de lo observado en STOV ($32 \pm 23,17 \mu M$). Sin embargo, las aguas de AESS en la zona de estudio experimentan los menores valores de déficit de nitrógeno (i.e., N^*) de las tres masas de agua (Figura 4.2.3) con promedio de $-16,87 \pm 6,67$, esto porque a su vez es la masa donde más bajo contenido de oxígeno hay y se producen procesos de desnitrificación que aumentan el déficit de nitrógeno. El N^* Tiene una correlación de 0,74 con el nitrato y -0,52 con el ácido silícico, indicando los procesos de desnitrificación que ocurren en la zona.

Por otra parte, las concentraciones de nitrato, fosfato y ácido silícico observadas en AIAA se encuentran dentro de los rangos reportados en la región (Silva et al., 2009). Una excepción se observó con algunas concentraciones de fosfato mayores a las reportadas (hasta $3,23 \mu M$), lo cual se debería a la mayor cercanía a la costa de las mediciones del presente estudio al igual que lo observado en AESS. Asimismo, comparando este estudio con Llanillo et al. (2013) para AIAA las concentraciones de nitrato y fosfato fueron mayores a $33^\circ S$ que en el Ecuador, donde tiene valores

de 28,5 y 1,97 μM .

5.2. Meteotsunami

Al igual que el patrón de circulación de vientos modula la ocurrencia de los eventos de surgencia (Thiel et al., 2007), otros eventos atmosféricos afectan al océano. Así por ejemplo, los cambios bruscos de presión que ocurrieron en agosto de 2015, gatillaron un evento de marejadas extremas conocido como meteotsunami (Carvajal et al, 2017), el cual, provocó una perturbación en toda la columna de agua de la estación de estudio. Con el registro mensual de la zona de surgencia frente a Valparaíso como parte de la Serie de Tiempo STOV, esta perturbación pudo ser claramente detectada también en la variabilidad biogeoquímica.

De acuerdo con Soto (2019), posterior al meteotsunami se produjo una perturbación física y biogeoquímica en la mayor parte de la columna de agua (0 - 1000 m). Los efectos de este meteotsunami se observaron en una disminución de la temperatura, salinidad y nitrato, mientras que el nitrito y amonio presentaron un aumento en relación a las mismas profundidades a lo largo del período de estudio. En este estudio, entre 100 y 400 m se observa una disminución de salinidad (entre 34,4 y 34,5) y un aumento de la concentración de oxígeno disuelto (entre 45 y 90 μM) (Figura 4.1.1). En cuanto al nitrato bajo 50 m se observa una disminución de la concentración (10-15 μM). Por otra parte, el nitrito aumenta a 0,1 μM y el amonio 0,3 μM (figura 4.1.3) respecto a la serie. Con respecto al N^* , se intensifica la zona con déficit de nitrógeno, expandiéndose verticalmente llegando hasta los 1000 m con valores menores a -20. En cuanto al fosfato no se ve mayormente afectados por el evento.

5.3. Presencia de remolinos de mesoescala

Los remolinos intratermoclina (ITEs) contienen núcleos de alta salinidad ($>34,5$) y bajo oxígeno disuelto ($<1 \text{ mL}^{-1}$, equivalente a 44,6 $\mu\text{mol/kg}$), siendo características asociadas a AESS (Andrade et al., 2014; Auger et al., 2021; Hormazabal et al., 2013; Stramma et al., 2014; Thomsen et al., 2016). Las características antes descritas se presentan en ciertas fechas durante el periodo estudiado en la zona de estudio. Los ITEs suelen afectar a una gran parte de

la columna de agua y provocan desplazamiento vertical en ambas termoclinas, estacional y permanente (Morales et al., 2012), produciendo una estructura en forma de lente. Los ITEs se caracterizan por presentar una trayectoria de propagación hacia el oeste (Chelton et al., 2007) transportando aguas de alta salinidad contenidas en el núcleo subsuperficial con alta participación de la AESS hacia océano abierto.

El análisis de masas de agua como criterio de detección de remolinos para esta zona (i.e., alta salinidad, >34.5) y bajo oxígeno disuelto ($<44,6 \mu\text{mol}/\text{kg}$) indica que los ITEs, en la capa subsuperficial, presentan dominancia de AESS (Figura 4.2.5), lo cual concuerda con lo presentado en la literatura (Chaigneau et al., 2011; Andrade et al., 2014; Auger et al., 2021; Hormazabal et al., 2013; Stramma et al., 2014; Thomsen et al., 2016). De acuerdo a esto, las características biogeoquímicas de la AESS implican que los ITEs también están transportando condiciones reducidas desde el origen en la zona costera hacia el océano abierto. Colas et al. (2012) plantean que en Chile los remolinos anticiclónicos presentan su núcleo entre la superficie y 250 m, esto concuerda con lo encontrado, donde a 33°S el núcleo de los ITEs identificados muestran su núcleo cercano a 200 m, de acuerdo a la salinidad. Por otra parte, el estudio de Chaigneau et al. (2011) muestra que los núcleos de los remolinos anticiclónicos están a 400 m, pero se encontraron en la subtermoclina a σ de $26-26,8 \text{ kgm}^{-3}$ que corresponde a la zona donde se aprecian los ITEs en este estudio (Figura 4.1.1) concordando con el núcleo en AESS.

El criterio de identificación de ITEs a partir de las características de salinidad y oxígeno disuelto puede ser complementado con el análisis de altimetría satelital para confirmar no sólo la expresión de estos remolinos subsuperficiales en superficie, sino que también de su permanencia, evolución y transporte hacia afuera de la costa. En particular, para este estudio es necesario el estudio del nivel del mar, ya que la variabilidad de la presencia de AESS depende de forzantes remotos ecuatoriales (Pizarro et al., 2001), lo cual puede llevar a la confusión entre la presencia de ITEs y la intensificación de la masa de agua predominante en la zona. En base al seguimiento de remolinos de los datos AVISO+, como herramienta complementaria para la detección de remolinos, se detectaron 9 remolinos anticiclónicos, cuya señal pasó por la estación de estudio entre 2015 y 2020 (Tabla 4.4.1). De estos remolinos, los tres observados en el año 2018 se detectó su formación en las cercanías de la estación de estudio. Estos 3 remolinos están por debajo del promedio de desfase,

el cual es de 28,8 días. Esto quiere decir que los ITEs observados el año 2018 se formaron en menor tiempo de acuerdo al promedio (28,8 días), desde que la señal de los remolinos pasó por la estación hasta que cumplió las cualidades para ser calificado como un remolino por AVISO+. El resto de los remolinos se detectaron varios kilómetros mar adentro. De los 9 remolinos detectados, 5 se formaron al sur de la zona de estudio, 2 al norte y otros 2 a la misma latitud, pero hacia el oeste (72-73 °W). Sin embargo, la señal de formación de los 9 remolinos pasó por la estación de estudio. Villegas (2020), en un estudio realizado entre enero y agosto del año 2015 detectó 2 períodos con presencia de remolinos. El primero entre enero y marzo y el segundo entre junio y julio. Sin embargo, aun cuando el criterio biogeoquímico de la columna de agua indica la presencia de remolinos, la detección satelital muestra que en el 2015 se presentaron remolinos en dos periodos, en mayo y agosto (Figura 4.4.1). No obstante, en los periodos detectados satelitalmente, el criterio de salinidad y oxígeno solo se cumple en agosto, pero no en el mes de mayo (Figura 4.2.5). Esta diferencia con Villegas puede ser debida a que no siempre se cumplen ambos criterios, dado que no siempre se presentan señales en la superficie de remolinos, o que esta señal se mantenga en el tiempo.

Por otra parte, en este estudio se usa la detección de remolinos de AVISO+ el cual tiene un proceso más complejo; además de no contemplar la intensificación de AESS. En el año 2016, aun cuando de acuerdo al criterio de salinidad y oxígeno existieron remolinos, y a pesar de que AESS no es tan intensa como en otro periodo del mismo estudio (Figura 4.2.5), no se observaron remolinos que pasaran la señal por la estación, si bien sí hubo a los alrededores estos fueron menores a los detectados otros años. Esta disminución en la formación de remolinos puede deberse al fuerte evento El Niño 2015-2016, ya que durante eventos fuertes de El Niño el número de ITEs disminuye (Combes et al., 2015).

El análisis de variación del nivel del mar en la estación de estudio muestra que si bien se detectaron remolinos en 2015, 2017, 2018 y 2019, el nivel del mar no respondió de forma clara con anomalías positivas en todos los años en las fechas de los ITEs, excepto en 2017 y 2018 (Figura 4.4.5 y 4.4.6). Esto podría implicar que si bien bajo el criterio de salinidad y oxígeno se detectan ITEs, y satelitalmente se presenta un aumento en el nivel del mar comparados con las cercanías de la zona, no se observan cambios o patrón claro en el nivel del mar en la estación. Esto podría explicar las diferencias del presente estudio con los resultados obtenidos

por Villegas (2020). No obstante, aún se debe considerar los forzantes remotos u otro evento que influyen la zona en sus características físicas y biogeoquímicas, en vista de que en el periodo de estudio hubo, al menos, un evento que pudo afectar en mayor medida a las estructuras de mesoescala (i.e., El Niño/La Niña). Los efectos que estos eventos tienen sobre la estructura vertical en la zona de estudio y las características de formación de los remolinos no fueron consideradas en este trabajo. Sin embargo, según lo planteado por Combes et al. (2015) la variabilidad interanual de El ENSO, moldea el número de ITEs que se forman, disminuyendo en la fase cálida (El Niño). Además, según Espinoza-Morriberón et al. (2019) los remolinos incrementan la ventilación de la zona, causando un aumento del oxígeno, junto con un aumento en la remineralización de la materia orgánica en la subsuperficie, que es mayor durante El Niño. De forma análoga al nivel del mar, en el periodo 2018 y 2019 se ven cambios en la temperatura, salinidad y oxígeno en el paso del remolino, pero estos cambios no siguen el mismo comportamiento en el año 2015; la tendencia de estas variables no es continua, dado la discontinuidad en los datos lo que dificulta el análisis para encontrar respuestas de dichas variables con el paso de ITEs.

5.4. Biogeoquímica de los remolinos de mesoescala

Las características de mayor salinidad y menor oxígeno, asociadas a AESS, se observan en la capa subsuperficial a lo largo de todo el período de estudio. Sin embargo, estas características se intensifican en cierto periodo de tiempo sugiriendo una mayor participación de la masa de agua, condición que en general esta asociada a la presencia de remolinos intratermoclina modificando con ello, las diferentes condiciones biogeoquímicas respecto a cuando no hay presencia de remolinos. Para definir las diferencias en las características biogeoquímicas de la columna de agua entre períodos con y sin remolinos, se realizaron diferentes análisis estadísticos con resultados que se discuten a continuación.

El análisis de componentes principales (ACP) aplicado por masa de agua (i.e., ASAA, AESS y AIAA) no muestra una clara diferenciación en los grupos entre períodos con y sin remolinos (Figuras 4.5.5(a), 4.5.6(a) y 4.5.7(a)). El análisis muestra, sin embargo, una diferencia entre las capas dominadas por las distintas

masas de agua (Figuras 4.5.5(b), 4.5.6(b) y 4.5.7(b)), con una agrupación con el incremento de salinidad de AESS (Apendice Figura A.0.1). Estas diferencias encontradas por profundidad implican que las propiedades físicas y biogeoquímicas están estratificadas, pero los periodos de tiempo con y sin remolinos no entregan información de jugar un papel relevante, esto se puede ver bien en AESS y AIAA (Figuras 4.5.6(b) y 4.5.7(b), respectivamente). Además, la agrupación con respecto a la salinidad en AESS sugiere que en aquellos puntos donde la salinidad es mayor a 34,6 la variabilidad de las concentraciones de nitrato, nitrito, fosfato y ácido silícico estarían involucradas en los procesos en los ITEs. La razón de porque no se aprecia una diferenciación clara entre periodos con y sin remolinos, a diferencia de separados por profundidad o salinidad, es que en el ACP de periodo con y sin remolinos la variabilidad está enmascarada debido a que son muchas las variables que entran en el análisis estadístico. Por esta razón, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para definir si existieron diferencias entre los periodos con y sin remolinos para cada variable y no de todas juntas como en el ACP.

Los resultados estadísticos de la ANOVA, realizados por masa de agua para cada variable biogeoquímica, mostraron diferencias significativas entre los periodos con y sin ITEs para algunas variables dependiendo de la masa de agua. En la capa superficial, según Correa-Ramirez et al. (2007) los remolinos ciclónicos son asociados con mayor concentración de clorofila-a, a diferencia de los anticiclónicos. Aun así, los remolinos junto con la surgencia son asociados con un aumento en la producción primaria en la zona central de Chile y su distribución mar adentro. Además, Gruber et al. (2011) observaron que en los Sistemas de Borde Oriental con alta presencia de remolinos se encontró baja actividad de producción biológica. En el presente estudio se encontró diferencias significativas de fluorescencia entre 0 y 100 m entre periodos con y sin remolinos. Sobre 40 m se presenta menor concentración de fluorescencia en presencia de remolinos que en los periodos sin remolinos ($1.05 \mu\text{gL}^{-1}$). Considerando estas diferencias en fluorescencia entre periodos con y sin remolinos, se esperaría observar estas diferencias también en el contenido de materia orgánica (C y N); presentando menores concentraciones promedios en periodos con remolinos para el carbono y nitrógeno en los primeros 40 m. Por el contrario, sí se observaron diferencias con mayores (menores) concentraciones de nitrito (amonio) durante los periodos de ITEs (Figura 4.5.2), aunque estas diferencias son significativas de acuerdo al ANOVA en el nitrito, pero no en el

amonio. Asimismo se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de nitrato, fosfato y ácido silícico, no así en N^* (Apendice tabla B.0.1), presentando menores concentraciones de los tres nutrientes en periodos con ITEs. De acuerdo con Sweeney et al. (2003), en los ITEs se presenta un aumento en los nutrientes y en la producción primaria; por el contrario en este estudio se presentan menores concentraciones de nutrientes (amonio, nitrato, fosfato y ácido silícico) y menor producción primaria. Además, el trabajo anteriormente señalado presenta que existen diferencias físicas y biogeoquímicas en los ITEs del resto de remolinos, donde los ITEs y remolinos ciclónicos son asociados a mayor producción primaria, pero de manera diferente, mientras que, los anticiclónicos son asociados a menor producción.

En la capa subsuperficial, entre 100 y 400 m, asociada a AESS, existen diferencias estadísticamente significativas en la concentración de oxígeno entre periodos con y sin remolinos. En los periodos con presencia de ITEs se registra menor concentración de oxígeno (tan baja como $18 \mu M$). Esta disminución de la concentración de oxígeno implica una modificación de las condiciones redox de esta capa de agua, afectando los procesos biogeoquímicos que se dan en la zona y el reciclaje de trazadores biogeoquímicos como nutrientes y gases de efecto invernadero. De acuerdo al ANOVA, se observan diferencias significativas en la distribución de CO_2 y N_2O entre 100 y 400 m, con mayores concentraciones de ambos GEI en periodos con presencia de remolinos (Figura 4.5.3(a)). Esto no concuerda con lo planteado por Arévalo-Martínez et al. (2016) donde en los centros con bajo contenido de oxígeno de los remolinos anticiclónicos se produce pérdida o agotamiento de óxido nítrico. Sin embargo, el estudio de Arévalo-Martínez et al. (2016) es realizado en el Pacífico Sur tropical oriental donde se ubica la ZMO permanente, con concentraciones de oxígeno menores a las presentes en este estudio. Estas diferencias en la concentración de oxígeno se deberían a que cuando la ZMO característica de la AESS arriba a la zona de estudio, está más oxigenada producto de la mayor ventilación a lo largo del transporte por la Corriente Perú-Chile. Por otra parte, las diferencias de oxígeno tienen implicancias biogeoquímicas importantes, gatillada a menores concentraciones, como las observadas en el norte, procesos de desnitrificación que utilizan N_2O , observándose una disminución del gas. Las mayores concentraciones de oxígeno observadas en la zona de estudio no favorecen la ocurrencia de este proceso, explicando las mayores concentraciones

de este gas en relación a lo observado por Arevalo-Martinez et al. (2016). Se ha encontrado que se pueden formar zonas muertas en los remolinos; según Karstensen et al. (2015) los ITEs pueden crear zonas muertas más intensas que los remolinos ciclónicos. No obstante, en los periodos con ITEs, las concentraciones de oxígeno nunca llegan a la anoxia ($1 \mu M$) y forman una zona muerta, por lo que el óxido nitroso se sigue formando. De acuerdo con Cornejo-D'Ottone et al (2016), en los remolinos ocurre consumo y producción de N_2O por desnitrificación y nitrificación dependiendo de la variación de las condiciones reductoras que van cambiando con la profundidad. De esta forma, la concentración de oxígeno, de los ITEs observados en el presente estudio, genera que exista solo acumulación de N_2O dado que las concentraciones de oxígeno no son suficientemente bajas.

Según los trabajos de Stramma et al (2013) y Mahadevan (2014) los remolinos anticiclónicos en el núcleo de la mínima de oxígeno contienen baja concentración de nitrato, pero alta concentración de nitrito, sugiriendo la presencia de desnitrificación activa en la zona, concordando bien con la mayor concentración de óxido nitroso. Estas diferencias en ambas especies de nitrógeno (i.e., nitrato y nitrito) se observan en el presente estudio, donde los periodos con presencia de ITEs se caracterizan por menor concentración promedio de nitrato y mayor de nitrito entre los 100 y 400 m, profundidad donde se localizan los ITEs en la zona (Figura 4.5.3(b)). Sin embargo, esta diferencia es estadísticamente significativa solo para el nitrito; mientras que, para el nitrato solo hay diferencia estadísticamente significativa entre periodos con y sin remolinos para los primeros 100 m, bajo esta profundidad ya no hay significancia entre los periodos por parte de esta especie. En cuanto, a los demás nutrientes (ácido silícico, amonio, fosfato) y N^* no hay diferencias estadísticamente significativas. Si bien Altabet et al (2012) y Stramma et al. (2013) plantean que en los ITEs activan y aumentan la pérdida de nitrógeno en la zona donde se ubican, esto no se cumple, no se aprecian diferencias entre periodos con y sin remolinos en el déficit de nitrógeno entre los 100 y 400 m (Figura 4.5.3(b)). Así, los procesos en la zona están asociados a las especies de nitrógeno, específicamente al nitrito y no otro proceso físico (i.e., mezcla). Morales et al. (2012) plantean que los procesos verticales y horizontales alrededor de los remolinos podrían estar implicados en el enriquecimiento de nutrientes dentro de los remolinos frente a Chile central. Además, plantean que los mecanismo por los que los remolinos de mesoescala costeros se forman, influyen en la distribución de

nutrientes siendo más complejos que aquellos de océano abierto.

En el tramo más profundo, entre 400 y 900 m, dominado por la AIAA el oxígeno presenta diferencias estadísticamente significativas, con menores concentraciones en períodos de remolinos, al igual que lo observado en las capas superiores de la columna de agua. Del mismo modo, el N_2O , nitrito y N^* presentan diferencias significativas. El óxido nitroso es mayor en periodos con ITEs, mientras que se presenta menor N^* . Por parte del nitrito, qué periodo tiene más concentraciones del nutriente varía a lo largo de la profundidad, no estableciéndose una tendencia clara de aumento o disminución con periodos con y sin ITEs. En cuanto al CO_2 , no hay diferencias significativas entre periodos con y sin remolinos, al igual que el resto de nutrientes (ácido silícico, nitrato, amonio y fosfato), pero si entre los 400 y 500 m se observa mayor concentración del gas en los periodos con ITEs, luego de los 500 m la diferencia en concentraciones se reduce, pero manteniendo mayores concentraciones en promedio durante los remolinos, esta reducción es producto que disminuyen los procesos que involucran al gas al estar alejado de la superficie.

Las aguas de océano abierto impactadas por los remolinos de mesoescala, transportando aguas y sus propiedades desde la zona costera, en este estudio se encontró que 2 remolinos que se forman en la zona de estudio son transportados a distancias mayores a 800 km; para la mayor parte de estos remolinos su señal superficial desaparece al este de $78^\circ W$. En el periodo de estudio, solo los del año 2017 se transportaron más al oeste de $78^\circ W$, pero en ese dicho año no hay datos de STOV.

Dado lo descrito, el estudio de los ITEs y los impactos que tienen estos debe continuar, puesto que la conexión de los remolinos con procesos como la producción primaria podría estar implicada con la distribución de recursos naturales de alta importancia socioeconómica (Hormazabal et al., 2013). También, los ITEs guardan relación con los gases de efecto invernadero, dióxido de carbono y óxido nitroso, por lo que continuar el estudio de estos es clave para presentes y futuros escenarios en torno al cambio climático. Una parte no contemplada en este trabajo, pero no menos importante es que los remolinos al transportar aguas y sus propiedades, dejan un recambio en dicha zona, con nuevas aguas y propiedades biogeoquímicas.

Finalmente, se rechaza la hipótesis planteada en este estudio, ya que, si bien en la zona a $33^\circ S$ hay formación de remolinos y estos llevan una intensificación del

aporte de AESS, estos no tiene menores concentraciones de N_2O , al contrario, son mayores en toda la columna de agua. Aun así, si presentan mayores concentraciones de CO_2 en toda la columna de agua y se produce un mayor déficit de nitrógeno bajo la profundidad del remolino, a los 400 m.

Capítulo 6

Conclusión

1. La estación de estudio presentó una estructura física y biogeoquímica típica para la región, con núcleos superficiales de alta concentración de clorofila en primavera y verano a los que se asociaron máximos de nitrito y amonio. La capa subsuperficial presentó núcleos de alta salinidad y bajo contenido de oxígeno, los que se intensificaron en primavera y verano y estuvieron acompañados de mayor concentración de nutrientes y gases de efecto invernadero y mayor déficit de nitrógeno. Bajo estas aguas subsuperficiales (>500 m) las aguas son más oxigenadas, y presentan una menor salinidad, concentración de nutrientes y gases de efecto invernadero. Estas aguas se caracterizaron por presentar una menor variabilidad en el tiempo, a diferencia de las capas superiores.
2. La columna de agua, entre 0 y 1000 m, en la zona de generación de remolinos de mesoescala frente a Valparaíso muestra la presencia de ASAA, AEES y AIAA. La participación de cada una de ellas depende de la época del año y de la presencia de remolinos intratermoclina o de otros eventos como el meteotsunami de agosto de 2015. ASAA presenta mayor participación en otoño-invierno y AEES en primavera-verano y en presencia de remolinos de mesoescala (>75 % de participación, abarcando hasta 400 m de la capa subsuperficial), mientras que, la participación de AIAA tiene una menor variabilidad en el tiempo.
3. En superficie, dominada por ASAA, la relación significativa entre el oxígeno, el nitrato y óxido nitroso indica la dominancia de nitrificación en la acumulación de óxido nitroso. En cambio, entre 100 y 400 m, dominada por AEES, el incremento del déficit de nitrógeno revela la ocurrencia y/o advección de aguas con desnitrificación

activa. En cuanto a AIAA, el ciclo del nitrógeno sigue activo.

4. La determinación de remolinos de mesoescala utilizando los criterios de alta salinidad ($>34,6$) y baja concentración de oxígeno disuelto ($<45 \mu M$), permitió identificar 13 remolinos intratermoclina durante el periodo de estudio. Sin embargo, solo 9 de estos remolinos fueron detectados superficialmente a través del análisis de altimetría satelital; dos el 2015, dos el 2017, tres el 2018, dos el 2019 y ninguno durante el 2016 o enero 2020. El tiempo de desfase de estos remolinos fue variable, con los menores observados el año 2018.

5. La columna de agua de la zona de formación de remolinos de mesoescala frente a Valparaíso presentó diferencias en algunas características físicas y biogeoquímicas entre periodos con y sin remolinos de mesoescala. En los primeros 100 m hay menores concentraciones de fluorescencia y amonio en presencia de ITEs; al contrario hay más concentración de nitrito en los remolinos. Entre 100 y 400 m, los ITEs, presentan menor concentración de oxígeno disuelto y mayores concentraciones de CO_2 y N_2O y un mayor déficit de nitrógeno, aunque este último no es estadísticamente significativo. Entre 400 y 900 m los ITEs presentan menor concentración de oxígeno, mientras que mayores concentraciones de N_2O y mayor déficit de nitrógeno.

Bibliografía

- [1] Andrade, I., Hormazábal, S., & Combes, V. (2014). Intrathermocline eddies at the Juan Fernández Archipelago, southeastern Pacific Ocean. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(4), 888-906.
- [2] Altabet, M. A., Ryabenko, E., Stramma, L., Wallace, D. W. R., Frank, M., Grasse, P., and Lavik, G.: An eddy-stimulated hotspot for fixed nitrogen-loss from the Peru oxygen minimum zone, *Biogeosciences*, 9, 4897–4908, <https://doi.org/10.5194/bg-9-4897-2012>, 2012.
- [3] Arévalo-Martínez, D. L., Kock, A., Löscher, C. R., Schmitz, R. A., Stramma, L., & Bange, H. W. (2016). Influence of mesoscale eddies on the distribution of nitrous oxide in the eastern tropical South Pacific. *Biogeosciences*, 13(4), 1105-1118.
- [4] Auger, P. A., Bento, J. P., Hormazabal, S., Morales, C. E., & Bustamante, A. (2021). Mesoscale variability in the boundaries of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific: Influence of intrathermocline eddies. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2019JC015272. <https://doi.org/10.1029/2019JC015272>.
- [5] Bello, Monica., Barbieri, M. A., Salinas, Sergio., & Soto, Luis. (1997). Surgencia costera en la zona central de Chile, durante el ciclo El Niño-La Niña 1997-1999. *El Niño-La Niña*, 2000, 77-94.
- [6] Carr, M. E., & Kearns, E. J. (2003). Production regimes in four Eastern Boundary Current systems. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(22-26), 3199-3221.
- [7] Carvajal, M., M. Contreras-López, P. Winckler & I. Sepúlveda. 2017.

- Meteotsunamis occurring along the southwest coast of South America during an intense storm. *Pure and Applied Geophysics*.
- [8] Chaigneau, A., & Pizarro, O. (2005). Eddy characteristics in the eastern South Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C6).
- [9] Chaigneau, A., Eldin, G., & Dewitte, B. (2009). Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007). *Progress in Oceanography*, 83(1-4), 117-123.
- [10] Chaigneau, A., Le Texier, M., Eldin, G., Grados, C., & Pizarro, O. (2011). Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C11).
- [11] Chavez, F. P., & Messié, M. (2009). A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems. *Progress in Oceanography*, 83(1-4), 80-96.
- [12] Chelton, D. B., Deszoeke, R. A., Schlax, M. G., El Naggar, K. & Siwertz, N. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation. *J. Phys. Oceanogr* 28, 433–460 (1998).
- [13] Chelton, D. B., Schlax, M. G., Samelson, R. M., & de Szoeki, R. A. (2007). Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, 34(15).
- [14] CMEMS.(2021).MyOcean.https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047
- [15] Colas, F., McWilliams, J. C., Capet, X., & Kurian, J. (2012). Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system. *Climate dynamics*, 39(1), 509-529.
- [16] Combes, V., Hormazabal, S., & Di Lorenzo, E. (2015). Interannual variability of the subsurface eddy field in the Southeast Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(7), 4907-4924.
- [17] Contreras, M., Pizarro, O., Dewitte, B., Sepulveda, H. H., & Renault, L. (2019). Subsurface mesoscale eddy generation in the ocean off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 5700–5722. <https://doi.org/10.1029/2018JC014723>

- [18] Cornejo-D'Ottone, M., Bravo, L., Ramos, M., Pizarro, O., Karstensen, J., Gallegos, M., & Karp-Boss, L. (2016). Biogeochemical characteristics of a long-lived anticyclonic eddy in the eastern South Pacific Ocean. *Biogeosciences*, 13(10), 2971-2979.
- [19] Cornejo-Guzman., S., 2017. [Tesis para optar al título de Geofísico] Mecanismos de mesoescala y variables biogeoquímicas que determinan la variabilidad de clorofila-a en el Archipiélago de Juan Fernández.
- [20] Correa-Ramirez, M. A., Hormazábal, S., & Yuras, G. (2007). Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29–39 S). *Geophysical Research Letters*, 34(12).
- [21] Czeschel, R., Stramma, L., Schwarzkopf, F. U., Giese, B. S., Funk, A., & Karstensen, J. (2011). Middepth circulation of the eastern tropical South Pacific and its link to the oxygen minimum zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C1).
- [22] Escribano, R., Fernández, M., & Aranís, A. (2003). Physical-chemical processes and patterns of diversity of the Chilean eastern boundary pelagic and benthic marine ecosystems: an overview. *Gayana*, 67(2), 190-205.
- [23] 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.
- [24] Espinoza-Morriberón D, Echevin V, Colas F, Tam J, Gutierrez D, Graco M, Ledesma J and Quispe-Ccalluari C (2019) Oxygen Variability During ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Front. Mar. Sci.* 5:526. doi: 10.3389/fmars.2018.00526
- [25] Faghmous, J. H., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A., & Kumar, V. (2015). A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry. *Scientific data*, 2(1), 1-16.
- [26] Figueroa, D., & Moffat, C. (2000). On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean coast. *Geophysical Research Letters*, 27(23), 3905-3908.

- [27] Frenger, I., Bianchi, D., Stührenberg, C., Oschlies, A., Dunne, J., Deutsch, C., ... & Schütte, F. (2018). Biogeochemical role of subsurface coherent eddies in the ocean: Tracer cannonballs, hypoxic storms, and microbial stewpots?. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(2), 226-249.
- [28] Gruber, N., Lachkar, Z., Frenzel, H., Marchesiello, P., Münnich, M., McWilliams, J. C., & Plattner, G. K. (2011). Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems. *Nature geoscience*, 4(11), 787-792.
- [29] Hormazabal, S., Shaffer, G., & Leth, O. (2004). Coastal transition zone off Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109 (C1).
- [30] Hormazábal, S., V. Combes, C.E. Morales, M.A. Correa-Ramirez, E. Di Lorenzo & S. Nuñez. 2013. Intrathermocline eddies in the coastal transition zone off central Chile (31-41°S). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(10): 4811-4821.
- [31] Johnson, G.C. & K.E. McTaggart. 2010. Equatorial Pacific 13°C water eddies in the eastern subtropical South Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 40(1): 226-236.
- [32] Karstensen, J., Ulloa, O. (2009). *Encyclopedia of Ocean Sciences || Peru–Chile Current System.* , (), 385–392. doi:10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
- [33] Karstensen, J., Fiedler, B., Schütte, F., Brandt, P., Körtzinger, A., Fischer, G., & Wallace, D. (2015). Open ocean dead zones in the tropical North Atlantic Ocean. *Biogeosciences*, 12(8), 2597-2605.
- [34] Llanillo, P. J., Karstensen, J., Pelegrí, J. L., & Stramma, L. (2013). Physical and biogeochemical forcing of oxygen and nitrate changes during El Niño/El Viejo and La Niña/La Vieja upper-ocean phases in the tropical eastern South Pacific along 86 W. *Biogeosciences*, 10(10), 6339-6355.
- [35] Mackey, K., Bristow, L.A., Parks, D.R., Altabet, M.A., Post, A.F., & Paytan, A. (2011). The influence of light on nitrogen cycling and the primary nitrite maximum in a seasonally stratified sea. *Progress in Oceanography*, 91, 545-560.
- [36] Mahadevan, A. (2014). Eddy effects on biogeochemistry. *Nature*, 506(7487), 168-169.

- [37] Mamayev, O. I. 1975. Water masses of the south East Pacific Ocean. En: R. Fraser, (ed.). *Oceanography of the South Pacific 1972. Papers presented at the International Symposium on the Oceanography of the South Pacific, Wellington, New Zealand, 9–12 February 1972.* Wellington, New Zealand National Commission for UNESCO, pp. 71–99.
- [38] Mason, E., A. Pascual, and J.C. McWilliams, 2014: A New Sea Surface Height–Based Code for Oceanic Mesoscale Eddy Tracking. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 31, 1181–1188, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00019.1>
- McGillicuddy, D. J., Robinson, A. R., Siegel, D. A., Jannasch, H. W., Johnson, R., Dickey, T. D., ... & Knap, A. H. (1998). Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Nature*, 394(6690), 263-266.
- [39] McGillicuddy Jr, D. J., Johnson, R., Siegel, D. A., Michaels, A. F., Bates, N. R., & Knap, A. H. (1999). Mesoscale variations of biogeochemical properties in the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C6), 13381-13394.
- [40] McGillicuddy, D. J.; Anderson, L. A.; Bates, N. R.; Bibby, T.; Buesseler, K. O.; Carlson, C. A.; Davis, C. S.; Ewart, C.; Falkowski, P. G.; Goldthwait, S. A.; Hansell, D. A.; Jenkins, W. J.; Johnson, R.; Kosnyrev, V. K.; Ledwell, J. R.; Li, Q. P.; Siegel, D. A.; Steinberg, D. K. (2007). Eddy/Wind Interactions Stimulate Extraordinary Mid-Ocean Plankton Blooms. *Science*, 316(5827), 1021–1026. doi:10.1126/science.1136256.
- [41] Michael G. Schlax and Dudley B. Chelton, 2016: The “Growing Method.” of Eddy Identification and Tracking in Two and Three Dimensions, College of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, Oregon State University, Corvallis, Oregon, July 8, 2016.
- [42] Morales, C. E., Blanco, J. L., Braun, M., & Silva, N. (2001). Chlorophyll-a distribution and mesoscale physical processes in upwelling and adjacent oceanic zones off northern Chile (summer–autumn 1994). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 81(2), 193-206.
- [43] Morales, C. E., & Lange, C. B. (2004). Oceanographic studies in the Humboldt Current System off Chile: an introduction. *Deep-Sea Research Part II*, 20(51), 2345-2348.

- [44] Morales, C. E., Hormazabal, S., Correa-Ramirez, M., Pizarro, O., Silva, N., Fernandez, C., & Torreblanca, M. L. (2012). Mesoscale variability and nutrient–phytoplankton distributions off central-southern Chile during the upwelling season: The influence of mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 104, 17-29.
- [45] Morales, C. E., Anabalón, V., Berto, J. P., Hormazabal, S., Cornejo, M., Correa-Ramirez, M. A., & Silva, N. (2017). Fronteddy influence on water column properties, phytoplankton community structure, and cross-shelf exchange of diatom taxa in the shelf-slope area off Concepción (36–37°S). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 8944–8965. <https://doi.org/10.1002/2017JC013111>.
- [46] Paulmier, A., & Ruiz-Pino, D. (2009). Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography*, 80(3-4), 113-128.
- [47] Pegliasco, C., Delepouille, A., Morrow, R., Faugère, Y., and Dibarboue, G.: META3.1exp : A new Global Mesoscale Eddy Trajectories Atlas derived from altimetry, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2021-300>, in review, 2021. Reyes, H.A., 2004. [tesis para optar al título de Oceanógrafo, PUCV] Variación espacio-temporal de las masas de agua Subtropical, Subantártica y Ecuatorial Subsuperficial en la zona norte de Chile (18°15'S-24°00'S) en el periodo 1980-2001.
- [48] Pizarro, O., Clarke, A. J., & Van Gorder, S. (2001). El Niño sea level and currents along the South American coast: Comparison of observations with theory. *Journal of Physical Oceanography*, 31(7), 1891–1903. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<1891:ENOSLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<1891:ENOSLA>2.0.CO;2).
- [49] Santoro, A. E., Sakamoto, C. M., Smith, J. M., Plant, J. N., Gehman, A. L., Worden, A. Z., Johnson, K. S., Francis, C. A., and Casciotti, K. L.: Measurements of nitrite production in and around the primary nitrite maximum in the central California Current, *Biogeosciences*, 10, 7395–7410, <https://doi.org/10.5194/bg-10-7395-2013>, 2013.
- [50] Shaffer, G., O. Pizarro, L. Djurfeldt, S. Salinas & J. Rutllant. 1997. Circulation and low-frequency variability near the Chilean coast: Remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. *J. Phys. Oceanogr.*, 27(2): 217-235.

- [51] Silva, N., Konow, D., 1975. Contribución al conocimiento de las masas de agua en el Pacífico Sudoriental Expedición Krill. Crucero 3–4 July–August 1974. *Revista de la Comisión Permanente Pacífico Sur* 3 ,63–75 (with English Abstract).
- [52] 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.
- [53] Strub PT, Mesías JM, Montecino V, Rutllant J, Salinas S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. Pages 273–313 in Robinson A, Brink K, eds. *The Sea*, vol. 14A: *The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses*. New York: John Wiley and Sons.
- [54] Stramma, L., Bange, H. W., Czeschel, R., Lorenzo, A., & Frank, M. (2013). On the role of mesoscale eddies for the biological productivity and biogeochemistry in the eastern tropical Pacific Ocean off Peru. *Biogeosciences*, 10(11), 7293-7306.
- [55] Stramma, L., Weller, R. A., Czeschel, R., & Bigorre, S. (2014). Eddies and an extreme water mass anomaly observed in the eastern south Pacific at the Stratus mooring. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(2), 1068-1083.
- [56] Soto, A., 2019. [tesis para optar al título de Oceanógrafo, PUCV] Efectos del meteotsunami de agosto de 2015 sobre las condiciones biogeoquímicas de la columna de agua frente a Valparaíso, Chile.
- [57] Sweeney, E. N., McGillicuddy Jr, D. J., & Buesseler, K. O. (2003). Biogeochemical impacts due to mesoscale eddy activity in the Sargasso Sea as measured at the Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(22-26), 3017-3039.
- [58] Thiel, M., Castilla, J. C., Fernández, M., & Navarrete, S. (2007). The Humboldt current system of northern and central Chile.
- [59] Thomsen, S., Kanzow, T., Krahnemann, G., Greatbatch, R. J., Dengler, M., & Lavik, G. (2016). The formation of a subsurface anticyclonic eddy in the Peru-Chile Undercurrent and its impact on the near-coastal salinity, oxygen, and nutrient distributions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(1), 476-501.

-
- [60] Villegas, V. 2020 [tesis para optar al título de Oceanógrafo, PUCV] Variabilidad de las características biogeoquímicas y de la comunidad bacteriana en la zona de formación de remolinos de mesoescala frente a Valparaíso ($\sim 33^\circ$ S).
- [61] Xiu, P., & Chai, F. (2011). Modeled biogeochemical responses to mesoscale eddies in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C10).

Apéndice A

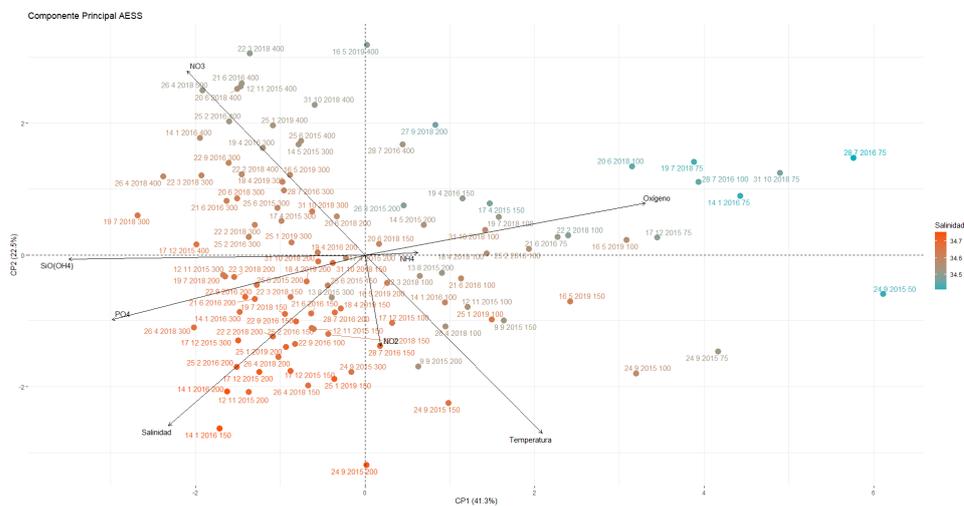


Figura A.0.1: Primeras y segunda componente principal de la masa de agua AESS. Los números de cada punto indican las fechas y la profundidad de la muestra, siendo el los últimos dígitos la profundidad.

Apéndice B

Tabla B.0.1: ANOVA de bloque de 0 a 100 m de las variables de temperatura, salinidad, oxígeno, fluorescencia, dióxido de carbono (CO_2), óxido nítrico (N_2O), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}), ácido silícico ($Si(OH)_4^-$) y amonio (NH_4^+).
 $H_0: \mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$; $H_a: \mu_{remolino} \neq \mu_{noremolino}$

variable	H_0	F Value	F Crítico	Pr	Decisión Estadística
Temperatura	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	41,8	3,937	3,847x10-9	Se rechaza a H_0 debido a que $41,8 > 3,937$
Salinidad	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	281,6	3,937	1,04x10-30	Se rechaza a H_0 debido a que $284,6 > 3,937$
Oxígeno	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	13,03	3,937	0,00048	Se rechaza a H_0 debido a que $13,03 > 3,937$
Fluorescencia	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	52,62	3,937	9,15x10-11	Se rechaza a H_0 debido a que $52,62 > 3,937$
CO_2	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	4,564	5,591	0,07	No se rechaza a H_0 debido a que $4,564 < 5,591$
N_2O	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	4,527	5,591	0,07	No se rechaza a H_0 debido a que $4,527 < 5,591$
NO_3^-	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	40,24	5,591	0,00038	Se rechaza a H_0 debido a que $40,24 > 5,591$
NO_2^-	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	27,577	5,591	0,00118	Se rechaza a H_0 debido a que $27,577 > 5,571$
PO_4^{3-}	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	27,12	5,591	0,0012	Se rechaza a H_0 debido a que $27,12 > 5,591$
NH_4^+	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	1,427	5,591	0,0271	No se rechaza a H_0 debido a que $1,427 < 5,591$
$Si(OH)_4^-$	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	136	5,591	7,7x10-6	Se rechaza a H_0 debido a que $136 > 5,591$
N*	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	3,46	5,591	0,1	No se rechaza a H_0 debido a que $3,46 < 5,591$

Tabla B.0.2: ANOVA de bloque de 100 a 400 m de las variables de temperatura, salinidad, oxígeno, fluorescencia, dióxido de carbono (CO_2), óxido nítrico (N_2O), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_3^{4-}), ácido silícico ($Si(OH)_4^-$) y amonio (NH_4^+).
 $H_0: \mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$; $H_a: \mu_{remolino} \neq \mu_{noremolino}$

variable	H_0	F Value	F Crítico	Pr	Decisión Estadística
Temperatura	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	0,005	3,87	0,94	No se rechaza a H_0 debido a que $0,005 < 3,87$
Salinidad	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	3,325	3,87	0,0692	No se rechaza a H_0 debido a que $2,325 < 3,87$
Oxígeno	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	420,1	3,87	0,00048	Se rechaza a H_0 debido a que $420,1 > 3,87$
CO_2	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	212,012	10,12	0,0007	Se rechaza a H_0 debido a que $212,012 > 10,12$
N_2O	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	33,46	10,12	0,01	Se rechaza a H_0 debido a que $33,46 > 10,12$
NO_3^-	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	6,667	10,12	0,08	No se rechaza a H_0 debido a que $6,667 < 10,12$
NO_2^-	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	91,801	10,12	0,0024	Se rechaza a H_0 debido a que $91,801 > 10,12$
PO_3^{4-}	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	0,744	10,12	0,45	No se rechaza a H_0 debido a que $0,744 > 10,12$
NH_4^+	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	0,351	10,12	0,59	No se rechaza a H_0 debido a que $0,351 < 10,12$
$Si(OH)_4^-$	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	0,001	10,12	0,976	No se rechaza a H_0 debido a que $0,001 < 10,12$
N*	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	2,195	10,12	0,23	No se rechaza a H_0 debido a que $2,195 < 10,12$

Tabla B.0.3: ANOVA de bloque de 400 a 900 m de las variables de temperatura, salinidad, oxígeno, fluorescencia, dióxido de carbono (CO_2), óxido nítrico (N_2O), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}), ácido silícico ($Si(OH)_4^-$) y amonio (NH_4^+).
 $H_0: \mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$; $H_a: \mu_{remolino} \neq \mu_{noremolino}$

variable	H_0	F Value	F Crítico	Pr	Decisión Estadística
Temperatura	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	1984	3,86	5,37x10-176	Se rechaza a H_0 debido a que 1984 > 3,86
Salinidad	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	115,01	3,86	2,74x10-24	Se rechaza a H_0 debido a que 115,01 > 3,86
Oxígeno	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	945,15	3,86	3,14x10-117	Se rechaza a H_0 debido a que 945,15 > 3,86
CO_2	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	6,817	10,12	0,079	No se rechaza a H_0 debido a que 5,817 < 10,12
N_2O	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	18,499	10,12	0,023	Se rechaza a H_0 debido a que 18,499 > 10,12
NO_3^-	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	1,167	10,12	0,35	No se rechaza a H_0 debido a que 1,167 < 10,12
NO_2^-	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	1516,58	10,12	3,72x10-5	Se rechaza a H_0 debido a que 1516,58 > 10,12
PO_4^{3-}	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	3,217	10,12	0,17	No se rechaza a H_0 debido a que 3,217 > 10,12
NH_4^+	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	0,005	10,12	0,948	No se rechaza a H_0 debido a que 0,005 < 10,12
$Si(OH)_4^-$	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	1,909	10,12	0,26	No se rechaza a H_0 debido a que 1,909 < 10,12
N*	$\mu_{remolino} = \mu_{noremolino}$	11,628	10,12	0,042	Se rechaza a H_0 debido a que 11,628 > 10,12