

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



**Variabilidad en datos de testigos
sedimentarios en la región central de
Chile: interpretación en termino de
procesos de oxigenación a escala
inter-anual e inter-decadal**

De
Iván Almendra Gajardo

Tesis presentada al Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias
Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción para optar al título
de geofísico

Junio, 2020

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

Variabilidad en datos de testigos sedimentarios en la
región central de Chile: interpretación en termino de
procesos de oxigenación a escala inter-anual e
inter-decadal

De
Iván Almendra Gajardo

Tesis presentada al Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias
Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción para optar al título
de geofísico

Profesor Guía: Carolina Parada

Comisión de evaluación: Práxedes Muñoz, Boris Dewitte

Concepción, Chile

Junio, 2020

© 2020 Iván Alejandro Almendra Gajardo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría comenzar agradeciendo a mis padres por su apoyo en mi desarrollo académico y personal. Agradecer también a Camila, por su paciencia y por su ayuda a concentrarme en mi investigación.

Me gustaría agradecer a Caly, por su ayuda en el desarrollo de esta tesis y además, por los consejos y el apoyo entregado.

A Práxedes por sus conocimientos en la geoquímica y por la facilitación de los datos del testigo sedimentario. Además, agradecerle por su apoyo y confianza. A Boris, me gustaría agradecerle por sus correcciones y consejos al momento de desarrollar la investigación, y por facilitarme las salidas del modelo hidrodinámico utilizado en este estudio.

Me gustaría agradecer al proyecto Fondecyt#1140851, a partir del cual surgieron los datos que dieron comienzo a esta tesis.

Índice general

1. Capítulo 1	2
1.1. Introducción	2
1.2. Zona de estudio e impacto de eventos ENSO	5
1.3. Hipótesis y objetivos	7
2. Capítulo 2	9
2.1. Metodología	9
2.1.1. Estado medio y desviación estándar media de OD y V	11
2.1.2. Cálculo de anomalías	11
2.1.3. Filtros	13
2.1.4. Índices ENSO	14
2.1.5. Análisis de compuestos	15
2.1.6. Cálculo de oxiclina	16
2.1.7. Funciones ortogonales empíricas	16
2.1.8. Regla de North	19
2.1.9. Correlación con desfase	19
3. Capítulo 3	20
3.1. Resultados	20
3.1.1. Razones elementales	20
3.1.2. Índices ENSO	24
3.1.3. Análisis de compuestos	25
3.1.4. Análisis de EOF para los primeros modos de variabilidad	38
3.1.5. Combinaciones lineales de los primeros modos de variabilidad	46
3.1.6. Análisis de EOF combinada	51
3.1.7. Análisis de desfase para escala temporal inter-anual	57
4. Capítulo 4	58
4.1. Discusión	58
4.1.1. Variabilidad inter-decadal de las concentraciones de oxígeno disuelto	58
4.1.2. Razones elementales y proxies paleo-climáticos	59
4.1.3. Variabilidad inter-anual de variables físicas y biogeoquímicas	60
4.1.4. Modelo Conceptual	61
4.2. Conclusión	64

A. Anexo	71
A.0.1. Análisis del testigo sedimentario	72
A.0.2. Razones isotópicas	74

Índice de figuras

1.1. Norte y centro de Chile, el recuadro azul enmarca la región espacial (latitud y longitud) utilizada para ambas secciones horizontales. La línea verde representa la transecta (longitudes) centrada en 30°S utilizada para la sección vertical.	6
2.1. a) Estado medio de corriente meridional. b) estado medio de oxígeno disuelto. c) Desviación estándar media de corriente meridional. d) Desviación estándar media de oxígeno disuelto. El estado medio y la desviación estándar media fueron estimados a través de un promedio y desviación estándar, respectivamente, para el período de 1850-2005.	12
3.1. Razones elementales de Mo/Al, Cd/Al, Re/Al y Ni/Al. La fila superior (inferior) corresponde al testigo de Guanaqueros (Coquimbo), este comprende el período 109 A.C. – 2015 A.D. (1183 – 2014 A.D.). Los puntos rojos corresponden a máximos para las fechas: 1850, 1969 y 1996. Los puntos verdes corresponden a máximos asociados a las fechas: 1861 y 2000.	21
3.2. Razones elementales de U/Al, Ca/Al; y los proxys de: carbono orgánico total (TOC) y ópalo biogénico (Opalo). La fila superior (inferior) corresponde al testigo de Guanaqueros (Coquimbo). Los puntos rojos corresponden a máximos para las fechas de: 1850, 1969 y 1996. Los puntos verdes corresponden a máximos asociadas a las fechas: 1861 y 2000.	22
3.3. Razones elementales para la relación de suboxia/anoxia. (Fila superior) Se muestran las razones elementales: Re/Mo y U/Mo para el testigo de Guanaqueros. Los puntos rojos corresponden a máximos para las fechas de: 1850, 1969 y 1996. (Fila inferior) Se tienen las mismas razones elementales descritos arriba, pero para el testigo de Coquimbo. Los puntos verdes corresponden a máximos asociadas a las fechas: 1861 y 2000.	22
3.4. Razones elementales para la erosión química. (Fila superior) Se muestran la razón elemental K/Ca y el proxy de tamaño de grano (MGS) testigo de Guanaqueros. Los puntos rojos corresponden a máximos para las fechas de: 1850, 1969 y 1996. (Fila inferior) Se tienen la misma razón elemental y proxy descritos arriba, pero para el testigo de Coquimbo. Los puntos verdes corresponden a máximos asociadas a las fechas: 1861 y 2000.	23
3.5. a) Índice E que se utiliza para cuantificar los eventos extremos de El Niño. b) Índice C que se utiliza para cuantificar los eventos moderados y fríos de ENSO. c) El índice ONI que representa una visión más general de los eventos ENSO. d) El Índice IPO que representa la variabilidad inter-decadal.	24

- 3.6. Mapas de compuestos utilizando el índice ONI para una fase positiva (El Niño). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase cálida. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente. 27
- 3.7. Mapas de compuestos utilizando el índice ONI para una fase negativa (La Niña). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase fría. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente. 28
- 3.8. Mapas de compuestos utilizando el índice E para una fase positiva (El Niño). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase cálida. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente. 30
- 3.9. Mapas de compuestos utilizando el índice E para una fase negativa. Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase fría. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente. 31
- 3.10. Mapas de compuestos utilizando el índice C para una fase positiva (El Niño). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase cálida. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente. 32
- 3.11. Mapas de compuestos utilizando el índice C para una fase negativa (La Niña). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase fría. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente. 33

- 3.12. Mapas de compuestos utilizando el índice IPO para una fase positiva. Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase cálida. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 *m*, 408 *m* y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente. 36
- 3.13. Mapas de compuestos utilizando el índice IPO para una fase negativa. Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase fría. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 *m*, 408 *m* y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente. 37
- 3.14. Primer modo de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (47 %), la segunda fila a oxiclina (47 %) y la tercera fila a la variable de corriente meridional (53 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 *m* y 408 *m* de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el primer modo. La variable de oxiclina sólo tiene un patrón espacial debido a que los análisis de EOF para esta variable fueron calculados con una superficie de anomalías y no un volumen. 39
- 3.15. Segundo modo de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (15 %), la segunda fila a oxiclina (15 %) y la tercera fila a la variable de corriente meridional (29 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 *m* y 408 *m* de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el segundo modo. 40
- 3.16. Primer modo de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (55 %), la segunda fila a oxiclina (55 %) y la tercera fila a la variable de corriente meridional (49 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 *m* y 408 *m* de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el primer modo. 41

3.17. Primer modo de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (55 %), la segunda fila a tasas de desnitrificación (40 %) y la tercera fila a amonio (46 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.	42
3.18. Segundo modo de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (18 %), la segunda fila a tasas de desnitrificación (14 %) y la tercera fila a amonio (25 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.	43
3.19. Primer modo de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (60 %), la segunda fila a tasas de desnitrificación (54 %) y la tercera fila a la variable de amonio (64 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el primer modo.	44
3.20. Segundo modo de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (16 %), la segunda fila a tasas de desnitrificación (24 %) y la tercera fila a la variable de amonio (20 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el primer modo.	45
3.21. Modo 1+2 de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (62 %), la segunda fila a la oxiclina (62 %) y la tercera fila a corriente meridional (82 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.	47
3.22. Modo 1+2 de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (75 %), la segunda fila a la oxiclina (62 %) y la tercera fila a corriente meridional (81 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.	48

3.23. Modo 1+2 de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (73 %), la segunda fila a las tasas de desnitrificación (54 %) y la tercera fila a amonio (71 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.	49
3.24. Modo 1+2 de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (79 %), la segunda fila a las tasas de desnitrificación (70 %) y la tercera fila a amonio (75 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.	50
3.25. Análisis de EOF combinada para escala inter-anual. (De arriba hacia abajo) Se enumeran los modos de variabilidad: primer, segundo y modo 1+2. Además, (de izquierda a derecha) se grafican las componentes principales, patrones espaciales a 105 m, 408 m y el perfil vertical. Esta figura muestra la parte de oxígeno disuelto de la EOF combinada.	53
3.26. Análisis de EOF combinada para escala inter-anual. (De arriba hacia abajo) Se enumeran los modos de variabilidad: primer, segundo y modo 1+2. Además, (de izquierda a derecha) se grafican las componentes principales, patrones espaciales a 105 m, 408 m y el perfil vertical. Esta figura muestra la parte de corriente meridional de la EOF combinada.	54
3.27. Análisis de EOF combinada para escala inter-decadal. Se muestran las componentes principales (a,e,i), patrones espaciales horizontales a 105 m (b,f,j), patrones espaciales horizontales a 408 m (c,g,k) y patrón espacial para una sección vertical centrada en 30°S (d,h,l) para oxígeno disuelto. Las filas de arriba hacia abajo muestran, primer modo de variabilidad, segundo modo de variabilidad y modo 1+2 de OD-V, respectivamente.	55
3.28. Análisis de EOF combinada para escala inter-decadal. Se muestran las componentes principales (a,e,i), patrones espaciales horizontales a 105 m (b,f,j), patrones espaciales horizontales a 408 m (c,g,k) y patrón espacial para una sección vertical centrada en 30°S (d,h,l) para corriente meridional. Las filas de arriba hacia abajo muestran, primer modo de variabilidad, segundo modo de variabilidad y modo 1+2 de OD-V, respectivamente.	56
4.1. Diagrama de flujo de los resultados. Se explica el impacto que tienen los eventos El Niño sobre las variables estudiadas. Los análisis expresados en este diagrama se centran en lo que ocurre alrededor de los 100 m de profundidad y centrado alrededor de los 30°S.	63

- A.1. Diagrama de North en escala inter-anual para: a) oxígeno disuelto, b) corriente meridional, c) nitrato, d) desnitrificación, e) amonio y f) oxiclina. Aquí, la primera (segunda) componente principal explica un: 47 % (15 %) para oxígeno disuelto; 53 % (29 %) para corriente meridional; 55 % (18 %) para nitrato; 40 % (14 %) para desnitrificación; 46 % (25 %) para amonio; 47 % (15 %) para oxiclina. 71
- A.2. Diagrama de North en escala inter-decadal para: a) oxígeno disuelto, b) corriente meridional, c) nitrato, d) desnitrificación, e) amonio y f) oxiclina. Aquí, la primera (segunda) componente principal explica un: 55 % (20 %) para oxígeno disuelto; 49 % (32 %) para corriente meridional; 60 % (19 %) para nitrato; 54 % (16 %) para desnitrificación; 64 % (24 %) para amonio; 55 % (20 %) para oxiclina. 71

Índice de cuadros

- 1.1. El cuadro presenta de izquierda a derecha: (primera columna) las razones elementales utilizadas en este estudio; (segunda columna) la variable biogeoquímica asociada a estas razones elementales; (tercera columna) una breve descripción de la dinámica asociada a la razón elemental. Otros proxies como tamaño de grano, ópalo biogénico y carbono orgánico total no fueron adjuntados en esta tabla debido a que se tratan de relaciones más directas, sin embargo son descritos a continuación: (1) el tamaño de grano permite cuantificar las variaciones en el caudal del río o los vientos; (2) el ópalo biogénico nos permite cuantificar la productividad asociada a organismos silíceos; (3) el carbono orgánico total nos entrega una estimación de la productividad de la zona. . 4
- 2.1. WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) corresponde al forzamiento para las concentraciones de ozono. Para la serie de control usaron un forzamiento preindustrial (1850) y WACCM, se consideró el promedio climatológico de enero de temperatura y salinidad potencial del modelo PCH2 (Polar Science Center Hydrographic Climatology) como condiciones iniciales. Aquí, OD es oxígeno disuelto, TSM es temperatura superficial del mar, u y v son corriente zonal y meridional respectivamente, DEN es tasas de desnitrificación, NO3 es nitrato y NH4 es amonio 10
- 3.1. Cuadro con los valores de correlaciones entre componentes principales de: oxígeno disuelto (OD), oxiclina (OXC), corriente meridional (V), nitrato (NO3), amonio(NH4), desnitrificación (DEN) y la combinación de las variables de oxígeno disuelto y corriente meridional (OD-V); con los índices de ENSO: ONI, E, C e IPO. Los valores de correlación fueron aproximados a la centésima. Los valores entre paréntesis corresponden al segundo modo de variabilidad, mientras que los valores fuera del paréntesis corresponden al primer modo de variabilidad. Además, aquellos valores sobre (bajo) 0,5 (−0,5) fueron destacados en negrita. 38
- 3.2. (De izquierda a derecha) La primera columna muestra la fórmula de la combinación lineal de ambos modos de variabilidad. Aquí PC1 (PC2) hace referencia a la primera (segunda) componente principal. La segunda, tercera, cuarta y quinta columna muestran las correlaciones entre el modo 1+2 de las variables y los índices ONI, E, C e IPO, respectivamente. Los valores de correlación fueron aproximados a la centésima. Los valores en negrita son aquellos que se encuentran sobre los 0,5 o bajo −0,5 de correlación. 46

- 3.3. Matriz de correlaciones entre las combinaciones lineales de las primeras dos componentes principales de las variables de: oxígeno disuelto (OD), oxiclina (OXC), corriente meridional (V), nitrato (NO₃), amonio(NH₄), desnitrificación (DEN) y la combinación (OD-V) de las variables de oxígeno disuelto y corriente meridional. Los valores de correlación fueron aproximados a la centésima. Los valores dentro de los paréntesis corresponden a las correlaciones para la escala temporal inter-decadal, mientras que los valores sin paréntesis corresponden a las correlaciones para la escala temporal inter-anual. 51
- 3.4. Correlaciones entre los modos 1, 2 y 1+2 de la EOF combinada de oxígeno disuelto y corriente meridional (OD-V) con el primer y segundo modo de las variables de oxígeno disuelto (OD) y corriente meridional (V). Los valores entre paréntesis muestran las correlaciones para una escala temporal inter-decadal, mientras que los valores sin paréntesis muestran las correlaciones para una escala temporal inter-anual. 52
- 3.5. Valores de correlación entre el segundo modo de variabilidad de corriente meridional y el modo 1+2 de oxiclina con los índices de ENSO. Los valores entre paréntesis muestran el desfase entre las series correlacionadas. 57

Resumen

La Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) del Pacífico Sur-oriental se extiende desde zonas Ecuatoriales hasta latitudes medias ($\sim 36^{\circ}S$). Las ZMOs constituyen zonas de vital importancia para la dinámica de los distintos procesos biogeoquímicos que ocurren en la columna de agua, así como también para la actividad económica de la región. En este estudio nos centraremos particularmente en el segmento de la ZMO que se encuentra frente a la región de Coquimbo ($30^{\circ}S$), en esta zona, existen datos de testigos sedimentarios que indican una tendencia hacia la oxigenación de la ZMO con respecto a las condiciones de hace ~ 2000 años atrás, este comportamiento es contrario al que presentan las ZMO de latitudes más bajas. Las discrepancias latitudinales en el comportamiento de la ZMO sirvieron de motivación para el desarrollo de esta investigación. Para analizar la variabilidad de la ZMO, este estudio se enfocó en las escalas inter-anual e inter-decadal, particularmente, por la relación que tienen estas escalas con la dinámica Ecuatorial. En este sentido, se le dio énfasis a los eventos de ENSO (El Niño Oscilación del Sur). Para analizar la variabilidad de la ZMO se utilizaron datos observacionales de testigos sedimentarios y datos numéricos de un escenario climático (CESM Large Ensemble, escenario 1). Se estudió la variabilidad para las escalas temporales inter-anual e inter-decadal de variables de oxígeno disuelto (OD), corriente meridional (V), oxiclina (OXC), nitrato (NO_3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH_4). La oxiclina fue escogida como el valor más negativo del gradiente de OD. Se utilizó un filtro digital Chebyshev y un filtro Coseno-Lanczos para estudiar la variabilidad inter-decadal e inter-anual de las anomalías estandarizadas de OD, V, OXC, NO_3 , DEN y NH_4 . Las variables fueron analizadas por separado y en combinaciones utilizando Funciones Ortogonales Empíricas (EOF). Los resultados muestran que alrededor de los 100 m, parte de la variabilidad de la ZMO se asocia a eventos de profundización (levantamiento) de la oxiclina, la cual genera a eventos de oxigenación (desoxigenación). Estos eventos de oxigenación (desoxigenación) vienen acompañados de eventos de intensificación (debilitamiento) de la CSSPC.

1. Capítulo 1

1.1 Introducción

Las capas sedimentarias constituyen un registro geológico de vital importancia debido a su rol en las reconstrucciones paleo-oceanográficas de alta resolución (Vargas et al., 2004), especialmente en los márgenes continentales bajo zonas de alta productividad primaria. Debido a la gran cantidad de procesos que ocurren en la columna de agua, la composición y preservación del material sedimentario dependerá de: (1) variaciones en la actividad química-biológica, (2) tasas de sedimentación suficientemente altas para permitir la formación de capas apreciables de sedimentos y (3) condiciones ambientales que alteren estas capas debido a la actividad bentónica (Kemp and Kemp, 1996). Aquí, un ejemplo de condiciones ambientales que permitan la preservación del material sedimentario, está dado por la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO). En este sentido, cuando la ZMO intercepta la plataforma continental, induce hipoxia, lo cual limita los procesos de bio-perturbación y favorece la preservación de la estructura sedimentaria (Vargas et al., 2004). La ZMO está determinada por la oxigenación y desoxigenación de la columna de agua, en ZMOs costeras estos procesos están regidos por factores como: el flujo de material orgánico derivado de la productividad primaria, o derivado a través de los ríos, el cual al descomponerse consume oxígeno; además, la circulación y las perturbaciones del nivel del mar contribuyen en la determinación de la profundidad de la oxiclina, esto permitiría oxigenación (desoxigenación) cuando la oxiclina se profundiza (levanta). Además, en la escala temporal inter-anual, los factores como la circulación y las perturbaciones en el nivel del mar están estrechamente influenciados por las dinámicas ecuatoriales como las ondas de Kelvin y el transporte de oxígeno disuelto a través del Sistema de Corrientes de Perú-Chile (SCPC).

En la zona de Coquimbo, la ZMO está influenciada por el Sistema de Corrientes de Perú-Chile (SCPC). El SCPC se ve fuertemente impactado por las dinámicas ecuatoriales y la batimetría cerca de la línea de costa en una gran variedad de escalas temporales (Montes et al., 2014). En escalas intra-estacionales y estacionales, las ondas de Kelvin ecuatoriales impactan la surgencia costera a lo largo del borde del Pacífico Sur-oriental (Pizarro et al., 2002; Dewitte et al., 2011), esto provocaría una profundización de la oxiclina a lo largo de la costa Sudamericana (Pizarro et al., 2002). Por otro lado, para escalas inter-anales, las ondas de Rossby ecuatoriales causadas por ondas de Kelvin durante eventos El Niño en el Pacífico oriental (Pizarro et al., 2002; Ramos et al., 2008), generan un cambio drástico en la circulación media, lo cual resulta en advección de aguas cálidas hacia el sur y en una profundización de la oxiclina debido al ajuste geostrófico (Montes et al., 2014). Para entender las dinámicas de este sistema de corrientes, es necesario saber que la Corriente de Perú-Chile nace de la separación de la Corriente Circumpolar Antártica (CCA), la cual se divide en una componente norte y otra sur; la componente norte recibe el nombre de la Corriente de Perú-Chile (CPC) y la componente sur tiene por nombre Corriente del Cabo de Hornos (CCH), ambas transportan Agua Subantártica ($11,5^{\circ}\text{C} < T < 14,5^{\circ}\text{C}$, $34,1 < S < 34,8$), con la diferencia que la CCH se mezcla con aguas más frescas ($< 31 \text{ psu}$) pertenecientes a los fiordos (Silva and Neshyba, 1977, 1979;

Strub P, 1998). Por otro lado, la Contracorriente de Perú-Chile (CCPC) transporta Agua Subtropical ($T > 18,5^{\circ}\text{C}$, $S > 34,9$) hacia altas latitudes (Silva et al., 2009). Esta corriente se divide en una rama oceánica y una costera (Vargas et al., 2004), y al igual que la Corriente Inferior de Perú-Chile, advecta parte de Agua Ecuatorial Subsuperficial a longitudes más oceánicas (Wyrski, 1963; Silva et al., 2009). Finalmente, la Corriente Sub-superficial de Perú-Chile (CSSPC), se encuentra por debajo de la CPC y la CCPC, la cual viaja como una corriente costera (Silva et al., 2009) por sobre la plataforma continental a profundidades sub-superficiales. Esta transporta agua Ecuatorial Sub-superficial ($8,5^{\circ}\text{C} < T < 10,5^{\circ}\text{C}$, $34,4 < S < 34,8$) la cual se caracteriza por tener bajas concentraciones de oxígeno disuelto ($\text{O}_2 < 0,25 - 0,5 \text{ ml l}^{-1}$) (Vargas et al., 2004) y acarrear una alta cantidad de nutrientes, siendo la responsable de la productividad primaria en la costa del borde oriental del Pacífico sur y por lo tanto, de la formación de la ZMO. A su vez, la CSSPC se ve fuertemente influenciada por las dinámicas ecuatoriales, esta es alimentada por las Contracorrientes Sub-superficiales primaria y secundaria (CCSSp y CCSSs, respectivamente) y por la Corriente Ecuatorial Sub-superficial (CESS) las cuales forman parte del Sistema de Corrientes Ecuatorial (Montes et al., 2010). La CESS transporta agua oxigenada, mientras que la CCSSs transporta agua con bajos niveles de oxígeno. Entonces, la CSSPC termina siendo un balance de las características de las CESS y CCSSs en términos de oxígeno, en particular, cuando el transporte de aguas desoxigenadas de la CCSSs es mayor, las ZMO del Pacífico oriental se intensifican (Montes et al., 2014). Por otro lado, estas relaciones son modificadas durante las distintas fases de un evento ENSO (El Niño Southern Oscillation) (Colas et al., 2008; Kessler, 2006).

En la horizontal, las ZMOs llegan a abarcar cientos de kilómetros, y verticalmente pueden llegar incluso hasta el suelo marino de la plataforma continental, estas áreas son caracterizadas por una baja biodiversidad de macro-fauna marina. Sin embargo, las ZMOs proveen un ambiente óptimo a las comunidades bentónicas, que incluyen bacterias oxidantes de sulfuro, protistas asociados a la respiración del nitrógeno y metazoos que se han adaptado a ambientes anóxicos (Ulloa and Pantoja, 2009). Particularmente, la ZMO frente a la región de Coquimbo es alimentada por la surgencia costera. Así, recibiendo una entrada de nutrientes y participando activamente en los ciclos biogeoquímicos de la columna de agua. En este sentido, el ciclo del nitrógeno (N) es uno de los más afectados por la variabilidad en las concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua. En zonas donde las concentraciones de oxígeno disuelto son bajas ($< 20 \mu\text{M}$ de OD) el nitrato (NO_3^-) es reducido a nitrógeno (N_2 gas) a través de un proceso llamado desnitrificación. Durante este proceso es liberado óxido nitroso (N_2O). Otro proceso importante es el anammox, este es un acrónimo de de oxidación anaeróbica para el ion de amonio (NH_4^+). Se han observado dos vías para la oxidación de amonio en condiciones anaeróbicas: (1) usando nitrito como aceptor de electrones. Aquí, el nitrógeno inorgánico disuelto (DIN) es convertido a nitrógeno, el estudio realizado por Lam et al. 2009 señala que, este proceso es más importante que la desnitrificación en remover nitrógeno fijado en la columna de agua para la región del Pacífico Sur-Oriental. (2) El otro proceso para la oxidación de amonio en condiciones anaeróbicas, ocurre en presencia de manganeso. El manganeso actúa como aceptor de electrones oxidando el amonio a nitrógeno.

El objetivo de este estudio es analizar el impacto de las distintas fases de los eventos ENSO en la variabilidad de la ZMO, para esto se analizó la variabilidad inter-anual de variables físicas y biogeoquímicas obtenidas a partir de un modelo hidrodinámico. Para esto se utilizaron Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) y análisis de compuestos. Además, se analizó la variabilidad inter-decadal de las variables físicas y biogeoquímicas (oxígeno disuelto, corriente meridional, profundidad de la oxiclina, nitrato, tasas de desnitrificación y amonio), con el objetivo de compararlas con las interpretaciones obtenidas a partir de los datos de testigos sedimentarios. Estos testigos entregan información sobre la variabilidad temporal de las condiciones ambientales durante la depositación de las partículas que lo componen.

Razones elementales	Variable asociada	Descripción
Mo/Al	Oxígeno disuelto	Mayor Mo indica condiciones de anoxia. Implica que hay aguas menos oxigenadas.
Re/Al	Oxígeno disuelto	Mayor Mo indica condiciones de suboxia. Implica que hay aguas menos oxigenadas y con menor contenido de sulfidos.
Ni/Al	Oxígeno disuelto	Las concentraciones de Ni no disminuyen con la anoxia.
Re/Mo	Oxígeno disuelto	Relación entre la suboxia y anoxia. Valores por sobre 0.4 mmol/mol indican suboxia.
U/Al	Oxígeno disuelto	Altas concentraciones de U se asocian con condiciones de suboxia. Aumentos de materia orgánica implican aumentos de U.
U/Mo	Oxígeno disuelto	Relación entre la suboxia y anoxia.
Cd/Al	Nitrato	El comportamiento de Cd es similar al de los macro-nutrientes durante eventos de surgencia.
K/Ca	Erosión química	Un aumento en esta razón se asocia con aumento en las precipitaciones y el caudal de los ríos.
Ca/Al	Productividad	Un aumento de esta razón se puede asociar con un aumento en la productividad, principalmente debido a la mayor presencia de organismos calcáreos.

Cuadro 1.1: El cuadro presenta de izquierda a derecha: (primera columna) las razones elementales utilizadas en este estudio; (segunda columna) la variable biogeoquímica asociada a estas razones elementales; (tercera columna) una breve descripción de la dinámica asociada a la razón elemental. Otros proxies como tamaño de grano, ópalo biogénico y carbono orgánico total no fueron adjuntados en esta tabla debido a que se tratan de relaciones más directas, sin embargo son descritos a continuación: (1) el tamaño de grano permite cuantificar las variaciones en el caudal del río o los vientos; (2) el ópalo biogénico nos permite cuantificar la productividad asociada a organismos silíceos; (3) el carbono orgánico total nos entrega una estimación de la productividad de la zona.

Se analizaron las razones elementales de los elementos traza: Mo/Al, Re/Al, Re/Mo, U/Al, U/Mo, Cd/Al, Ni/Al, K/Ca y Ca/Al y otros proxies biogeoquímicos como: Carbono Orgánico Total (TOC), tamaño de grano y ópalo biogénico, en sedimentos bajo una columna de agua de alrededor de 100 m de profundidad. Las razones Mo/Al, Re/Al y U/Al entregan información sobre la tendencia a la suboxia o anoxia en la columna de agua. El Mo/Al, Ni/Al y Cd/Al entregan información sobre la tendencia a condiciones anóxicas en la columna de agua debido a que su acumulación en los sedimentos se facilita en presencia de sulfuros que se desarrollan en condiciones anóxicas. Además, las razones elementales U/Al y Ca/Al pueden usarse para interpretar la productividad de la capa fótica. Así, las razones de Re/Mo y U/Mo entregar información sobre las condiciones dominantes (anoxia o suboxia) en la columna de agua. Por otro lado, la razón K/Ca se utiliza para interpretar las variaciones en los aportes continentales, indicando periodos de mayor o menor erosión química (por ejemplo, debido a precipitación y/o aumento en los caudales de los ríos).

El objetivo general de este estudio es interpretar la variabilidad en datos de testigos sedimentarios frente a la región de Coquimbo, y relacionar dichas interpretaciones con procesos de oxigenación y desoxigenación en la columna de agua alrededor de los 100 m de profundidad, utilizando variables físicas: oxígeno disuelto y corriente meridional; y utilizando variables biogeoquímicas: nitrato, tasas de desnitrificación y amonio obtenidas a partir de salidas de un modelo biogeoquímico acoplado (CESM).

1.2 Zona de estudio e impacto de eventos ENSO

La región de Coquimbo se puede considerar como un borde entre distintas áreas climáticas. Esta limita al sur con la zona mediterránea del centro de Chile, al oeste con el Sistema de Corrientes de Perú-Chile y al este con la Cordillera de los Andes (Montecinos et al., 2016). La región de Coquimbo (30°S) se caracteriza por tener varios regímenes de viento. Por sobre los 4 km de altura, los vientos alisios prevalecen, bajo esta altura (2 – 4 km) los vientos se ven afectados por la Cordillera de los Andes, causando que los vientos fluyan en dirección norte (Kalthoff et al., 2002), bajo este flujo la dinámica de los vientos se ve dominada por el forzamiento térmico, tales como los vientos de montaña y la brisa marina. Además, el clima en esta región se ve influenciado por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur, este genera una alta presión la cual se desplaza de 35°S, 90°W en Enero a 25°S, 90°W en Julio (Kalthoff et al., 2002; Montecinos et al., 2016). Esto facilita la entrada de frentes polares, lo que produce inestabilidades que provocan que los gradientes térmicos busquen estabilizarse. Esto resulta en la formación de nubes estratos (Rundel et al., 1991; Rutllant et al., 2003). Además, los regímenes de vientos a escala sinóptica modulan progresivamente los vientos del sur (controlados por el Anticiclón Subtropical), produciendo ciclos de 3-7 días de intensificación/relajación de los vientos ecuatoriales (Garreaud et al., 2002; González et al., 2004).

Por otro lado, la precipitación en la región de Coquimbo se ve afectada por la gran variabilidad orográfica, se observa un gradiente altitudinal marcado respecto a la precipitación. Estas varían de 25 a 300 mm a⁻¹ de áreas costeras a la cordillera respectivamente (Favier et al., 2009), además se observan promedios locales de 80 mm a⁻¹ en los 30°S (Ortega et al., 2012). Latitudinalmente, hacia el norte se observa una disminución de la precipitación (Luebert and Plischoff, 2006). El ciclo estacional de la

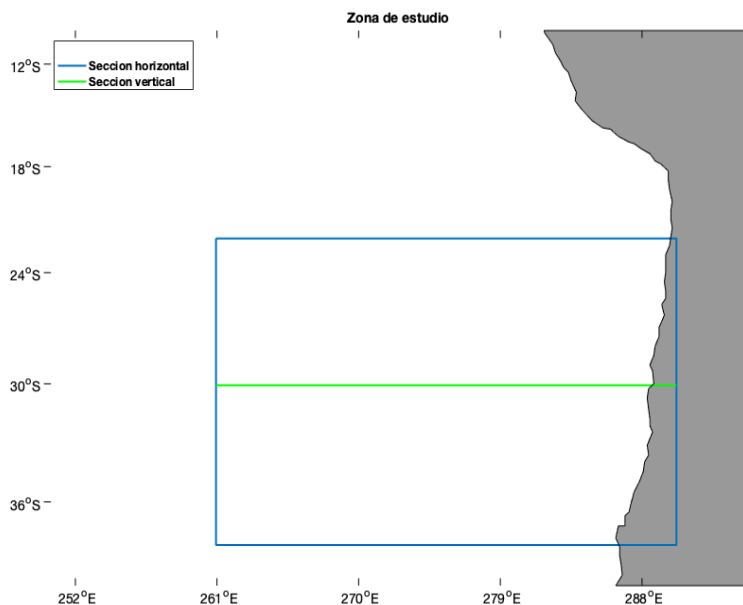


Figura 1.1: Norte y centro de Chile, el recuadro azul enmarca la región espacial (latitud y longitud) utilizada para ambas secciones horizontales. La línea verde representa la transecta (longitudes) centrada en 30°S utilizada para la sección vertical.

precipitación es bastante marcado, con la mayor cantidad de ocurrencia durante invierno (Favier et al., 2009). La variabilidad estacional de la precipitación (no asociada a eventos ENSO) está muy relacionada a las anomalías de los vientos del oeste (del este) para condiciones húmedas (secas) (Montecinos et al., 2011).

Durante eventos El Niño, la variabilidad de la precipitación muestra una fuerte estacionalidad (Montecinos et al., 2000). En donde eventos cálidos (fríos) implican mayor (menor) precipitación. En invierno, la mayor actividad de bloqueo sobre el área de los mares Amundsen-Bellingshausen y el aumento del gradiente de temperatura tropical-extratropical contribuyen a condiciones más húmedas para el centro de Chile (Montecinos and Aceituno, 2003).

Existen varios estudios que han investigado el impacto físico de los eventos ENSO (Smith, 1983; Huyer et al., 1987; Montecinos and Aceituno, 2003; Pizarro et al., 2001) y las consecuencias biológicas en la comunidad pelágica (Thomas et al., 2001) y bentónica, así como en los flujos de material particulado (Marchant et al., 2004) en las costas del Pacífico Sur-oriental. El estudio realizado por Escribano et al. 2004 sugiere que bajo condiciones “normales” frías, la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el área costera de surgencia varía entre 15 – 18°C y que el Agua Ecuatorial Subsuperficial, rica en nutrientes, asciende cerca de la costa. Esto provoca que la columna de agua se encuentre más mezclada (Marchant et al., 2004) y que además, la ZMO se vuelva más somera, creando un ambiente bajo en oxígeno cerca de las aguas superficiales (Blanco et al., 2002). Estas condiciones favorecen la entrada de NO_3 , por lo que se espera que la productividad primaria sea mayor. Esta alta productividad incrementaría las tasas de sedimentación y acumulación de materia orgánica en la plataforma conti-

mental (Carr, 2003). Se han observado flujos totales de partículas del orden de los $65,1 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, junto a un patrón estacional caracterizado por un evento de florecimiento de diatomeas en septiembre, el cual disminuye y se mantiene en un nivel intermedio hasta enero, para después disminuir a niveles bajos hasta junio. Este flujo puede alcanzar velocidades de hundimiento de 300 m d^{-1} (Hebbeln et al., 2000). Durante el período “normal” los organismos fitoplanctónicos se encontrarían sobre los 50 m y el zooplancton poseería una distribución similar, siendo restringidos por la ZMO. Por otro lado, durante la fase “cálida” de ENSO, los valores de la TSM incrementan ($> 20^\circ\text{C}$) (Blanco et al., 2002) y la capa fótica se profundiza bajo los 100 m . Además, la termoclina, la oxiclina, la nutrioclina y la ZMO se profundizan lo que causa una oxigenación en aguas subsuperficiales, sobre la plataforma continental (Blanco et al., 2002). Esta profundización y la expansión vertical de la capa fótica implicaría una mayor dispersión vertical y horizontal de plancton (Escribano et al., 2004). Durante un evento El Niño, la oxigenación de la columna de agua causa tasas menores de denitrificación (Morales et al., 1999; Escribano et al., 2004), la reducción del suministro de materia orgánica a las aguas profundas y liberación de nutrientes desde los sedimentos de la plataforma continental (Gutiérrez et al., 2000). Los eventos El Niño pueden favorecer la nitrificación, contribuyendo potencialmente NO_3 a la capa fótica. La expansión volumétrica de la capa fótica permitiría un incremento en la respiración aeróbica de pequeños organismos (microplancton) (Eissler and Quiñones, 1999). Además, durante un evento El Niño, se observa abundancia de otras especies que bajo condiciones “normales” fueron menos importantes (Marchant et al., 2004). Según el estudio realizado por Escribano et al. (2004), se observan cambios en las clases de especies fitoplanctónicas (apareciendo especies de menor tamaño durante condiciones El Niño). Finalmente el flujo total no presenta variaciones durante períodos “normales” y “cálidos”, este último asociado a eventos El Niño. Sin embargo, proporciones mayores de carbono orgánico y materia litogénica durante un evento El Niño sea probablemente debido al incremento de precipitación que resulta en el aumento del caudal de los ríos (Hebbeln et al., 2000).

Resultados preliminares mostraron que las razones elementales calculadas a partir de muestras sedimentarias, indicaban un aumento en la productividad durante el pasado reciente (aproximadamente los últimos 200 años). Así, un aumento en la productividad implica en un aumento en la cantidad de materia orgánica que cae a los sedimentos y por lo tanto, una disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua producto de la descomposición aeróbica de la materia orgánica. Sin embargo, este aumento en la productividad es acompañado de una mayor concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua alrededor de los 100 m de profundidad. Estas interpretaciones llevaron a la formulación de la siguiente hipótesis:

1.3 Hipótesis y objetivos

- Hipótesis: La dinámica de la oxigenación (desoxigenación) observada en registros sedimentarios a 100 metros de profundidad frente a la región de Coquimbo, es coherente con la que ocurre a escala inter-anual (ENSO) e inter-decadal (IPO) según el análisis de la variabilidad de la concentración de oxígeno y nitrato en un modelo biogeoquímico acoplado global de última generación (CESM).

- Hipótesis alternativa: La dinámica de la oxigenación (desoxigenación) observada en registros sedimentarios a 100 metros de profundidad frente a la región de Coquimbo, es coherente con la que ocurre a escala local según el análisis de la variabilidad de la concentración de oxígeno y nitrato en un modelo biogeoquímico acoplado global de última generación (CESM).

Por otro lado, se tiene como objetivo general: Analizar la variabilidad inter-anual e inter-decadal de variables físicas y biogeoquímicas asociadas a la ZMO para el pasado reciente (aproximadamente los últimos 200 años) a través de un modelo biogeoquímico acoplado (CESM), y estudiar la coherencia de la variabilidad inter-anual e inter-decadal con la variabilidad observada en los testigos de sedimentos para la Bahía de Coquimbo y Guanaqueros. Para esto, los objetivos específicos se definen como:

- Analizar e interpretar datos de razones elementales de testigos sedimentarios.
- Analizar la variabilidad inter-anual e inter-decadal de las variables de: oxígeno disuelto, corriente meridional, profundidad de la oxiclina, tasa de desnitrificación, nitrato y amonio.
- Calcular los índices E, C, Índice Niño Oceánico (ONI) y Oscilación Inter-decadal del Pacífico (IPO) de los eventos ENSO para el escenario climático (modelo numérico).
- Cuantificar el impacto de los fenómenos ENSO e IPO en la variabilidad de las variables de interés (oxígeno disuelto, corriente meridional, profundidad de la oxiclina, tasas de desnitrificación, nitrato y amonio).
- Analizar la variabilidad inter-anual e inter-decadal de la ZMO frente a las costas de la región de Coquimbo utilizando un análisis de EOF para las variables de interés.
- Analizar la variabilidad inter-anual e inter-decadal de la ZMO frente a las costas de la región de Coquimbo utilizando un análisis de EOF combinada para las variables de: oxígeno disuelto y corriente meridional.

2. Capítulo 2

2.1 Metodología

El estudio se centra en la región de Coquimbo. Se utilizaron datos biogeoquímicos obtenidos a partir de muestras de testigos y datos numéricos físicos y biogeoquímicos, obtenidos a partir de salidas de un modelo biogeoquímico acoplado (CESM).

Los datos biogeoquímicos de las muestras de testigos fueron facilitados por el proyecto Fondecyt#1140851. Las muestras fueron extraídas utilizando un testigo KC-Denmark (Rumohr) en la Bahía de Guanaqueros y la Bahía de Coquimbo, el nombre del testigo es BGGC5 y BC117, y sus coordenadas de extracción son $30^{\circ}09'S$ y $29^{\circ}51,749'S$, longitud $289^{\circ}26'E$ y $289^{\circ}21,042'E$, obtenidas a 89 m y 117 m de profundidad. Estas se extrajeron durante el mes de mayo y julio del 2015 abordo de la embarcación L/C Stella Maris II, perteneciente a la Universidad Católica del Norte. El período para BGGC5 comprende desde 109 AC hasta 2015 DC, mientras que el período para BC117 comprende desde 1183 DC hasta 2014 DC. El sedimento fue seccionado cada 1 cm y 0,5 cm para el testigo BGGC5 y BC117, respectivamente. Cada sección fue separada en sub-muestras para estudiar tamaño de grano, susceptibilidad magnética, elementos traza, ópalo biogénico, isótopos estables de carbono y nitrógeno ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ respectivamente) y análisis del total de carbono orgánico (TOC). Cada muestra se mantuvo a $-20^{\circ}C$ y luego fue secada por liofilización.

La base de datos numéricos que se utilizó en este estudio corresponde a un conjunto escenarios climáticos del proyecto: CESM Large Ensemble (Kay et al., 2015). Estas simulaciones son obtenidas a partir de un acoplamiento de modelos, estos incluyen: atmósfera (CAM5), océano (POP2), tierra o continentes (CLM4), hielo marino (CICE4) y biogeoquímica (BEC). Existen 42 miembros (escenarios climáticos con diferentes condiciones iniciales), los cuales son creados a partir del mismo acoplamiento de modelos y de los mismos forzantes externos. De los 42 miembros, se escogió el primero (Cuadro 2.1). El escenario usado en este trabajo comprende el período de los años 1850-2005. Este toma como condiciones iniciales el 1 de enero del año 402 de la serie de control. Los 42 miembros de CESM-LE comparten las mismas condiciones iniciales oceánicas, debido a esto no muestran variabilidad climática interna resultante de los diferentes estados del océano. La resolución espacial horizontal del escenario utilizado es de $\sim 1^{\circ}$ y posee 60 niveles verticales. Un tema importante al utilizar escenarios climáticos, es la variabilidad interna. Esta se genera por las diferentes condiciones iniciales que le son asignadas a cada escenario. Es conocida por tener efectos significativos en cambiar las proyecciones climáticas, especialmente en escala espacial regional y escala temporal sub-decadal (Hawkins and Sutton, 2009; Deser et al., 2014). Sin embargo, en este trabajo se estudia el impacto de los eventos ENSO en la columna de agua, por lo que la variabilidad interna no ocupa un rol importante.

Debido a la importancia que tienen las variables biogeoquímicas en este estudio, es relevante describir de manera general el modelo BEC (Biogeochemical Elemental Cycle). Este modelo biogeoquímico incluye explícitamente tres grupos funcionales de fitoplancton (diatomeas, diazotrofos, fitoplancton más pequeño) e implícitamente un grupo de fitoplancton (organismos calcáreos) (Moore

et al., 2004). El modelo BEC también estima el patrón espacial de la limitación en el crecimiento del fitoplancton debido a los nutrientes, así como también el ciclo del nitrógeno (Moore et al., 2013).

Las variables físicas y biogeoquímicas extraídas de modelo hidrodinámico son: temperatura superficial del mar (TSM), oxígeno disuelto (OD), componente meridional (V) de corriente, nitrato (NO₃), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH₄). Se utilizó la TSM para calcular los índices de EN-SO, para esto se siguió las metodologías empleada por la NOAA (índice ONI), Takahashi et al. 2011 (índices E y C) y Henley et al. 2015 (índice IPO). Utilizando las concentraciones de oxígeno disuelto se calculó la oxiclina y se analizaron los eventos de oxigenación y desoxigenación. Los datos de corriente meridional se utilizaron para localizar la CSSPC y asociar su variabilidad con la de oxígeno disuelto. Además, se estudió el debilitamiento/intensificación de esta corriente, el cual se asocia a la propagación de ondas de Kelvin ecuatoriales a lo largo de la costa Sudamericana. Las variables de nitrato, tasas de desnitrificación y amonio se estudiaron en conjunto para analizar la variabilidad del ciclo del nitrógeno y los procesos involucrados en este.

En este estudio se trabajó con las anomalías normalizadas (detalle descrito en la Sección 2.1.2) de las variables mencionadas en el párrafo anterior. Por otro lado, los datos biogeoquímicos obtenidos a partir de las muestras de dos testigos sedimentarios constan de: razones elementales de metales traza, ópalo biogénico, carbono orgánico total y tamaño de grano. Estas razones elementales fueron normalizadas utilizando las concentraciones de aluminio (Al) (Calvert and Pedersen 2007).

Nombre del escenario	Período de tiempo	Forzante	Condiciones iniciales	Variables
b.e11.B20TR C5CNBDRD. f09.g16.001	1850-2100	Histórico (1850- 2005), RCP8.5 (2006-2100) y WACCM	1 de enero de 402 de esce- nario de con- trol	OD, TSM, U, V, DEN, NO ₃ , NH ₄

Cuadro 2.1: WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) corresponde al forzamiento para las concentraciones de ozono. Para la serie de control usaron un forzamiento preindustrial (1850) y WACCM, se consideró el promedio climatológico de enero de temperatura y salinidad potencial del modelo PCH2 (Polar Science Center Hydrographic Climatology) como condiciones iniciales. Aquí, OD es oxígeno disuelto, TSM es temperatura superficial del mar, u y v son corriente zonal y meridional respectivamente, DEN es tasas de desnitrificación, NO₃ es nitrato y NH₄ es amonio

Se realizaron análisis de compuestos y EOF sobre las anomalías normalizadas de las salidas del modelo hidrodinámico de: oxígeno disuelto (OD), corriente meridional (V), oxiclina, nitrato (NO₃), amonio (NH₄) y tasas de desnitrificación (DEN). El análisis de compuestos consideró todos los períodos (1850-2005) de eventos El Niño y La Niña, separándolos en dos grupos de acuerdo a los criterios establecidos por los índices ONI, E, C e IPO respectivamente. Aquí, las anomalías positivas se consideran eventos El Niño y formarían parte de uno de los grupos, mientras que las anomalías negativas se consideran como eventos La Niña, por lo que estos períodos serían agrupados en el segundo grupo. Por otro lado, los análisis de EOF se realizaron para la escala temporal inter-anual e

inter-decadal. Aquí, las anomalías normalizadas fueron filtradas utilizando un filtro Coseno-Lanczos. Ambos análisis, compuestos y EOF, fueron focalizados en dos profundidades (105 y 408 *m*) y en una sección vertical (centrada en los 30°S). Las profundidades asociadas a ambos cortes horizontales se escogieron tras estudiar el estado medio y la desviación estándar media de las variables de oxígeno disuelto y corriente meridional (Fig. 2.1), esto con el objetivo de posicionarnos en el límite superior y el núcleo de la ZMO (para los cortes horizontales), así como también en la zona por la cual fluye la CSSPC (en el corte vertical). Además, la profundidad de 105 *m* también corresponde a la profundidad en la cual se obtuvieron las muestras de testigos sedimentarios. Por otro lado, los datos de las razones elementales normalizadas se utilizaron para interpretar el clima del pasado y realizar comparaciones para períodos El Niño/La Niña. Estos períodos fueron obtenidos a partir de los datos del índice ONI de la NOAA.

Finalmente, las componentes principales resultantes de los análisis de EOF, fueron comparadas con los índices de ENSO para estudiar el impacto de este último en la columna de agua. Además, se estudió el desfase entre las componentes principales para las variables ya mencionadas y los índices ENSO, para esto se utilizó la correlación con desfase.

2.1.1. Estado medio y desviación estándar media de OD y V

El estado medio fue calculado promediando las variables de oxígeno disuelto y corriente meridional a través de toda la escala temporal, es decir, desde enero de 1850 hasta diciembre de 2005. De la Fig. 2.1b se puede observar que el núcleo de la Zona Mínima de Oxígeno se encuentra cerca de los 400 *m* de profundidad. Además, de la Fig. 2.1a,b observamos que tanto la CSSPC como el núcleo de la ZMO se encuentran sobre los 500 *m* de profundidad.

Las desviaciones estándar medias se calcularon como el valor de desviación estándar para todo el rango temporal, similar a lo realizado para el estado medio. La Fig. 2.1c muestra altos valores de desviación estándar, estos se asocian a la variabilidad de la CSSPC, mientras que en la Fig. 2.1d se observan valores más pequeños de desviación estándar. Estos se asocian al núcleo de la ZMO, lo que mostraría que las concentraciones de oxígeno se alejan muy poco de su promedio.

En base a estos resultados, se escogieron dos profundidades (105 *m* y 408 *m*, respectivamente) para analizar a través de los análisis de compuestos y EOF la variabilidad horizontal de las variables: oxígeno disuelto, corriente meridional, nitrato, tasas de desnitrificación y amonio. Se escogió 105 *m* por ser una profundidad aproximada a la cuál se realizaron los muestreos de sedimentos (Sección 2.1), y se escogió 408 *m* por ser la profundidad aproximada del núcleo de la ZMO.

2.1.2. Cálculo de anomalías

En este estudio, para analizar la variabilidad en la columna de agua asociada a las variables de: oxígeno disuelto, oxiclina, corriente meridional, nitrato, amonio y tasas de desnitrificación se utilizaron anomalías normalizadas. Se optó por anomalías normalizadas en vez de anomalías sin normalizar, para poder cuantificar de mejor manera el impacto de los eventos El Niño/La Niña sobre las variables mencionadas arriba, principalmente en las concentraciones de oxígeno disuelto, ya que las variacio-

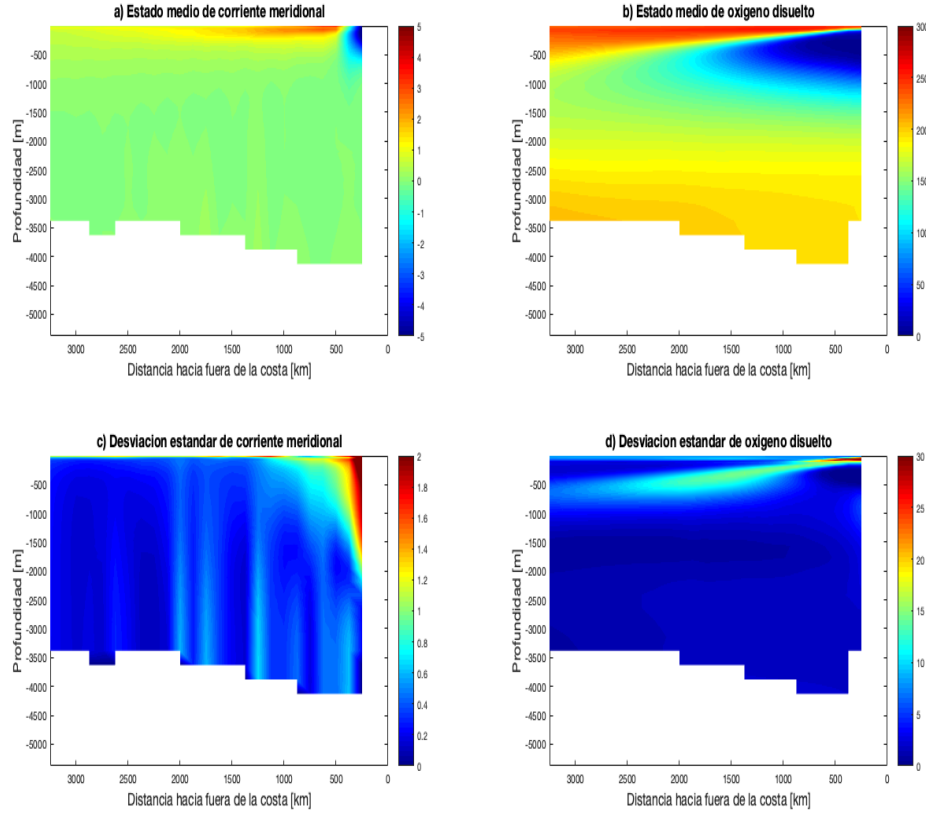


Figura 2.1: a) Estado medio de corriente meridional. b) estado medio de oxígeno disuelto. c) Desviación estándar media de corriente meridional. d) Desviación estándar media de oxígeno disuelto. El estado medio y la desviación estándar media fueron estimados a través de un promedio y desviación estándar, respectivamente, para el período de 1850-2005.

nes de estas en el núcleo de la ZMO son bastante pequeñas (del orden de 10^{-2}) en comparación a las variaciones de oxígeno disuelto en el límite superior de la ZMO. Las anomalías normalizadas fueron calculadas removiendo el ciclo anual y dividiendo por las desviaciones estándares asociadas a cada mes climatológico del año.

Para remover el ciclo anual, se calcularon las climatologías asociadas a los meses del año para el período de tiempo completo. Las climatologías mensuales fueron restadas a los datos mensuales correspondientes, es decir, la climatología de Enero fue restada a todos los Eneeros. Una vez extraído el ciclo anual, se normalizó dividiendo por la desviación estándar climatológica (asociada a la climatología calculada anteriormente) (Ecuación 2.1).

$$F_m = \frac{\psi_m(t) - \mu_m}{\sigma_m} \quad (2.1)$$

En donde,

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_m(t)}{N}$$

y

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\psi_m(t) - \mu_m)^2}{N - 1}}$$

el sub-índice m simboliza el mes al cuál se le aplica la fórmula, mientras que t , es el tiempo en años, N representa el largo total de la serie temporal, ψ_m representa los valores escalares de la serie de tiempo para el mes m , μ_m es el promedio climatológico para el mes m y σ_m representa la desviación estándar climatológica para el mes m .

En este estudio, los análisis de compuestos y de EOF fueron realizados sobre anomalías normalizadas.

2.1.3. Filtros

En este estudio se utilizaron dos filtros: Chebyshev tipo I y Coseno-Lanczos. El filtro Chebyshev es considerado un filtro electrónico que puede ser tanto analógico como digital. Permite fluctuaciones constantes en la banda pasante y una caída monótona en la banda de rechazo. La respuesta de la frecuencia es:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 - \varepsilon^2 T_N^2\left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)} \quad \text{para } 0 < \varepsilon \leq 1$$

en donde N es el orden del filtro, Ω_c es la frecuencia de corte, Ω es la frecuencia analógica compleja y $T_N(x)$ es el polinomio de Chebyshev de orden N que se define como:

$$T_{N+1}(x) = 2xT_N(x) - T_{N-1}(x) \quad \text{con } T_0(x) = 1 \text{ y } T_1(x) = x$$

El filtro Chebyshev tipo I, es utilizado para estudiar la variabilidad inter-decadal, según lo visto en Henley et al. 2015. La razón principal, es para mantener la consistencia entre el cálculo del índice IPO y el filtraje inter-decadal de las anomalías normalizadas para las variables de oxígeno disuelto, corriente meridional, nitrato, tasas de desnitrificación, amonio y oxiclina.

Por otro lado, el filtro Coseno-Lanczos es utilizado porque sus pesos son formulados con la intención de hacer que la función de respuesta sea una serie de cosenos de Fourier truncada. Un filtro de coseno por si solo, provoca fluctuaciones de gran amplitud cerca de la frecuencia de corte, esto se conoce como el fenómeno de Gibbs. Los filtros de coseno que usan una ventana Lanczos, son filtros rectangulares re-formulados los cuales incorporan un factor multiplicativo para asegurar una atenuación más rápida de este exceso de ondulaciones. El siguiente filtro, es un filtro Coseno-Lanczos que utiliza una ventana de coseno alzada o "Hanning".

$$W_k = \begin{cases} 1 & \text{si } k = 0 \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{k\pi}{m}\right) \frac{\sin k\pi \frac{T_N}{T_c}}{k\pi \frac{T_N}{T_c}} & \text{si } 1 \leq |k| \leq m \end{cases}$$

aquí, T_N es el período de Nyquist y T_c el período de corte y m representa los factores de pesos. Así, un filtro con $m = 60$ tendrá un largo de $(2m - 1)$, es decir 119 factores de peso.

En este estudio, el filtro Coseno-Lanczos se utilizó para estudiar la variabilidad inter-anual de las anomalías normalizadas de las variables: oxígeno disuelto, corriente meridional, nitrato, tasas de desnitrificación, amonio y oxiclina.

2.1.4. Índices ENSO

Para estudiar la variabilidad inter-anual e inter-decadal de las variables, se calcularon cuatro índices asociados a los eventos ENSO: índice ONI, E y C para escala temporal inter-anual; índice IPO para escala temporal inter-decadal.

Los índices E y C fueron calculados siguiendo la metodología descrita en Takahashi et al. 2011. Se escogió el rectángulo entre las latitudes $10^\circ S - 10^\circ N$ y entre las longitudes $140^\circ E - 275^\circ E$ para la variable de TSM. Luego, se calcularon las anomalías normalizadas para esta región y la matriz tri-dimensional resultante (longitud, latitud y tiempo) se transformó a una matriz bi-dimensional cuya primera dimensión corresponde al tiempo y su segunda dimensión al espacio (longitud y latitud). Esta matriz bi-dimensional se analizó utilizando Funciones Ortogonales Empíricas (EOF). Las componentes principales resultantes para los primeros dos modos de variabilidad fueron utilizadas para calcular el índice E (2.2) y el índice C (2.3).

$$E = \frac{PC1 - PC2}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{PC1 + PC2}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

Para el Índice Niño Oceánico (ONI), se siguió la metodología empleada por Trenberth 2016. Aquí, la región de TSM escogida es entre las latitudes de $5^\circ S - 5^\circ N$ y las entre las longitudes de $190^\circ E - 240^\circ E$ (región Niño 3.4). A esta matriz tri-dimensional de datos (longitud, latitud y tiempo) se le realiza un promedio espacial, el resultado es una serie de tiempo. A esta serie de tiempo se le remueve el ciclo anual y luego, las anomalías resultantes se suavizan utilizando un filtro de media móvil con una ventana de 3 meses. Finalmente estas anomalías son normalizadas por su desviación estándar.

El índice de Oscilación Inter-decadal del Pacífico (IPO) fue calculado siguiendo la metodología propuesta por Henley et al. 2015. Primero se debe escoger la región completa de TSM del Océano Pacífico (por motivos computacionales la región escogida comprende desde $60^\circ S$ a $60^\circ N$). Esta región es filtrada utilizando el filtro digital Chebyshev (Sección 2.1.3), con 6 coeficientes y una frecuencia de

corte de 13,3 años. La matriz tri-dimensional de datos, fue transformada a una matriz bi-dimensional (tiempo y espacio) a la cual se le aplicó un análisis de EOF. Se obtuvo un resultado similar a lo observado en Henley et al. 2015, en donde la variabilidad inter-decadal del índice estaba contenida en el segundo modo de variabilidad. Así, se escogieron las siguientes regiones para la confección del índice:

- **R1:** $25^{\circ}N - 45^{\circ}N, 140^{\circ}E - 215^{\circ}E$
- **R2:** $10^{\circ}S - 10^{\circ}N, 170^{\circ}E - 270^{\circ}E$
- **R3:** $50^{\circ}N - 15^{\circ}N, 140^{\circ}E - 200^{\circ}E$

estas regiones corresponden a las zonas espaciales que más contribuyen al segundo modo de variabilidad. Considerando las tres regiones (**R1**, **R2** y **R3**) se calcularon anomalías normalizadas (2.1) para datos no filtrados de TSM. Estas tres matrices tri-dimensionales de anomalías normalizadas de TSM fueron promediadas espacialmente, obteniéndose una serie de tiempo para cada región. Las tres series de tiempo fueron combinadas utilizando:

$$TPI = TSMA_{R2} - \frac{TSMA_{R1} + TSMA_{R3}}{2} \quad (2.4)$$

Finalmente, al resultado de la ecuación 2.4 se le aplica el mismo filtro digital Chebyshev, obteniéndose el índice IPO.

En este estudio, los índices se utilizaron para calcular los mapas promedio de anomalías para los análisis de compuestos, y para estudiar el impacto de los eventos de ENSO en la variabilidad inter-anual e inter-decadal contenida en las componentes principales resultantes del análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF). Por otro lado, el índice ONI se utilizó para visualizar el impacto de los eventos de ENSO para la escala temporal inter-anual, mientras que los índices E y C se utilizaron para discriminar entre eventos extremos, y moderados o fríos. Además, el índice IPO es utilizado para cuantificar el impacto inter-decadal. Por otro lado, se recopilieron las fechas históricas de datos observacionales asociadas a eventos de ENSO, estos fueron visualizados con las series de tiempo de las razones elementales.

2.1.5. Análisis de compuestos

Un análisis de compuestos permite observar el impacto que tiene un cierto evento sobre una variable física o biogeoquímica. El impacto es cuantificado utilizando un estadístico (promedio, desviación estándar, correlación, etc). Para este estudio, el impacto fue cuantificado usando el promedio. Para definir un evento, es necesario una serie de tiempo de control, a esta serie de control se le definen condiciones o umbrales que caracterizan al evento. Para este estudio, las series de control utilizadas son los índices de ENSO, así, se definen los siguientes eventos:

- La Niña $[ONI \leq -0,5]$ $[C < 0]$ $[E < 0]$ $[TPI < 0]$

- El Niño $[ONI \geq 0,5]$ $[C > 0]$ $[E > 0]$ $[TPI > 0]$

Aquí se trabajaron matrices tri-dimensionales cuyas dimensiones corresponden a longitud, latitud o profundidad y tiempo. Dependiendo si el mapa es un corte horizontal o vertical se trabajará con latitud o profundidad. Las matrices tri-dimensionales corresponden a anomalías normalizadas.

El análisis de compuestos encuentra las posiciones (fechas) en las cuales se cumplen las condiciones descritas arriba para los eventos El Niño o La Niña. Las posiciones son localizadas en la dimensión temporal dentro de las matrices tri-dimensionales, y luego se les aplica el estadístico, es decir, se promedian todas las fechas que cumplan la condición impuesta por la serie de control para obtener mapas de compuestos. Los mapas resultantes son bi-dimensionales. Las secciones horizontales utilizadas corresponden a la región entre las latitudes: $39^{\circ}S - 22^{\circ}S$ y longitudes: $261^{\circ}E - 290^{\circ}E$ (Fig. 1.1). Mientras que la sección vertical corresponde a la zona ubicada entre las longitudes: $261^{\circ}E - 290^{\circ}E$ y las profundidades: $0 - 5000\text{ m}$. Finalmente, los índices ONI, E y C sirven para observar el impacto de eventos intra-estacionales a inter-anales sobre los datos mensuales, mientras que el índice IPO cuantifica el impacto de la escala inter-decadal sobre los datos mensuales.

La metodología para calcular los mapas de compuestos aplicada en este análisis, también se utiliza para visualizar de mejor manera los modos de variabilidad de las EOF. En este caso, el estadístico utilizado es la correlación, y las series de control son las K-primeras componentes principales resultantes de un análisis de EOF. Las componentes principales son correlacionadas con las series de tiempo de anomalías asociadas a cada punto de grilla (longitud y latitud profundidad) para una variable cualquiera. El mapa de compuestos o mapa de correlación resultante, representa el patrón espacial del K-modo variabilidad.

2.1.6. Cálculo de oxiclina

La oxiclina es conocida como la superficie o capa en dónde las concentraciones de oxígeno disuelto cambian abruptamente. Para este caso, se espera que las concentraciones de oxígeno disuelto disminuyan con la profundidad. Así, físicamente se puede pensar en la oxiclina como la capa en dónde el gradiente de oxígeno disuelto es más negativo.

En este estudio, la oxiclina fue calculada como las profundidades en dónde el gradiente de oxígeno disuelto es más negativo. Los valores de profundidad fueron considerados como negativos, con 0 indicando la superficie. Es necesario tener esto en consideración al momento de interpretar los resultados del análisis de EOF para oxiclina. Esto significaría que para zonas más azules en los patrones espaciales de las EOF, la profundidad de la oxiclina es mayor (más profunda).

2.1.7. Funciones ortogonales empíricas

Las Funciones Ortogonales Empíricas (EOF), son un método multivariado enfocado a la reducción de información, los datos resultantes del análisis de EOF son combinaciones lineales de los datos originales. Las combinaciones lineales buscan particionar la varianza de un grupo de series de tiempo espacialmente distribuidas en un campo de grilla, estas reciben el nombre de modos de variabilidad y

están determinadas para poder representar el máximo de varianza contenida en los datos originales, los modos están ordenados de forma descendiente, es decir, el primer modo contiene la mayor cantidad de varianza. La cantidad resultante de modos es K con $K \leq \min(M, N)$, en donde M y N son las dimensiones de la matriz bi-dimensional $\mathbf{F}$, es decir, la dimensión más pequeña de la matriz $\mathbf{F}$ es la cantidad de modos de variabilidad que se obtiene de un análisis de EOF. Este método es utilizado en estudios climáticos para analizar la varianza temporal y espacial de un campo y obtener una descripción de esta en términos de componentes principales y vectores propios (patrón espacial) respectivamente.

Si abordamos esto desde un punto de vista numérico, se tiene que considerar que la matriz de datos a la que se le aplica el análisis de EOF es bi-dimensional, esto quiere decir que una de las dimensiones de nuestra matriz estará asociada al tiempo, mientras que la otra estará asociada al espacio (en general, el parámetro asociado a las dimensiones de esta matriz puede ser cualquier cosa que el analista quiera estudiar). En nuestro estudio, las matrices de datos eran tri-dimensionales, en dónde, las primeras dos dimensiones corresponden a longitud y latitud (o longitud y profundidad), mientras que la tercera corresponde al tiempo. Las matrices de datos tri-dimensionales tuvieron que ser reagrupadas de tal forma que la primera dimensión (filas) corresponda al tiempo, mientras que la segunda dimensión (columnas) corresponda al espacio, esto quiere decir que esta segunda dimensión contiene puntos asociadas a longitud y latitud (o longitud y profundidad). Por un tema de nomenclatura, nuestra matriz bi-dimensional será referida como $\mathbf{F}$, esta tiene N filas y M columnas, en dónde N corresponde al largo de vector de tiempo y M es la multiplicación del número de latitudes (o profundidad) por el número de longitudes. A la matriz $\mathbf{F}$ se le calculan las anomalías, removiendo el ciclo anual y normalizando, según lo visto en 2.1. Finalmente, la nueva matriz $\mathbf{F}$ de anomalías es analizada usando EOF.

El método empleado para el cálculo de la EOF es conocido como Descomposición de Valores Singulares (SVD). Este es uno de los tantos métodos para calcular las EOF, es elegido porque es computacionalmente más robusto y rápido que otros métodos (como por ejemplo el método de la matriz de covarianza). El método SVD resuelve la siguiente ecuación matricial:

$$\mathbf{F} = \mathbf{U} * \mathbf{\Gamma} * \mathbf{V}^\dagger \quad (2.5)$$

Esta define la matriz $\mathbf{F}(M \times N)$ de anomalías como el producto de tres matrices: $\mathbf{U}(M \times M)$ la matriz izquierda de vectores, $\mathbf{\Gamma}(M \times N)$, la matriz diagonal que contiene valores ≥ 0 , y la matriz transpuesta de $\mathbf{V}(N \times N)$, la matriz derecha de vectores singulares.

Los valores de $\mathbf{\Gamma}$ entregan el porcentaje de varianza almacenado en el K -modo tal que: $VAR_K = \frac{\gamma^2}{\sum \gamma^2} \times 100$ es el porcentaje de varianza contenida en el modo de variabilidad, aquí γ corresponde a un valor de la matriz $\mathbf{\Gamma}$. Por otro lado, las primeras K columnas de $\mathbf{U}$ son idénticas a las los vectores propios (contribución de cada punto espacial a la varianza del K -modo de variabilidad), mientras que las primeras K filas de $\mathbf{V}^\dagger$ son proporcionales a las K componentes principales, tal que: $\mathbf{A} = \mathbf{\Gamma} * \mathbf{V}^\dagger$. Finalmente las anomalías pueden ser reconstruidas usando los K primeros modos:

$$F_m(t) = \sum_{k=1}^K U_m^k \gamma_k V^\dagger(t) \quad (2.6)$$

El patrón espacial asociado al K-modo de variabilidad es visualizado utilizando análisis de componentes. Aquí, se correlaciona la componente principal asociada al K-modo con la tercera dimensión temporal de las matrices tri-dimensionales de anomalías, el resultado es un mapa de correlaciones que muestra las contribuciones al K-modo de variabilidad asociadas a los distintos puntos espaciales en la grilla. Las componentes principales asociados al K-modo de variabilidad muestran la variación temporal del patrón espacial y por lo tanto, las anomalías. A partir de la ecuación (2.6) se observa que si los valores de la componente principal son negativos, el patrón espacial se invierte y las anomalías cambian de signo, entre más grandes sean los valores de la componente principal, más intensas serán las anomalías.

Hasta ahora, sólo se ha pensado que la matriz $\mathbf{F}$ de anomalías corresponde a un campo y por lo tanto a una variable en particular (temperatura, salinidad, oxígeno, etc). Sin embargo, estas pueden ser combinadas. Se habla de EOF combinada cuando hay dos o más variables dentro de la matriz $\mathbf{F}$. Observemos que al tratarse de una matriz bi-dimensional, la combinación entre variables puede realizarse combinando filas o columnas. Para mantener la consistencia entre los análisis, y por su mayor simpleza, en este estudio las variables fueron combinadas por columnas, es decir, comparten la misma dimensión temporal. Por lo tanto, la nueva matriz sería $F_{comb}(M \times H)$, con $H = N_{var1} + N_{var2}$. Una vez combinada la matriz $\mathbf{F}$, el procedimiento para el cálculo de la EOF es el mismo mencionado con anterioridad. Para este tipo de EOF, se obtendrá una componente principal y k_o patrones espaciales asociados al mismo K-modo de variabilidad, en donde k_o representa el número de variables que fueron combinadas dentro de la matriz $\mathbf{F}$.

En este estudio, los análisis de EOF se realizaron a anomalías normalizadas filtradas para los períodos inter-anual e inter-decadal, estas anomalías filtradas se calcularon para variables (oxígeno disuelto, corriente meridional, nitrato, tasas de desnitrificación y amonio) tri-dimensionales (latitud, longitud y profundidad) y variables (oxiclina) bi-dimensionales (latitud y longitud) espacialmente. Ambos tipos de matrices fueron arregladas de tal forma que la primera dimensión (filas) corresponde a la componente temporal, mientras que la segunda dimensión (columnas) corresponde a la componente espacial. Entonces, para las matrices tri-dimensionales se seleccionó un volumen ($31^\circ S - 29^\circ S$, $285^\circ E - 288^\circ E$, $0 - 600\ m$) de la columna de agua para un tiempo t_n , con $n = 1, 2, \dots, N$, el cuál fue transformado en un arreglo uni-dimensional. Este procedimiento fue repetido N veces, de tal manera que la matriz bi-dimensional resultante ($\mathbf{F}$) tiene N filas y M columnas, con $M = L_{latitud} \dot{L}_{longitud} \dot{L}_{profundidad}$, en donde L simboliza el largo de la dimensión. Para la oxiclina, al tratarse de una matriz bi-dimensional en el espacio, se seleccionó una superficie ($33^\circ S - 28^\circ S$, $285^\circ E - 288^\circ E$) a la cual se le aplicó el mismo procedimiento.

El patrón espacial para el K-modo de variabilidad fue calculado correlacionando la componente principal asociada al K-modo de variabilidad con las anomalías normalizadas de la variable analizada (oxígeno disuelto, corriente meridional, nitrato, tasas de desnitrificación o amonio). El dominio

espacial que se utilizó para calcular el patrón espacial es más grande que el utilizado para calcular la EOF. Además, se escogieron las mismas secciones que se utilizaron para calcular los mapas de compuestos de la sección 2.1.5 con la excepción de que la sección vertical comprende las longitudes: $261^{\circ}E - 290^{\circ}E$ y las profundidades: $0 - 1000\text{ m}$.

2.1.8. Regla de North

Para aquellos vectores propios cuyos valores propios se aproximan al de otro vector propio, es de esperarse que ocurran errores de muestreo. Según North et al. 1982 si el error de muestreo asociado a un valor propio es comparable o mayor a la distancia entre valores propios, entonces los modos de variabilidad asociado a esos valores propios se encuentran mezclados y por lo tanto no son significativos.

La regla de North, es utilizada en este estudio para asegurar la significancia de los modos de variabilidad de los análisis de EOF.

2.1.9. Correlación con desfase

El objetivo de este análisis es encontrar el desfase entre dos series de tiempo para el cual la correlación es máxima. La correlación utilizada en este estudio corresponde a la propuesta por Pearson:

$$r_i = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.7)$$

En dónde n es el número de observaciones, X_i y Y_i corresponden al i -ésimo valor de las series de tiempo X e Y mientras que $\bar{X}$ y $\bar{Y}$ corresponden al promedio de la serie de tiempo. Valores cercanos a -1 y 1 indican una buena correlación, mientras que valores cercanos a cero indican una mala correlación, se considerarán valores cercanos a cero todos aquellos $\leq 0,3$.

En este estudio, las variables analizadas para correlación con desfase son: corriente meridional (V) y oxiclina, además de los índices de ENSO vistos en la Sección 2.1.4. El objetivo de este análisis es encontrar una relación entre corriente meridional y la variabilidad vertical de la oxiclina. Un desfase de ~ 6 meses entre ambas variables, se relacionaría al impacto de ondas de Rossby.

3. Capítulo 3

3.1 Resultados

3.1.1. Razones elementales

Las razones elementales de Mo/Al, Cd/Al, Re/Al y Ni/Al para el testigo de Guanaqueros BGGC5 (Fig. 3.1) muestran una tendencia negativa para el período 109 B.C. – 2015 A.D., esto indica una columna de agua menos anóxica hacia el presente. Además, las razones elementales U/Al y Ca/Al (Fig. 3.2) también presentan una tendencia negativa, siendo más pronunciada para la razón U/Al. Esto, junto con la razón Ni/Al indicaría una disminución en la intensidad de la productividad en la zona, así como también una disminución en la presencia de organismos calcáreos. Sin embargo, el carbono orgánico total (TOC) y el ópalo biogénico (Fig.3.2) muestran una tendencia positiva. Esto indicaría una mayor presencia de material orgánico y organismos silíceos hacia el presente. Por otro lado, a partir de la Fig. 3.3 podemos observar que las razones de Re/Mo y U/Mo presentan una tendencia positiva. La mayor presencia de Re y U, respecto a las concentraciones de Mo, hacen referencia a una disminución de sulfidos (anoxia) en la columna de agua. Al mismo tiempo, si bien tanto Re/Mo como U/Mo indican una tendencia hacia aguas subóxicas, la pendiente de U/Mo es más débil que la pendiente de Re/Mo, esto se debe a que durante un evento de ventilación, U se pierde más rápidamente de los sedimentos que Mo, esto debido a que la presencia de óxidos de Fe y Mn capturan parte de Mo y lo retornan a los sedimentos. Finalmente, la Fig. 3.4 nos muestra una tendencia positiva para la razón K/Ca y negativa para el tamaño de grano. La razón K/Ca nos indica un aumento en la precipitación y/o caudales de los ríos, mientras que la disminución en el tamaño de grano indica un menor arrastre de partículas hacia la columna de agua. Estas discrepancias entre K/Ca y tamaño de grano se deben a la posición geográfica del testigo de Guanaqueros, indicando que no recibe aportes de ríos.

Por otro lado, para el testigo de Coquimbo BC117 se observa que el registro temporal es menor que el observado para el testigo de Guanaqueros. Aquí, este período comprende los años entre 1183 – 2014 A.D. Además, podemos notar que la tendencia para las razones elementales de Mo/Al, Cd/Al, Re/Al y Ni/Al es positiva. Esto indicaría que la columna de agua se ha vuelto más anóxica hacia el presente. Estas diferencias entre ambos testigos podrían deberse a la distinta resolución a la cual se realizaron los cortes para el muestreo de los sedimentos, esto será abordado en la sección de discusión. Por otro lado, la Fig. 3.2 muestra tendencias positivas para las razones de U/Al, carbono orgánico total y Ca/Al, indicando un aumento en la productividad y presencia de organismos calcáreos hacia el presente. Además, el ópalo biogénico muestra una tendencia negativa, lo que implicaría una menor presencia de organismos silíceos hacia el presente. Por otro lado, la tendencia de Re/Mo nos indica una preferencia a condiciones subóxicas, mientras que la razón U/Mo casi no presenta una tendencia. Esto se debe a la posible presencia de óxidos de Fe y Mn, que facilitarían la precipitación de Mo y por lo tanto suavizando la pendiente de la serie temporal. Finalmente, la Fig. 3.4 nos muestra una tendencia negativa de K/Ca y una tendencia positiva del tamaño de grano. Un aumento en el tamaño de grano indica un mayor arrastre de partículas, el cual podría asociarse a una intensificación en el

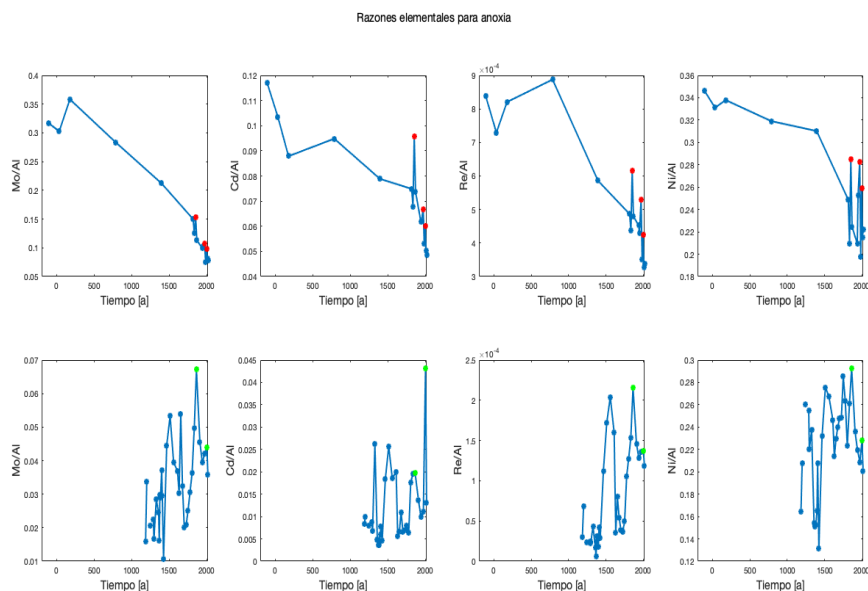


Figura 3.1: Razones elementales de Mo/Al, Cd/Al, Re/Al y Ni/Al. La fila superior (inferior) corresponde al testigo de Guanaqueros (Coquimbo), este comprende el período 109 A.C. – 2015 A.D. (1183 – 2014 A.D.). Los puntos rojos corresponden a máximos para las fechas: 1850, 1969 y 1996. Los puntos verdes corresponden a máximos asociados a las fechas: 1861 y 2000.

caudal del río Elqui. Por otro lado, la tendencia negativa de la razón K/Ca nos indica una disminución de las precipitaciones hacia el presente. Por otro lado, se puede observar que entre ambos testigos ocurren cosas distintas. Las diferencias entre las razones de K/Ca de ambos testigos puede deberse a las distintas posiciones geográficas en las que se realizó el muestreo. Así, la zona del testigo de Coquimbo recibiría más aporte de los ríos a diferencia de la zona del testigo de Guanaqueros.

Se observa que las razones elementales del testigo de Guanaqueros comparten máximos asociados a los años: 1850, 1969 y 1996 (Fig. 3.1 y Fig. 3.2). Esto indicaría que durante condiciones más anóxicas existe una intensificación en la productividad y en la presencia de organismos calcáreos. Para el testigo de Coquimbo, ocurre algo similar. Sin embargo, no presentan máximos asociados a las mismas fechas que el testigo de Guanaqueros. Aquí podemos observar máximos para los años: 1861 y 2000. De manera análoga, durante condiciones más anóxicas ocurre una intensificación en la productividad. Sin embargo, no se observa que estos máximos coincidan con un aumento en la presencia de organismos calcáreos o silíceos. Por otro lado, los máximos mencionados anteriormente en este párrafo no coinciden en ambos testigos (Fig. 3.3). Se puede observar que para el testigo de Guanaqueros el año 1996 corresponde a un mínimo de K/Ca y un máximo de tamaño de grano, esto se asocia a una disminución en las precipitaciones y a un aumento en el arrastre de partículas (Fig. 3.4). Mientras que para el testigo de Coquimbo se observa un máximo de K/Ca y mínimos de Ca/Al y tamaño de grano para el año 2000, los cuales estarían asociados a un incremento de las precipitaciones y una disminución en el arrastre de partículas.

Datos históricos indican que el período 1995-96 corresponde a un evento La Niña leve. Esto podría

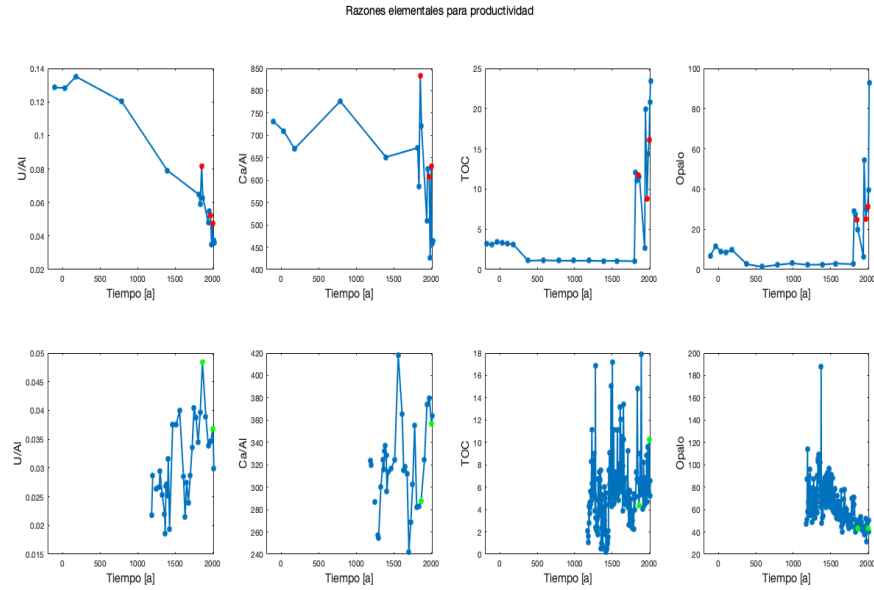


Figura 3.2: Razones elementales de U/Al, Ca/Al; y los proxys de: carbono orgánico total (TOC) y ópalo biogénico (Opalo). La fila superior (inferior) corresponde al testigo de Guanaqueros (Coquimbo). Los puntos rojos corresponden a máximos para las fechas de: 1850, 1969 y 1996. Los puntos verdes corresponden a máximos asociadas a las fechas: 1861 y 2000.

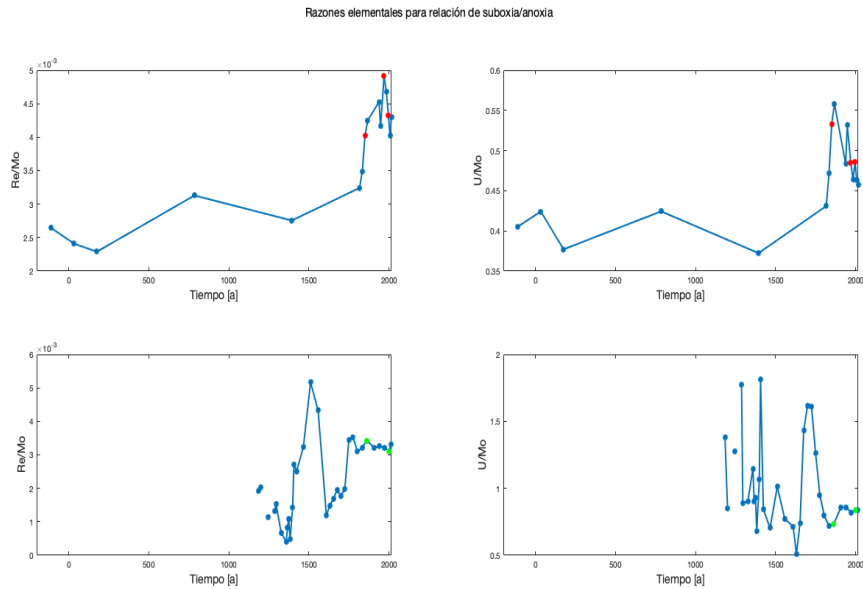


Figura 3.3: Razones elementales para la relación de suboxia/anoxia. (Fila superior) Se muestran las razones elementales: Re/Mo y U/Mo para el testigo de Guanaqueros. Los puntos rojos corresponden a máximos para las fechas de: 1850, 1969 y 1996. (Fila inferior) Se tienen las mismas razones elementales descritos arriba, pero para el testigo de Coquimbo. Los puntos verdes corresponden a máximos asociadas a las fechas: 1861 y 2000.

explicar la disminución de las precipitaciones y los caudales de los ríos observados para el año 1996 en el testigo de Guanaqueros. Por otro lado, el período 1998-99 corresponde a un evento La Niña fuerte. Esto explicaría el debilitamiento de los aportes fluviales observados para el año 2000 en el testigo de Coquimbo.

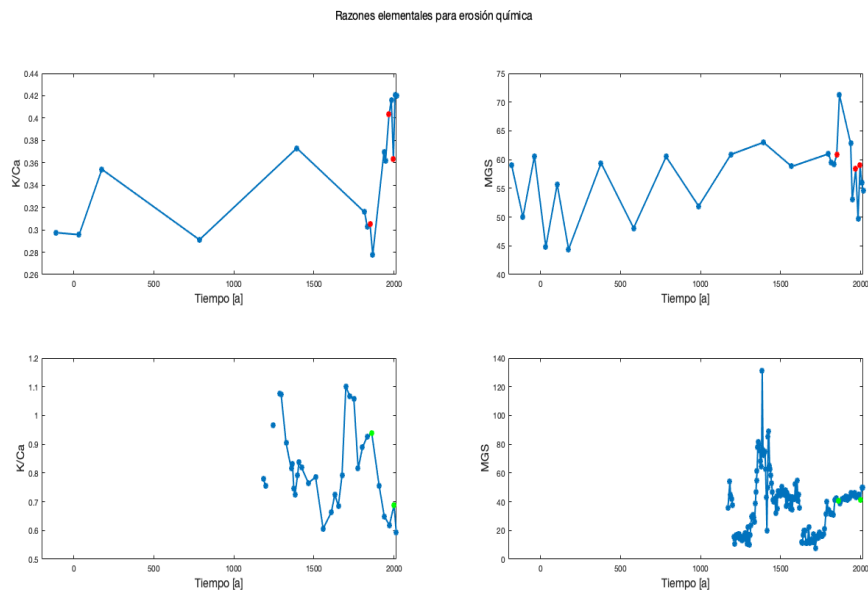


Figura 3.4: Razones elementales para la erosión química. (Fila superior) Se muestran la razón elemental K/Ca y el proxy de tamaño de grano (MGS) testigo de Guanaqueros. Los puntos rojos corresponden a máximos para las fechas de: 1850, 1969 y 1996. **(Fila inferior)** Se tienen la misma razón elemental y proxy descritos arriba, pero para el testigo de Coquimbo. Los puntos verdes corresponden a máximos asociadas a las fechas: 1861 y 2000.

En síntesis, las razones elementales y proxys biogeoquímicos obtenidos del testigo de Guanaqueros indican un ambiente más oxigenado, menos productivo, con menor (mayor) presencia de organismos calcáreos (silíceos) y con mayor aporte fluvial hacia el presente. Por otro lado, el testigo de Coquimbo muestra exactamente lo contrario. Ambos testigos presentan distintas resoluciones temporales (distintos pasos de tiempo), lo cual podría afectar las comparaciones entre la variabilidad de estos. Además, geográficamente el testigo de Guanaqueros se encuentra más alejado de la desembocadura del río Elqui, lo cual significa que es una zona con bajo aporte fluvial y por lo tanto podríamos pensar que este testigo describe la variabilidad del paleo-clima con más aportes oceánicos, mientras que el testigo de Coquimbo describe la variabilidad más local. En el testigo de Guanaqueros, la razón K/Ca está dominada por las variaciones de Ca asociadas a la productividad. Por otro lado, en la Bahía de Coquimbo, las variaciones de los aportes fluviales son más evidentes debido a la presencia del río Elqui, lo que significa que las variaciones de la razón K/Ca están dominadas por los aportes fluviales. Esto explicaría las diferencias de interpretaciones entre ambos testigos de sedimentos.

3.1.2. Índices ENSO

Los índices de ENSO fueron calculados utilizando anomalías normalizadas (2.1) de TSM. Se siguió la metodología explicada en la sección 2.1.4. La Fig. 3.5 muestra los índices E, C, ONI e IPO.

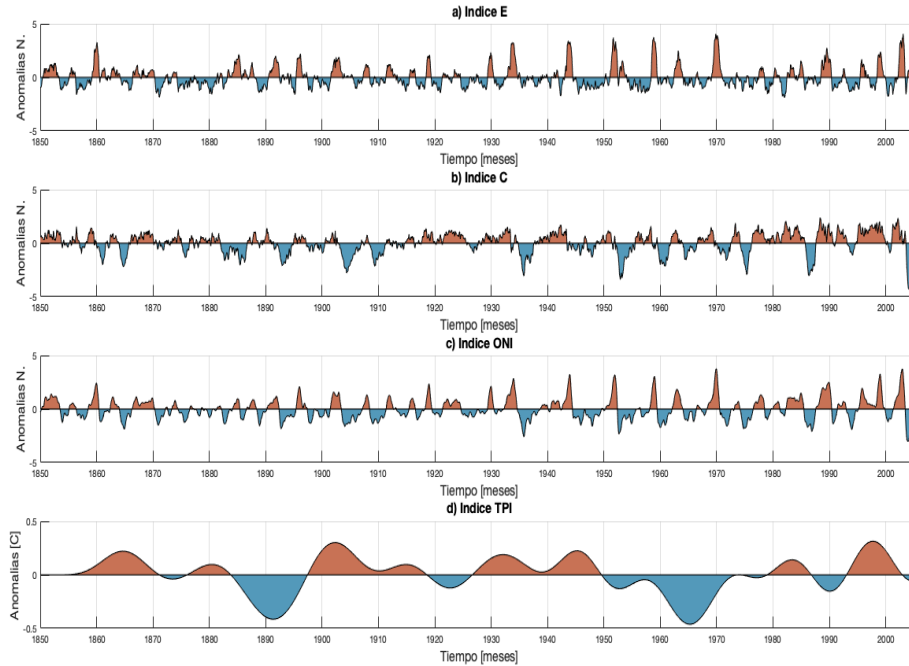


Figura 3.5: a) Índice E que se utiliza para cuantificar los eventos extremos de El Niño. b) Índice C que se utiliza para cuantificar los eventos moderados y fríos de ENSO. c) El índice ONI que representa una visión más general de los eventos ENSO. d) El índice IPO que representa la variabilidad inter-decadal.

Los índices fueron normalizados por su desviación estándar, por lo tanto los valores asignados al eje-y de la Fig. 3.5 son proporcionales a las desviaciones estándar. Para el índice ONI, los valores entre $-1,0 < ONI < -0,5$ ($1,0 < ONI < 0,5$) son considerados eventos fríos (cálidos) débiles, entre $-1,5 < ONI < -1,0$ ($1,5 < ONI < 1,0$) son considerados eventos fríos (cálidos) moderados, entre $-2,0 < ONI < -1,5$ ($2,0 < ONI < 1,5$) son considerados eventos fríos (cálidos) fuertes, para valores $ONI < -2,0$ ($ONI > 2,0$) son considerados eventos fríos (cálidos) muy fuertes.

Si comparamos los índices E, C y ONI, podemos observar que los eventos extremos cálidos del índice E y los eventos moderados y fríos del índice C están bien representados en los eventos cálidos y fríos respectivamente del índice ONI. La correlación entre el índice E y ONI es de 0,75, y para el índice C y ONI es de 0,62. Así, calculado el coeficiente de determinación se observa que el índice E y el índice ONI comparten $\sim 56\%$ de varianza, mientras que el índice C y el índice ONI comparten $\sim 39\%$ de varianza.

A partir de aquí, nos referiremos a los eventos El Niño (La Niña) como fase cálida (fría). Esto para tener generalidad respecto a los cuatro índices, ya que las distintas fases del índice IPO no describen eventos ENSO, si no su impacto a una escala temporal distinta.

3.1.3. Análisis de compuestos

En base a los índices ONI, E, C e IPO se definieron los períodos cálidos y fríos según lo expuesto en la sección 2.1.5. Aquí, el índice ONI será utilizado para referirnos a la contribución que tiene la escala inter-anual en la variabilidad de la región, mientras que los índices E y C se utilizarán para cuantificar impacto de los eventos cálidos extremos, y moderados y fríos respectivamente. Por otro lado, el índice IPO se utilizará para estudiar la contribución inter-decadal en la variabilidad de la región.

Durante la fase positiva (negativa) ocurre oxigenación (desoxigenación) a lo largo de la costa alrededor de 105 *m* de profundidad (Fig. 3.6 y Fig. 3.7). Se observa que las anomalías positivas de oxígeno disuelto son mayores que las anomalías negativas a esta profundidad. Además, la fase positiva (negativa) se asocia a una disminución (aumento) en las concentraciones de nitrato, junto a una intensificación (debilitamiento) en las concentraciones de amonio y las corrientes meridionales que viajan hacia el sur. Las anomalías de las corrientes a 105 *m* de profundidad señalan hacia el sur (norte) durante una fase positiva (negativa). Esto se interpreta como un fortalecimiento (debilitamiento) de las corrientes. Además, la posición y profundidad a la cual se encuentran las anomalías de corriente corresponden a la posición y profundidad característica de la CSSPC. Sin embargo, es necesario destacar que la extensión horizontal de la CSSPC se encuentra sobrestimada por los datos del modelo, esto indicaría que este flujo hacia los polos podría estar incluyendo los aportes de otros flujos hacia el sur. Finalmente, a esta profundidad no se observa variabilidad asociada a las tasas de desnitrificación.

Considerando las mismas figuras mencionadas en el párrafo anterior, pero a 408 *m* de profundidad, podemos observar que durante una fase positiva (negativa) ocurre un patrón inverso al observado a 105 *m* para oxígeno disuelto. Las anomalías de nitrato se mantienen similares a las observadas a 105 *m*, mientras que para las tasas de desnitrificación se observa un aumento (disminución). Por otro lado, no se observa variabilidad asociada a las concentraciones de amonio cerca de la costa, a excepción de la zona al norte de los 27°S. Finalmente, podemos observar que las anomalías de la corriente indican un patrón similar al observado a 105 *m*, pero con una componente zonal que implica un leve desplazamiento hacia el oeste.

Así, en las secciones verticales (Fig. 3.6 y Fig. 3.7) durante una fase positiva (negativa) se observa un núcleo de desoxigenación (oxigenación) en las primeras decenas de metros y cerca de la plataforma continental. Estas anomalías se profundizan a medida que nos alejamos de la costa, llegando a los 130 *m* de profundidad en zonas más oceánicas. Entre los 30 – 400 *m*, apegado a la plataforma continental, se tiene un núcleo de oxigenación (desoxigenación), mientras que entre los 400 – 600 *m* se tiene una zona de desoxigenación (oxigenación). Notamos entonces que el patrón de anomalías alrededor de los 105 *m* es inverso a aquel encontrado alrededor de los 408 *m*. Por otro lado, para nitrato se observa que en zonas costeras ocurre una disminución (aumento) entre la superficie y los ~ 1000 *m* de profundidad. Por lo que, contrario a lo visto para oxígeno disuelto, las concentraciones de nitrato varían de igual manera en la columna de agua entre dichas profundidades. Para amonio en zonas costeras, se tiene que hay una disminución (aumento) para las primeras decenas de metros y un aumento (disminución) bajo esta zona. Esta última zona alcanza los ~ 200 *m*. Entre los 200 – 1000 *m* no se ob-

servan anomalías de amonio. Por otro lado, podemos notar que existe una disminución (aumento) en las tasas de desnitrificación entre los 200 – 400 *m* y un aumento (disminución) entre los 400 – 500 *m*.

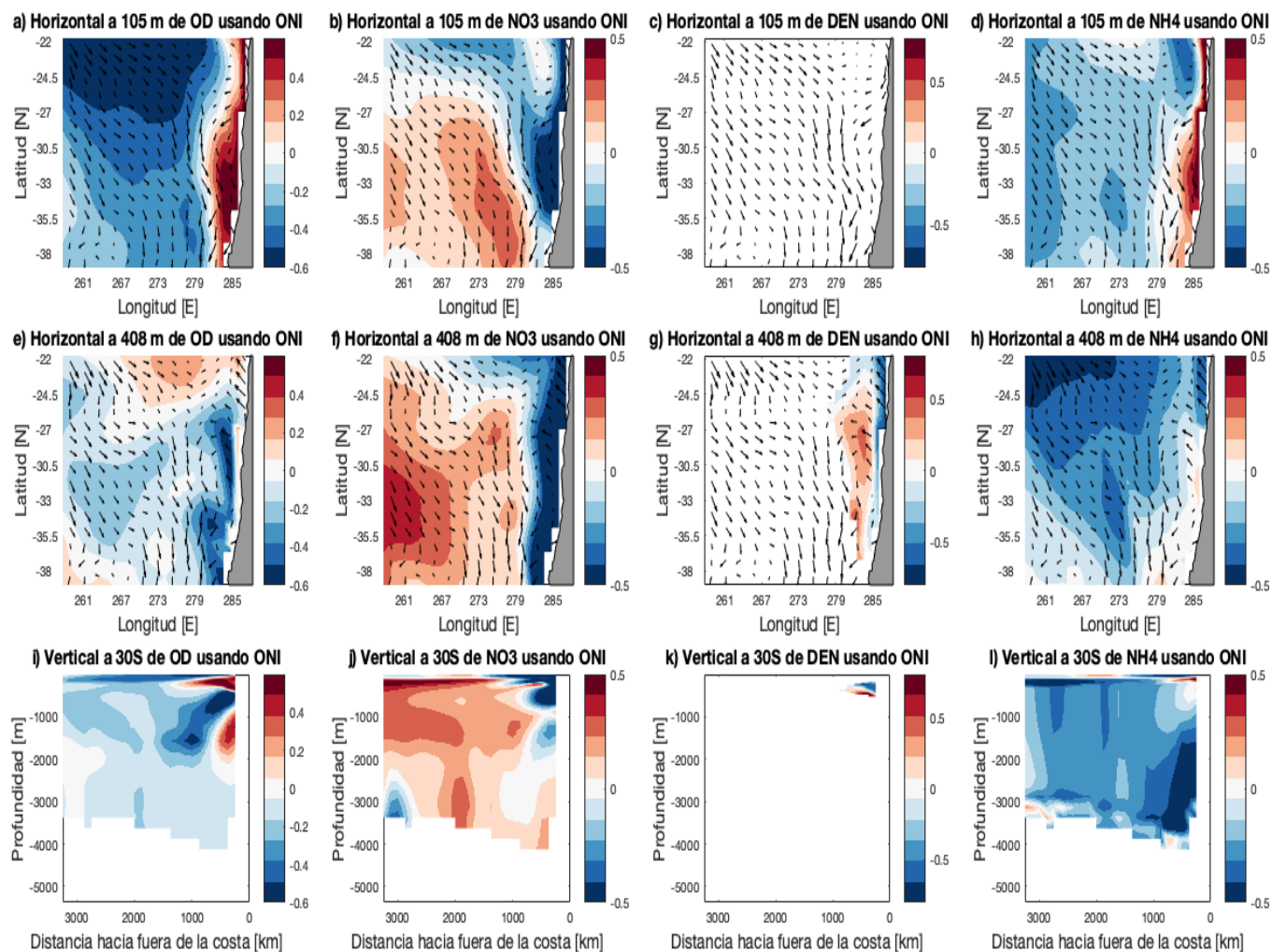


Figura 3.6: Mapas de compuestos utilizando el índice ONI para una fase positiva (El Niño). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase cálida. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH4). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente.

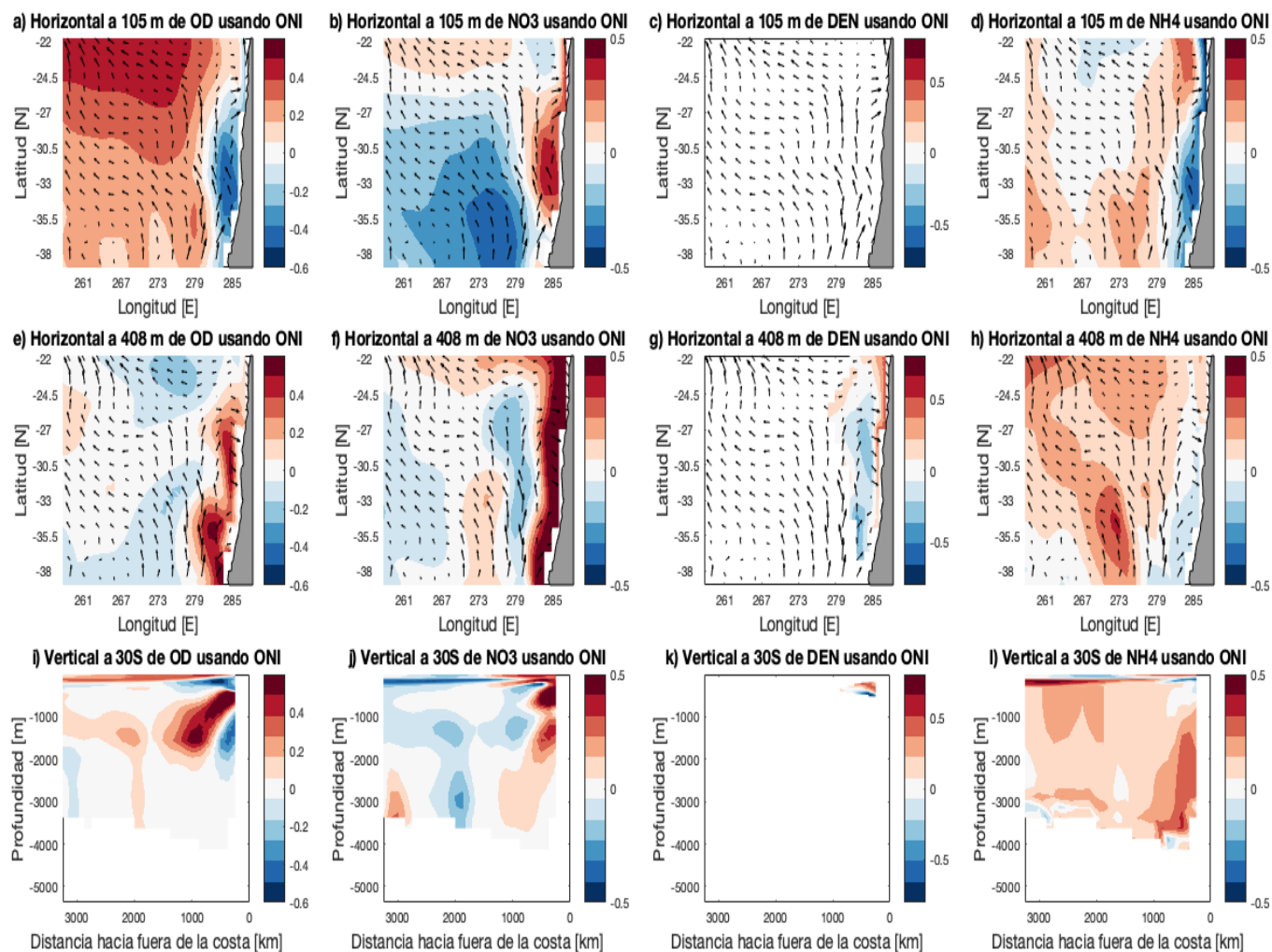


Figura 3.7: Mapas de compuestos utilizando el índice ONI para una fase negativa (La Niña). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dado una fase fría. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH4). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente.

A partir de los perfiles verticales podemos notar que las profundidades en las cuales hay anomalías negativas (positivas) de las tasas de desnitrificación son las mismas en las cuales ocurren eventos de oxigenación (desoxigenación) cerca de la plataforma continental, ya sea una fase positiva o negativa del índice. Por otro lado, podemos notar que existe una zona en la cual no hay variabilidad asociada a las concentraciones de amonio. Esta corresponde a una zona en donde se tienen anomalías del mismo signo de oxígeno disuelto y nitrato junto con anomalías de signo contrario de tasas de desnitrificación. Esto podría indicar una preferencia a procesos de desnitrificación por sobre aquellos procesos del ciclo del nitrógeno que se asocian a un incremento en las concentraciones de amonio.

Los mapas de compuestos calculados utilizando el índice E (Fig. 3.8 y Fig. 3.9) muestran una distribución espacial de anomalías bastante similar a la observada en los mapas de compuestos calculados utilizando el índice ONI (Fig. 3.6 y Fig. 3.7). Esto se aprecia en las secciones horizontales (105 y 408 *m*) y en el perfil vertical. Sin embargo, las anomalías pertenecientes a los mapas asociados al índice E, son más débiles. Esto también se evidencia para aquellos mapas calculados utilizando el índice C (Fig. 3.10 y Fig. 4.1). Las diferencias de magnitud entre el índice C y los demás índices se observan con gran claridad, siendo los compuestos calculados con el índice C aquellos de menor intensidad respecto a los compuestos calculados utilizando el índice E y ONI.

Es importante destacar que la fase negativa del índice E (Fig. 3.9) no representa un evento como tal ya que el índice E sólo comprende los eventos extremos cálidos de ENSO, es por esto que las discusiones sobre los mapas de compuestos del índice E se realizarán considerando sólo la fase positiva. Por otro lado, podemos notar que las anomalías de oxígeno disuelto, a 105 *m* de profundidad, para los mapas de compuestos calculados con el índice C (Fig. 3.10 y Fig. 4.1) son bastante débiles, por lo que podrían considerarse como el estado “normal” de la columna de agua. Además, las anomalías, durante ambas fases, se vuelven más intensas alrededor de los 408 *m* de profundidad.

Las anomalías de corrientes a 105 *m* de profundidad no muestran un patrón claro en los mapas de compuestos calculados utilizando el índice E. Por otro lado, las anomalías de corriente a 408 *m* indican un debilitamiento (intensificación) durante una fase positiva (negativa). De manera análoga, para aquellos mapas calculados utilizando el índice C podemos notar lo contrario. Aquí, se observa una clara intensificación (debilitamiento) de las corrientes a 105 *m* de profundidad durante una fase positiva (negativa), mientras que a 408 *m* no se observa un patrón claro.

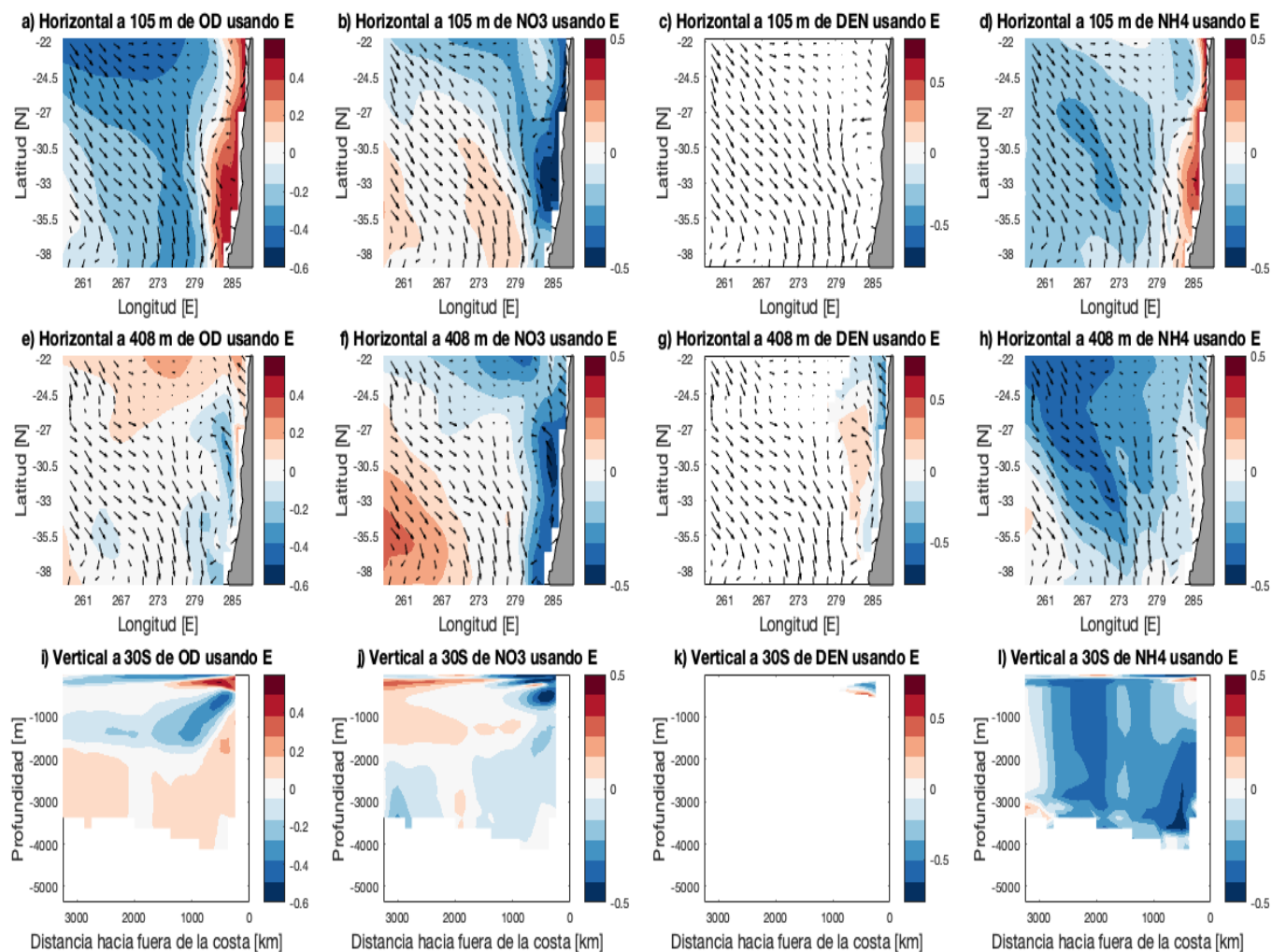


Figura 3.8: Mapas de compuestos utilizando el índice E para una fase positiva (El Niño). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase cálida. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH4). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente.

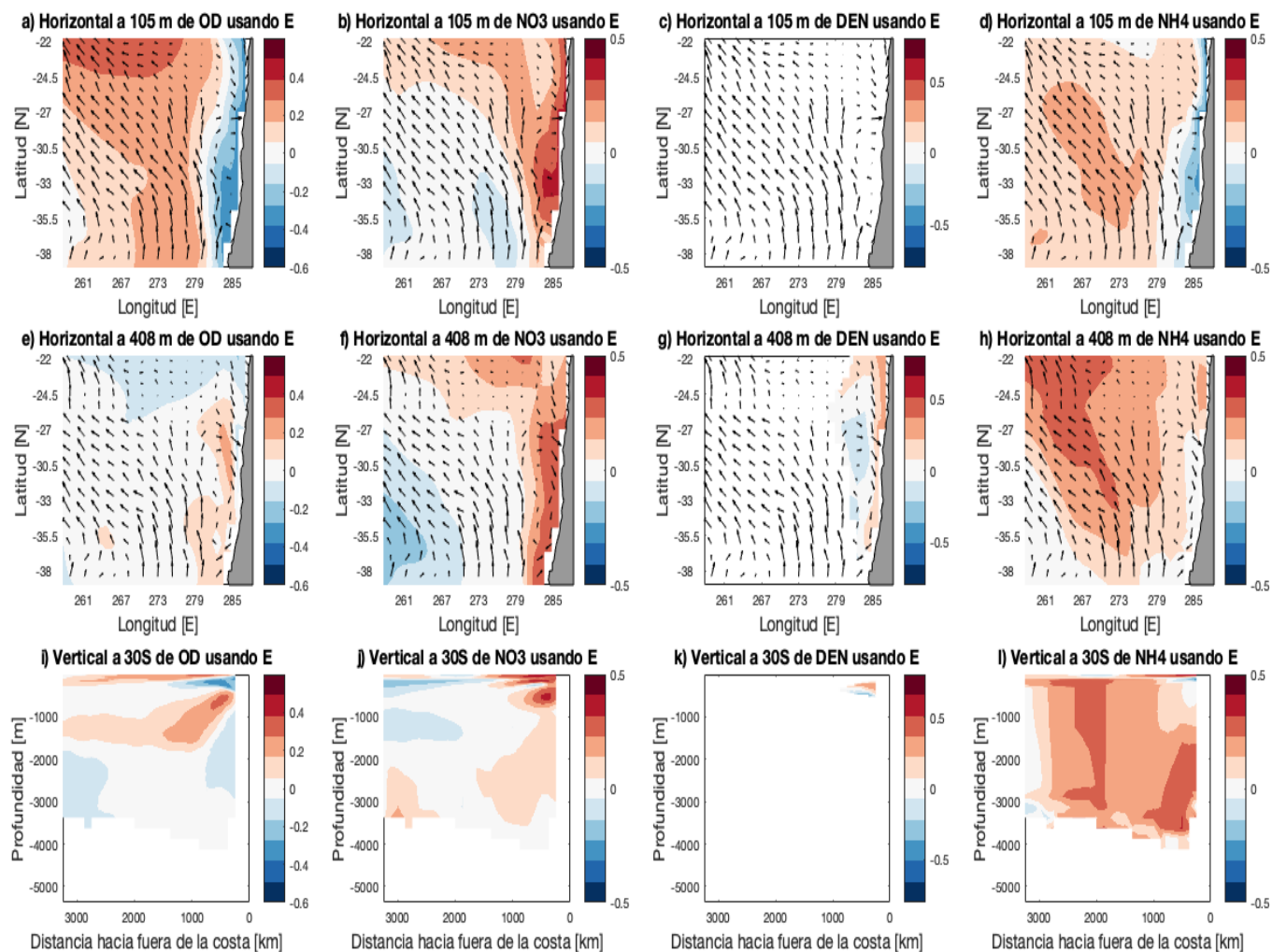


Figura 3.9: Mapas de compuestos utilizando el índice E para una fase negativa. Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase fría. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH4). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente.

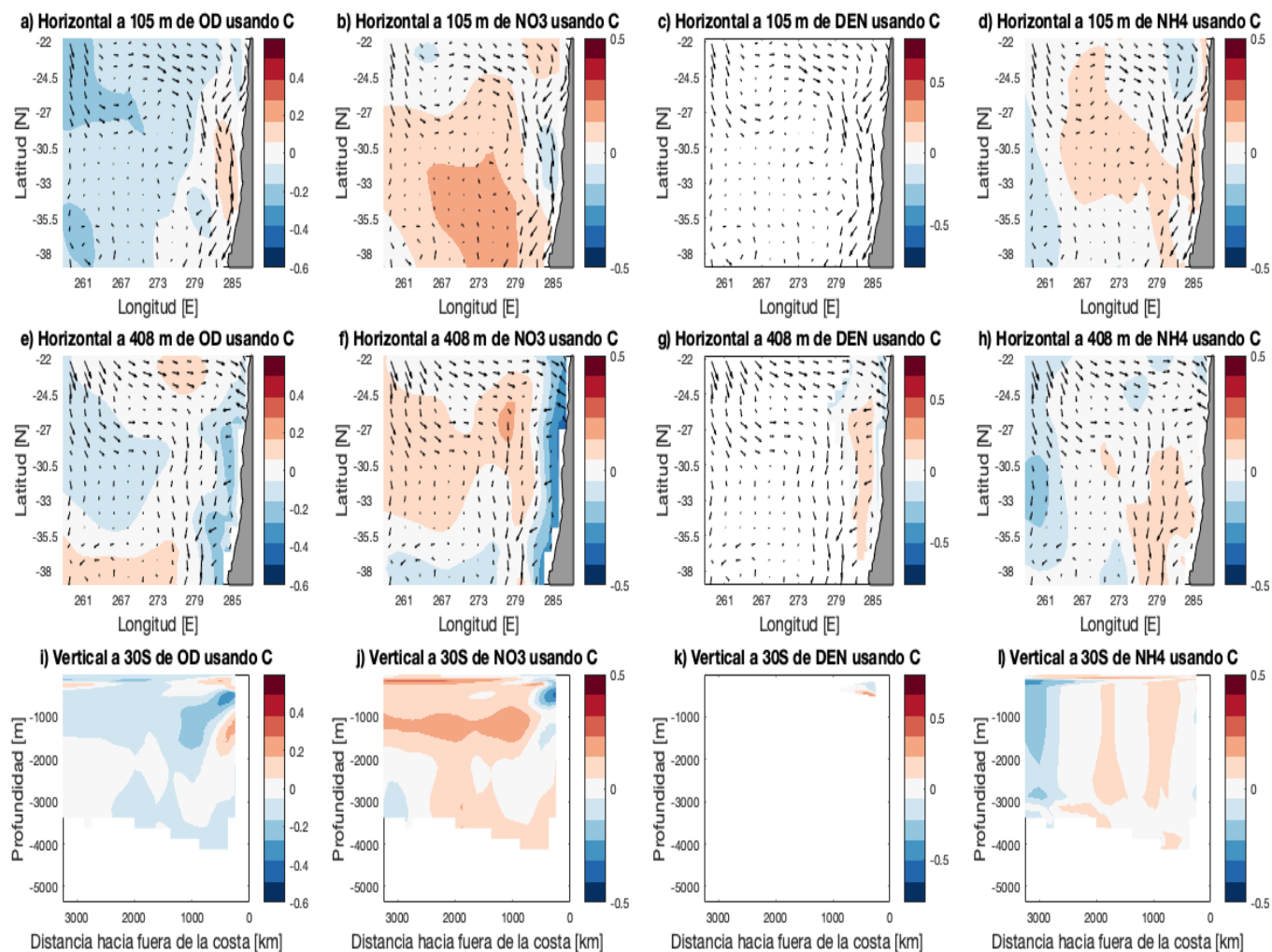


Figura 3.10: Mapas de compuestos utilizando el índice C para una fase positiva (El Niño). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase cálida. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH4). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente.

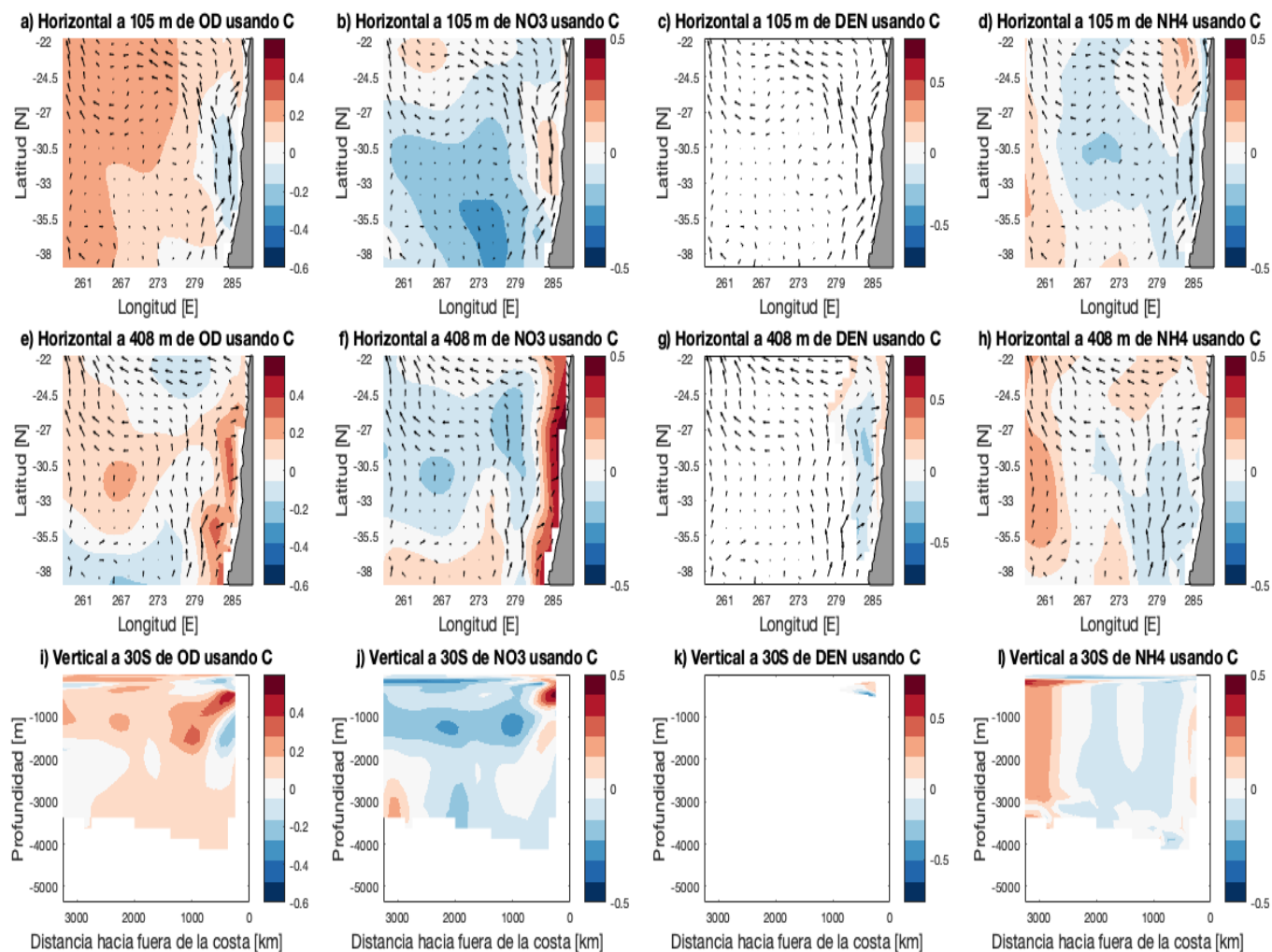


Figura 3.11: Mapas de compuestos utilizando el índice C para una fase negativa (La Niña). Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase fría. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH4). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente.

Para la escala inter-decadal. A través de una comparación entre los mapas de compuestos calculados utilizando el índice IPO (Fig. 3.12 y Fig. 3.13) y los mapas de compuestos calculados para la escala inter-anual (utilizando los índices ONI, E y C), podemos notar una gran diferencia en la distribución espacial de las anomalías. Los mapas de compuestos inter-decadales muestran anomalías bastante débiles en superficie (105 *m* de profundidad), las cuales se intensifican a medida que profundizamos en la columna de agua. Podemos notar que en todas las variables hay núcleos de anomalías en zonas hacia fuera de la costa. En este sentido, para las concentraciones de nitrato y oxígeno disuelto se observa un impacto costero asociado a los núcleos de anomalías ubicados fuera de la costa. Aun así, la magnitud de las anomalías asociada a este impacto costero es bastante pequeña. Por otro lado, se observa que durante la fase positiva (negativa) ocurre desoxigenación (oxigenación) a lo largo de la costa para la sección a 105 *m*. Estos eventos ocurren junto a una disminución (aumento) de las concentraciones de nitrato. Por último, a esta profundidad el patrón de corrientes no es claro.

Para los 408 *m* de profundidad, durante una fase positiva (negativa) podemos observar desoxigenación (oxigenación) junto a una disminución (aumento) en las concentraciones de nitrato y amonio. Aquí, se observa un núcleo positivo (negativo) de las tasas de desnitrificación hacia fuera de la costa. Sin embargo, también podemos notar que a lo largo de la costa ocurre una disminución (aumento) bastante leve en las tasas de desnitrificación. Nuevamente en esta profundidad, el patrón de corrientes no es claro.

Para la sección vertical, se observa en los mapas de compuestos (Fig. 3.12 y Fig. 3.13) que los valores de las anomalías para las tasas de desnitrificación son cercanas a cero, sin embargo, mantienen el patrón observado en los mapas de compuestos para escala temporal inter-anual. Para oxígeno disuelto, las anomalías son más intensas a mayor profundidad. Aquí se tienen eventos de desoxigenación (oxigenación) sobre los 200 *m* de profundidad durante una fase positiva (negativa). Entre los 200 – 400 *m* de profundidad se observa una oxigenación (desoxigenación) apegada a la plataforma continental y cuyas contribuciones pueden llegar hasta los 800 *m* de profundidad. Por otro lado, para nitrato, se puede observar que hay un aumento (disminución) en sus concentraciones sobre los 600 *m* de profundidad. Esto sólo se observa cerca de la plataforma continental. Para el resto de las profundidades y para zonas más alejadas a la costa se observa una disminución (aumento).

Finalmente, podemos notar que las anomalías inter-decadales son más intensas durante la fase negativa. Esto es similar a lo encontrado para el índice C.

En síntesis, podemos notar que en la escala inter-anual existe una relación entre la variabilidad de las concentraciones de oxígeno disuelto y las variables biogeoquímicas de nitrato, amonio y tasas de desnitrificación. Esto también nos muestra la preferencia sobre algunos procesos del ciclo del nitrógeno. Los eventos de disminución (aumento) de nitrato y aumento (disminución) de amonio, pueden estar relacionados a la profundización (levantamiento) de la oxiclina, favoreciendo procesos del ciclo del nitrógeno que actúen en condiciones más óxicas (anóxicas) en la columna de agua. Así, la disminución de nitrato y el aumento de amonio pueden deberse a procesos de asimilación y amonificación, mientras que el aumento de nitrato y la disminución de amonio pueden deberse a procesos de nitrificación anaeróbica, los cuales utilizarían manganeso como compuesto oxidante. Por último,

otro aspecto importante a destacar es que dependiendo de la fase y la intensidad de un evento ENSO la columna de agua se ve afectada de una manera u otra. Aquí, los eventos extremos cálidos parecen afectar la columna de agua en general, mientras que los eventos moderados o fríos tienen mayores contribuciones a profundidades intermedias (700 – 1300 *m*).

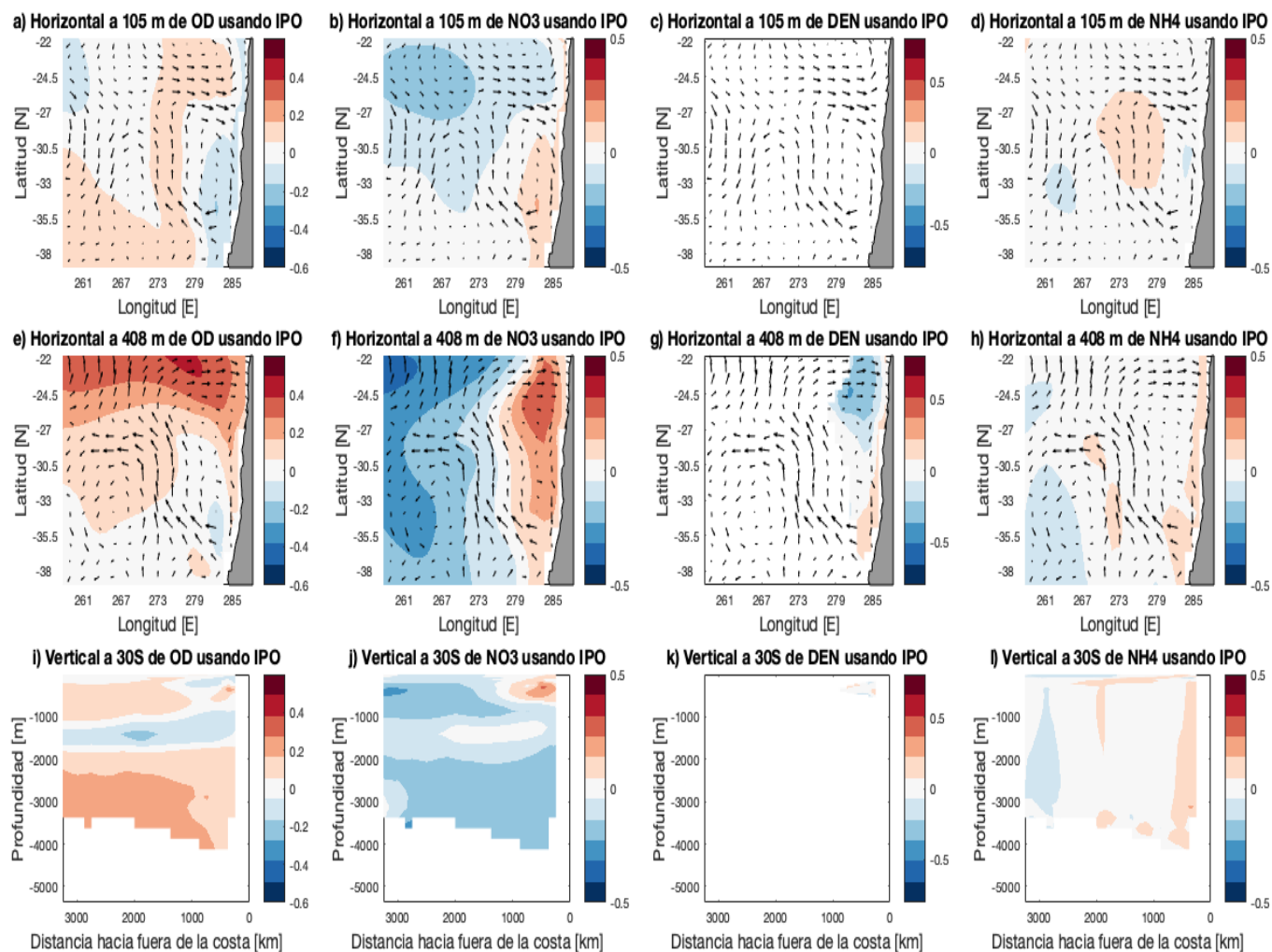


Figura 3.12: Mapas de compuestos utilizando el índice IPO para una fase positiva. Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase cálida. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH4). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente.

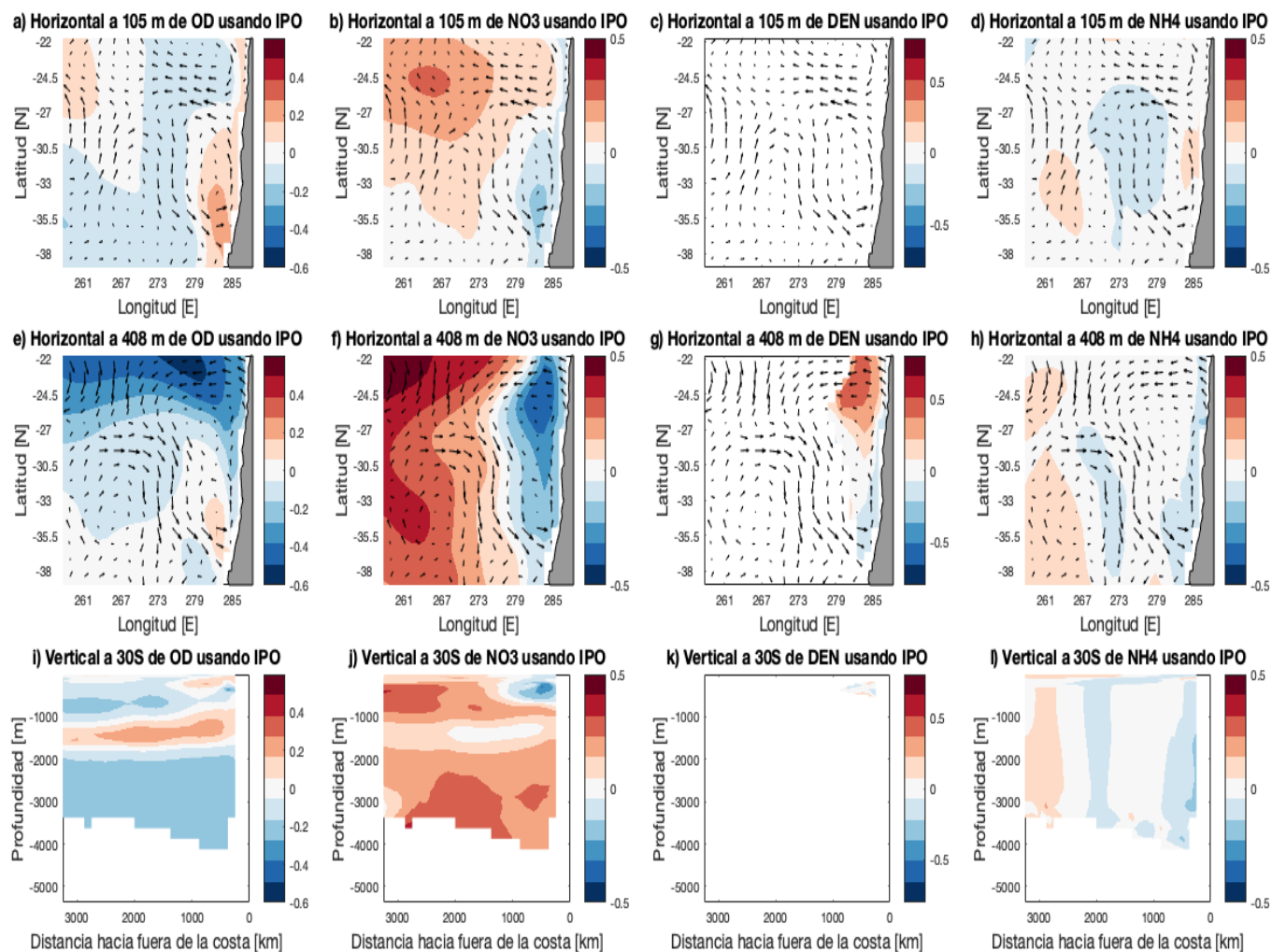


Figura 3.13: Mapas de compuestos utilizando el índice IPO para una fase negativa. Las flechas negras muestran la magnitud, dirección y sentido de las anomalías de corrientes dada una fase fría. Las columnas (de izquierda a derecha) muestran las variables de oxígeno disuelto (OD), nitrato (NO3), tasas de desnitrificación (DEN) y amonio (NH4). Las filas (de arriba hacia abajo) muestran los cortes horizontales a 105 m, 408 m y el corte vertical centrado en los 30°S respectivamente.

3.1.4. Análisis de EOF para los primeros modos de variabilidad

El análisis de EOF fue realizado para volúmenes (latitud, longitud y profundidad) de anomalías filtradas para las variables de: oxígeno disuelto, corriente meridional, nitrato, tasas de desnitrificación y amonio. Por otro lado, para las anomalías filtradas de profundidad de oxiclina se utilizó una superficie (latitud y longitud) en vez de un volumen. El patrón espacial fue visualizado para dos secciones horizontales (a 105 y 408 m de profundidad) y una vertical (centrada en 30°S). Aquí, sólo se encontró variabilidad asociada a ENSO para los primeros dos modos de variabilidad.

Componentes principales	ONI	E	C	IPO
PC1(PC2) _{OD}	0.53 (-0.58)	0.55 (-0.37)	0.24 (-0.46)	-0.40 (0.08)
PC1(PC2) _{OXC}	-0.19 (-0.42)	-0.28 (-0.50)	-0.01 (-0.09)	0.08 (0.05)
PC1(PC2) _V	0.25 (0.21)	0.06 (0.24)	0.29 (0.08)	0.11 (0.03)
PC1(PC2) _{NO3}	0.58 (-0.12)	0.59 (-0.22)	0.26 (0.02)	0.22 (-0.53)
PC1(PC2) _{NH4}	0.11 (-0.55)	0.25 (-0.60)	-0.05 (-0.18)	-0.20 (-0.39)
PC1(PC2) _{DEN}	-0.53 (0.45)	-0.53 (0.37)	-0.28 (0.25)	-0.48 (0.23)
PC1(PC2) _{OD-V}	0.56 (0.24)	0.56 (0.02)	0.28 (0.31)	-0.39 (-0.09)

Cuadro 3.1: Cuadro con los valores de correlaciones entre componentes principales de: oxígeno disuelto (OD), oxiclina (OXC), corriente meridional (V), nitrato (NO3), amonio(NH4), desnitrificación (DEN) y la combinación de las variables de oxígeno disuelto y corriente meridional (OD-V); con los índices de ENSO: ONI, E, C e IPO. Los valores de correlación fueron aproximados a la centésima. Los valores entre paréntesis corresponden al segundo modo de variabilidad, mientras que los valores fuera del paréntesis corresponden al primer modo de variabilidad. Además, aquellos valores sobre (bajo) 0,5 (−0,5) fueron destacados en negrita.

Las correlaciones entre las variables: oxígeno disuelto, nitrato, amonio y las tasas de desnitrificación, y el índice ONI son superiores a 0,5 para el primer y/o segundo modo de variabilidad (Cuadro 3.1). Esto también se observa en los valores de correlación para las mismas variables mencionadas arriba y el índice E. Esto indica una relación entre dichas variables y los eventos extremos de El Niño. Por otro lado, los valores de correlación con el índice C, indican que los eventos moderados o fríos comparten menos varianza con las variables adjuntadas en el Cuadro 3.1.

Podemos notar que el primer modo de variabilidad de corriente meridional tiene mayor correlación con el índice E (Cuadro 3.1), mientras que el segundo modo de variabilidad tiene una correlación mayor con el índice C. Esto indicaría que el primer y segundo modo de variabilidad de corriente meridional estarían siendo influenciados por distintos tipos de eventos de ENSO. Este patrón también se observa para la variable de oxígeno disuelto. Aquí, la correlación entre oxígeno disuelto y el índice E es mayor para el primer modo de variabilidad, mientras que la correlación con el índice C es mayor para el segundo modo de variabilidad.

De manera análoga, la correlación entre oxiclina y el índice E es mayor para el segundo modo de variabilidad. Este valor de correlación llega a ser incluso mayor al observado con el índice ONI. Esto nos indica que los eventos extremos de El Niño comparten un 25 % de varianza con la variabilidad asociada a la profundidad de la oxiclina para el segundo modo. Por otro lado, los valores de correlación

entre oxiclina y el índice C son muy cercanos a cero para ambos modos de variabilidad, lo que indicaría que la oxiclina no se ve afectada por eventos moderados o fríos de ENSO.

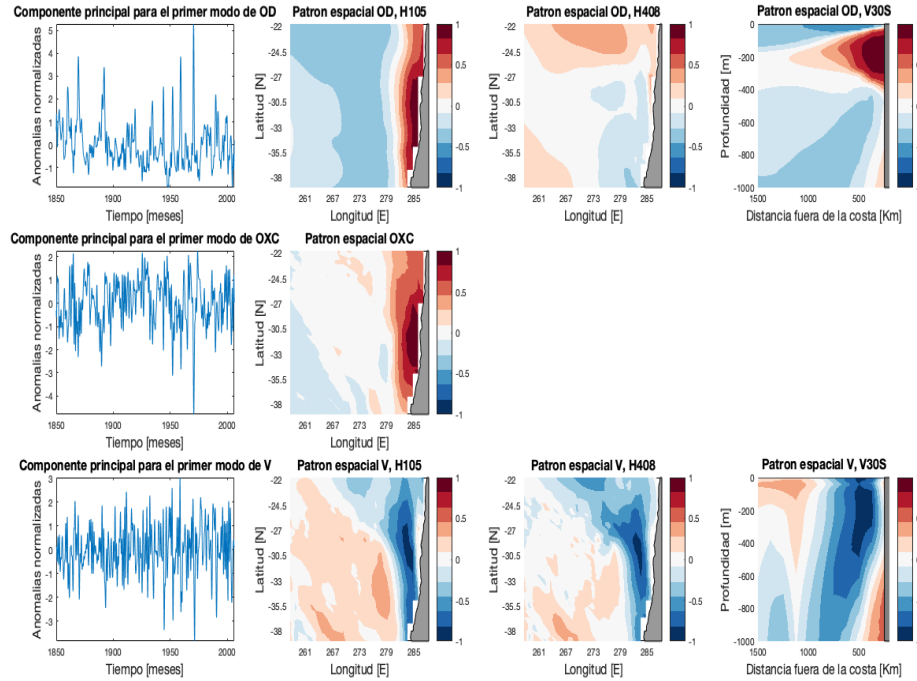


Figura 3.14: Primer modo de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (47%), la segunda fila a oxiclina (47%) y la tercera fila a la variable de corriente meridional (53%). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el primer modo. La variable de oxiclina sólo tiene un patrón espacial debido a que los análisis de EOF para esta variable fueron calculados con una superficie de anomalías y no un volumen.

Podemos observar que las variables biogeoquímicas (oxígeno disuelto, nitrato, tasas de desnitrificación y amonio) poseen un comportamiento distinto a las variables físicas (corriente meridional, oxiclina) observadas en el Cuadro 3.1. Aquí, los valores de correlación entre las concentraciones de nitrato y los índices ONI y E son mayores para el primer modo de variabilidad. Esto refleja que hay un $\sim 35\%$ de varianza que es compartida por el primer modo de variabilidad de nitrato y por los eventos extremos de El Niño. Este patrón también se observa para la variable de las tasas de desnitrificación, pero las correlaciones asociadas a esta son de signo negativo. Por otro lado, para amonio podemos observar lo contrario. Aquí, las correlaciones con los índices ONI y E son mayores (en magnitud) para el segundo modo de variabilidad.

La Fig. 3.14 muestra las componentes principales y sus respectivos patrones espaciales asociados al primer modo de variabilidad de las variables de: oxígeno disuelto, oxiclina y corriente meridional. Esta EOF corresponde a la escala temporal inter-anual. El patrón espacial de oxígeno disuelto correspondiente a 105 m de profundidad muestra un polo positivo apegado a la costa. Si sólo consideramos

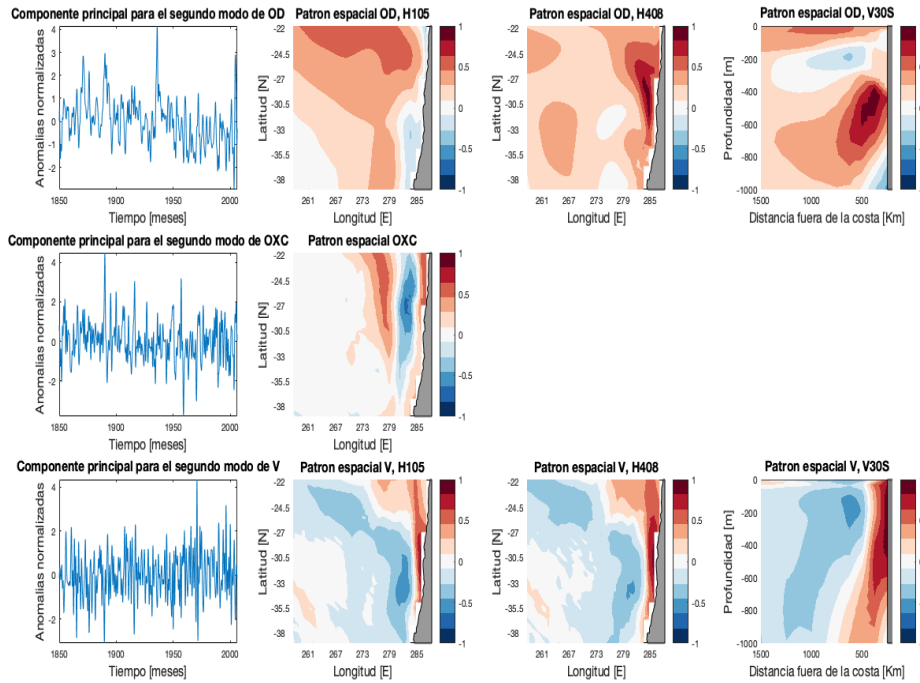


Figura 3.15: Segundo modo de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (15%), la segunda fila a oxiclina (15%) y la tercera fila a la variable de corriente meridional (29%). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el segundo modo.

el signo de la correlación entre la componente principal del primer modo de oxígeno disuelto y el índice ONI (0,53) o el índice E (0,55), se tiene que para la fase positiva (negativa) de ENSO las concentraciones de oxígeno disuelto aumentan (disminuyen). Sin embargo, si consideramos la magnitud de la correlación, a través del coeficiente de determinación podemos observar que los eventos de ENSO sólo comparten un $\sim 29\%$ de variabilidad con este primer modo. Esto deja abierto a la posibilidad de períodos durante la fase positiva en donde las concentraciones de oxígeno disuelto no aumenten, o bien, la posibilidad de un desfase entre la ocurrencia de un evento de ENSO y la variabilidad de las concentraciones de oxígeno disuelto.

Siguiendo la misma metodología que en el párrafo anterior, para la variable de oxiclina se tienen valores negativos de correlación. Además, se debe considerar que para el cálculo de las profundidades de oxiclina se utilizaron valores negativos. Así, para la fase positiva (negativa) de ENSO existe una profundización (levantamiento) de la oxiclina. Sin embargo, la magnitud de la correlación para este primer modo de variabilidad es pequeña ($< 0,2$) y por lo tanto, no existe una relación lineal entre los eventos de ENSO y el primer modo de variabilidad de la oxiclina.

De igual manera, para corriente meridional a 105 m, se hacen las mismas consideraciones que para oxiclina. Aquí, se tiene una intensificación (debilitamiento) de la corriente meridional costera durante

la fase positiva (negativa) de ENSO. Este resultado es consistente con lo descrito por (Vargas et al., 2007), en donde se explica que debido al contraste termal océano-continente ocurre una intensificación de la surgencia costera durante la fase positiva.

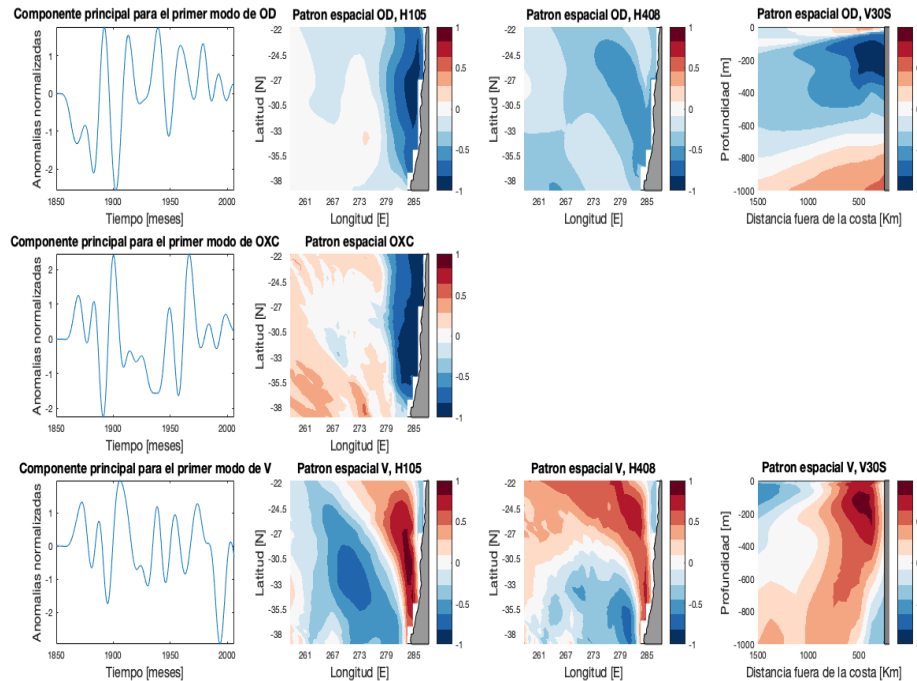


Figura 3.16: Primer modo de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (55 %), la segunda fila a oxiclina (55 %) y la tercera fila a la variable de corriente meridional (49 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el primer modo.

Por otro lado, para los 408 m de profundidad, no se observan grandes contribuciones de oxígeno disuelto en la costa. Las contribuciones se vuelven negativas al sur de los 30°S y por lo tanto podemos notar que es un patrón inverso al observado a 105 m de profundidad. De igual manera, podemos notar que el patrón de la corriente meridional en la costa se mantiene similar a lo observado a 105 m.

Finalmente, observamos que el patrón espacial de la sección vertical de oxígeno disuelto es similar al obtenido en el análisis de compuestos (Fig. 3.6i). Por lo tanto, podemos obtener las mismas interpretaciones realizadas en la Sección 3.1.3. Además, para corriente meridional podemos observar que hay un polo negativo sobre los 400 m de profundidad. Las contribuciones de este polo negativo se extienden hasta al menos los 1000 m de profundidad. Por otro lado, se observan contribuciones positivas de corriente meridional bajo los 600 m de profundidad cerca de la plataforma continental.

Utilizando el mismo análisis que se realizó para el primer modo de variabilidad. A partir de la Fig. 3.15 podemos notar que a 105 m de profundidad las contribuciones costeras de oxígeno disuelto son débiles y negativas. Esto lleva a que durante la fase positiva (negativa) ocurra oxigenación (desoxige-

nación).

Para la oxiclina se observa un tripolo, en dónde se tiene un polo positivo en la costa, seguido por un polo negativo y finalmente otro polo positivo en una zona más alejada de la costa. Aquí, durante una fase positiva (negativa) en las zonas donde ocurre el polo positivo se tiene una profundización (levantamiento), mientras que en la zona donde ocurre el polo negativo se tiene un levantamiento (profundización) de la oxiclina.

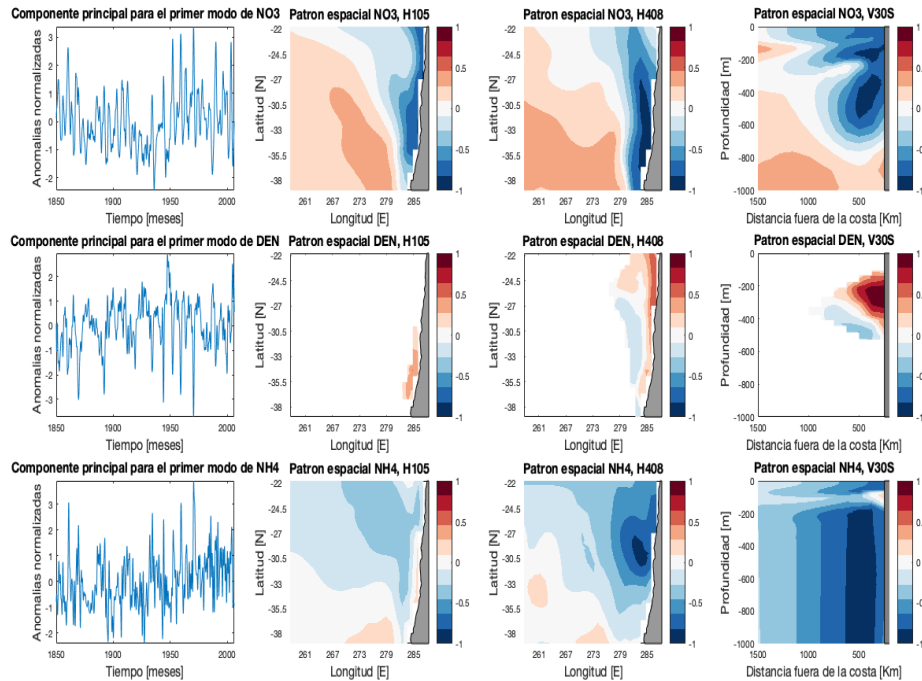


Figura 3.17: Primer modo de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (55 %), la segunda fila a tasas de desnitrificación (40 %) y la tercera fila a amonio (46 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.

A diferencia de lo observado para el primer modo de variabilidad de corriente meridional. Aquí, para el segundo modo se tiene que durante una fase positiva (negativa) ocurre un debilitamiento (intensificación) de la corriente costera.

Por otro lado, a 408 m de profundidad, notamos que hay un polo positivo de oxígeno disuelto apegado a la costa. Este polo positivo indicaría que a 408 m existe un comportamiento inverso al observado a 105 m para la variabilidad de oxígeno disuelto en la costa. Por otro lado, para corriente meridional se observa un patrón espacial similar al observado a 105 m.

Finalmente, podemos observar que el perfil vertical de oxígeno disuelto tiene ciertas similitudes al observado en la Fig. 3.6i). Este muestra el mismo polo sobre los 30 m de profundidad y bajo los 600 m. Sin embargo, no puede resolver el polo centrado en 200 m, cosa que sí se observa en la Fig. 3.14 para el primer modo de variabilidad. Además, podemos observar que para corriente meridional se tiene

un polo positivo apegado a la plataforma continental, similar al observado para el primer modo de variabilidad. Sin embargo, este polo positivo es más extenso en el segundo modo. Las contribuciones de este llegan a abarcar desde la superficie hasta los ~ 1000 m de profundidad. Además, podemos observar un polo negativo, similar al encontrado para el primer modo de variabilidad. No obstante, este se encuentra más alejado de la costa y es más débil que el polo negativo asociado al primer modo de variabilidad de corriente meridional.

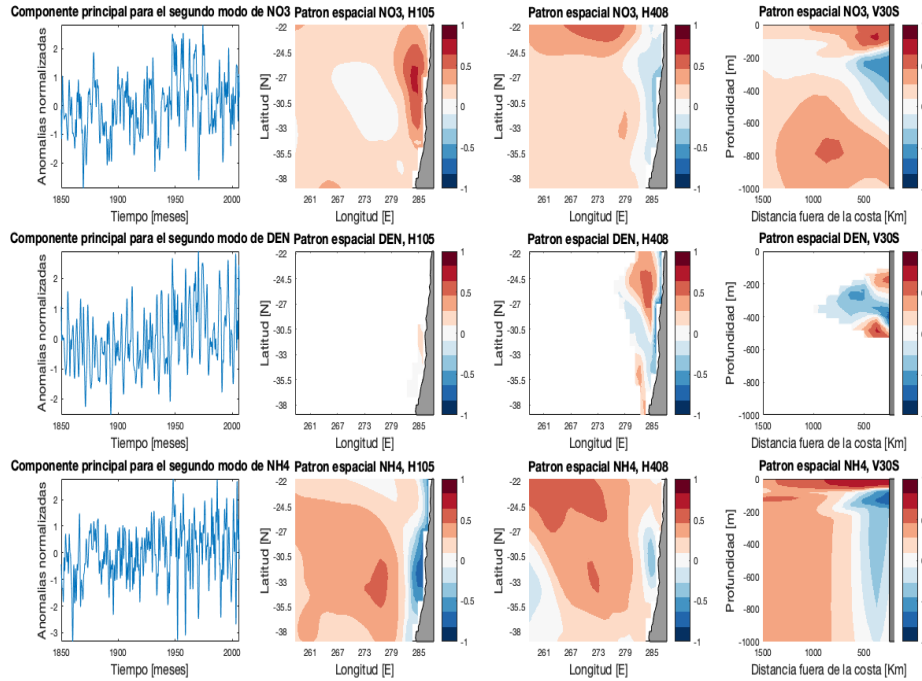


Figura 3.18: Segundo modo de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (18 %), la segunda fila a tasas de desnitrificación (14 %) y la tercera fila a amonio (25 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30° S.

Similar a lo realizado para la escala temporal inter-anual. Para la escala inter-decadal (Fig. 3.16) podemos notar que a 105 m de profundidad las contribuciones costeras para oxígeno disuelto son negativas al igual que su correlación con el índice IPO. Esto lleva a que durante la fase positiva (negativa) ocurra oxigenación (desoxigenación).

Para oxiclina y corriente meridional se observa que los valores de correlación para ambos modos de variabilidad son bastante pequeños ($< 0,2$) y por lo tanto no se considerarán en este estudio. Esto también ocurre para el segundo modo de variabilidad de oxígeno disuelto.

A partir de la Fig. 3.17 se observa en la costa a 105 m un polo negativo de nitrato. Además, se tiene que las correlaciones entre la componente principal para el primer modo de variabilidad de nitrato y los índices ONI y E son positivas y sobre 0,5. Esto implica que durante la fase positiva (negativa) existe una disminución (aumento) en la concentraciones de nitrato. Esto viene acompañado de una

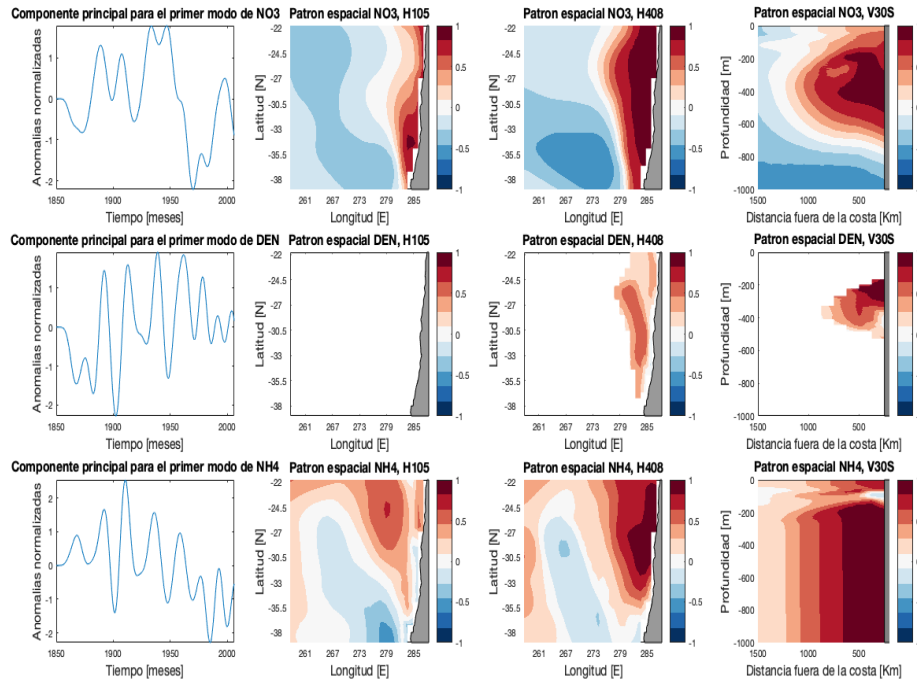


Figura 3.19: Primer modo de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (60%), la segunda fila a tasas de desnitrificación (54%) y la tercera fila a la variable de amonio (64%). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el primer modo.

disminución (aumento) de las tasas de desnitrificación en la zona costera entre 30 – 37°S. Además, ocurre una disminución (aumento) en las concentraciones de amonio. Sin embargo, los valores de correlación entre el primer modo de variabilidad de amonio y los índices ONI, E y C son pequeños ($< 0,3$).

A 408 m de profundidad, se observa que la variabilidad de nitrato, tasas de desnitrificación y amonio es la misma que la observada a 105 m de profundidad, pero más intensa.

Por último, podemos observar que los perfiles verticales de nitrato y las tasas de desnitrificación se asemejan a los mapas de compuestos obtenidos en la Fig. 3.6. Esto concuerda con los altos valores de correlación obtenidos entre la componente principal del primer modo de estas dos variables y los índices ONI y E.

A partir de la Fig. 3.18, se observa un polo positivo de nitrato apegado a la costa. Además, los valores de correlación entre el segundo modo de variabilidad de nitrato y los índices ONI y E son negativos. Esto indicaría que para una fase positiva (negativa) hay una disminución (aumento) en las concentraciones de nitrato. Sin embargo, los valores de correlación entre el segundo modo de variabilidad de nitrato y los índices ONI y E son pequeños y por lo tanto no existe una relación lineal entre la variabilidad contenida en el segundo modo de nitrato y los eventos de ENSO. Por otro lado,

se observa que las concentraciones de amonio son negativas a lo largo de la costa. Esto indicaría un aumento (disminución) en las concentraciones de amonio durante una fase positiva (negativa).

A 408 m de profundidad, se tiene que las contribuciones costeras de las tasas de desnitrificación aumentan con respecto a las observadas a 105 m. Además, las contribuciones de nitrato se vuelven negativas en la costa. Mientras que las contribuciones costeras y negativas de amonio disminuyen en extensión y magnitud. Aquí, se tiene que durante una fase positiva (negativa), las tasas de desnitrificación aumentan (disminuyen) en las zonas donde las contribuciones son positivas, las concentraciones de amonio y nitrato aumentan (disminuyen) en las zonas donde las contribuciones son negativas.

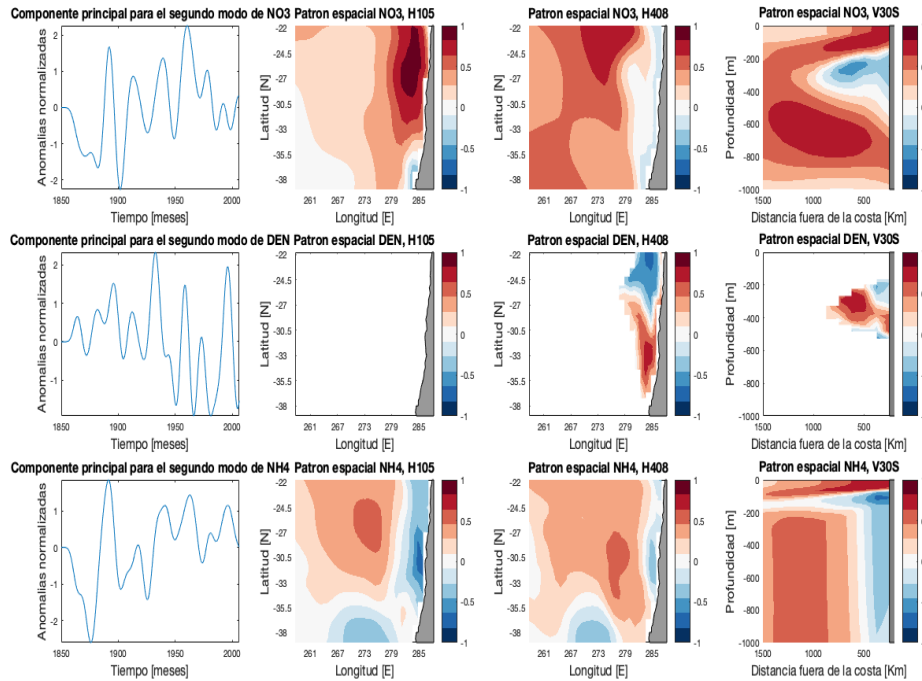


Figura 3.20: Segundo modo de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (16%), la segunda fila a tasas de desnitrificación (24%) y la tercera fila a la variable de amonio (20%). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S. Los valores porcentuales indicados arriba corresponden a la varianza explicada por el primer modo.

Considerando los valores de correlación del Cuadro 3.1 podemos observar que para el primer modo de variabilidad inter-decadal de nitrato y amonio (Fig. 3.19), las correlaciones con el índice IPO son bajas ($< 0,3$) y por lo tanto no existe una relación lineal entre los eventos inter-decadales y las variaciones de estas dos variables mencionadas. Por otro lado, para el primer modo de variabilidad de las tasas de desnitrificación, no se observan contribuciones a 105 m de profundidad. Sin embargo, para los 408 m se tiene un polo positivo cerca de la costa. Esto indicaría una disminución (aumento) de las tasas de desnitrificación durante fases positivas (negativas). Además, podemos notar que el valor de correlación entre el primer modo de variabilidad de las tasas de desnitrificación y el índice IPO es de

una magnitud considerable (0,48). Por último, el perfil vertical de las tasas de desnitrificación, muestra un polo positivo apegado a la plataforma continental.

A partir de la Fig. 3.20 asociada al segundo modo de variabilidad, a 105 m podemos observar un polo positivo de nitrato apegado a la costa. Esto implica que durante fases positivas (negativas) ocurre una disminución (aumento) en las concentraciones de nitrato. Algo similar ocurre con las concentraciones de amonio. Aquí, se tiene un polo negativo en la costa, el cual indicaría un aumento (disminución) en las concentraciones de nitrato para fases positivas (negativas). Sin embargo, para 408 m de profundidad se observan contribuciones negativas débiles de nitrato a lo largo de la costa. Esto indica una variabilidad similar a la observada a 105 m pero menos intensa. No obstante, el valor de correlación entre el segundo modo de variabilidad de las tasas de desnitrificación y el índice IPO es pequeño ($< 0,3$) lo que indica una relación no-lineal.

3.1.5. Combinaciones lineales de los primeros modos de variabilidad

En base a las correlaciones obtenidas con los índices ONI, E y C (escala temporal inter-anual, Cuadro 3.1), se realizaron combinaciones lineales para los primeros dos modos de variabilidad, esto con el objetivo de analizar el mayor porcentaje de varianza asociada a eventos ENSO. Así, la varianza contenida en estas combinaciones lineales para la escala temporal inter-anual (inter-decadal) queda definida por: 62 % (75 %) de varianza para oxígeno disuelto; 82 % (81 %) para corriente meridional; 73 % (79 %) para nitrato; 54 % (70 %) para desnitrificación; 71 % (88 %) para amonio; y 62 % (75 %) para oxiclina, respecto al total de varianza. A partir de aquí, se hablará del modo 1+2, en vez de combinaciones lineales de modos de variabilidad.

Componentes principales	ONI	E	C	IPO
PC1_{OD}/2 – PC2_{OD}/2	0.79	0.65	0.50	-0.34
PC1_{OXC}/2 + PC2_{OXC}/2	-0.44	-0.55	-0.07	0.09
PC1_V/2 + PC2_V/2	0.33	0.22	0.27	0.10
PC1_{NO3}/2 – PC2_{NO3}/2	0.49	0.57	0.17	0.53
PC1_{NH4}/2 – PC2_{NH4}/2	0.46	0.60	0.09	0.14
PC1_{DEN}/2 – PC2_{DEN}/2	-0.70	-0.63	-0.38	-0.50
PC1_{OD-V}/2 + PC2_{OD-V}/2	0.57	0.41	0.41	-0.34

Cuadro 3.2: (De izquierda a derecha) La primera columna muestra la fórmula de la combinación lineal de ambos modos de variabilidad. Aquí PC1 (PC2) hace referencia a la primera (segunda) componente principal. La segunda, tercera, cuarta y quinta columna muestran las correlaciones entre el modo 1+2 de las variables y los índices ONI, E, C e IPO, respectivamente. Los valores de correlación fueron aproximados a la centésima. Los valores en negrita son aquellos que se encuentran sobre los 0,5 o bajo $-0,5$ de correlación.

Comparando el Cuadro 3.1 con el Cuadro 3.2 podemos observar que los valores de correlación entre los modos 1+2 y los índices de ENSO aumentaron en magnitud. Además, se observa que los valores de correlación entre las variables estudiadas y el índice E son mayores a los valores de correlación con el índice C, esto exceptuando aquellos valores para corriente meridional, en donde la magnitud de la correlación es mayor para el índice C. En resumen, esto muestra una mayor sensibi-

lidad a eventos extremos de El Niño que a eventos moderados o fríos de ENSO. Por otro lado, los valores de correlación con el índice IPO, indican que no hay relación lineal para las variables de: oxiclina, corriente meridional y amonio en la escala temporal inter-decadal.

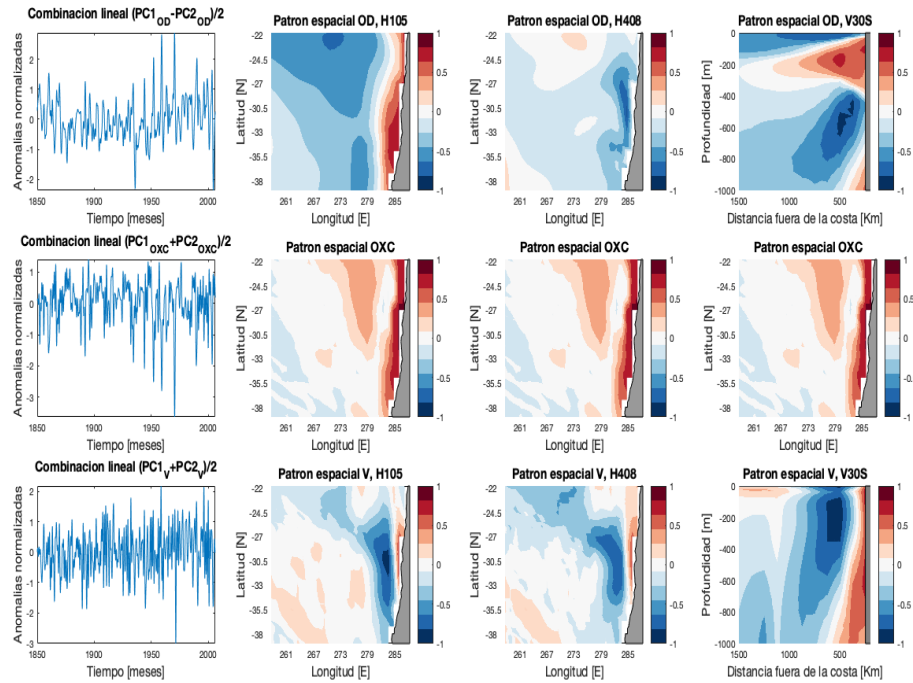


Figura 3.21: Modo 1+2 de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (62%), la segunda fila a la oxiclina (62%) y la tercera fila a corriente meridional (82%). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.

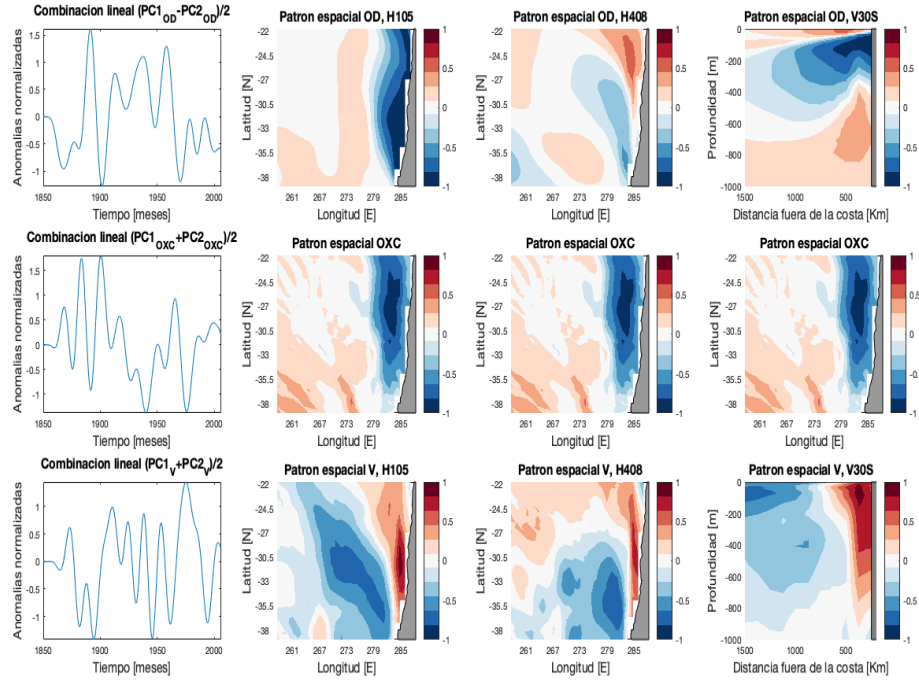


Figura 3.22: Modo 1+2 de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de oxígeno disuelto (75 %), la segunda fila a la oxiclina (62 %) y la tercera fila a corriente meridional (81 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.

Considerando la Fig. 3.14 y la Fig. 3.15 (asociada al primer y segundo modo de variabilidad respectivamente) podemos observar en la Fig. 3.21 (modo 1+2 de variabilidad) que para oxígeno disuelto a 105 m de profundidad existe un polo positivo en la costa. Este polo se observa en la Fig. 3.14. Por otro lado, para el segundo modo de variabilidad de oxígeno disuelto, este polo costero no existe.

Para los 408 m de profundidad, en la Fig. 3.21 se observa un polo costero negativo de oxígeno disuelto. De manera análoga, este polo costero se encuentra en la Fig. 3.15 asociada al segundo modo de variabilidad de oxígeno disuelto. Esto no se observa en el primer modo de variabilidad. Además, a partir del Cuadro 3.1 notamos que el primer modo de variabilidad de oxígeno disuelto comparte más varianza con los eventos extremos de El Niño, mientras que el segundo modo de variabilidad de oxígeno disuelto comparte más varianza con los eventos moderados o fríos de ENSO.

Para corriente meridional se observa un dipolo costero en ambas profundidades (105 y 408 m). Este se asemeja bastante al encontrado en la Fig. 3.15. Sin embargo, las magnitudes de las contribuciones del polo negativo son más parecidas a las encontradas en la Fig. 3.14.

Para oxiclina también se observa un patrón similar al encontrado para el primer modo de variabilidad. Sin embargo, el patrón espacial de oxiclina observado para el modo 1+2 se encuentra más apegado a la costa. La correlación entre el índice ONI, E y C y el modo 1+2 de oxiclina, indica que la

variabilidad de esta se encuentra más asociada a los eventos extremos de El Niño.

Finalmente, notamos que el perfil vertical de oxígeno disuelto para el modo 1+2 es similar al encontrado para el análisis de compuestos (Fig. 3.6).

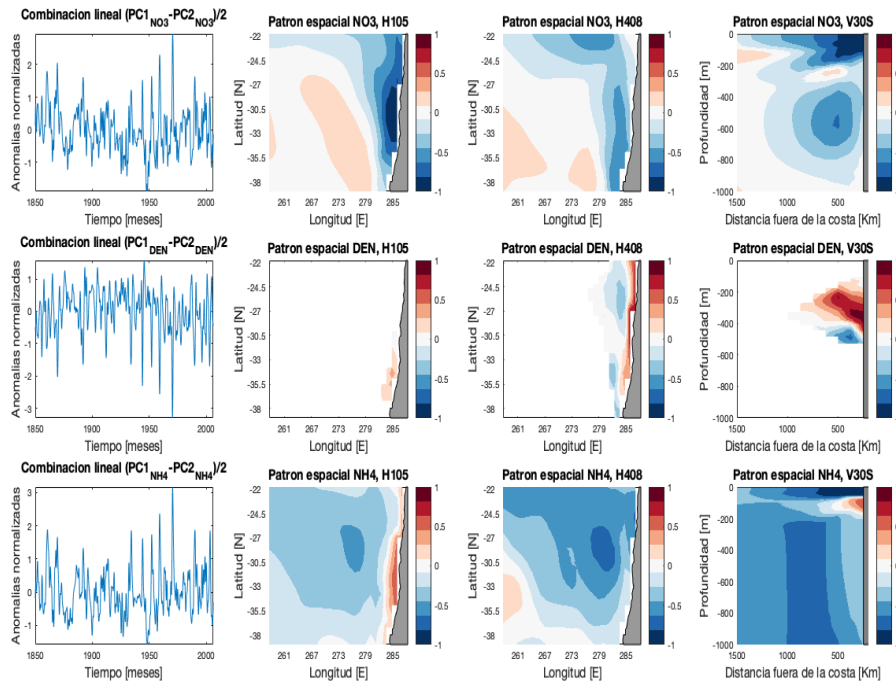


Figura 3.23: Modo 1+2 de variabilidad para escala temporal inter-anual. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (73 %), la segunda fila a las tasas de desnitrificación (54 %) y la tercera fila a amonio (71 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.

De manera análoga, para el caso inter-decadal (Fig. 3.22), podemos observar que los patrones espaciales de oxígeno disuelto, corriente meridional y oxiclina son idénticos a los observados para la Fig. 3.16 (primer modo de variabilidad inter-decadal). De esta manera, el primer modo aporta más a la combinación lineal que el segundo modo de variabilidad inter-decadal. Además, la correlación entre el modo 1+2 de oxígeno disuelto y el índice IPO es de $-0,34$ lo que indica algún tipo de relación no-lineal. Por otro lado, siguiendo el mismo pensamiento, podemos observar que los valores de correlación entre el índice IPO y el modo 1+2 de oxiclina y corriente meridional son menores a $0,1$ lo que pone en duda su significancia física.

A partir de la Fig. 3.17 (primer modo de variabilidad de variables biogeoquímicas) y Fig. 3.18 (segundo modo de variabilidad de variables biogeoquímicas) podemos observar que la Fig. 3.23 se asemeja más al primer modo de variabilidad. Sin embargo, existe zonas en dónde el segundo modo se hace presente.

A 105 m de profundidad, para el modo 1+2 de nitrato podemos observar que el polo negativo costero se asemeja más al observado para el primer modo de variabilidad. Sin embargo, este es más

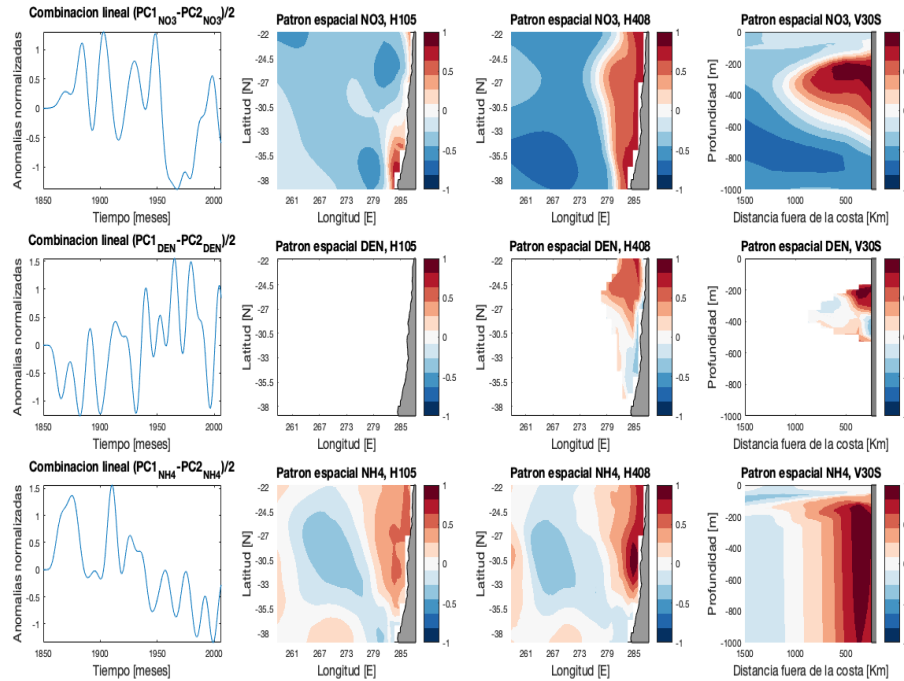


Figura 3.24: Modo 1+2 de variabilidad para escala temporal inter-decadal. (De arriba hacia abajo) la primera fila corresponde a la variable de nitrato (79 %), la segunda fila a las tasas de desnitrificación (70 %) y la tercera fila a amonio (75 %). (De izquierda a derecha) Las figuras muestran la componente principal y los patrones espaciales para las secciones horizontales a 105 m y 408 m de profundidad y para la sección vertical centrada en los 30°S.

intenso en el modo 1+2. Esta intensificación se debe a las contribuciones aportadas por segundo modo de variabilidad.

Para las tasas de desnitrificación, a 105 m se observan contribuciones positivas débiles. Esto también se observa en el primer y segundo modo de variabilidad.

Para amonio, a la misma profundidad que los párrafos anteriores, se observan contribuciones negativas en zonas hacia afuera de la costa y positivas en la costa. En este caso, se tiene que las contribuciones positivas costeras son aporte del segundo modo de variabilidad.

Por otro lado, para los 408 m podemos observar que para nitrato y las tasas de desnitrificación hay contribuciones provenientes de ambos modos de variabilidad. Aquí, podemos notar que los patrones espaciales del modo 1+2 de nitrato, tasas de desnitrificación y amonio son similares a los calculados por el análisis de compuestos.

Finalmente, podemos notar que los valores de correlación para nitrato, tasas de desnitrificación y amonio son mayores para el índice E. Esto implicaría que los eventos extremos de El Niño juegan un rol más importante en la variabilidad de dichas variables biogeoquímicas de la zona.

De manera análoga, para la Fig. 3.24. Podemos observar que los patrones espaciales se asemejan bastante al primer modo (Fig. 3.19). Sin embargo, el valor de correlación entre las componentes principales del modo 1+2 de las variables asociadas a la figura antes mencionada y el índice IPO son

PC	PC _{OD}	PC _{OXC}	PC _V	PC _{NO3}	PC _{NH4}	PC _{DEN}	PC _{OD-V}
PC _{OD}	1	-0.66 (-0.50)	0.47 (-0.22)	0.73 (-0.09)	0.72 (0.07)	-0.82 (0.23)	0.59 (0.03)
PC _{OXC}	-0.66 (-0.50)	1	-0.38 (-0.30)	-0.75 (0.28)	-0.77 (0.01)	0.64 (-0.39)	-0.46 (0.01)
PC _V	0.47 (-0.22)	-0.38 (-0.30)	1	0.37 (-0.30)	0.25 (0.19)	-0.47 (0.40)	0.78 (0.04)
PC _{NO3}	0.73 (-0.09)	-0.75 (0.28)	0.37 (-0.30)	1	0.92 (0.28)	-0.70 (-0.70)	0.57 (-0.12)
PC _{NH4}	0.72 (0.07)	-0.77 (0.01)	0.25 (0.19)	0.92 (0.28)	1	-0.68 (-0.41)	0.38 (-0.02)
PC _{DEN}	-0.82 (0.23)	0.64 (-0.39)	-0.47 (0.40)	-0.70 (-0.70)	-0.68 (-0.41)	1	-0.64 (0.05)
PC _{OD-V}	0.59 (0.03)	-0.46 (0.01)	0.78 (0.04)	0.57 (-0.12)	0.38 (-0.02)	-0.64 (0.05)	1

Cuadro 3.3: Matriz de correlaciones entre las combinaciones lineales de las primeras dos componentes principales de las variables de: oxígeno disuelto (OD), oxiclina (OXC), corriente meridional (V), nitrato (NO₃), amonio(NH₄), desnitrificación (DEN) y la combinación (OD-V) de las variables de oxígeno disuelto y corriente meridional. Los valores de correlación fueron aproximados a la centésima. Los valores dentro de los paréntesis corresponden a las correlaciones para la escala temporal inter-decadal, mientras que los valores sin paréntesis corresponden a las correlaciones para la escala temporal inter-anual.

bastante bajas, por lo que no será considerado.

A partir del Cuadro 3.3 podemos notar que existe una relación entre oxígeno disuelto y las demás variables (oxiclina, corriente meridional, nitrato, amonio y tasas de desnitrificación). Aquí, observamos que las correlaciones entre oxígeno disuelto y las demás variables se encuentran por sobre (bajo) los 0,5 ($-0,5$), a excepción de corriente meridional cuya correlación con oxígeno disuelto es de 0,47. Entonces, considerando las correlaciones inter-anales del Cuadro 3.3 y las figuras: Fig. 3.21 y Fig. 3.23, podemos observar que si la oxiclina se profundiza, entonces las concentraciones costeras de oxígeno disuelto y amonio aumentan en los 105 *m* de profundidad, mientras que las concentraciones de nitrato y las tasas de desnitrificación disminuyen. Para los 408 ocurre algo distinto. Si la oxiclina se profundiza, entonces las concentraciones de oxígeno disuelto, nitrato y las tasas de desnitrificación disminuyen, mientras que para amonio no se observan variaciones en de la costa, pero inmediatamente fuera de la costa las concentraciones de amonio disminuirían.

3.1.6. Análisis de EOF combinada

Este análisis tiene como objetivo visualizar la relación entre la variabilidad de la CSSPC y las concentraciones de oxígeno disuelto alrededor de 100 *m* de profundidad. Tomando los valores de correlación en el Cuadro 3.3, se puede observar que el modo 1+2 de la EOF combinada de oxígeno disuelto y corriente meridional tiene una correlación de 0,59 con el modo 1+2 de oxígeno disuelto, lo que se traduce a que comparten un 34 % de varianza. Además, se observa un valor de correlación de 0,78 entre el modo 1+2 de la EOF combinada con el modo 1+2 de corriente meridional, esto se

traduce a que ambos modos 1+2 comparten un 60 % de varianza. A partir de aquí, la EOF combinada será referida simplemente como OD-V. Además, mencionar que por cada componente principal de OD-V existen dos patrones espaciales asociados, para oxígeno disuelto y corriente meridional respectivamente.

	PC1 _{OD}	PC2 _{OD}	PC1 _V	PC2 _V
PC1 _{OD-V}	0.99 (0.99)	-0.08 (0.01)	0.14 (-0.17)	0.44 (0.33)
PC2 _{OD-V}	-0.08 (0.01)	-0.18 (-0.99)	0.96 (-0.07)	0.01 (-0.62)
PC1 + 2 _{OD-V}	0.65 (0.09)	-0.19 (0.21)	0.78 (-0.02)	0.32 (-0.003)

Cuadro 3.4: Correlaciones entre los modos 1, 2 y 1+2 de la EOF combinada de oxígeno disuelto y corriente meridional (OD-V) con el primer y segundo modo de las variables de oxígeno disuelto (OD) y corriente meridional (V). Los valores entre paréntesis muestran las correlaciones para una escala temporal inter-decadal, mientras que los valores sin paréntesis muestran las correlaciones para una escala temporal inter-anual.

Observando los valores para la escala temporal inter-anual del Cuadro 3.4, encontramos una correlación de 0,99 para el primer modo de variabilidad de OD-V con el primer modo de variabilidad de oxígeno disuelto. Esto indica que el primer modo de OD-V posee la misma componente principal y además, el mismo patrón espacial de oxígeno disuelto que aquel observado en la Fig. 3.14. Por otro lado, podemos notar que el primer modo de variabilidad de OD-V tiene una correlación de 0,44 con el segundo modo de variabilidad de corriente meridional. De esta manera, el primer modo de OD-V comparte un 98 % de varianza con el primer modo de oxígeno disuelto y un 20 % de varianza con corriente meridional. Por otro lado, a partir del Cuadro 3.1 podemos notar que las correlaciones del primer modo de variabilidad de oxígeno disuelto y el segundo modo de variabilidad de corriente meridional son mayores para el índice E. Esto muestra que el primer modo de variabilidad de OD-V tiene mayor influencia de eventos extremos de El Niño. Por otro lado, se puede observar que el segundo modo de variabilidad de OD-V tiene una correlación de 0,96 con el primer modo de variabilidad de corriente meridional. Esto se traduce a que ambos modos comparten un 92 % de varianza. Además, se puede observar en el Cuadro 3.1, que el primer modo de variabilidad de corriente meridional posee valores de correlación mayores con el índice C. Así, el segundo modo de variabilidad de OD-V representaría la misma componente principal y patrón espacial de corriente meridional observado en la Fig. 3.14 y, además estaría más influenciado por eventos moderados o fríos de ENSO. Para la escala temporal inter-decadal, se puede notar una relación análoga entre el primer modo de variabilidad de OD-V y oxígeno disuelto. Sin embargo, no se observa la misma relación entre el segundo modo de variabilidad de OD-V y el primer modo de variabilidad de corriente meridional. Aquí, se tiene una correlación de $-0,07$.

Para la escala temporal inter-anual, los patrones espaciales de oxígeno disuelto para el primer modo de variabilidad de OD-V (Fig. 3.25) son idénticos a los patrones espaciales del primer modo de variabilidad de oxígeno disuelto (Fig. 3.14). Por otro lado, el segundo modo de variabilidad de OD-V tiene contribuciones débiles positivas y negativas en ambas profundidades (105 m y a 408 m) a lo largo de la costa, mientras que para la sección vertical se observan contribuciones positivas en superficie,

sobre los sobre los 200 m. Además, de un polo negativo apegado a la plataforma continental entre los 400 – 1000 m de profundidad. Este polo negativo es similar al polo positivo observado en la Fig. 3.15 entre 400 – 800 m de profundidad para el patrón espacial del segundo modo de variabilidad de oxígeno disuelto. Además, según las correlaciones entre el segundo modo de variabilidad de OD-V y el primer modo de variabilidad corriente meridional, es probable que este polo negativo de oxígeno disuelto entre 400 – 800 m se deba a la variabilidad de corrientes costeras. Por otro lado, para el modo 1+2 de OD-V (Fig. 3.25), podemos notar a 105 m la presencia de un polo positivo de oxígeno disuelto en la costa, además, se observan contribuciones negativas en regiones oceánicas. Para los 408 m, se observan contribuciones débiles positivas y negativas. Para la sección vertical, no se encuentran contribuciones sobre en la superficie. Sin embargo, se observa un polo positivo apegado a la plataforma continental, entre los 30 – 400 m de profundidad. Además, debajo de este polo positivo de oxígeno disuelto, se observa un polo negativo cerca de la plataforma, entre 400 – 1000 m. Podemos notar que el perfil vertical del modo 1+2 de OD-V es bastante similar al perfil vertical del análisis de compuestos (Fig. 3.6) para los primeros 1000 m de profundidad.

Para los patrones espaciales de corriente meridional para el segundo modo de variabilidad de OD-V (Fig. 3.26), podemos notar que se asemejan a los patrones espaciales para el primer modo de variabilidad de corriente meridional (Fig. 3.14). Por otro lado, para el primer modo de variabilidad

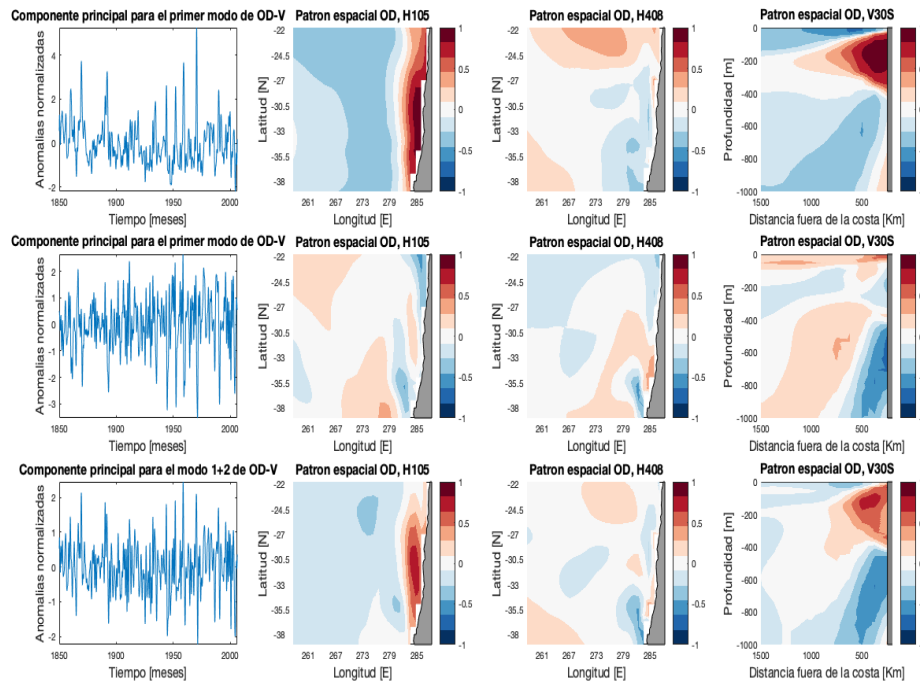


Figura 3.25: Análisis de EOF combinada para escala inter-anual. (De arriba hacia abajo) Se enumeran los modos de variabilidad: primer, segundo y modo 1+2. Además, (de izquierda a derecha) se grafican las componentes principales, patrones espaciales a 105 m, 408 m y el perfil vertical. Esta figura muestra la parte de oxígeno disuelto de la EOF combinada.

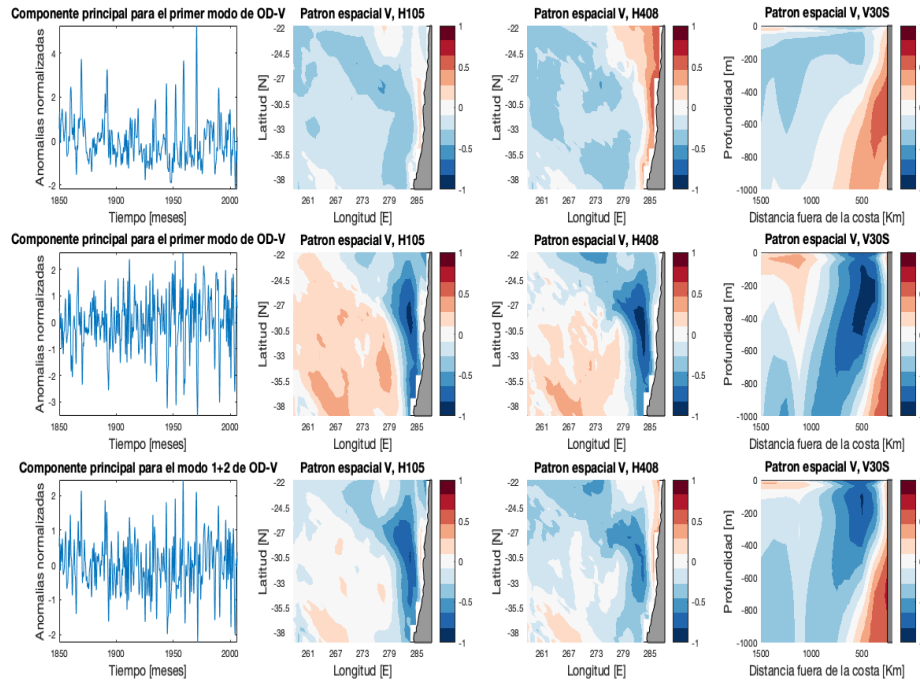


Figura 3.26: Análisis de EOF combinada para escala inter-anual. (De arriba hacia abajo) Se enumeran los modos de variabilidad: primer, segundo y modo 1+2. Además, (de izquierda a derecha) se grafican las componentes principales, patrones espaciales a 105 m, 408 m y el perfil vertical. Esta figura muestra la parte de corriente meridional de la EOF combinada.

de OD-V, de la misma figura, se observa que a 105 m hay leves contribuciones positivas en la costa. Estas se vuelven más extensa a medida que nos profundizamos. Para los 408 m de profundidad, se encuentra un polo positivo a lo largo de la costa. Para la sección vertical, se observa un polo positivo apegado a la plataforma continental. Notemos que el patrón espacial visualizado en el perfil vertical del primer modo de variabilidad de OD-V es similar al encontrado en la Fig. 3.15 para el segundo modo de variabilidad de corriente meridional. Para el modo 1+2 de OD-V (Fig. 3.26), se tiene la presencia de un polo negativo de corriente meridional en la costa a 105 m, no se observan grandes contribuciones en regiones más oceánicas. Para los 408 m se observa un patrón espacial parecido, pero menos intenso al encontrado a 105 m. Para la sección vertical, podemos notar un polo negativo centrado en los 200 m de profundidad, las contribuciones de este alcanzan los 1000 m. Además, se tienen contribuciones positivas en la plataforma continental en profundidades bajo los 400 m. Notemos que este patrón espacial se asemeja a aquel obtenido para el modo 1+2 de corriente meridional.

Para la escala temporal inter-decadal, notamos que el patrón espacial de oxígeno disuelto para el primer modo de variabilidad de OD-V (Fig. 3.27) es idéntico al patrón espacial para el primer modo de variabilidad oxígeno disuelto (Fig. 3.16). Para el modo 1+2 de OD-V (Fig. 3.27) se puede observar que este se asemeja el modo 1+2 de oxígeno disuelto. Aquí, se tiene la presencia de un polo negativo de oxígeno disuelto en la costa a 105 m. Además, se observan contribuciones positivas inmediatamente

fuera de la costa. La mayor parte de las regiones oceánicas permanece sin contribuciones. Para los 408 m, se puede observar un dipolo. El polo negativo se encuentra en la costa al sur de los $30^{\circ}S$, sus contribuciones se distribuyen entre los $27 - 38^{\circ}S$. El polo positivo se encuentra en la costa al norte de los $30^{\circ}S$, sus contribuciones se distribuyen entre los $30 - 22^{\circ}S$. Este patrón, es inverso al encontrado para el modo 1+2 de oxígeno disuelto (Fig. 3.22).

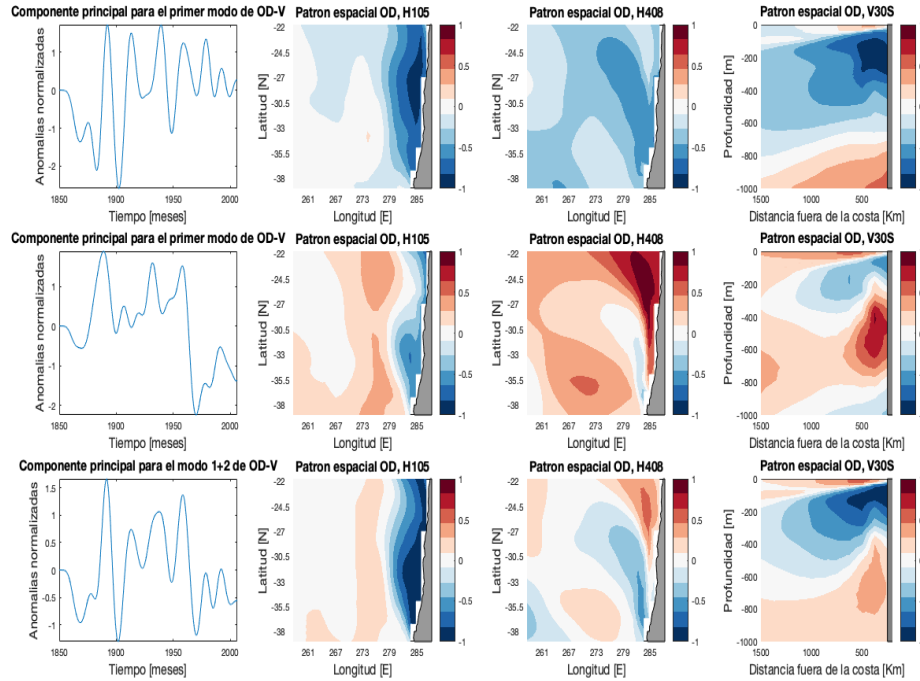


Figura 3.27: Análisis de EOF combinada para escala inter-decadal. Se muestran las componentes principales (a,e,i), patrones espaciales horizontales a 105 m (b,f,j), patrones espaciales horizontales a 408 m (c,g,k) y patrón espacial para una sección vertical centrada en $30^{\circ}S$ (d,h,l) para oxígeno disuelto. Las filas de arriba hacia abajo muestran, primer modo de variabilidad, segundo modo de variabilidad y modo 1+2 de OD-V, respectivamente.

Nuevamente considerando la escala temporal inter-decadal, notamos que los patrones espaciales de corriente meridional para el primer y segundo modo de variabilidad de OD-V (Fig. 3.28) no son idénticos a los patrones espaciales para el primer y segundo modo de variabilidad de corriente meridional (Fig. 3.16 y Fig. ?? respectivamente). Aquí, para el primer modo de variabilidad de OD-V se observan contribuciones positivas hacia fuera de la costa a 105 m de profundidad. Además, se observan contribuciones negativas débiles a lo largo de la costa. Para los 408 m, se observan principalmente contribuciones negativas. Sin embargo, a lo largo de la costa no ocurre variabilidad. Para el segundo modo de variabilidad de OD-V, se puede notar un tripolo a 105 m. Aquí, este patrón se mantiene casi intacto a los 408 m de profundidad. Sin embargo, podemos observar que el polo negativo costero se extiende más hacia el norte, alcanzando los $22^{\circ}S$, mientras que el polo positivo se extiende hacia el oeste, el segundo polo negativo mantiene su posición, pero se vuelve más débil. Para la sección vertical, se observa un dipolo. Aquí, el polo negativo se encuentra apegado a la plataforma continental, sus

contribuciones comprenden desde la superficie hasta los 1000 m de profundidad. El polo positivo, se encuentra en una región más oceánica (~ 1200 km hacia fuera de la costa), centrado en los 100 m de profundidad, sus contribuciones alcanzan los 1000 m. Finalmente, podemos notar que los patrones espaciales para el segundo modo de variabilidad de OD-V para escala inter-decadal, son patrones que no se asemejan a los vistos en las anteriores EOF o análisis de compuestos. Esto también se ve reflejado en las bajas correlaciones adjuntas en el Cuadro 3.4.

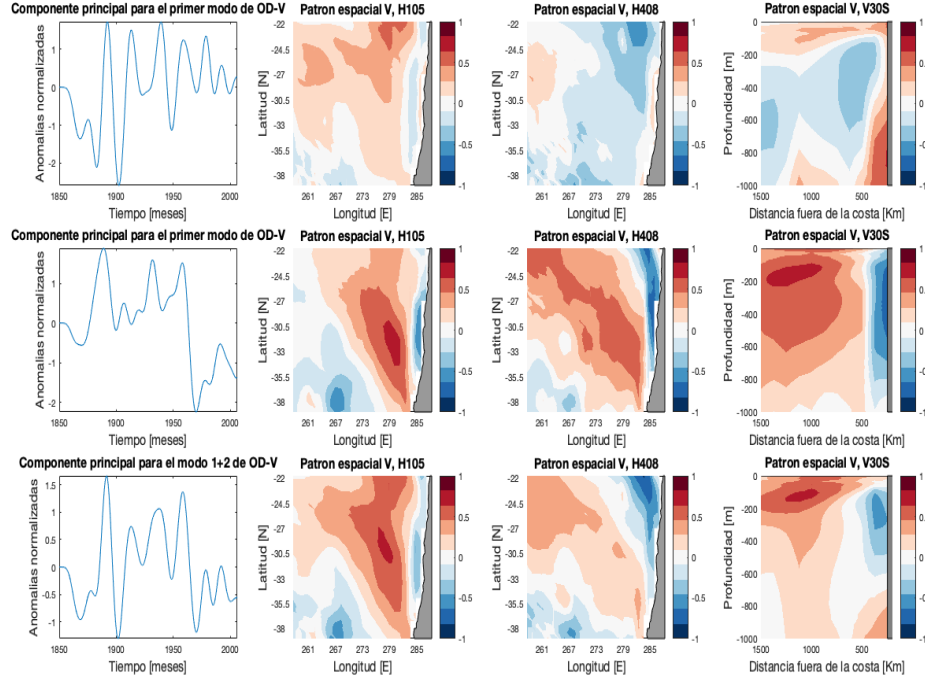


Figura 3.28: Análisis de EOF combinada para escala inter-decadal. Se muestran las componentes principales (a,e,i), patrones espaciales horizontales a 105 m (b,f,j), patrones espaciales horizontales a 408 m (c,g,k) y patrón espacial para una sección vertical centrada en $30^{\circ}S$ (d,h,l) para corriente meridional. Las filas de arriba hacia abajo muestran, primer modo de variabilidad, segundo modo de variabilidad y modo 1+2 de OD-V, respectivamente.

Para el modo 1+2 de OD-V (Fig. 3.28), podemos observar un patrón espacial de corriente meridional similar al observado para el segundo modo de variabilidad de OD-V. Aquí, para el modo 1+2 de OD-V a 105 m, se observa que el polo positivo es más intenso, mientras que ambos polos negativos se debilitan. Para los 408 m, el polo negativo costero se intensifica y desplaza hacia el norte, mientras que el polo positivo oceánico se debilita. Para la sección vertical, se observa que ambos polos son más débiles, pero permanecen centrados en la misma posición observada para el segundo modo de variabilidad de OD-V.

3.1.7. Análisis de desfase para escala temporal inter-anual

Se analizó el desfase de la corriente meridional y oxiclina con respecto al índice ONI (escala de tiempo inter-anual). A partir del Cuadro 3.1 se puede observar que el primer modo de variabilidad de corriente meridional se encuentra dominado por eventos moderados o fríos de ENSO, mientras que el segundo modo de variabilidad está dominado por eventos extremos de El Niño.

De manera análoga, se puede observar a partir de los Cuadro 3.1 y Cuadro 3.2, que el primer y segundo modo de variabilidad de oxiclina están dominados por eventos extremos de El Niño. Además, el modo 1+2 de oxiclina registra sus valores más altos de correlación con el índice E. De esta manera, para el análisis se utilizaron las componentes principales del modo 2 de corriente meridional y del modo 1+2 de oxiclina.

	Índice ONI	Índice E	Índice C	Índice IPO
PC2_v	0.39 (6)	0.39 (5)	-0.19 (-14)	0.44 (-75)
PC1 + 2_{oxc}	-0.53 (4)	-0.59 (2)	-0.35 (-17)	0.46 (-380)

Cuadro 3.5: Valores de correlación entre el segundo modo de variabilidad de corriente meridional y el modo 1+2 de oxiclina con los índices de ENSO. Los valores entre paréntesis muestran el desfase entre las series correlacionadas.

En el Cuadro 3.5, se puede observar un valor de correlación de 0,39 entre el segundo modo de variabilidad de corriente meridional y el índice ONI. Aquí, se tiene un desfase de 6 meses entre ambas series de tiempo. Además, podemos notar que el valor de correlación entre corriente meridional y el índice E es mayor al valor obtenido con el índice C. Aquí, los desfases entre el segundo modo de corriente meridional y el índice E y C son de 5 y -14 meses, respectivamente. Un valor negativo de desfase indica que un máximo en corriente meridional ocurre antes que un evento El Niño o La Niña, lo contrario ocurre para valores positivos de desfase. Por último, el valor de correlación entre el segundo modo de variabilidad de corriente meridional y el índice IPO es de 0,44, con un desfase de aproximadamente -6 años.

Por otro lado, para el modo 1+2 de oxiclina, se tiene una correlación de -0,54 con el índice ONI, el valor negativo de la correlación indica una profundización (levantamiento) de la oxiclina durante fases positivas (negativas) de ENSO. Aquí, se observa un desfase de 4 meses entre ambas series de tiempo. Además, podemos notar que el valor de correlación entre oxiclina y el índice E es mayor al valor obtenido con el índice C.

Por último, se correlacionó el segundo modo de variabilidad de corriente meridional con el modo 1+2 de oxiclina. Aquí se obtuvo un valor de correlación de -0,53, con un desfase de 2 meses. El desfase obtenido no concuerda con lo esperado (desfase de ~ 6) meses, esto puede deberse a que la sobre-estimación de la distribución espacial de la corriente meridional, es decir, recibe aportes de otros flujos meridionales que se mueven hacia el sur.

4. Capítulo 4

4.1 Discusión

El impacto de ENSO en la columna de agua y especialmente en las propiedades biogeoquímicas ocurre en diferentes escalas temporales, especialmente la escala inter-anual. Además, parte de la energía de la escala inter-anual se transfiere a escalas temporales de menor frecuencia, como la inter-decadal, en donde se puede apreciar las contribuciones del ENSO y otros fenómenos de baja frecuencia a través del índice IPO. Es por esto que las siguientes secciones de la discusión están organizadas según la escala temporal.

4.1.1. Variabilidad inter-decadal de las concentraciones de oxígeno disuelto

El índice IPO (Oscilación Inter-decadal del Pacífico) se utilizó para estudiar la variabilidad inter-decadal. Con este índice se agruparon todos los períodos cálidos y los períodos fríos para preparar los distintos mapas de compuestos. El mapa de compuestos muestra el impacto que tiene la componente inter-decadal sobre los datos mensuales. Como era de esperar, el impacto observado es menor al encontrado en la escala inter-anual. Las anomalías inter-decadales se intensifican a medida que aumenta la profundidad. Así las anomalías alrededor de los 400 *m* fueron más intensas que las anomalías alrededor de los 100 *m* de profundidad. Además, las anomalías también son más intensas durante el período frío del índice inter-decadal.

A través de los análisis de EOF, se observó que las variables biogeoquímicas no se encuentran acopladas a la variabilidad física. Los valores de correlación entre las variables estudiadas (oxígeno disuelto, corriente meridional, profundidad de oxiclina, nitrato, amonio y tasas de desnitrificación) son bastante bajos (Cuadro 3.3). De las variables estudiadas, el oxígeno disuelto, nitrato y las tasas de desnitrificación presentan correlaciones sobre $|0,3|$ con el índice IPO (Cuadro 3.2). Esto indica una relación no-lineal entre las variables mencionadas y el índice IPO, dado que los valores de correlación obtenidos son cercanos a 0. La reducción de la variabilidad de la oxiclina (Graco et al., 2017), tiene como consecuencia el desacoplamiento inter-decadal entre las variables estudiadas.

Finalmente, los mapas de compuestos a 100 *m* de profundidad, indican una desoxigenación (oxigenación) costera durante fases cálidas (frías). Al mismo tiempo, ocurre un aumento (disminución) costero en las concentraciones de nitrato, junto a una leve disminución (aumento) en las concentraciones de amonio. Además, según un estudio realizado por (Dewitte et al., 2012), la reiterada ocurrencia de eventos moderados o fríos de ENSO (índice C) tienen como resultado promedio, una tendencia negativa a largo plazo de la temperatura superficial del mar frente a las costas de Perú. Esto debilitaría la profundización de la oxiclina, lo que se traduce en condiciones menos oxigenadas (Pizarro and Montecinos, 2004). Sin embargo, esto no se apreciaría en la serie de la razón de Mo/Al para el testigo de Guanaqueros. Aquí, se observa más bien una tendencia hacia condiciones más oxigenadas hacia el presente.

Por otro lado, a 400 *m* de profundidad, las anomalías de oxígeno disuelto se invierten e intensifican.

Sin embargo, a través de este estudio no es posible justificar la inversión e intensificación de las anomalías inter-decadales a 400 *m* de profundidad. Por último, se observa que las anomalías alrededor de 30°S son más intensas bajo 1000 *m* de profundidad. Esto indica que en esta escala temporal, las anomalías son más intensas en profundidad.

4.1.2. Razones elementales y proxies paleo-climáticos

Las razones elementales son usadas para estudiar propiedades físicas, biológicas y químicas de la columna de agua durante el pasado. Aquí, los testigos sedimentarios utilizados corresponden a la zona de Coquimbo (BC117) y Guanaqueros (BGCC5). Estos comprenden los períodos de 1183 – 2014 A.D. y 109 B.C. – 2015 A.D. respectivamente.

A través de las razones elementales de: Mo/Al, Re/Al, Re/Mo, U/Al, U/Mo y Ni/Al se encontró un aumento (disminución) en la productividad e hipoxia de la columna de agua del testigo BC117 (BGCC5) hacia el tiempo presente. Las diferencias entre las concentraciones de un mismo metal en ambos testigos implicaría que la zona del muestreo sedimentario en Coquimbo (Guanaqueros) está dominada por variabilidad de origen más local (oceánico). La Bahía de Coquimbo recibe constantemente aportes de material litogénico gracias al río Elqui, mientras que la zona de Guanaqueros no contaría con descargas de ríos. Por otro lado, se tiene una mayor (menor) productividad en Coquimbo (Guanaqueros), la cual se asocia a un aumento (disminución) de la surgencia costera. Esto último ha sido documentado en otros estudios del registro sedimentario, como el realizado por Gutiérrez et al. 2006 y CANIUPÁN et al. 2009. Estos estudios observan un aumento en el flujo de carbono orgánico del siglo 20, asociado a una intensificación de los vientos favorables a la surgencia. Una intensificación de la surgencia costera tiene como consecuencia que las concentraciones de oxígeno disuelto disminuyan (Vargas et al., 2007). La disminución de oxígeno disuelto hacia el presente es consistente con lo encontrado en el testigo de Coquimbo, podríamos atribuir esto al aumento en la periodicidad de eventos moderados o fríos de ENSO. Sin embargo, debido a la presencia del río Elqui, existe una gran posibilidad que los forzantes locales dominen la variabilidad de metales traza en esta zona. Por otro lado, la disminución de oxígeno disuelto hacia el presente no concuerda con lo encontrado en el testigo de Guanaqueros, esto será abordado en la sección siguiente (Sección 4.1.3).

Por otro lado, otro cambio importante resulta en la composición de los organismos fitoplanctónicos en la columna de agua. En este estudio, la razón elemental Ca/Al y las cantidades de ópalo biogénico nos entregan una idea de la variabilidad en la composición de los organismos de la columna de agua. Se observó una relación inversa entre las tendencias de ambas variables. Para BC117, se tiene una tendencia positiva (negativa) para Ca/Al (ópalo biogénico) hacia el presente. El estudio realizado por (Díaz Ochoa et al., 2011) nos indica que a partir del año 1960 entramos en un período donde ocurren eventos El Niño (fase positiva de ENSO) más intensos. Este estudio indica un posible cambio en la composición de la comunidad fitoplanctónica. Sin embargo, no nos es posible atribuir estos cambios a eventos El Niño. Además, el aporte de Ca en BC117 podría verse diluido por el aporte del río Elqui, y por lo tanto alterar estas interpretaciones. Según

4.1.3. Variabilidad inter-anual de variables físicas y biogeoquímicas

Los mapas de compuestos indicaron que durante eventos El Niño (fase positiva de ENSO), ocurre oxigenación en la costa alrededor de los 100 *m* de profundidad. Al mismo tiempo, se tiene una disminución de las concentraciones de nitrato, junto a un aumento de las concentraciones de amonio y de corriente meridional en la costa. De acuerdo a Escribano et al. 2004, durante un evento El Niño, la entrada de nitrato se reduce debido a la profundización de la termoclina. Además, existen zonas más cercanas a la costa en donde las concentraciones de nitrato aumentan a pesar de la ocurrencia de un evento El Niño (Escribano et al., 2004). Es probable que debido a la resolución del modelo, este aumento costero en las concentraciones de nitrato no logre apreciarse en los mapas de compuestos realizados en este estudio.

A 400 *m* de profundidad, durante la fase positiva de ENSO, se tienen patrones distintos a los observados a 100 *m*. Aquí, ocurre una desoxigenación de la columna de agua. Esta se debe a la profundización de la ZMO, de esta manera, las zonas con menor concentración de oxígeno disuelto (cerca del núcleo de la ZMO) se profundizan, provocando anomalías negativas en regiones más profundas que poseían mayores concentraciones de oxígeno disuelto (respecto al núcleo de la ZMO). Al mismo tiempo, se observó una zona costera que presentó anomalías negativas (positivas) de oxígeno disuelto (tasas de desnitrificación). Esta relación entre el oxígeno disuelto y las tasas de desnitrificación también se explica en las investigaciones de (Morales et al., 1999) y (Escribano et al., 2004). Aquí, las condiciones más subóxicas favorecen procesos del ciclo del nitrógeno que utilizarían nitrato para degradar materia orgánica. Bajo condiciones más subóxicas, los procesos que reducen nitrato y liberan N_2O a la superficie se intensifican, como resultado se observan los incrementos en las tasas de desnitrificación (Escribano et al., 2004; Canfield, 2006). Finalmente, en esta profundidad las disminuciones en las concentraciones de nitrato se mantienen, mientras que la variabilidad para las concentraciones de amonio se aproximan a cero.

Es probable que los eventos de disminución (aumento) de nitrato y aumento (disminución) de amonio a 105 *m*, pueden estar relacionados a la profundización (levantamiento) de la oxiclina, favoreciendo procesos del ciclo del nitrógeno que actúen en condiciones más óxicas (anóxicas) en la columna de agua. Así, la disminución de nitrato y el aumento de amonio pueden deberse a procesos de asimilación y amonificación, mientras que el aumento de nitrato y la disminución de amonio pueden deberse a procesos de oxidación anaeróbica. Sin embargo, se necesitan otros análisis para poder verificar lo último.

Durante eventos La Niña (fase negativa de ENOS), los patrones mencionados en los párrafos anteriores se invierten. Aquí, la termoclina y oxiclina tienden a volverse más someras. Esto se asemeja a eventos intensificados de surgencia.

El análisis de EOF identifica la varianza asociada a eventos de ENSO para los primeros dos modos de variabilidad. Además, estos modos explican el mayor porcentaje de varianza (> 70 %) asociada a las series de tiempo de las variables de oxígeno disuelto, profundidad de la oxiclina, corriente meridional, nitrato, amonio y tasas de desnitrificación.

El análisis de componentes principales, muestra que las variables (oxígeno disuelto, oxiclina, co-

riente meridional, nitrato, amonio y tasas de desnitrificación) tienen una mayor correlación con el índice E en comparación al índice C. Esto significa que los eventos extremos de El Niño comparten mayor varianza con las variables mencionadas. Esto se debe a que durante eventos extremos de El Niño, las variables biogeoquímicas están mejor acopladas con la variabilidad de la oxiclina y las concentraciones de oxígeno disuelto ((Graco et al., 2017)). Esto se reflejaría en los altos valores de correlación obtenidos en este estudio. Por otro lado, los bajos valores de correlación con el índice C, son un reflejo de las distintas tele-conexiones oceánicas a través de las ondas de Kelvin, en dónde el estado medio de la columna de agua apenas se ve alterado durante eventos moderados o fríos de ENSO ((Dewitte et al., 2012)).

Las correlaciones del modo 1+2 entre las distintas variables estudiadas (oxígeno disuelto, profundidad de la oxiclina, concentraciones de nitrato, amonio y las tasas de desnitrificación) muestran una conexión entre estas. Indicando que ante una profundización de la oxiclina, las concentraciones costeras de oxígeno disuelto y amonio aumentan alrededor de los 100 m de profundidad. Mientras que las concentraciones de nitrato y las tasas de desnitrificación disminuyen. Esto es consistente con lo observado en los mapas de compuestos y lo descrito por (Escribano et al., 2004).

Es posible apreciar que los valores de correlación entre las variables mencionadas en el párrafo anterior y corriente meridional son bastante bajos (Cuadro 3.3. Según un estudio realizado por (Pizarro et al., 2001), existe un desfase de ~ 7 meses entre una posible intensificación/debilitamiento de la Corriente Sub-superficial de Perú Chile y los eventos El Niño (propagación de la onda de Rossby). Sin embargo, en este estudio el desfase encontrado es de 2 meses. Es posible que las discrepancias entre los desfases se deba a la resolución del modelo. Esto implicaría que la corriente hacia el sur analizada en este estudio no se trataría de la CSSPC, si no que también incluiría otras corrientes que viajan al sur (Fig. 2.1), como es el caso de la Contracorriente de Perú-Chile.

4.1.4. Modelo Conceptual

La variabilidad en la ZMO está definida a través de las variaciones en las concentraciones de oxígeno disuelto. Las variaciones de oxígeno disuelto para la escala inter-anual se ven moduladas por dos tipos de eventos de ENSO. El primer tipo de evento de ENSO se asocia a los eventos cálidos extremos, mientras que el segundo tipo a los eventos moderados o fríos. Dependiendo si se trata de un evento o el otro, el impacto en la columna de agua será distinto. Durante eventos extremos de El Niño, las variables físicas y biogeoquímicas se encuentran acopladas. Así, durante eventos cálidos extremos, se observa un aumento en las concentraciones de oxígeno disuelto, amonio y corrientes meridionales. Al mismo tiempo, las concentraciones de nitrato disminuyen. Además, los eventos moderados o fríos no impactan fuertemente la columna de agua en superficie. Aquí, las variables físicas y biogeoquímicas no se encuentran acopladas, principalmente debido a que durante este tipo de eventos, el nivel del mar y por ende la oxiclina no se ven perturbados. Las anomalías en 100 m son pequeñas respecto a las encontradas alrededor de los 400 m y se considera que no hay variaciones, es decir, la variabilidad de la columna de agua es similar a la del estado normal (sin El Niño). Finalmente serían los eventos cálidos extremos los que perturbarían la oxiclina y ventilarían el registro sedimentario alrededor de

los 100 *m* de profundidad.

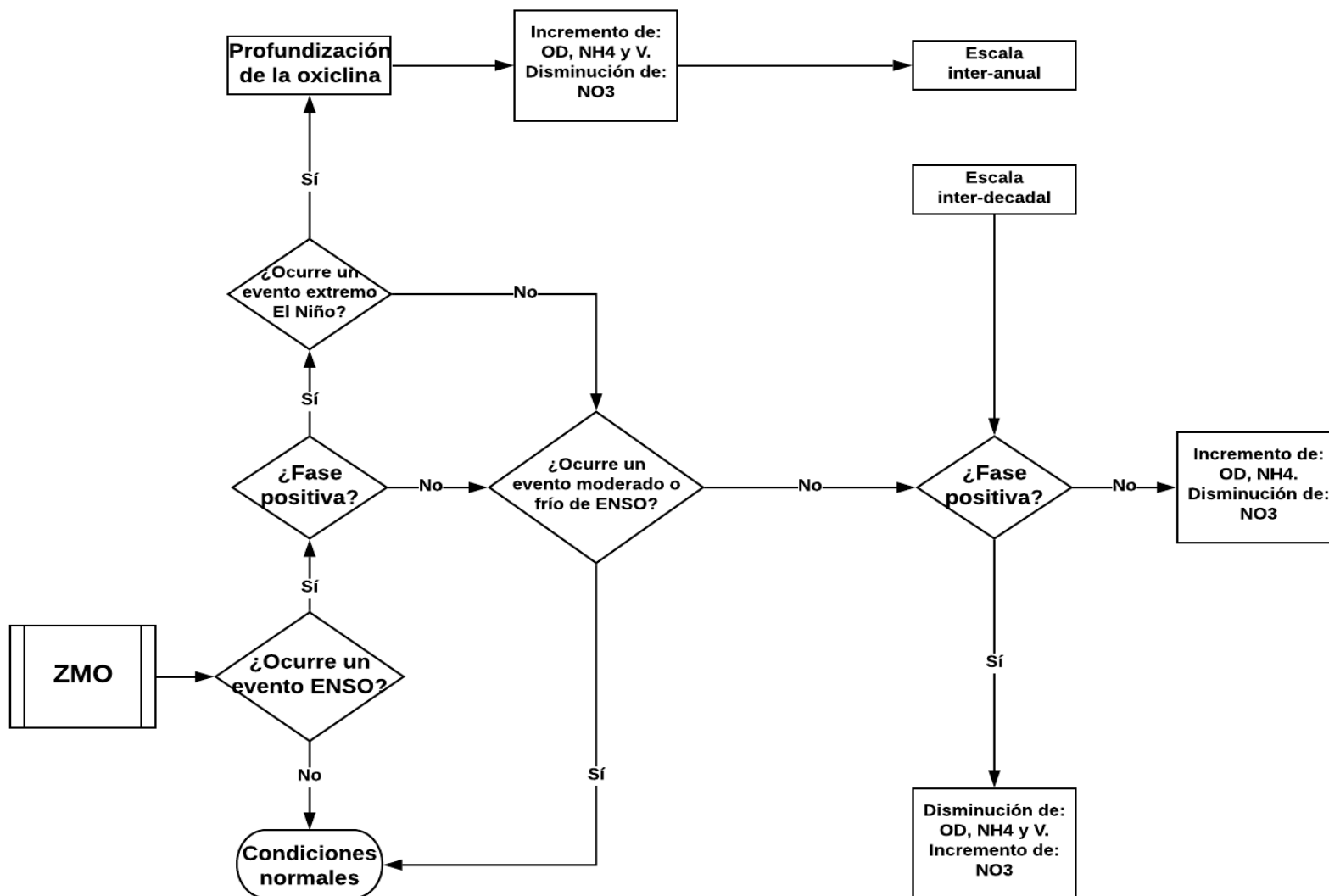


Figura 4.1: Diagrama de flujo de los resultados. Se explica el impacto que tienen los eventos El Niño sobre las variables estudiadas. Los análisis expresados en este diagrama se centran en lo que ocurre alrededor de los 100 m de profundidad y centrado alrededor de los 30°S.

4.2 Conclusión

Respecto a la metodología empleada en este trabajo de investigación, es importante destacar la necesidad de más análisis complementarios. Principalmente, se necesitan análisis que sirvan como soporte estadístico de los resultados obtenidos. En este sentido, el uso de la simulación pre-industrial, perteneciente al mismo escenario climático, que comprende un período más extenso (0 – 1800 A.D.), se vuelve fundamental para validar las interpretaciones obtenidas de los datos de testigos sedimentarios, ya que los diferentes pasos de tiempo en las series de las razones elementales pueden introducir aliasing. El aliasing (enmascaramiento de la señal) pone en duda si la tendencia observada en los testigos es real, o bien es producto del enmascaramiento de la señal. Por otro lado, la resolución espacial del modelo impide la representación exacta de la Corriente Sub-Superficial de Perú-Chile (CSSPC), esto también provocaría errores al momento de interpretar los resultados, principalmente aquellos asociados al desfase entre un evento El Niño y la intensificación de la CSSPC.

Respecto a los análisis al modelo numérico, podemos concluir que durante eventos extremos de El Niño (fase positiva de ENSO, índice E) ocurre oxigenación en la columna de agua. Esta oxigenación se produce debido a la profundización de la oxiclina, e impactaría los ciclos biogeoquímicos de la zona, especialmente el ciclo del nitrógeno. Favoreciendo procesos aeróbicos. Durante eventos extremos de El Niño se observa que las variables biogeoquímicas se encuentran acopladas con el forzamiento físico, es decir, existe una relación entre la variabilidad de la oxiclina y la corriente meridional con la variabilidad de oxígeno disuelto, nitrato, amonio y tasas de desnitrificación. Por otro lado, para eventos moderados o fríos de El Niño (fase positiva y negativa de ENSO, índice C) las variables biogeoquímicas no se acoplan con el forzamiento físico, es decir, la profundidad de la oxiclina no se ve perturbada durante este tipo de eventos. Esto se observa en las bajas correlaciones encontradas con el índice C y en la poca relación entre eventos de oxigenación y la variabilidad de nitrato, amonio y tasas de desnitrificación. Además, se observa muy poca variabilidad asociada a este tipo de eventos ENSO en la superficie de la columna de agua. Para la escala inter-decadal, la correlación entre la variabilidad de la oxiclina y el índice IPO es cercana a cero, lo que indica que las variaciones de oxígeno disuelto en esta escala temporal no se relacionan a la variabilidad de la oxiclina.

En conclusión, el testigo de Coquimbo estaría dominado por efectos locales, lo cual respondería el por qué existen diferencias de concentraciones de metales traza entre el testigo de Coquimbo y el testigo de Guanaqueros, así como también tendencias inversas en las razones elementales de ambos testigos. Además, el testigo de Guanaqueros se ve modulado por variabilidad de origen más oceánico. La tendencia hacia aguas más oxigenadas por parte del testigo de Guanaqueros se debe a las contribuciones de eventos cálidos extremos de ENSO, sin embargo, hace falta profundizar en esto, complementándolo con estudios sobre otros mecanismos para poder justificarlo de manera más concisa.

Bibliografía

- Blanco, J. L., Carr, M.-E., Thomas, A. C., and Strub, P. T. (2002). Hydrographic conditions off northern chile during the 1996–1998 la nina and el nino events. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C3):3–1.
- Calvert, S. and Pedersen, T. (2007). Proxies in late cenozoic paleoceanography.
- Canfield, D. E. (2006). Models of oxic respiration, denitrification and sulfate reduction in zones of coastal upwelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(23):5753–5765.
- CANIUPÁN, M., VILLASEÑOR, T., PANTOJA, S., LANGE, C. B., VARGAS, G., MUÑOZ, P., and SALAMANCA, M. (2009). Sedimentos laminados de la bahía mejillones como registro de cambios temporales en la productividad fitoplanctónica de los últimos~ 200 años. *Revista chilena de historia natural*, 82(1):83–96.
- Carr, M.-E. (2003). Simulation of carbon pathways in the planktonic ecosystem off peru during the 1997–1998 el niño and la niña. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C12).
- Colas, F., Capet, X., McWilliams, J., and Shchepetkin, A. (2008). 1997–1998 el niño off peru: A numerical study. *Progress in Oceanography*, 79(2-4):138–155.
- Deser, C., Phillips, A. S., Alexander, M. A., and Smoliak, B. V. (2014). Projecting north american climate over the next 50 years: Uncertainty due to internal variability. *Journal of Climate*, 27(6):2271–2296.
- Dewitte, B., Illig, S., Renault, L., Goubanova, K., Takahashi, K., Gushchina, D., Mosquera, K., and Purca, S. (2011). Modes of covariability between sea surface temperature and wind stress intra-seasonal anomalies along the coast of peru from satellite observations (2000–2008). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C4).
- Dewitte, B., Vazquez-Cuervo, J., Goubanova, K., Illig, S., Takahashi, K., Cambon, G., Purca, S., Correa, D., Gutiérrez, D., Sifeddine, A., et al. (2012). Change in el niño flavours over 1958–2008: Implications for the long-term trend of the upwelling off peru. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77:143–156.
- Díaz Ochoa, J., Pantoja, S., De Lange, G., Lange, C., Sánchez, G., Acuña, V., Muñoz, P., and Vargas Easton, G. (2011). Oxygenation variability in mejillones bay, off northern chile, during the last two centuries.
- Eissler, Y. and Quiñones, R. A. (1999). Microplanktonic respiration off northern chile during el niño 1997–1998. *Journal of Plankton Research*, 21(12):2263–2283.

- Escribano, R., Daneri, G., Farías, L., Gallardo, V. A., González, H. E., Gutiérrez, D., Lange, C. B., Morales, C. E., Pizarro, O., Ulloa, O., et al. (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.
- Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E., and López, D. (2009). Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of chile's norte chico region (26–32 s). *Water Resources Research*, 45(2).
- Flynn, W. (1968). The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Analytica chimica acta*, 43:221–227.
- Garreaud, R., Rutllant, J., and Fuenzalida, H. (2002). Coastal lows along the subtropical west coast of south america: Mean structure and evolution. *Monthly Weather Review*, 130(1):75–88.
- González, H. E., Hebbeln, D., Iriarte, J. L., and Marchant, M. (2004). Downward fluxes of faecal material and microplankton at 2300 m depth in the oceanic area off coquimbo (30 s), chile, during 1993–1995. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(20-21):2457–2474.
- Graco, M. I., Purca, S., Dewitte, B., Castro, C. G., Morón, O., Ledesma, J., Flores, G., and Gutiérrez, D. (2017). The omz and nutrient features as a signature of interannual and low-frequency variability in the peruvian upwelling system.
- Gutiérrez, D., Gallardo, V. A., Mayor, S., Neira, C., Vásquez, C., Sellanes, J., Rivas, M., Soto, A., Carrasco, F., and Baltazar, M. (2000). Effects of dissolved oxygen and fresh organic matter on the bioturbation potential of macrofauna in sublittoral sediments off central chile during the 1997/1998 el niño. *Marine Ecology Progress Series*, 202:81–99.
- Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Reyss, J., Vargas, G., Velasco, F., Salvattecí, R., Ferreira, V., Ortlieb, L., Field, D., Baumgartner, T. R., et al. (2006). Anoxic sediments off central peru record interannual to multidecadal changes of climate and upwelling ecosystem during the last two centuries.
- Hansen, H. P. and Koroleff, F. (1999). Determination of nutrients. *Methods of seawater analysis*, pages 159–228.
- Hawkins, E. and Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8):1095–1108.
- Hebbeln, D., Marchant, M., and Wefer, G. (2000). Seasonal variations of the particle flux in the peru-chile current at 30 s under 'normal' and el niño conditions. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(9-11):2101–2128.
- Henley, B. J., Gergis, J., Karoly, D. J., Power, S., Kennedy, J., and Folland, C. K. (2015). A tripole index for the interdecadal pacific oscillation. *Climate Dynamics*, 45(11-12):3077–3090.

- Huyer, A., Smith, R. L., and Paluszkievicz, T. (1987). Coastal upwelling off peru during normal and el niño times, 1981–1984. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 92(C13):14297–14307.
- Kalthoff, N., Bischoff-Gauß, I., Fiebig-Wittmaack, M., Fiedler, F., Thürauf, J., Novoa, E., Pizarro, C., Castillo, R., Gallardo, L., Rondanelli, R., et al. (2002). Mesoscale wind regimes in chile at 30 s. *Journal of Applied Meteorology*, 41(9):953–970.
- Kay, J. E., Deser, C., Phillips, A., Mai, A., Hannay, C., Strand, G., Arblaster, J. M., Bates, S., Danabasoglu, G., Edwards, J., et al. (2015). The community earth system model (cesm) large ensemble project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(8):1333–1349.
- Kemp, A. E. and Kemp, A. E. (1996). Palaeoclimatology and palaeoceanography from laminated sediments. Geological Society of London.
- Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4):181–217.
- Lam, P., Lavik, G., Jensen, M. M., van de Vossenberg, J., Schmid, M., Woebken, D., Gutiérrez, D., Amann, R., Jetten, M. S., and Kuypers, M. M. (2009). Revising the nitrogen cycle in the peruvian oxygen minimum zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(12):4752–4757.
- Luebert, F. and Plischoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. Editorial Universitaria.
- Marchant, M., Hebbeln, D., Giglio, S., Coloma, C., and González, H. E. (2004). Seasonal and interannual variability in the flux of planktic foraminifera in the humboldt current system off central chile (30 s). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(20-21):2441–2455.
- Mazzullo, J., Meyer, A., and Kidd, R. (1988). New sediment classification scheme for the ocean drilling program. *Handbook for shipboard sedimentologists. ODP Tech. Note*, 8:45–67.
- Montecinos, A. and Aceituno, P. (2003). Seasonality of the enso-related rainfall variability in central chile and associated circulation anomalies. *Journal of climate*, 16(2):281–296.
- Montecinos, A., Díaz, A., and Aceituno, P. (2000). Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical south america based on tropical pacific sst. *Journal of Climate*, 13(4):746–758.
- Montecinos, A., Kurgansky, M. V., Muñoz, C., and Takahashi, K. (2011). Non-enso interannual rainfall variability in central chile during austral winter. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(3-4):557–568.
- Montecinos, S., Gutiérrez, J., López-Cortés, F., and López, D. (2016). Climatic characteristics of the semi-arid coquimbo region in chile. *Journal of Arid Environments*, 126:7–11.

- Montes, I., Colas, F., Capet, X., and Schneider, W. (2010). On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial pacific and their contributions to the peru-chile undercurrent. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C9).
- Montes, I., Dewitte, B., Gutknecht, E., Paulmier, A., Dadou, I., Oschlies, A., and Garçon, V. (2014). High-resolution modeling of the eastern tropical pacific oxygen minimum zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8):5515–5532.
- Moore, J. K., Doney, S. C., and Lindsay, K. (2004). Upper ocean ecosystem dynamics and iron cycling in a global three-dimensional model. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(4).
- Moore, J. K., Lindsay, K., Doney, S. C., Long, M. C., and Misumi, K. (2013). Marine ecosystem dynamics and biogeochemical cycling in the community earth system model [cesm1 (bgc)]: Comparison of the 1990s with the 2090s under the rcp4. 5 and rcp8. 5 scenarios. *Journal of Climate*, 26(23):9291–9312.
- Morales, C. E., Hormazábal, S. E., and Blanco, J. (1999). Interannual variability in the mesoscale distribution of the depth of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern chile (18–24s): Implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *Journal of Marine Research*, 57(6):909–932.
- Mortlock, R. A. and Froelich, P. N. (1989). A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 36(9):1415–1426.
- North, G. R., Bell, T. L., Cahalan, R. F., and Moeng, F. J. (1982). Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly weather review*, 110(7):699–706.
- Ortega, C., Vargas, G., Rutllant, J. A., Jackson, D., and Méndez, C. (2012). Major hydrological regime change along the semiarid western coast of south america during the early holocene. *Quaternary Research*, 78(3):513–527.
- Pizarro, O., Clarke, A. J., and 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.
- Pizarro, O. and Montecinos, A. (2004). Interdecadal variability of the thermocline along the west coast of south america. *Geophysical Research Letters*, 31(20).
- Pizarro, O., Shaffer, G., Dewitte, B., and Ramos, M. (2002). Dynamics of seasonal and interannual variability of the peru-chile undercurrent. *Geophysical Research Letters*, 29(12):22–1.
- Ramos, M., Dewitte, B., Pizarro, O., and Garric, G. (2008). Vertical propagation of extratropical rossby waves during the 1997–1998 el niño off the west coast of south america in a medium-resolution ogcm simulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).

- Rundel, P. W., Dillon, M. O., Palma, B., Mooney, H. A., Gulmon, S., and Ehleringer, J. (1991). The phytogeography and ecology of the coastal atacama and peruvian deserts. *Aliso: A Journal of Systematic and Evolutionary Botany*, 13(1):1–49.
- Rutllant, J. A., Fuenzalida, H., and Aceituno, P. (2003). Climate dynamics along the arid northern coast of chile: The 1997–1998 dinámica del clima de la región de antofagasta (diclima) experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D17).
- Sabatier, P., Dezileau, L., Blanchemanche, P., Siani, G., Condomines, M., Bentaleb, I., and Piquès, G. (2010). Holocene variations of radiocarbon reservoir ages in a mediterranean lagoonal system. *Radiocarbon*, 52(1):91–102.
- Schrader, H. and Gersonde, R. (1978). Diatoms and silicoflagellates. In *Zachariasse etb al. Microplaeontological counting methods and techniques-an exercise on an eight metres section of the lower Pliocene of Capo Rossello. Sicily. Utrecht Micropal. Bull. 17:*, pages 129–176.
- Silva, N. and Neshyba, S. (1977). Corrientes superficiales frente a la costa austral de chile.
- Silva, N. and Neshyba, S. (1979). Masas de agua y circulación geostrófica frente a la costa de chile austral. *Instituto Antártico Chileno, Serie Científica*, 25:5–32.
- Silva, N., Rojas, N., and 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.
- Smith, R. L. (1983). Peru coastal currents during el niño: 1976 and 1982. *Science*, 221(4618):1397–1399.
- Strub P, Mesias J, M. V. . J. R. (1998). Coastal ocean circulation off western south america. In Robinson, A., B. K., editor, *The Global coastal ocean*, First Workshop on Coastal Ocean Advanced Science and Technology Studies (COASTS) IOC, Liege. John Wiley Sons, Inc.
- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., and Dewitte, B. (2011). Enso regimes: Reinterpreting the canonical and modoki el niño. *Geophysical Research Letters*, 38(10).
- Thomas, A., Blanco, J., Carr, M., Strub, P. T., and Osses, J. (2001). Satellite-measured chlorophyll and temperature variability off northern chile during the 1996–1998 la niña and el niño. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C1):899–915.
- Trenberth, K. (2016). The climate data guide: Nino sst indices (nino 1+2, 3, 3.4, 4; oni and tni).
- Ulloa, O. and Pantoja, S. (2009). The oxygen minimum zone of the eastern south pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16):987–991.
- Vargas, G., Ortlieb, L., Pichon, J. J., Bertaux, J., and Pujos, M. (2004). Sedimentary facies and high resolution primary production inferences from laminated diatomaceous sediments off northern chile (23 s). *Marine Geology*, 211(1-2):79–99.

- Vargas, G., Pantoja, S., Rutllant, J. A., Lange, C. B., and Ortlieb, L. (2007). Enhancement of coastal upwelling and interdecadal enso-like variability in the peru-chile current since late 19th century. *Geophysical Research Letters*, 34(13).
- Wyrski, K. (1963). *The horizontal and vertical field of motion in the Peru Current*. University of California Press.

A. Anexo

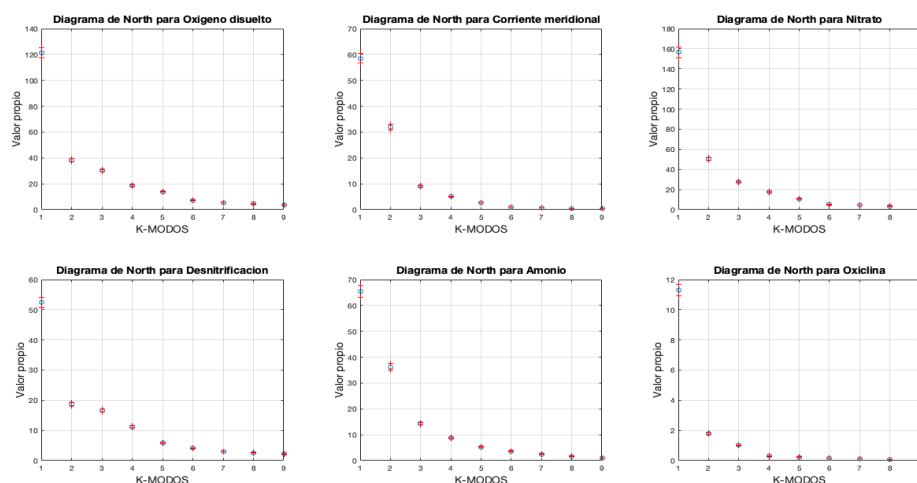


Figura A.1: Diagrama de North en escala inter-anual para: a) oxígeno disuelto, b) corriente meridional, c) nitrato, d) desnitrificación, e) amonio y f) oxiclina. Aquí, la primera (segunda) componente principal explica un: 47 % (15 %) para oxígeno disuelto; 53 % (29 %) para corriente meridional; 55 % (18 %) para nitrato; 40 % (14 %) para desnitrificación; 46 % (25 %) para amonio; 47 % (15 %) para oxiclina.

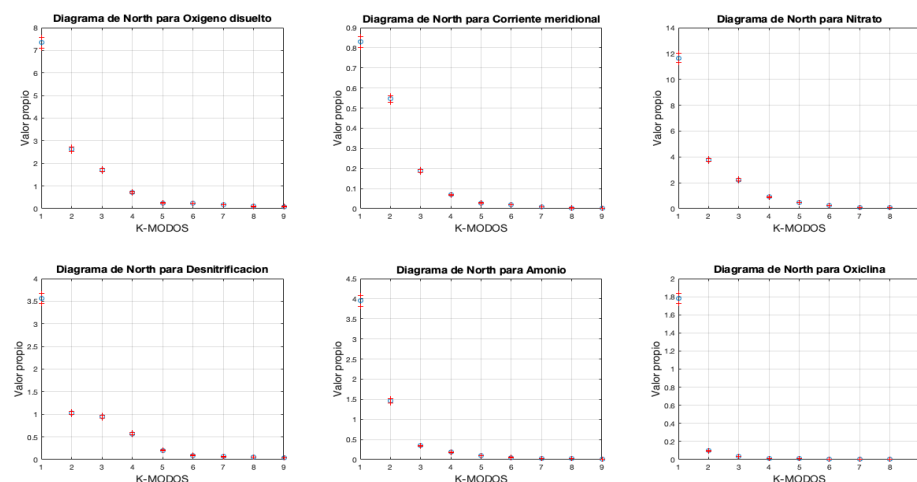


Figura A.2: Diagrama de North en escala inter-decadal para: a) oxígeno disuelto, b) corriente meridional, c) nitrato, d) desnitrificación, e) amonio y f) oxiclina. Aquí, la primera (segunda) componente principal explica un: 55 % (20 %) para oxígeno disuelto; 49 % (32 %) para corriente meridional; 60 % (19 %) para nitrato; 54 % (16 %) para desnitrificación; 64 % (24 %) para amonio; 55 % (20 %) para oxiclina.

A.0.1. Análisis del testigo sedimentario

La actividad del plomo (^{210}Pb) fue cuantificada usando espectroscopia alfa del isótopo hija (^{210}Po) en equilibrio secular con ^{210}Pb , usando ^{209}Po como un trazador (Flynn, 1968). Las muestras liofilizadas fueron digeridas con ácido clorhídrico 1,5 normal. A esta solución, se le agrega ácido ascórbico y se deja a una temperatura de $\sim 75^\circ\text{C}$ en un agitador magnético, en el fondo del recipiente con la solución se incorporan láminas de plata, en las cuales se acumulará el plomo. Este procedimiento químico dura aproximadamente tres horas. Una vez finalizado, las láminas de plata son llevadas a conteo. El conteo se realizó usando el espectrómetro alfa CANBERRA QUAD del laboratorio de Oceanografía Química de la Universidad de Concepción. La actividad de ^{210}Po fue calculada usando la razón entre el radionucleido natural (^{210}Pb) y el traza (^{209}Po), la cual es multiplicada por la actividad del traza luego del tratamiento químico. Se debe considerar que durante el período entre el tratamiento químico y el conteo existe decaimiento de ^{210}Po (vida media de 138 días), además, durante el período entre el muestreo y el tratamiento químico hay decaimiento de ^{210}Pb (vida media de 22,3 años). Debido los decaimientos de ^{210}Po y ^{210}Pb , se hicieron correcciones para el conteo durante estos dos períodos. Finalmente las edades fueron calculadas usando:

$$I = \sum A_i \rho_i h_i$$

Aquí, A_i es $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (dpm g^{-1} , actividad en exceso), ρ_i es la densidad aparente para el intervalo i (g cm^{-3}), h es el grosor del intervalo (cm). Aquí las actividades en exceso son calculadas como el total de ^{210}Pb menos la actividad de su padre ^{226}Ra .

Las muestras para las mediciones de radio-carbono fueron secadas en frío y lavadas sobre una grilla de tamiz de $63\mu\text{m}$, posterior al lavado se secaron a 50°C . Se usaron 2 mg de foraminíferos planctónicos de la mezcla de $125 - 150\mu\text{m}$ de tamaño. Las muestras fueron enviadas al National Ocean Sciences AMS Facility (NOSAMS) de Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI). Aquí, la Fracción Moderna (Fm) fue corregida por el valor de $\delta^{13}\text{C}$, y las edades fueron calculadas usando una vida media del radio-carbono de 5568 años. Además, la escala de tiempo fue obtenida de acuerdo al mejor ajuste entre $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ y ^{14}C usando el software CLAM 2.2. Se consideró una desviación entre las edades del reservorio y la edad promedio global del reservorio (DR) de 441 ± 35 años (Sabatier et al., 2010). Esto fue calculado restando la edad de ^{14}C correspondiente a las fechas históricas 1828 (AD) y 1908 (AD) de la edad aparente de ^{14}C de foraminíferos a 5 cm y 10 cm para BC117 y BGGC5 respectivamente.

El tamaño de grano fue calculado utilizando un analizador láser de partículas Mastersizer 2000 acoplado a un Hydro 2000-G Malvern en el laboratorio de sedimentología de la Universidad de Chile. La simetría, clasificación y curtosis fueron calculadas utilizando el software estadístico GRADISTAT, el cual incluye todos los espectros de tamaño de partícula.

Los análisis de elementos traza fueron realizados por ICP-MS (Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente) y se llevaron a cabo en Université de Montpellier 2, France (OSU ORE-ME/AETE regional facilities) utilizando un Agilent 7700x. Aproximadamente 50 mg de muestras y

materiales de referencia geoquímicos (UBN, BEN y MAG1) se disolvieron dos veces usando un concentrado de $\text{HF-HNO}_3\text{HClO}_4$ (1 : 1 : 0,1) en un vaso precipitado Savillex de teflón con tapa de rosca a 120°C sobre un plato caliente durante 48 horas. Luego, las muestras fueron sometidas a tres etapas de evaporación para así remover el flúor. Antes de realizar el análisis, las muestras fueron disueltas en 2 ml de HNO_3 concentrado y transferidas a botellas de polipropileno de 20 ml. La preparación final de las muestras se realizó mediante dilución con agua ultra-pura en una razón de 1 : 4000 o 1 : 5000 y la adición de un peso conocido de solución de estándar interno de 1 ppb de In y Bi. La estandarización interna usa una solución ultra-pura enriquecida en In y Bi, elementos cuya abundancia natural en muestras geológicas no contribuyen significativamente al estándar interno agregado. Esto se usa para estimar variaciones dependientes de la masa, ya sea de origen instrumental o de la matriz, durante el análisis. Para el análisis de la muestra, se utiliza una bomba peristáltica, un micro-nebulizador y una cámara enfriada de doble paso tipo Scott. El tiempo de consumo (45 segundos) se establece para facilitar señales estables del analito antes de un análisis de 120 segundos para cada muestra. Elementos con masa atómica inferior a 80 se analizaron en modo de colisión utilizando He; elementos más pesados fueron analizados en un modo sin gas. Por otro lado, se estableció un procedimiento de lavado, que consiste en 60 segundos con 10 % HNO_3 y 120 segundos con 2 % HNO_3 para alcanzar el nivel blanco del instrumento. El tiempo total para el análisis de una solución de muestra única es de 3 minutos. Las concentraciones medias para las muestras analizadas se determinaron mediante calibraciones externas preparadas diariamente a partir de soluciones multi-elementales y mono-elementales, con concentraciones en el rango de 0,05 – 10 ppb para elementos traza y 1 – 10 ppm para elementos mayores. Las interferencias poli-atómicas se controlaron haciendo funcionar la máquina a un nivel de producción de óxido < 1 %. Las precisiones analíticas típicas alcanzadas por esta técnica son generalmente entre 1 % y 3 %. La precisión se ha evaluado con un análisis de materiales de referencia internacionales y los resultados muestran un acuerdo generalmente mejor que $\pm 5\%$ con los valores de referencia.

Para el material orgánico, se realizaron análisis de carbono orgánico total (TOC) e isótopos estables ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) en el Institut für Geographie, Friedrich Alexander Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg, Alemania. El material liofilizado se transfirió a cápsulas de estaño y plata para el análisis de N y C respectivamente, este se calentó a 1060°C en un flujo continuo de helio en un analizador elemental (NC2500, Carlo Erba), en presencia de óxido de cromo y óxido de cobalto plateado. Los gases resultantes se pasaron sobre alambres de cobre a 650°C para reducir el nitrógeno y el exceso de oxígeno. Luego, el vapor de agua quedó atrapado con $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ y los gases restantes (N_2 y CO_2) se separaron en una columna de cromatografía de gases a 45°C . Los gases N_2 y CO_2 se pasaron sucesivamente a través de una interfaz ConFloII en el espectrómetro de razón de masa de isótopo (Delta Plus, Thermo-Finnigan) y analizado isotópicamente. Los contenidos de carbono y nitrógeno se determinaron a partir de la razón de máximo por área y masa de la muestra, estas mediciones se calibraron con los estándares elementales ciclohexanona-2,4-dinitrofenilhidrazona ($\text{C}_{12}\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_4$) y atropina ($\text{C}_{17}\text{H}_{23}\text{NO}_3$) (Thermo Quest). Un estándar interno orgánico hecho en laboratorio (peptona) con composición isotópica conocida se usó para las calibraciones isotópicas finales. Las relaciones de isótopos estables se informan en la notación δ como la desviación con respecto a los estándares

internacionales (Vienna Pee Dee Belemnite para $\delta^{13}\text{C}$ y N_2 atmosférico para $\delta^{15}\text{N}$), entonces:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ o } \delta^{15}\text{N} = \left(\frac{\text{muestra } R}{\text{estandar } R} - 1 \right) \times 103$$

en donde R es ^{13}C para el numerador y ^{12}C para el denominador o ^{15}N para el numerador y ^{14}N para el denominador, respectivamente. La precisión típica de los análisis fue de $\pm 0,1 \text{ ppm}$ para $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$.

El ópalo biogénico se estimó siguiendo el procedimiento descrito por Mortlock and Froelich 1989 con una ligera modificación, esta consiste en extraer 50 mg de sedimento con 1 M de NaOH en lugar de 2 M de Na_2CO_3 , a 85°C durante 5 horas. La extracción y el análisis por espectrofotometría de de molibdato-azul (Hansen and Koroleff, 1999) se realizaron en los laboratorios de Geoquímica y Paleoceanografía orgánica marina, Universidad de Concepción, Chile. Los valores se expresan como ópalo biogénico multiplicando el Si (%) por 2,4. La precisión analítica fue de $\pm 0,5 \%$. Las tasas de acumulación se determinaron en función de las tasas de acumulación de masa de sedimentos y la cantidad de ópalo en cada sección del núcleo en %.

Las mediciones de micro-fósiles se llevaron a cabo siguiendo el protocolo del Programa de Perforación Oceánica (ODP) descrito por Mazzullo et al. 1988, con esta información se seleccionaron algunas secciones de BGGC5 cada $\sim 4, 8$ y 12 cm y para BC117 cada $\sim 6 \text{ cm}$ para el estudio de abundancias cuantitativas de micro-fósiles (diatomeas, silicoflagelados, espículas de esponja, criófitos y fitolitos). En resumen, se trataron $\sim 0,5 \text{ g}$ de sedimento liofilizado de acuerdo con Schrader and Gersonde 1978 para micro-fósiles silíceos. Los micro-fósiles silíceos fueron identificados y contados bajo un microscopio Olympus CX31 con contraste de fase. Se contó 1/5 de los portaobjetos a 400X para micro-fósiles silíceos y se contó un transecto a 1000X para esporas en reposo de *Chaetoceros* (esporas en reposo de Ch.). Se contaron dos portaobjetos por muestra. El error de conteo estimado fue de 15 %. La abundancia total de diatomeas se da en válvulas g^{-1} de sedimentos secos.

A.0.2. Razones isotópicas

Las razones elementales fueron normalizadas al dividir el valor de la concentración del metal traza por el valor de la concentración de aluminio (Al) en el sedimento. Aquí, el aluminio es utilizado para estimar el contenido de material litogénico total gracias a su comportamiento conservativo. Así, la razón (*elemento*)/Al puede entregar información sobre el enriquecimiento y pérdida de un elemento respecto a su contenido en la corteza terrestre.

El renio (Re) y uranio (U) ocurren en por lo menos dos estados de oxidación y son probablemente eliminados de la solución hacia los sedimentos de fondo como el estado de oxidación menor, y menos soluble. La distribución vertical de estos elementos muestra una menor participación en ciclos biogeoquímicos en la superficie. Esto se traduce a un comportamiento conservativo en superficie bajo condiciones óxicas. El Re y U, bajo condiciones subóxicas (bajas concentraciones de oxígeno disuelto y sin la presencia de sulfuro) se acumulan en los sedimentos por sobre su abundancia en la corteza. Esto se observa en el aumento de sus concentraciones en agua de poro en zonas donde las

concentraciones de los oxihidróxidos de hierro (Fe) disminuyen. El Re es entregado a los sedimentos por difusión de las aguas de fondo y tras ser removido de las aguas de poro en los sedimentos por la reducción de Re(VII) a Re(IV). U es entregado a los sedimentos por difusión de las aguas de fondo. Experimentos han observado una reducción bacterial, en presencia de ácido sulfhídrico (H_2S), de U(VI) a U(IV). Los sumideros subóxicos de U están controlados por el flujo de material orgánico (MO) y por las concentraciones de estos en los sedimentos. Por ejemplo, en condiciones donde el agua de fondo es oxigenada, el oxígeno disuelto es consumido por completo en las aguas de poro a un nivel subsuperficial. El incremento de MO causa que el borde subóxico se superficialice, fortaleciendo el gradiente de U disuelto de las aguas de fondo. Esto produce un incremento en la fijación de U en la zona subóxica de las aguas de poro.

El cadmio (Cd) y níquel (Ni) son elementos calcófilos que se concentran en depósitos de sulfuros en la corteza terrestre. Un elemento calcófilo, es un elemento con una fuerte afinidad con el azufre (S). El Cd y Ni se comportan como micro-nutrientes, siendo removidos de las aguas superficiales por el crecimiento de plancton y liberados de los depósitos de desechos orgánicos en la parte superior de la columna de agua. En cuencas anóxicas, las concentraciones de Cd disuelto disminuyen drásticamente. Estas disminuciones se asocian a la precipitación de los respectivos sulfuros sólidos (CdS) en presencia de sulfuros disueltos. Por otro lado, la concentración de Ni disuelto no disminuye en cuencas anóxicas, sin embargo, existen sulfuros insolubles que en presencia de sulfuro disuelto pueden limitar su concentración. Así, se espera que las concentraciones de Cd sean mayores que aquellas de sedimento detrítico bajo condiciones anóxicas. Para Ni, se observan enriquecimientos en cuencas donde la presencia de sedimentos es casi nula.

Las concentraciones de molibdeno (Mo) en el océano Pacífico muestran un ligero agotamiento en aguas superficiales, implicando una participación menor en los ciclos biogeoquímicos. El Mo es enriquecido en sedimentos marinos en presencia de sulfuro disuelto, el cual puede aumentar su concentración en niveles subsuperficiales de los sedimentos del margen continental. Aquí, el Mo de la agua de poro es consumido y las concentraciones de la fase sólida de Mo aumentan bajo la zona de reciclaje de oxihidróxidos de manganeso (Mn).

El potasio (K) es relativamente abundante en feldespatos, mientras que es relativamente bajo en kaolinitas. Esto es un proxy para el clima del pasado y las tasas de precipitación. La presencia abundante de kaolinitas muestra un período cálido/húmedo, mientras que la presencia de feldespato se asocia a un período seco. Los elementos contenedores de K son más estables durante erosión química que elementos contenedores de calcio (Ca).

Finalmente, la acumulación de calcio (Ca) en los sedimentos también depende de la cantidad de organismos carbonatados en la productividad de la zona, y por lo tanto también puede utilizarse como un proxy para estudiar la paleo-productividad en dicha región.