UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

Escuela de Postgrado Víctor Alzamora Castro

IMPACTO DE LA CIRCULACIÓN ECUATORIAL EN LA ZONA MÍNIMA DE OXÍGENO PRESENTE EN EL NORTE DEL ECOSISTEMA DE LA CORRIENTE DE HUMBOLDT

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DEL MAR

Blgo. DANTE ESPINOZA MORRIBERÓN

LIMA – PERÚ

2012

DEDICATORIA

A mis maravillosos padres Dante y Martha

A las mejores hermanas que existen: Rocio y Crsitina

A mis sobrinos Joaquín, Andrés y Andrea

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos son para todas las personas que me ayudaron a realizar mi tesis, en especial al grupo del CIMOBP por siempre enseñarme algo nuevo y su paciencia.

Un agradecimiento especial al Dr. Vincent Echevin, Dr. Jorge Tam y a mi asesor Ricardo Oliveros por confiar en mi para la realización de la tesis y su apoyo constante.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
II.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
II.2. HIPÓTESIS	4
II.2. MARCO TEÓRICO	4
II.3.1. ¿QUE ES LA ZONA MÍNIMA DE OXÍGENO?	4
II.3.2. EL NORTE DEL ECOSISTEMA DE LA CORRIENTE DE HUMBOLDT (NECH)	7
II.3.2.1. La Circulación regional oceánica en el NECH	7
a) Sistema de Corrientes Ecuatorial en el NECH	7
b) Sistema de Corriente frente a Perú	13
II.3.2.2. La ZMO del NECH: Una de las más intensas del Mundo	14
II.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	17
II.4. OBJETIVOS	21
III. METODOLOGÍA	23
III.1. MODELO FÍSICO ROMS	23
III.2. MODELO BIOGEOQUÍMICO PISCES	24
III.2.1 OXÍGENO EN PISCES	27
III.3. CONFIGURACIÓN DEL MODELO ACOPLADO ROMS/PISCES	30
III.3.1. CONDICIONES DE FRONTERA	33
III.3.2. FORZANTES ATMOSFÉRICOS	34
III.3.3. CONDICIONES INICIALES Y ESTABILIZACIÓN DEL MODELO	36

III.4. BASE DE DATOS PARA VALIDACIÓN DEL MODELO 38
III.5. CÁLCULO DE LOS FLUJOS DE OXÍGENO 39
III.6. CÁLCULO DEL BALANCE DE OXÍGENO 40
III.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS 42
III.8. DELIMITACIÓN DE SECCIONES 42

IV. RESULTADOS 44

IV.1. VALIDACIÓN DE LAS SALIDAS DEL MODELO ROMS-PISCES 44
IV.1.1. TEMPERATURA 44
IV.1.1.1. Temperatura Superficial del mar 44
IV.1.1.2. Perfiles Verticales de Temperatura 48
IV.1.2. CLOROFILA 49
IV.1.2.1. Clorofila Superficial 49
IV.1.2.2. Perfiles Verticales de Clorofila 53
IV.1.3. NUTRIENTES: NITRATOS, SILICATOS Y FOSFATOS 54
IV.1.3.1. Nutrientes Superficiales 54
IV.1.3.2. Distribución Vertical de nutrientes 55
IV.1.4. OXÍGENO 59
IV.1.4.1. Oxígeno Disuelto Superficial 59
IV.1.4.2. Estructura Vertical del OD 60
IV.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ZMO MODELADA FRENTE A PERÚ 63
IV.2.1. CONCENTRACIÓN DE LA ZMO 63
IV.2.2. PROFUNDIDAD DE LA ZMO 67
IV.2.3. ESPESOR DE LA ZMO 70
IV.2.4. VARIACIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO A LO LARGO DE LA COSTA 73
IV.3. FLUJOS DE OXIGENO 76
IV.4. BALANCE DE OXÍGENO 81
IV.4.1. ZONA ECUATORIAL 81

IV.4.2 ZONA FRENTE A PERÚ 82

V. DISCUSIÓN 86

V.1. VALIDACIÓN DEL MODELO ACOPLADO 86
V.2. SENSIBILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD
A DIFERENTES CONDICIONES DE FRONTERA 90
V.3. SENSIBILIDAD DE LA ZMO A DIFERENTES CONDICIONES
DE CIRCULACIÓN ECUATORIAL 92

VI. CONCLUSIONES 98

VII. PERSPECTIVAS 98

VIII. BIBLIOGRAFÍA 100

IX. ANEXOS 110

LISTA DE TABLAS

Página

Tabla 1. Variables de estado del modelo biogeoquímico PISCES 26

Tabla 2. Tabla de los parámetros utilizados en el modelo ROMS-PISCES 31

Tabla 3. Promedio anual de los términos de la ecuación de oxígeno en la ZMO de la zona Ecuatorial y frente a Perú. 83

Tabla 4. Tabla de los parámetros cambiados (rojo) que intervienen en el OD en la configuración de la simulación RPSoda. 99

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Distribución del oxígeno disuelto en el océano de WOA05, las áreas en rojo abarcan la ZMO (<22 µmol de O_2/kg), y las isolineas negras indican la profundidad del limite superor del nucleo de la OMZ en metros (Paulmier and Ruiz-Pino, 2009). 6

Figura 2. Sistema de corrientes del NECH. Corrientes superficiales (líneas solidas): Corriente Superficial Ecuatorial (SEC), Corriente Costera Peruana (PCC), Corriente Oceánica Peruana (POC); y Corrientes Sub-superficiales (líneas punteadas): Corriente Sub-superficial Peruana-Chilena (PCUC), Contracorriente Peruana-Chilena (PCCC), Corriente Sub-superficial Ecuatorial (EUC), Corriente Sub-superficial del Sur Primaria (pSSCC) y la Corriente Sub-superficial del Sur Secuandaria (sSSCC) (*Montes et al*., 2010). 8

Figura 3. Sección meridional promedio de temperatura (líneas blancas) y corrientes geostróficas zonales (color rojo muestra las que poseen dirección al este y las azules hacia el oeste, en cm/s) a los 125°W, 110°W y 90°W obtenidas de *Kessler* (2006). 10

Figura 4. Sección meridional promedio de oxígeno disuelto (µmol/kg) obtenido mediante datos de CTD y botellas por *Fiedler and Talley* (2006) a los 88°W. 12

Figura 5. Espesor de la ZMO (<20 µmol/kg) presente en el Sureste del Pacifico (SEP) en colores y la profundidad de la ZMO en líneas negras, basadas en la observaciones de CTDO (*Fuenzalida et al*., 2009). 17

Figura 6. Promedio anual de la velocidad zonal de la EUC observada en SODA (izquierda) y MERCATOR (derecha) (en colores m/s), y las concentraciones de oxígeno en µmol O_2/kg (líneas sólidas) extraídas del World Ocean Atlas (WOA) a los 93°W. 20

Figura 7. Arquitectura de PISCES, con énfasis en los procesos que intervienen en la concentración del oxígeno disuelto (flechas rojas), modificado de *Aumont and Bopp* (2006). 25

Figura 8. Topografía de GEBCO (izquierda) y de ROMS (derecha) en el dominio modelizado, mostrando que ROMS posee una topografía suavizada. 33

Figura 9. Forzantes superficiales y fronteras condiciones de borde (físicas y bioquímicas) dentro del modelo ROMS/PISCES en el presente estudio. 35

Figura 10. Evolución temporal de las principales variables físicas (energía cinética, temperatura, salinidad) y biogeoquímicas (oxígeno, nitratos, clorofila) del modelo ROMS/PISCES promediadas en el área estudiada y de los 0-600m de profundidad. 37

Figura 11. Volúmenes donde se ha calculado el balance de oxígeno. La caja ecuatorial (negra) se encuentra delimitada de los 4ºN-4ºS, 86ºW-76ºW y de los 250 a 400 metros de profundidad; y la caja frente a Perú de los 6ºS-14ºS, 86ºW-76ºW y de los 200 a 400 metros de profundidad. Los colores representan la concentración de O2 (µmol/kg) dentro de la ZMO de CARS. 41

Figura 12. Delimitación de la zona costera y oceánica para nuestro estudio. 43

Figura 13. Promedio anual de la temperatura superficial del mar para el área de estudio de pathfinder (a) y las simulaciones RPSoda (b) y RPMercator (c) en ºC. 46

Figura 14. Mapa de correlaciones (en color solo los valores significativos) y RMSe entre *Pathfinder* con RPSoda (a, c) y RPMercator (b, d) respectivamente. 47

Figura 15. Perfiles verticales de Temperatura promedio (en grados ºC) entre los 4ºS a 16ºS para los datos de CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 48

Figura 16. Promedio anual de la clorofila superficial dentro de los 100 km a la costa entre los 4ºS y 16ºS de SeaWIFS (línea verde), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja). 50

Figura 17. Promedio anual de la clorofila superficial para el área de estudio de SeaWIFS (a) y las simulaciones RPSoda (b) y RPMercator (c) en mgChl/m3. 51

Figura 18. Mapa de correlación (en color solo los valores significativos) y RMSe entre SeaWIFS con RPSoda (a, c) y RPMercator (b, d) respectivamente. 52

Figura 19. Perfiles verticales de Clorofila en mgChl/m^3 entre los 4ºS a 16ºS para los datos de IMARPE (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 53

Figura 20. Promedio de la concentración de nutrientes en umol/l dentro de los 200 km a la costa entre los 4ºS-16ºS. Silicatos (a), nitratos (b) y fosfatos (c) para la data de CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 57

Figura 21. Perfil vertical de la concentración de nutrientes en umol/l entre los 4ºS-16ºS. Silicatos (a), nitratos (b) y fosfatos (c) para la data de CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 58

Figura 22. Promedio anual del oxígeno superficial dentro de los 200 km a la costa entre los 4ºS a 16ºS de CARS (línea azul), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja). 60

Figura 23. Secciones verticales de oxígeno disuelto en µmol/kg a los 0ºS (primera fila), 6ºS (segunda fila) y 14ºS (tercera fila) para los datos de CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha) con sus respectivas isoxigenas de 22 µmol/kg (línea negra). 62

Figura 24. Promedio de la Concentración de OD dentro de la ZMO entre los 4ºS y 16ºS en la zona oceánica (200-400km) (a) y en la costera (0-200km) (b) para la base de datos de CARS (línea azul), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja). 64

Figura 25. Promedio anual de las concentraciones de OD en µmol/kg dentro de la ZMO para CARS (a), RPSoda (b), y RPMercator (c). A su vez, las diferencias entre las concentraciones de OD anuales de CARS y RPSoda (d); CARS y RPMercator (e); y entre RPSoda y RPMercator (f). 66

Figura 26. Promedio de la profundidad de la ZMO entre los 4ºS y 16ºS en la zona oceánica (200-400km) (a) y en la costera (0-200km) (b) para la base de datos de CARS (línea azul), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja). 68

Figura 27. Promedio anual de la profundidad de la ZMO (metros) para CARS (a), RPSoda (b), y RPMercator (c). A su vez, las diferencias entre las profundidades anuales de la ZMO de CARS y RPSoda (d); CARS y RPMercator (e); y entre RPSoda y RPMercator (f). 69

Figura 28. Promedio del espesor de la ZMO entre los 4ºS y 16ºS en la zona oceánica (a) y en la costera (b) para la base de datos de CARS (línea azul), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja). 71

Figura 29. Promedio anual del espesor de la ZMO en metros para CARS (a), RPSoda (b), y RPMercator (c). A su vez, las diferencias entre el espesor anual de la ZMO de CARS y RPSoda (d); CARS y RPMercator (e); y entre RPSoda y RPMercator (f). 72

Figura 30. Promedio anual de la concentración de oxígeno disuelto en umol/kg entre las isobatas de 1000m y 2000m de profundidad a lo largo de la costa para CARS (a), RPSoda (b), y RPMercator (c). A su vez, las diferencias entre CARS y RPSoda (d); CARS y RPMercator (e); y entre RPSoda y RPMercator (f). 75

Figura 31. Promedio anual de las velocidades zonales (>5cm/s) de las corrientes ecuatoriales (contornos negros), concentraciones de OD (colores) y nitratos (contornos celestes, µmol/l) de RPSoda (a) y RPMercator (b) a los 88ºW. 77

Figura 32. Flujo de oxígeno (10^3 moles de O_2/s) en a los 88ºW (superior) y 86ºW (inferior) de la EUC (izquierda), pSSCC (centro) y sSSCC (derecha) para las simulaciones RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja). 79

Figura 33. Promedio entre los 150m a 400m de profundidad de la variación estacional del oxígeno disuelto en µmol/kg (colores) y de la velocidad horizontal (vectores) para RPSoda (izquierda) y RPMercator (derecha). 80

Figura 34. Variación estacional de los términos de la ecuación de oxígeno en la ZMO de la zona ecuatorial: advección zonal (O2_xadv), advección meridional (O2_yadv), advección vertical (O2_vadv), advección por mezcla vertical (O2_vmix_adv). Por último el balance neto de oxígeno en el ecuador (O2_rate) para RPSoda (línea roja) y RPMercator (línea negra). Las líneas punteadas representan o2_xadv+o2yadv. 84

Figura 35. Variación estacional de los términos de la ecuación de oxígeno en la ZMO de la zona frente a Perú: advección zonal (O2_xadv), advección meridional (O2_yadv), advección vertical (O2_vadv), advección por mezcla vertical (O2_vmix_adv). Por último el balance neto de oxígeno frente a Perú (O2_rate) para RPSoda (línea roja) y RPMercator (línea negra). Las líneas punteadas representan o2_xadv+o2yadv. 85

Figura 36. Gráfico de dispersión entre datos *in situ* de GLODAP (datos observados de alta resolución) (eje x) versus los datos grillados de WOA05 (eje y), y su la línea de proporción 1:1 (línea roja) (*Bianchi et al*., 2012). 88

Figura 37. Concentraciones anuales promedio de Chl en mg Chl/m^3 (negro) y Fe en 10^3µmol/l (rojo) dentro de los 200km a la costa de los 4ºS a 16ºS de RPSoda. 89

Figura 38. Promedio anual de la velocidad meridional de las corrientes en cm/s (colores), temperatura en ºC (contorno negro), nitratos en µmol/l (contorno rojo) entre los 7ºS a 13ºS para las simulaciones RPSoda (izquierda) y RPMercator (derecha). 91

Figura 39. Velocidad vertical en m/dia dentro de los 200km a la costa a los 50m de profundidad de RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja). 92

Figura 40. Esquema de las fuentes y sumideros de oxígeno de la ZMO en la zona ecuatorial. 93

Figura 41. Esquema de las fuentes y sumideros de oxígeno de la ZMO en la zona frente a Perú. 94

Figura 42. Esquema de los procesos físicos y biológicos que afectan a la formación de la ZMO y las principales características que influyen en las diferencias entre la ZMO de la zona ecuatorial (superior) y frente a Peru(inferior) para la simulación RPSoda (izquierda) y RPMercator (derecha). 97

Figura 43. Temperatura superficial del mar por estaciones de *Pathfinder* (izquierda) en ºC; las diferencias estacionales entre RPSoda y pathfinder (centro); y entre RPMercator y *Pathfinder* (derecha). 111

Figura 44. Clorofila superficial por estaciones de SeaWIFS (izquierda) en mgChl/m^3; las diferencias estacionales entre SeaWIFS y RPSoda (centro); y entre SeaWIFS y RPMercator (derecha). 112

Figura 45. Variación estacional de concentración de oxígeno disuelto (µmol/kg) dentro de la ZMO en la zona oceánica (entre 200-400km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 113

Figura 46. Variación estacional de concentración de oxígeno disuelto (µmol/kg) dentro de la ZMO en la zona costera (entre 0-200km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 113

Figura 47. Variación estacional de la profundidad de la capa superior de la ZMO (metros) en la zona oceánica (entre 200-400km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 114

Figura 48. Variación estacional de la profundidad de la capa superior de la ZMO (metros) en la zona costera (entre 0-200km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 114

Figura 49. Variación estacional del espesor de la ZMO (metros) en la zona oceánica (entre 200-400km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 115

Figura 50. Variación estacional del espesor de la ZMO (metros) en la zona costera (entre 0-200km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha). 115

RESUMEN

El Norte del Ecosistema de la Corriente Humboldt (NECH) constituye una de las mayores zonas de afloramiento, localizada en el borde oriental del Pacifico Sur, la cual presenta características particulares, entre las que destacan una alta producción primaria y la presencia de una de las zonas mínimas de oxigeno (ZMO) más intensas en el océano abierto. La ZMO presente en esta zona es producto de la alta demanda de oxígeno durante la remineralización de la materia orgánica, el largo tiempo de residencia de sus aguas y su poca ventilación. En el presente estudio nos enfocamos en estudiar la influencia de cambios en la ventilación en la ZMO del NECH, tomando como las principales fuentes de aporte de oxígeno en esta zona a la Corriente Sub-superficial Ecuatorial (EUC) y las Contracorrientes Sub-superficiales del Sur (SSCCs) o también conocidas como los Jets de Tsuchiya. Utilizamos el modelo acoplado físico-biogeoquímico ROMS-PISCES, para observar la sensibilidad de la ZMO a diferentes condiciones de la circulación ecuatorial provenientes de dos modelos oceánicos de circulación general (SODA y MERCATOR).

Los resultados muestran que el flujo de oxígeno a los 88ºW disminuye latitudinalmente de la EUC a los SSCCs; además, se observa que la ZMO desaparece de los 4ºN - 4ºS en la simulación que presenta una circulación más intensa (RPSoda) por lo que se puede concluir que una intensificación de la circulación ecuatorial afectaría principalmente a la zona ecuatorial y no frente a Perú, debido a que una mayor ventilación sería compensada con un mayor

consumo de oxigeno durante la remineralización, producto de una alta productividad generada por un mayor flujo de nutrientes.

PALABRAS CLAVE: zona mínima de oxígeno, circulación ecuatorial, norte del ecosistema de la corriente de Humboldt, modelo acoplado ROMS-PISCES, flujo de oxígeno.

ABSTRACT

The Humboldt Current Ecosystem is one of the most intense upwelling zones of the Eastern Pacific Ocean, which has some important biogeochemical characteristics like a high productivity and an intense oxygen minimum zone (OMZ). This intense OMZ is generated by the oxygen consumption during the remineralization process and the desoxygenation of it source waters. In this study we focus on the influence of changes in the ventilation of the OMZ in the Northern Humboldt Current Ecosystem, considering the subsurface Equatorial Undercurrent (EUC) and South Subsurface Countercurrents (SSCC) or Tsuchiya Jets as the main sources of oxygen in this area. We used a coupled physical-biogeochemical ROMS-PISCES model to investigate the sensitivity of the OMZ to different equatorial boundary conditions from two ocean general circulation models (SODA and MERCATOR).

The results showed that oxygen flux at 88ºW decreases latitudinally from the EUC to SSCCs; we also observed that the OMZ disappears in the equatorial zone (4ºN - 4°S) in the simulation with a more intense circulation (RPSoda). We can conclude that an intensification of the equatorial circulation mainly affects the equatorial zone but do not affect the area off Peru, because an increased ventilation would be offset by an increased oxygen consumption during the remineralization process due to a high productivity generated by a greater nutrient flow.

KEY WORDS: oxygen minimum zone, equatorial circulation, Northern Humboldt Current Ecosystem, coupled model ROMS-PISCES, oxygen flux.

I. INTRODUCCIÓN

La biogeoquímica estudia la composición, dinámica y distribución de los elementos químicos en el océano y sus interrelaciones con los seres vivos, en particular con los niveles tróficos inferiores (LTL, *low trophic levels*). Así, los modelos biogeoquímicos tratan de representar los flujos de material dentro de la columna de agua, tomando en cuenta los principales ciclos biogequímicos (e.g. carbono, oxígeno, nitrógeno) y LTL (fitoplancton y zooplancton) (*Tabash*, 2006). El modelo biogeoquímico PISCES (*Pelagic Iteraction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies; Aumont y Bopp*, 2006) modela la dinámica espacial y temporal de los principales ciclos biogeoquímicos y LTL usando ecuaciones de tipo reacción-difusión con interacciones de tipo Michaelis-Menten y depredador-presa. El Norte del Ecosistema de la Corriente de Humboldt (NECH) es una de las cuatro mayores zonas de afloramiento localizadas en el borde oriental del Pacifico y el Océano Atlántico (*Freón et al.*, 2005*; Chavez y Messié*, 2009*; Lachkar and Gruber*, 2012). El NECH es además una de las zonas con mayor productividad marina en el océano (*Carr et al*., 2002) y soporta la pesquería monoespecifica más grande del mundo, la pesquería de anchoveta peruana (*FAO*, 2005). En el NECH también se desarrolla una de las zonas mínimas de oxigeno (ZMO) más intensas en el mundo (*Helly and Levin*, 2004), definiendo a la ZMO como zonas en subsuperficie que presentan concentraciones de oxígeno menores a 22 µmol/kg de O_2 (*Kartensen et al.*, 2008). La generación de la ZMO es producto de la poca ventilación de sus aguas por las corrientes ecuatoriales (*Stramma et al.*, 2010a) y del consumo de oxígeno durante el proceso de la remineralización de la materia

orgánica (*Libes*, 1992; *Sarmiento and Gruber*, 2006). En la actualidad es importante estudiar la ZMO debido a que existe una señal de su expansión en el océano (*Stramma et al*., 2008) y estaría provocando la reducción del hábitat de muchas especies (*Stramma et al*., 2010b).

La presente tesis tiene como objetivo principal estudiar el impacto de la circulación ecuatorial subsuperficial en la distribución de la zona mínima de oxígeno frente a Perú utilizando el modelo biogeoquímico PISCES.

II. PLANTEAMIENTO DE INVESTIGACIÓN

II.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se ha observado la expansión e intensificación de las zonas mínimas de oxígeno presentes en el Atlántico y el Pacífico Este durante los últimos 50 años (*Stramma et al.*, 2008), y se atribuye que la variabilidad de su volumen podría estar relacionada al cambio climático (*Oschlies et al.*, 2008). Así, las zonas mínimas de oxígeno se expanden durante periodos calientes y se contraen durante periodos fríos. Esta relación se puede evidenciar en la producción de gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (N_2O), el cual es adicionado al ambiente durante el proceso de denitrificación[1], proceso que se presenta en condiciones de bajas concentraciones de oxigeno (*Codispoti et al*., 2001; *Francis et al*., 2007). En la actualidad, uno de los principales temas de investigación en oceanografía es conocer los procesos que intervienen en la formación de la ZMO, debido a que su extensión reduce el hábitat de muchas especies de importancia comercial como la anchoveta y jurel.

Un factor importante en la formación de la ZMO en el NECH es la circulación a gran escala, en particular el sistema de corrientes ecuatoriales subsuperficiales conformada por la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (EUC, *Equatorial Undercurrent*) y las Corrientes Subsuperficiales del Sur (SSCCs, *subsuperficial countercurrents*, también conocidas como los Jets de Tsuchiya) (*Tsuchiya*, 1975). La EUC se caracteriza por transportar masas de agua relativamente ricas en

[1] Denitrificación: Proceso que ocurre durante la respiración de las bacterias cuando existen condiciones subóxicas, en el cual el nitrato es reducido, obteniéndose como producto final nitrógeno molecular (N_2); durante este proceso también se puede obtener como gas intermedio el óxido nitroso.

oxígeno hacia la ZMO (*Stramma et al*., 2010a), por lo que la variabilidad de la EUC y los Jets podría influir significativamente en la estructura espacial y la variabilidad estacional de la ZMO. Así, resulta importante conocer cuál sería el comportamiento de la ZMO frente a una intensificación o debilitamiento de las corrientes ecuatoriales, en particular debido a que su contracción o expansión nos permitiría entender mejor los cambios en el hábitat de especies marinas tales como la anchoveta, sardina, jurel, entre otras.

II.2. HIPÓTESIS

En esta tesis se plantea la hipótesis de que una intensificación de la circulación ecuatorial produciría una atenuación de la zona mínima de oxígeno en el Norte de Ecosistema de la Corriente de Humboldt.

II.3. MARCO TEÓRICO

II.3.1. LA ZONA MÍNIMA DE OXÍGENO

Muchas regiones en el océano abierto presentan bajas concentraciones de oxígeno disuelto (<22 µmol/kg de O_2) en profundidades subsuperficiales (entre los 100 – 900 m de profundidad) (*Kartensen et al*., 2008), siendo estas regiones conocidas como Zonas Mínimas de Oxígeno (ZMOs). Se he demostrado que la distribución de las ZMOs habría sido subestimada (*Ulloa and Pantoja*, 2009), pero que en la

actualidad podría representar el 7% del volumen del océano (102 $\pm$ 15 millones de km^3) (*Paulmier and Ruiz-Pino*, 2009). Las ZMOs se localizan principalmente en el Océano Pacifico (*Fuenzalinda et al*., 2009; *Graco et al*., 2007), el Océano Atlántico (*Stramma et al*., 2009) y el Mar de Arabia (*Reichart et al*., 1998) (figura 1). La oxiclina es la capa donde el gradiente de oxígeno es el máximo en la columna de agua, y en el presente estudio la definimos como el límite superior de la ZMO.

La presencia de las ZMO se debe a la combinación de procesos biogeoquímicos como la remineralización[2] (con alta demanda de oxígeno) y físicos como la circulación (zonas con mínima advección de oxígeno) (*Paulmier et al*., 2006). Wyrtki (1962) menciona que los procesos biogeoquímicos son los principales responsables de la existencia y mantención de la ZMO y la circulación de su posición en la columna de agua. Sin embargo, en la actualidad se conoce que los procesos físicos y químicos intervienen conjuntamente en la formación de la ZMO.

Podemos encontrar dos tipos de ZMOs en el océano:

- ZMO somera (50-500m), con muy baja concentración de oxígeno y frecuentemente asociadas a aguas altamente estratificadas (*Paulmier and Ruiz-Pino*, 2009).
- ZMO intermedias (1000-1500m, con 20% de saturación de O_2), presentes en todo el océano, con énfasis del Atlántico Norte a el Océano Pacifico, siguiendo la "Cinta Transportadora" (*Broecker and Peng*., 1983).

[2] Remineralización: Proceso bacteriano en el cual la materia orgánica disuelta es transformada a amonio (NH4), produciéndose un consumo elevado de oxígeno durante este proceso.

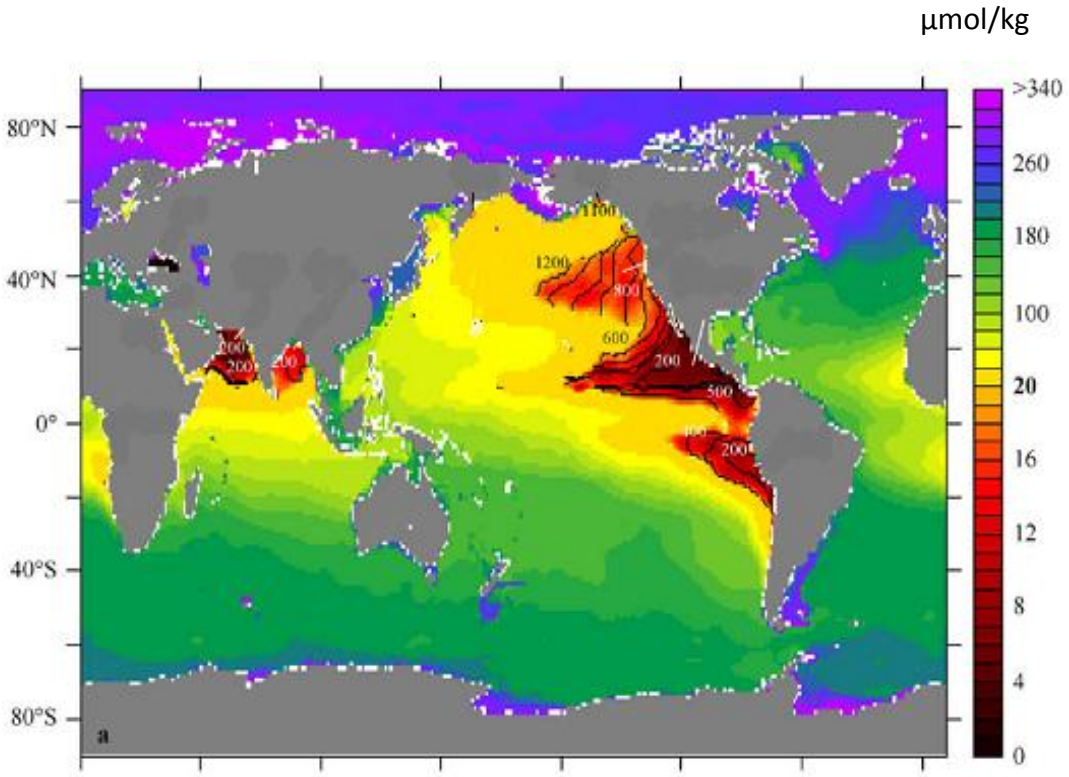

Figura 1. Distribución del oxígeno disuelto en el océano de WOA05, las áreas en rojo abarcan la ZMO (<22 µmol de O_2/kg), y las isolineas negras indican la profundidad del límite superor del nucleo de la OMZ en metros (*Paulmier and Ruiz-Pino*, 2009).

Se conoce que la ZMO se contrae durante periodos fríos y se extiende en periodos cálidos (*Rogers et al.*, 2000). Esta relación se puede evidenciar en el incremento del proceso de la denitrificación (proceso presente en condiciones subóxicas) en los últimos 50 años (*Emeis et al*., 2009).

II.3.2. EL NORTE DEL ECOSISTEMA DE LA CORRIENTE DE HUMBOLDT (NECH)

II.3.2.1. La Circulación regional oceánica en el NECH

La región costera peruana-chilena se caracteriza por presentar celdas de afloramiento constantes en la zona norte (entre los 4°S y 18°S), debido a los vientos alisios y un afloramiento estacional en la zona sur a lo largo de Chile (*Strub et al*., 1998). Esta región que presenta un sistema de corrientes particular es llamada el "Ecosistema de la Corriente de Humboldt" (ECH). En esta tesis nos enfocamos en el estudio de la zona Norte del Ecosistema de la Corriente de Humboldt (NECH). El NECH se compone de 2 importantes sistemas de corrientes: El Sistema de Corrientes Ecuatorial (*Tsuchiya* 1975; *Ishida et al*., 2005; *Johnson and Moree*, 1997) y el Sistema de Corrientes frente a Perú (*Brockmann et al*., 1980; *Penven et al*., 2005; *Montes et al*., 2010) (Figura 2), las cuales se describen a continuación.

a) Sistema de Corrientes Ecuatorial en el NECH

El sistema de corrientes ecuatorial en el NECH se encuentra compuesto en superficie por la Corriente Ecuatorial del Sur (SEC) y en subsuperficie por la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (EUC) y las Contracorrientes Sub-superficiales del Sur (SSCCs).

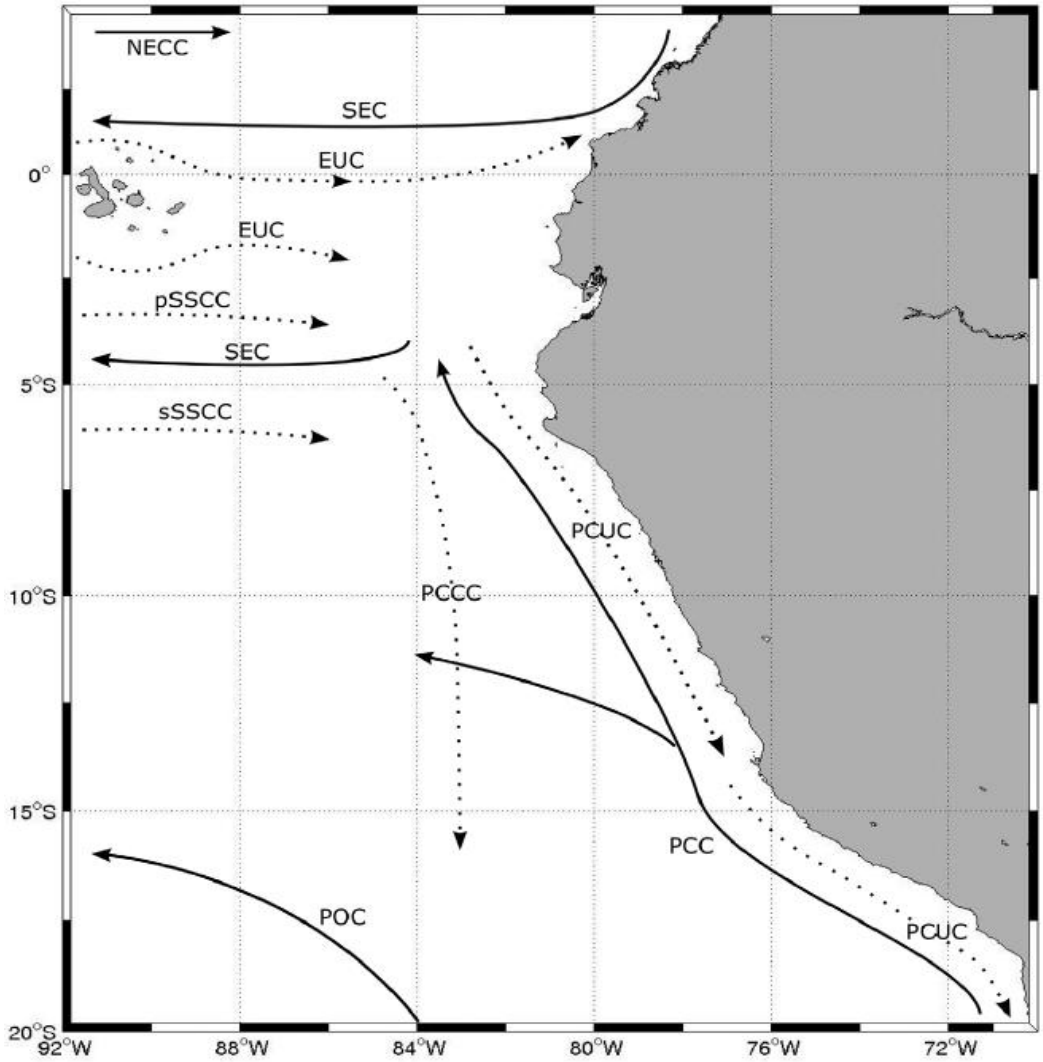

Figura 2. Sistema de corrientes del NECH. Corrientes superficiales (líneas solidas): Corriente Superficial Ecuatorial (SEC), Corriente Costera Peruana (PCC), Corriente Oceánica Peruana (POC); y Corrientes Sub-superficiales (líneas punteadas): Corriente Sub-superficial Peruana-Chilena (PCUC), Contracorriente Peruana-Chilena (PCCC), Corriente Sub-superficial Ecuatorial (EUC), Corriente Sub-superficial del Sur Primaria (pSSCC) y la Corriente Sub-superficial del Sur Secuandaria (sSSCC) (*Montes et al*., 2010).

En superficie, la Corriente Ecuatorial Sur (SEC) es impulsada por los vientos alisios y forma parte de la rama norte del Giro Subtropical del Pacifico Sur, la cual fluye hacia el Noroeste y a través del Ecuador (hacia el oeste) alrededor de los 5°N. Las observaciones han demostrado que al Este de los 85°W la SEC es débil y gana velocidad a medida que fluye hacia el oeste en el ecuador (*Wyrtki*, 1966). Se ha calculado que la SEC transporta por encima de los 200 metros de profundidad y dentro de los 6°S–6°N a los 95°W alrededor de 12 Sv, incrementándose a 35 Sv a los 140°W. En la zona ecuatorial esta corriente es dividida en dos brazos (a los 3°N y 3°S) cuando la EUC se someriza (figura 3) (*Kessler*, 2006). La SEC forma parte de un gran sistema de afloramiento en el océano abierto (el afloramiento ecuatorial), que se genera debido a la divergencia de aguas del SEC (aguas hacia el sur en el hemisferio sur) y la Corriente Ecuatorial Norte (NEC, aguas hacías el norte en el hemisferio norte) (*Pennington et al*., 2006).

Como ya se mencionó, en subsuperficie encontramos a la EUC y las SSCCs. La EUC es la corriente más prominente que fluye hacia el este a través de todo el Ecuador (*Ishida et al*., 2005), y se caracteriza por transportar aguas relativamente ricas en oxígeno en comparación con las aguas presentes zonas más costeras (Figura 4). Estas concentraciones de oxígeno van decreciendo a medida que avanza a través del ecuador hacia el continente americano (*Stramma et al*., 2010a).

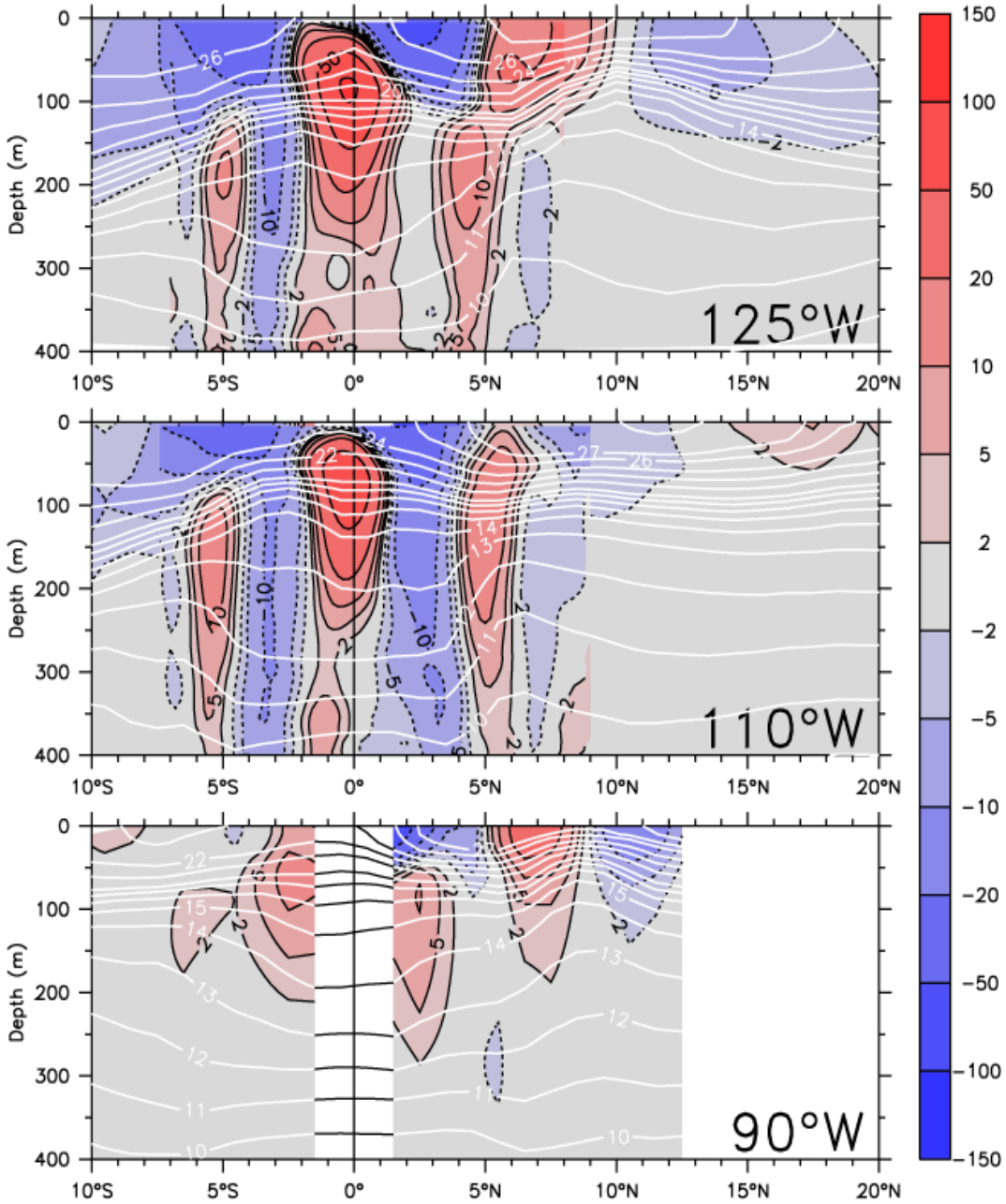

Figura 3. Sección meridional promedio de temperatura (líneas blancas) y corrientes geostróficas zonales (color rojo muestra las que poseen dirección al este y las azules hacia el oeste, en cm/s) a los 125°W, 110°W y 90°W obtenidas de *Kessler* (2006).

Las observaciones también nos indican que estas corrientes transportan un alto contenido de nitratos, silicatos y fosfatos a través del ecuador (*Fiedler and Talley*, 2006), así como también aguas con un contenido significativo de hierro provenientes de Indonesia en dirección al Pacífico Este (*Pennington et al*., 2006). La EUC se someriza durante la primavera boreal cambiando el flujo de agua (normalmente hacia el oeste en superficie) cerca de la superficie a los 0°W, 110°W hacia el este, presentando velocidades de 20 cm/s en promedio entre abril y mayo (*Kessler*, 2006). Las observaciones muestran también que a los 86°W la EUC es muy fuerte, llegando a presentar velocidades de 70 cm/s a los 70 metros de profundidad (*Tsuchiya and Talley*, 1998).

Dentro de las Contracorrientes Subsuperficiales del Sur (SSCCs), conocidas también como jets de Tsuchiya (*Tsuchiya*, 1975), encontramos a la Contracorriente Subsuperficial del Sur Primaria (pSSCC), localizada al sur de la EUC, y a la Contracorriente Subsuperficial del Sur Secundaria (sSSCC) localizada más al sur de la pSSCC. Estas corrientes fluyen también hacia el este y son ramificaciones de la EUC (*Lukas*, 1986; *Montes et al*, 2010), siendo en la actualidad poco lo que se conoce de ellas.

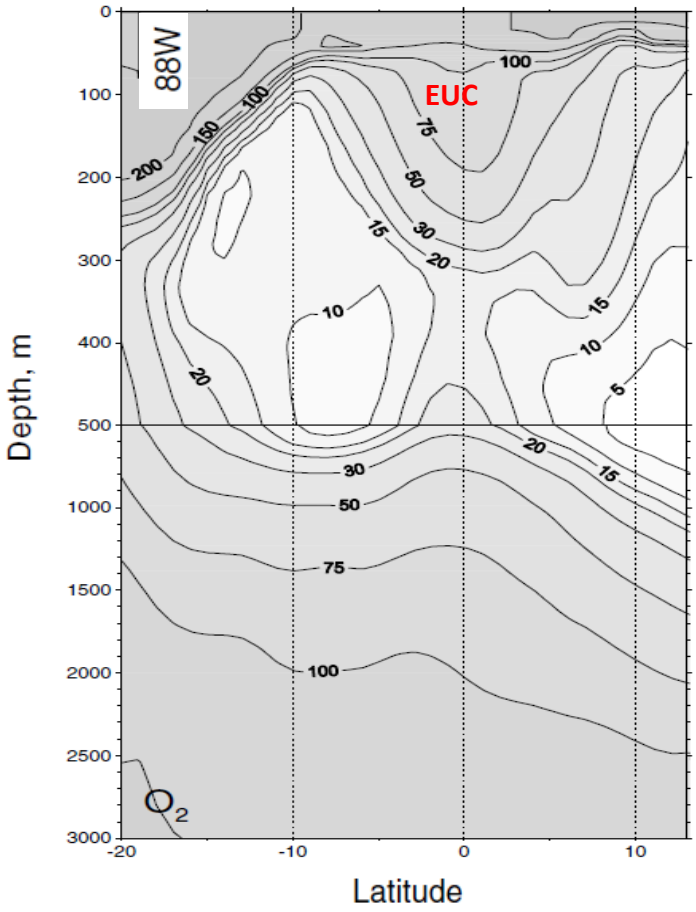

Figura 4. Sección meridional promedio de oxígeno disuelto (µmol/kg) obtenido mediante datos de CTD y botellas por *Fiedler and Talley* (2006) a los 88°W.

b) Sistema de Corrientes frente a Perú

En la superficie del Sistema de Corrientes frente a Perú dominan dos corrientes que fluyen hacia el ecuador. Acercándonos hacia la costa normalmente se reconoce a la Corriente Costera de Perú (PCC), también conocida como la Corriente de Humboldt, que presenta aguas frías y ricas en nutrientes debido al afloramiento (*Toggweiler et al.*, 1991). La PCC posee una velocidad promedio de 5 a 15 cm/s, siendo su flujo más fuerte hacia el ecuador durante el invierno boreal cuando los vientos hacia el ecuador alcanzan su máximo, transportando agua más frías y saladas hacia el norte alimentando parte de la lengua ecuatorial fría (*Strub et al*., 1998). También observamos a la Corriente Oceánica de Perú (POC), más oceánica y con 700 metros de profundidad, localizada entre los 1000-1500 km de la costa, la cual cambia de dirección hacia el oeste alrededor de los 15ºS-20ºS (*Wyrtki*, 1967).

En la zona subsuperficial, fluye la Corriente Sub-superficial Peruana-Chilena (PCUC) con dirección al Polo Sur (*Brockmann et al*., 1980). Su extensión, aproximadamente hasta los 48ºS, ha sido calculada usando velocidades geostróficas y diagramas T-S por *Silva and Neshyba* (1979). Sus aguas son reconocidas por ser saladas, poseer una alto contenido de nutrientes y bajas concentraciones de oxigeno (*Strub et al.*, 1998). Por otro lado, sus aguas son consideradas como la principal fuente del afloramiento costero frente a Perú (*Huyer et al.*, 1987). Sin embargo, estudios como el de *Toggweiler et al*. (1991 sugieren que esta hipótesis del origen de las aguas afloradas no debe ser tomada como una verdad absoluta. La PCUC presenta velocidades entre los 0.1 a 0.5 m/s,

su núcleo máximo de velocidad se localiza entre los 100 y 300 m de profundidad con un ancho de 30 km aproximadamente y se encuentra atrapada por la pendiente de la topografía a lo largo de la costa peruana-chilena (*Brink et al*., 1983). Se ha observado con datos de altimetría de satélite que la PCUC posee mayores velocidades durante la primavera austral y las menores durante el otoño (*Strub et al.*, 1998).

Existen diversas fuentes que alimentan a la PCUC, un 30% de las cuales corresponde a las corrientes subsuperficiales ecuatoriales, siendo la principal fuente las Contracorrientes Subsuperficiales del Sur (SSCCs) y no la Corriente Sub-superficial Ecuatorial (EUC) (*Montes et al.*, 2010). Más oceánica que la PCUC y menos conocida, se ubica la Contracorriente Peruana-Chilena (PCCC), la cual también fluye hacia el Polo Sur y posee aguas cálidas. Se encuentra a una distancia de entre los 100 y 300 km de la costa (Strub et al., 1998), y tiene una extensión desde los 5°S hasta los 35°S (*Strub et al*., 1995).

II.3.2.2. La ZMO del NECH: una de las más intensas del Mundo.

La ZMO localizada en el Océano Pacífico Sudeste (SEP) es una de las zonas con menores concentraciones de oxígeno en el océano abierto. El núcleo de la ZMO se distribuye aproximadamente entre los 50 a 500 metros de profundidad y la oxiclina presente en esta zona se localiza aproximadamente a los 30 a 50 metros de profundidad (*Graco et al.*, 2007), siendo una de las más someras e intensas del océano (*Helly and Levin*, 2004). La ZMO del SEP (Figura 5) también posee una

gran extensión, que abarca desde el Ecuador hasta los 37°S aproximadamente (*Fuenzalida et al*., 2009).

Existen diversos procesos que intervienen en la formación de la ZMO en el NECH, entre los cuales se encuentran:

- Falta de ventilación, aislamiento de la atmósfera y desoxigenación de las fuentes de agua. La presencia de una permanente picnoclina y somera capa de mezcla mantiene aisladas las aguas debajo de la termoclina de la atmosfera. Además *Luyten et al*. (1983) menciona que existen "zonas de sombra", localizadas al lado Este del Océano Tropical Ecuatorial, donde la termoclina no es ventilada por masas de agua subtropicales ricas en oxígeno disuelto, siendo estas áreas donde la ZMO se desarrolla.

  Por otro lado, las corrientes ecuatoriales (principal fuente de oxígeno en subsuperficie en esta área) van perdiendo oxígeno a medida que cruzan la zona ecuatorial (*Stramma et al*., 2010a).

- Un largo tiempo de residencia de sus aguas con reducción acumulativa de oxígeno. El Pacifico Este es un área donde generalmente los vientos son débiles y no es penetrada por el giro subtropical (*Pennington et al*., 2006). Como resultado, el tiempo de residencia es largo y el consumo de oxigeno acumulativo. *Czeschel et al*. (2011) demuestra que las aguas dentro del núcleo de la ZMO frente a Perú recirculan ahí por varios meses.

- La remineralización de la materia orgánica. Cuando se da este proceso y existe poca ventilación, las concentraciones de oxígeno pueden llegar hasta cero. El NECH posee una alta productividad primaria en la capa eufótica, la cual provee una gran cantidad de materia orgánica (MO) que es exportada a las capas subsuperficiales, provocando un mayor consumo de oxígeno durante el proceso de remineralización.

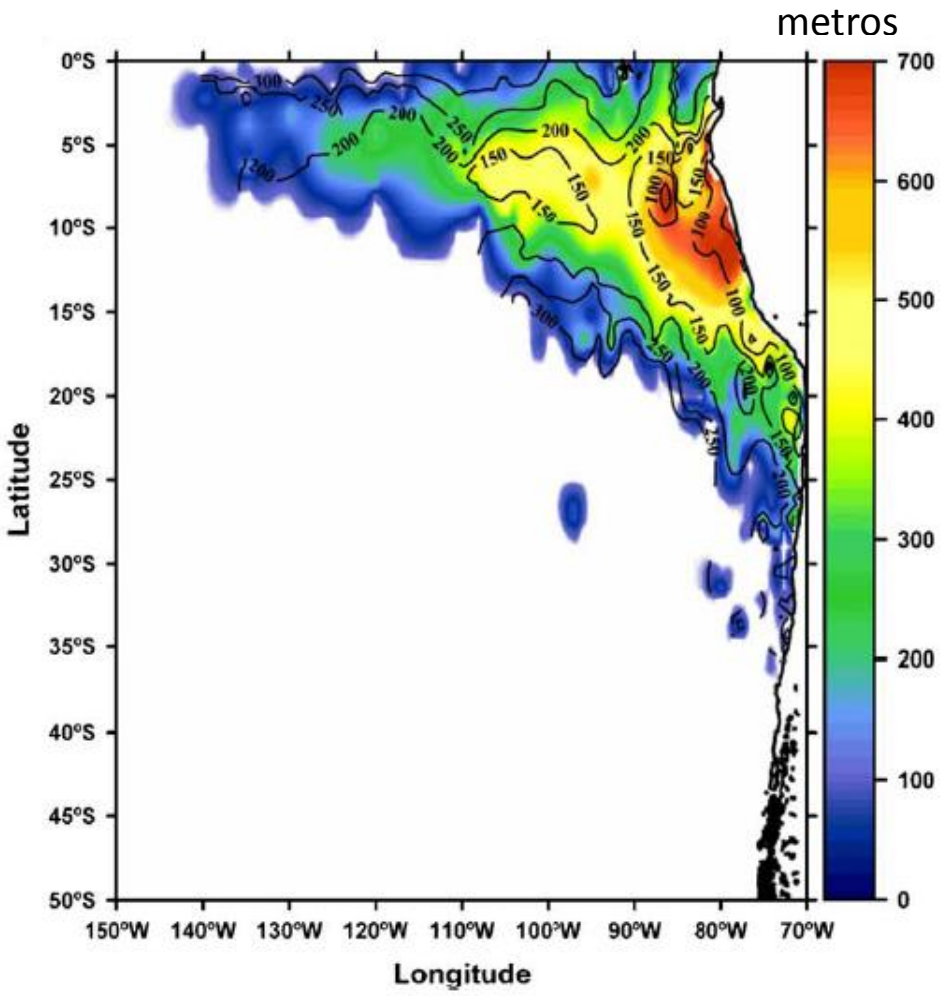

Figura 5. Espesor de la ZMO (<20 µmol/kg) presente en el Océano Pacífico sudeste (SEP) en colores y la profundidad de la ZMO en líneas negras, basadas en la observaciones de CTDO (*Fuenzalida et al*., 2009).

II.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El oxígeno es un indicador de cambios físicos y biológicos en el océano, por lo que entender los procesos que influyen en su concentración nos permitirá entender mejor el rol del océano en el clima (*Karstensen et al*., 2008), ya que desde el

océano se emiten hacia la atmosfera gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (N_2O). A su vez, el oxígeno es uno de los principales elementos que influyen en el área de distribución de los macroorganismos. Por ello, la expansión de la ZMO podría reducir su hábitat debido a condiciones de stress y muerte (*Díaz and Rosenberg*, 2008). Existen evidencias también de que los cambios a escala decadal entre la sardina y anchoveta se deberían a cambios en la profundidad de la OMZ (*Bertrand et al*., 2011).

El estudio analiza la sensibilidad de la ZMO a diferentes intensidades de circulación ecuatorial, siendo el cálculo de los flujos de oxígeno de las corrientes ecuatoriales subsuperficiales uno de los principales objetivos. La escasez de datos observados (concentraciones de O_2 y corrientes) dificulta el cálculo de los flujos, por lo que el uso de modelos oceánicos de escala regional permite entender y simular la dinámica de los principales procesos, físicos y biológicos, que intervienen en la formación de la ZMO. Estos modelos también permiten formulación de distintos escenarios de cambio climático para el futuro.

Los Modelos Oceánicos de Circulación General (MOCG) simulan la dinámica del océano a escala global y que sirven para definir las condiciones de frontera en los modelos regionales. Existen diversos MOCG y entre ellos se observan algunas diferencias significativas. En nuestro estudio se utilizarán dos MOCG: MERCATOR[3] (*Garric et al*., 2008) y SODA[4] (*Carton and Giese*, 2008), debido a que presentan diferencias importantes en la circulación ecuatorial (Figura 6). Estos dos modelos nos permitirán analizar el comportamiento de la ZMO frente a

[3] MERCATOR: Un modelo Oceánico de Circulación General Francés que provee información en tiempo real y diferido sobre las condiciones físicas del océano. Más información en el sitio web http://www.mercator-ocean.fr/.

[4] SODA: es el acrónimo de "Sinple Ocean Data Assimilation". Modelo Oceánico de Circulación General donde se utiliza asimilación de datos. La asimilación de datos consiste en corregir los datos obtenidos del modelo con observaciones directas.

intensidades distintas de la EUC y los Jets. Si observamos la Figura 5, se puede distinguir la EUC en los dos modelos a los 0°S, mostrando diferencias significativas en su distribución e intensidad. Estas diferencias podrían influir significativamente en la distribución y concentración de la ZMO del Pacífico Este.

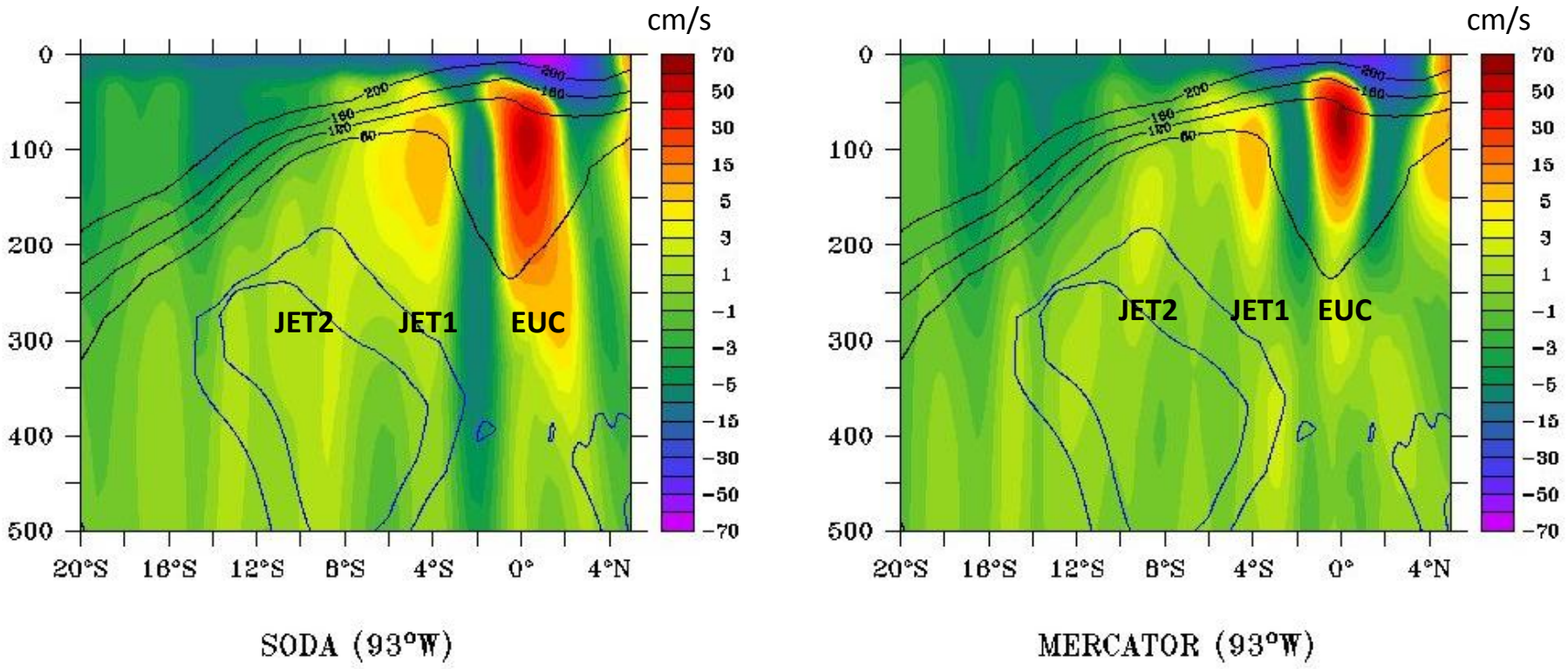

Figura 6. Promedio anual de la velocidad zonal de la EUC observada en SODA (izquierda) y MERCATOR (derecha) (en colores m/s), y las concentraciones de oxígeno en µmol O_2/kg (líneas sólidas) extraídas del World Ocean Atlas (WOA) a los 93°W.

II.5. OBJETIVOS

II.5.1 GENERAL:

- Describir el impacto de la circulación ecuatorial en la estructura espacial e intensidad de la ZMO del Pacifico Tropical Este, mediante el uso del modelo acoplado ROMS/PISCES utilizando diferentes condiciones de frontera obtenidas de los modelos MERCATOR y SODA.

II.5.2. ESPECÍFICOS:

- Configurar el modelo ROMS/PISCES para simular la dinámica física y biogeoquímica del Norte del Ecosistema de la Corriente de Humboldt con diferentes condiciones de frontera obtenidas de MERCATOR y SODA (simulaciones RPMercator y RPSoda, respectivamente).
- Validar las configuraciones RPMercator y RPSoda mediante bases de datos satelitales (e.g., SeaWIFS[5] para clorofila superficial y Pathfinder[6] para temperatura superficial) e *in situ* (IMARPE[7] y CARS[8]) a fin de estimar el realismo de ambas simulaciones.

---

[5] SeaWIFS: Acrónimo de Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor. Proyecto que proporciona datos cuantitativos de las propiedades bio-ópticos globales del océano permitiendo identificar tipos y concentraciones superficiales de fitoplancton.

[6] Pathfinder: Datos satelitales que brindan información de la temperatura superficial del océano y son proporcionados por National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

[7] IMARPE Instituto del Mar del Perú. Organismo Técnico Especializado del Sector Producción, Subsector Pesquería, orientado a la investigación científica, así como al estudio y conocimiento del Mar Peruano y sus recursos.:

[8] CARS: Acrónimo de Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation CSIRO. Climatología de las propiedades del océano (temperatura, salinidad, oxígeno y nutrientes) derivado de una base de datos que contiene mediciones históricas sub-superficiales del océano y perfiles verticales obtenidos en buques y boyas autónomas.

- Aplicar diagnósticos eulerianos a ambas simulaciones, RPSoda y RPMercator, para describir los cambios en la ZMO debidos al uso de diferentes condiciones de circulación en la parte oeste-ecuatorial de la ZMO.

III. METODOLOGÍA

III.1. MODELO FÍSICO ROMS

El modelo regional ROMS (Regional Oceanic Modeling System) es un modelo de circulación oceánica que ha sido diseñado especialmente para simular de manera realista la dinámica de los sistemas regionales. Es una evolución del SCoordinate Rutgers University Model (SCRUM) descrito por *Song and Haidvogel* (1994). ROMS resuelve las ecuaciones primitivas en un sistema en rotación y está basado en la aproximación de Boussinesq[9], el balance de momento vertical hidrostático y satisface la ecuación de continuidad en 3D para un fluido incompresible (*Shchepetkin and McWilliams*, 2005). ROMS es un modelo que tiene a la superficie libre, utiliza coordenadas curvilíneas ortogonales en la dimensión horizontal y coordenadas generalizadas "S" (o coordenadas sigma) que siguen la forma del suelo oceánico en la dimensión vertical. Las coordenadas sigma fueron introducidas por primera vez en modelación atmosférica por Phillips (1957) y desde entonces son una alternativa estándar para la modelación oceánica en zonas donde la topografía es variable.

[9] Aproximación de Boussinesq: Físicamente esta aproximación indica que se tiene conservación del volumen y no de la masa, y que el océano se comporta como un fluido incompresible.

III.2. MODELO BIOGEOQUÍMICO PISCES

El modelo biogeoquímico PISCES (*Pelagic Iteraction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*) simula la productividad biológica marina y describe los ciclos biogeoquímicos de carbono y de los principales nutrientes (P, N, Si, Fe) (*Aumont and Bopp*, 2006) (Figura 7). Este modelo es clasificado dentro de los modelos tipo "*Monod*", asumiendo que el crecimiento del fitoplancton depende de la concentración externa de nutrientes, en oposición a los modelos tipo "*Quota*" en los que el crecimiento depende de la concentración interna (*Jorgensen and Bendoricchio*, 2001). PISCES asume también que la proporción entre los principales nutrientes sigue la constante de Redfield (O:C:N:P ~ 172:122:16:1).

Sin embargo, cuando el contenido en el fitoplancton de silicio, hierro, clorofila, o alguno de ellos, es modelado; asumir proporciones constantes no tiene justificación suficiente debido a que las proporciones pueden variar mucho en la materia orgánica. Por lo tanto PISCES asume un compromiso entre las dos clásicas familias de modelos oceánicos. Las proporciones dentro de la célula de silicio, hierro y clorofila son predichas basadas en la concentración interna de los nutrientes limitantes como en los modelos matemáticos "*Quota*". En otra mano, la tasa de crecimiento del fitoplancton también va a depender de la concentración externa como en los modelos matemáticos "*Monod*".

PISCES posee 24 variables de estado (Tabla 1). Se modelan cinco nutrientes limitantes para el crecimiento del fitoplancton: nitrato, amonio, silicato, hierro y

fosfato. Es importante mencionar que el nitrato y el amonio no son nutrientes independientes en PISCES sino que se encuentra relacionados por la constante de Redfield (*Aumont*, 2005). El modelo presenta determinados compartimientos que al ser activados en su configuración nos brindan información de la influencia de la advección y procesos que contribuyen en la concentración de ciertas variables modeladas (oxígeno, hierro, nutrientes)

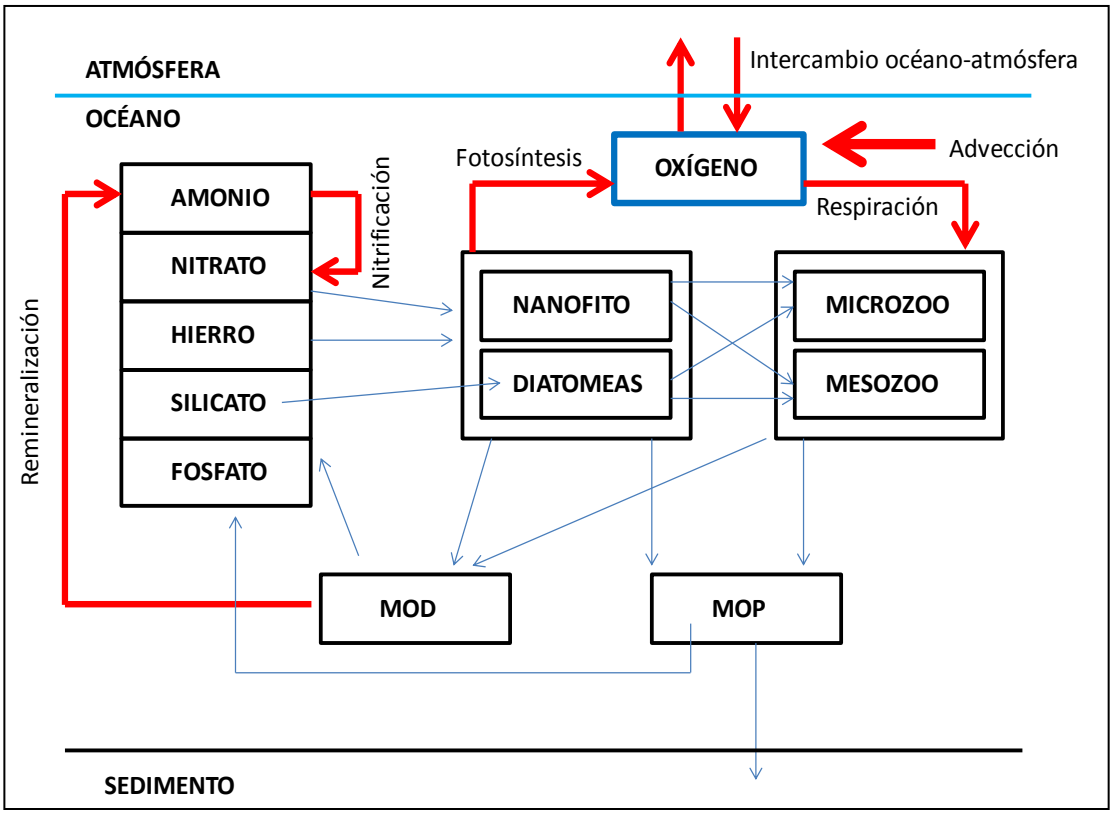

Figura 7. Arquitectura de PISCES, con énfasis en los procesos que intervienen en la concentración del oxígeno disuelto (flechas rojas), modificado de *Aumont and Bopp* (2006).

Tabla 1. Variables de estado del modelo biogeoquímico PISCES.

PISCES	
Tipo de componente	**Variable de estado**
Disuelto/Nutriente	Carbono inorgánico disuelto (DIC)
	Alcalinidad
	Oxigeno (O_2)
	Fosfato (PO_4)
	Silicato (SiO_3)
	Hierro (Fe)
	Carbono 13 inorgánico disuelto ($DI^{13}C$)
	Oxigeno 18 ($^{18}O_2$)
Fitoplancton	Nanoplancton (NAN)
	Diatomeas (DIA)
	Hierro en NAN
	Hierro en DIA
	Clorofila en NAN
	Clorofila en DIA
	Sílice en DIA
Zooplancton	Microzooplancton
	Mesozooplancton
Partículas muertas/Detritus	Carbono orgánico particulado pequeño (POCs)
	Carbono orgánico particulado grande (POCl)
	Carbono orgánico disuelto (DOC)
	Carbonato ($CaCO_3$)
	Sílice particulado
	Hierro en POCs
	Hierro en POCl

III.2.1 OXÍGENO EN PISCES

Resplandy et al. (2012) describen la evolución del oxígeno dentro del modelo acoplado como:

$$\partial_t O_2 = \underbrace{\left(\frac{\partial O_2}{\partial t}\right)_{\text{Dyn}}}_{\text{Transporte Dinámico}} + \underbrace{\left(\frac{\partial O_2}{\partial t}\right)_{\text{Bio}}}_{\text{Fuentes y Sumideros Biológicos}} + J_{\text{flux}} \qquad \text{(Ec.1)}$$

Donde $(\partial O_2/\partial_t)_{Bio}$ denota todos los procesos biológicos que afectan las concentraciones de oxígeno y $(\partial O_2/\partial_t)_{Dyn}$ denota todos los procesos que afectan su transporte dinámico. Por último J_{flux} es la contribución del flujo aire-océano.

El transporte dinámico en el modelo es calculado como:

$$\left(\frac{\partial O_2}{\partial t}\right)_{\text{Dyn}} = -\underbrace{u_{\text{H}} \cdot \nabla_H O_2}_{\text{Advección lateral}} - \underbrace{w \cdot \nabla_Z O_2}_{\text{Advección vertical}} + \underbrace{\frac{\partial K_z \partial O_2}{\partial z^2}}_{\text{Mezcla vertical}} \qquad \text{(Ec.2)}$$

Dentro del modelo PISCES, el oxígeno disuelto es modelado con la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\partial O_2}{\partial t}\right)_{\text{Bio}} = \underbrace{(R^1_{o:c} + R^2_{o:c})(\mu^P_{NO_3} P + \mu^D_{NO_3} D)}_{\text{Produción Nueva}} + \underbrace{R^1_{o:c}(\mu^P_{NH_4} P + \mu^D_{NH_4} D)}_{\text{Producción Regenerada}} - \underbrace{\lambda^*_{DOC} f(O_2)\text{DOC}}_{\text{Remineralización}} - \underbrace{G^Z Z - G^M M}_{\text{Respiración}} - \underbrace{R^2_{o:c}\text{Nitrif}}_{\text{Nitrificación}}. \quad \text{(Ec.3)}$$

Donde,

P = Nanofitoplancton en mol C l^{-1}.

D = Diatomeas mol C l^{-1}.

DOC = Carbono Organico Disuelto mol C l^{-1}.

Z = Microzooplancton mol C l^{-1}.

M = Mezooplancton mol C l^{-1}.

G^Z = Pastoreo del microzzoplancton en d^{-1}.

G^M = Pastoreo del mezooplancton d^{-1}.

$R^1_{O/C}$ = Proporción de cambio del oxígeno relativo al carbono cuando el amonio es convertido a materia orgánica (140/122).

$R^2_{O/C}$ = Proporción de consumo de oxígeno relativo al carbono durante la nitrificación (32/122).

μ^P_{nh4} = Producción regenerada por el nanofitoplancton.

μ^D_{nh4} = Producción regenerada por las diatomeas.

μ^P_{no3} = Producción nueva por el nanofitoplancton.

μ^D_{no3} = Producción nueva por las diatomeas.

λ^*_{DOC} = Tasa de remineralizacion del carbono orgánico disuelto en d^{-1}.

El oxígeno es producido durante la fotosíntesis realizada por el nanofitoplancton y diatomeas; y consumido durante la remineralización de la materia orgánica disuelta, la respiración del zooplancton (pequeño y grande) y la nitrificación. El término de *Nitrif* representa la conversión de amonio a nitrato y se asume que es fotoinhibido y reducido en aguas subóxicas, además se encuentra en función de la concentración de amonio y oxígeno y la radiación fotosintéticamente disponible. Un proceso clave para modelar las concentraciones del oxígeno en el modelo es la remineralización del carbono orgánico disuelto (DOC), este proceso puede ser óxico o anóxico dependiendo de la concentración de oxígeno en el medio. La concentración del DOC es altamente dependiente de la distribución en la columna de agua de las partículas del detritus. Finalmente J_{flux} es el flujo de O_2 del aire a océano (F_{O2}) dividido por la profundidad de la capa superficial donde:

$$F_{O_2} = k_w(\alpha O_{2\,atm} - O_2) \qquad \text{(Ec. 4)}$$

Donde k_w es la velocidad de transferencia, (αO_{2atm}-O_2) es la diferencia entre la presión parcial de O_2 entre el aire y la superficie del agua, y α la solubilidad del O_2 en el agua.

III.3. CONFIGURACIÓN DEL MODELO ACOPLADO ROMS/PISCES

El modelo acoplado ROMS/PISCES necesita de forzantes atmosféricos, condiciones de frontera y condiciones iniciales. Los forzantes son las variables atmosféricas que forzarán al modelo ROMS/PISCES en superficie para simular la dinámica del océano, y las condiciones de frontera son los valores de nuestras variables físicas y biogeoquímicas en los bordes de nuestro volumen de océano a modelar. Las condiciones iniciales permitirán al modelo iniciar los cálculos con valores coherentes, lo cual ayudará en el tiempo de estabilización del modelo. Dos simulaciones fueron realizadas para conocer el impacto de diferentes condiciones de circulación ecuatorial sobre la ZMO:

- Simulación **RPMercator**: ROMS/PISCES teniendo como frontera física MERCATOR.
- Simulación **RPSoda**: ROMS/PISCES teniendo como frontera física SODA.

Los parámetros biogeoquímicos utilizados en la configuración del modelo para las simulaciones RPMercator y RPSoda fueron las mismas que en *Echevin et al*. (2008) y *Albert et al*. (2010) resumidas en la tabla 2.

Tabla 2. Tabla de los parámetros utilizados en el modelo ROMS-PISCES.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR
FITOPLANCTON		
α	Pendiente inicial de la curva PI	4
δ	Excreción de DOC	0,05
K_{po4}	Constante de semi-saturación para fosfato	1E-7(*); 5E-7(**)
K_{nh4}	Constante de semi-saturación para amonio	1E-7(*); 5E-7(**)
K_{no3}	Constante de semi-saturación para nitrato	2E-6(*); 10E-6(**)
K^{D}_{si}	Constante de semi-saturación para silicato	1,5E-6(*); 4E-6(**)
K^{min}_{Fe}	Constante mínima de semi-saturación para hierro	0,01E-9(*); 0,1E-9(**)
m_p	Tasa de mortalidad del fitoplancton	0,01(*); 0,01(**)
w_p	Mortalidad cuadrática del fitoplancton	0,001
w^{max}_{p}	Mortalidad cuadrática máxima del fitoplancton	0,02
K_p	Constante de semi-saturación para mortalidad	1E-7
$\theta_{chl,\,max}$	Proporción máxima de Chl/C del fitoplancton	0,033(*); 0,05(**)
$\theta_{fe,\,max}$	Proporción máxima de Fe/C del fitoplancton	10E-6(*); 10E-6(**)
K^{2}_{si}	Constante de semi-saturación para el incremento de Si/C	4E-6
ZOOPLANCTON		
ϵ	Eficiencia de crecimiento del zooplancton	0,33(+); 0,33(++)
σ	Producción de pellets fecales	0,6(+); 0,6(++)
G	Tasa máxima de pastoreo	4
K_G	Constante de semi-saturación para el	20E-6

	pastoreo	
p^{Z}_{P}	Preferencia por nanofitoplancton	0,5
p^{Z}_{D}	Preferencia por diatomeas	0,5
p^{Z}_{POC}	Preferencia por POC_s	0,0
γ_z	Preferencia por microzooplancton	1
m^{M}	Mortalidad de mesozooplancton	0,05
R	Tasa de excreción	0,03(+); 0,005(++)
K	Constante de semi-saturación para la excreción	1E-7
$(Fe/C)_{ZOO}$	Proporcion de Fe/C del zooplancton	3E-6
MATERIA ORGANICA		
λ_{DOC}	Tasa de remineralizacion del DOC	0,3
K^{bac}_{DOC}	Constante de semi-saturacion del DOC	1E-6
λ_{POC}	Tasa de degradación del POC	0,025
w_{min}	Mínima velocidad de hundimiento del POC	3(°); 50(°°)
λ_{Fe}	Tasa de recuperación del hierro	0,005
λ_{BSi}	Tasa de disolución del Silicato biogénico	0,015
λ_{NH4}	Máxima tasa de nitrificación	0,05
O_2^{min}	Constante de semi-saturación para la denitrificación	1E-6

(*) nanofitoplancton, (**) diatomeas, (+) microzooplancton, (++) mesozooplancton, (°) pequeño, (°°) grande

Las dos simulaciones realizadas con el modelo biogeoquímico ROMS/PISCES fueron configuradas bajo condiciones climatológicas teniendo una resolución horizontal de 1/6° (~18 km), con 32 niveles verticales sigma. Se diseñó una grilla rectangular que se extiende de los 5°N – 20°S latitudinalmente y de los 93° W a 70° W longitudinalmente, utilizándose para la topografía la base de datos de GEBCO a

una resolución de ~1 km (http://www.gebco.net) (Figura 8).

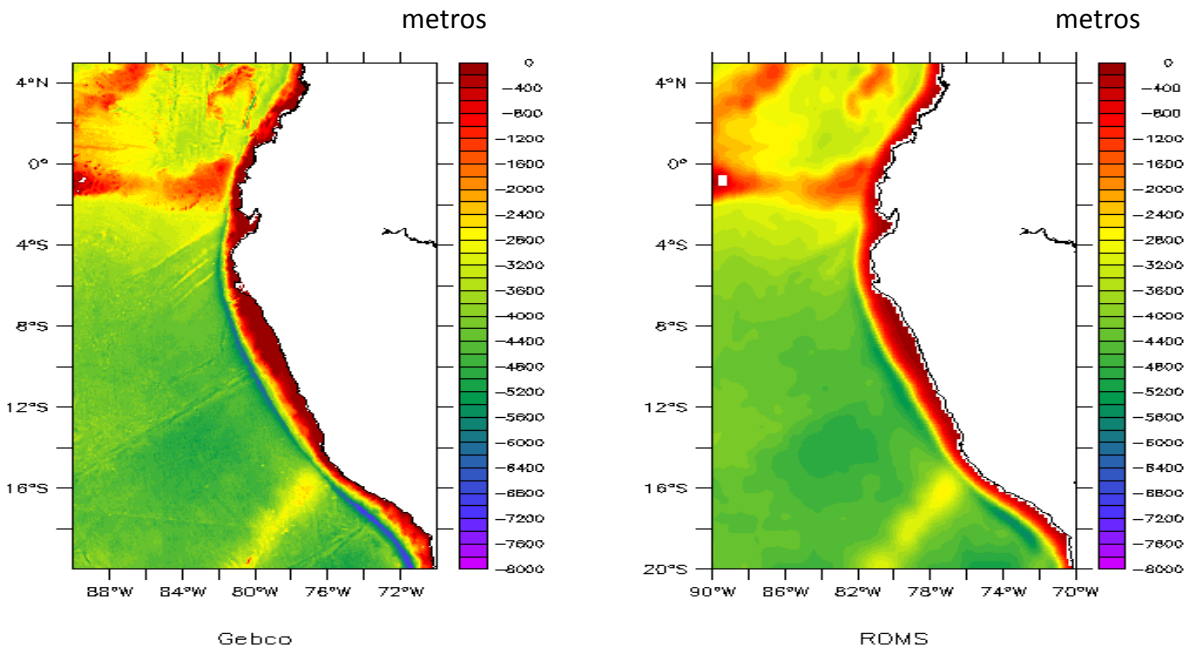

Figura 8. Topografía de GEBCO (izquierda) y de ROMS (derecha) en el dominio modelizado, mostrando que ROMS posee una topografía suavizada.

El pre-procesamiento y post-procesamiento para el correcto funcionamiento del modelo fueron realizados utilizando el paquete computacional desarrollado para ROMS por *Penven et al*.(2008).

III.3.1. CONDICIONES DE FRONTERA

Para nuestras 2 simulaciones se extrajeron las variables físicas (temperatura, salinidad, corrientes) y las biogeoquímicas (clorofila, oxígeno y nutrientes) necesarias

para las condiciones de frontera del modelo utilizando la parametrización descrita por *Marchesiello et al*. (2001):

Frontera Fisica. Se utilizó una frontera física distinta para cada simulación. La simulación RPSoda tuvo como frontera física la climatología de las variables físicas del modelo SODA (*Carton and Giese* 2008) a una resolución de 1/2° entre los años 2000-2008. Para la simulación RPMercator se utilizó como frontera la climatología de las variables físicas del modelo MERCATOR (*Garric et al*., 2008) a una resolución de 1/2° y entre los años 2000-2008. Las variables físicas extraídas de estas dos modelos fueron: temperatura, salinidad, velocidad de la corriente (componente u, v, w).

Frontera Biogeoquímica. Se utilizó la misma frontera biogeoquímica para ambas simulaciones. La base de datos elegida fue la climatología del World Ocean Atlas (WOA) (*Conkright et al*., 2002) a una resolución de 1°. Las variables biogeoquimicas utilizadas fueron: carbono orgánico disuelto, carbono inorgánico disuelto, oxígeno, fosfato, nitrato y silicato.

III.3.2. FORZANTES ATMOSFÉRICOS

Para los flujos de calor, los forzantes atmosféricos utilizados proviene de datos del *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Figura 9) obtenidos del ECMWF data server (http://www.ecmwf.int), a una resolución de 1/6°.

Se obtuvo una climatología entre los años 2000 al 2008 de las variables atmosféricas: temperatura superficial del aire, humedad relativa, tasa de precipitación y la radiación.

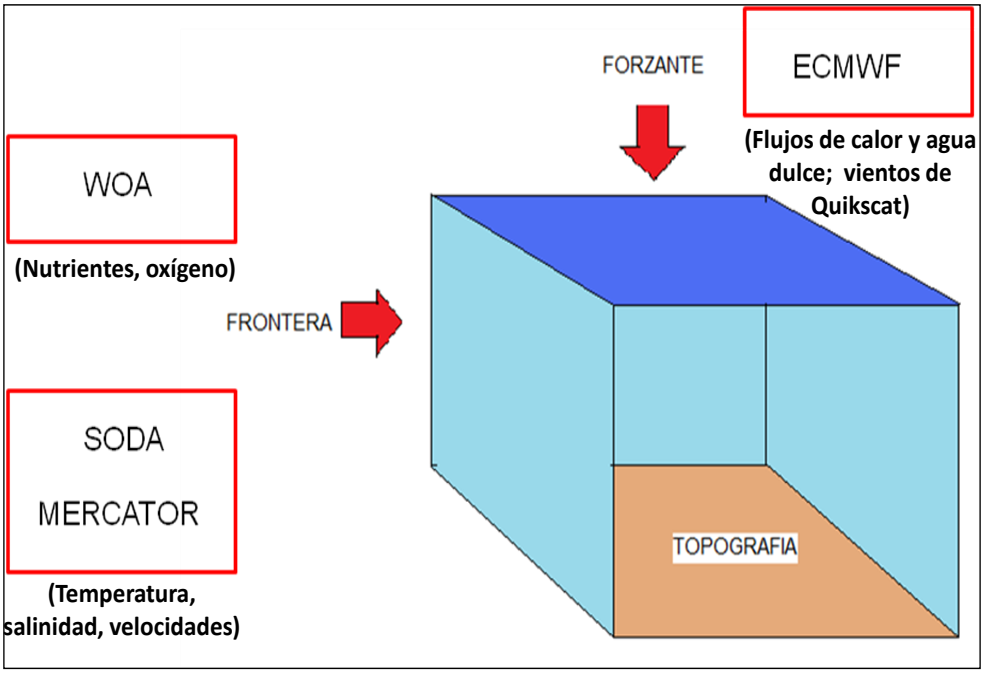

Figura 9. Forzantes superficiales y condiciones de frontera (físicas y bioquímicas) dentro del modelo ROMS/PISCES utilizadas en el presente estudio.

Para los campos de vientos se utilizó una climatología de los vientos satelitales de Quikscat (*Liu et al*., 1998) a una resolución de 1/2° entre los 2000 al 2008. Dentro de la configuración del modelo se utilizó la formulación "bulk" para los flujos de calor; donde se toma en cuenta la temperatura superficial del mar y el aire para calcular la tensión del viento, lo cual podría introducir una variación espacial de la tensión del

viento y el rotacional. Pero para el modelo PISCES también fue necesario tomar en cuenta como datos de entrada el polvo de hierro atmosférico, el cual fue obtenido de los resultados del modelo de *Tegen and Fung* (1995).

III.3.3. CONDICIONES INICIALES Y ESTABILIZACIÓN DEL MODELO

Las condiciones iniciales fueron obtenidas de las climatologías de SODA, MERCATOR y WOA, que se utilizaron como condiciones de fronteras grilladas a la resolución de las simulaciones.

El criterio para calcular la climatología de nuestras simulaciones consistió en promediar los años posteriores al "*spin-up*", es decir, luego que las variables tanto físicas como biogeoquímicas alcanzaron la estabilidad. Cada simulación fue realizada bajo condiciones climatológicas (atmósfera y fronteras) por 16 años, de los cuales solo se promediaron los últimos 7 años (año 10 al 16). Las variables físicas alcanzaron la estabilidad luego de 3 años en ambas soluciones, mientras que las variables biogeoquímicas lo hicieron en 10 años (Figura 10).

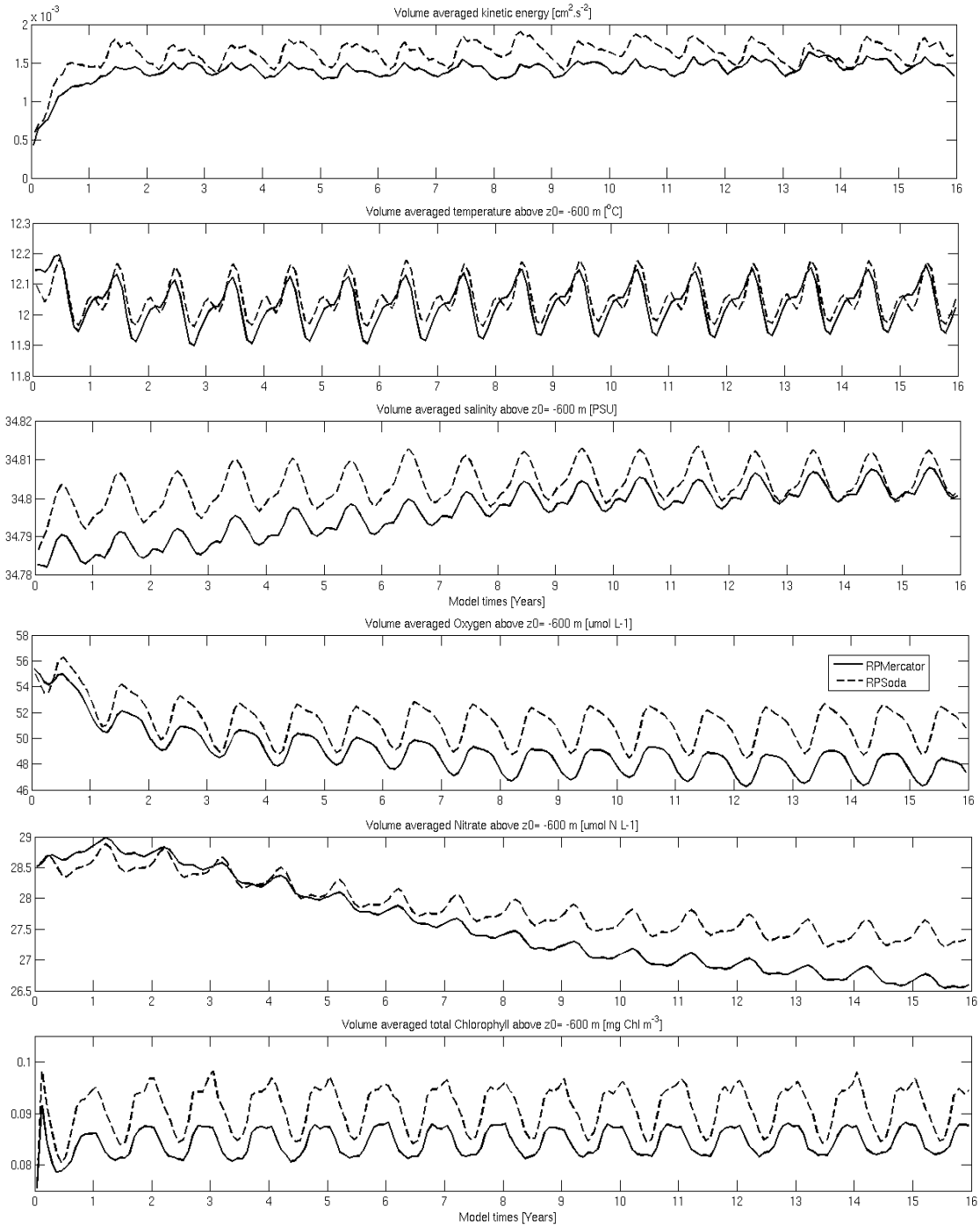

Figura 10. Evolución temporal de las principales variables físicas (energía cinética, temperatura, salinidad) y biogeoquímicas (oxígeno, nitratos, clorofila) del modelo ROMS/PISCES promediadas en el área estudiada y de los 0-600m de profundidad.

III.4. BASE DE DATOS PARA VALIDACIÓN DEL MODELO

Para comprobar que las configuraciones pueden reproducir los patrones de distribución de las principales variables físicas (e.g. temperatura y salinidad) y biogeoquímicas (e.g. clorofila, nutrientes, oxígeno), se utilizaron climatologías de las siguientes bases de datos:

Física: climatología de la base de datos satelitales de temperatura superficial del mar del producto *Pathfinder* (*Casey et al*., 2010) entre los años 2000-2008 a una resolución de 4 km y la climatología de CSIRO Atlas of Regional Seas "CARS 2009" (*Ridgway et al*., 2002) a una resolución de 1/2° para los datos de salinidad. Hay que tener en cuenta que en los datos de CARS existe una señal anual y semi-anual modeladas sinusoidalmente, generando un suavizamiento en la estacionalidad de sus variables lo cual podría generar pequeñas diferencias con las variable modeladas en PISCES. La estacionalidad de las variables en CARS posee la siguiente forma:

$$X(d) = mean + an_cos * cos(t(d)) + an_sen * sen(t(d)) + sa_cos * cos(2*t(d)) + sa_sen * sen(2*t(d)) \quad \text{(Ec. 5)}$$

Donde, *t(d)=2*pi*d/366*, siendo "*d*" es el día del año, "*mean*" es el valor promedio, "*an_cos*" es el coseno del ciclo anual, "*an_sen*" es el seno del ciclo anual, "*sa_cos*" es el coseno del ciclo semi-anual y "*sa_sen*" es el seno del ciclo semi-anual.

Química: CARS, ya que esta base de datos no solo posee datos físicos, sino también datos químicos como: oxígeno, nitratos, fosfatos y silicatos. También se utilizó la climatología de las variables disponibles de la base de datos *in situ* (e.g. oxígeno, nitratos) perteneciente al IMARPE, tomados durante cruceros de evaluación oceanográfica, la cual se encuentran a 1/10° y el ciclo anual y semi-anual son modelados (*Chaigneau et al*., en prep.)

Biológica: Se utilizó la climatología de la base de datos del *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWIFS) (*Behrenfeld and Falkowski*, 1997) a una resolución de 9 km entre los años 1997-2008 para validar la clorofila superficial simulada y también la climatología del IMARPE para validar la estructura vertical de la clorofila.

III.6. CÁLCULO DE LOS FLUJOS DE OXÍGENO

El flujo de oxígeno fue calculado para analizar su influencia sobre la ZMO y ver su sensibilidad frente a las diferentes condiciones de corrientes ecuatoriales. Las corrientes ecuatoriales fueron definidas por la isolínea de velocidad zonal de 0.5 m/s y el flujo de oxígeno para la corriente ecuatorial a una determinada longitud quedó explicado como:

$$\varphi X = \int_{z=50}^{z=400} \int_{y=a}^{y=b} u(> 0.5).O2\, dydz \quad \text{(Ec.6)}$$

Donde,

u(>0.5)	=	Velocidad zonal mayor a 0.5 m/s en la longitud X
O2	=	Oxígeno disuelto en la longitud X
z	=	profundidad
a y *b*	=	Latitudes que delimitan las corrientes ecuatoriales

III.7. CÁLCULO DEL BALANCE DE OXÍGENO

Para el cálculo del balance de oxígeno se tomó un volumen dentro de la ZMO para cada zona: la ecuatorial delimitada de los 4ºN-4ºS, 86ºW-76ºW y de los 250 a 400 metros de profundidad y la zona frente a Perú delimitada de los 6ºS-14ºS, 86ºW-76ºW y de los 200 a 400 metros de profundidad (Figura 11). Se analizó cada término de la ecuación de oxígeno, tanto los términos físicos (advección y mezcla) como los términos biológicos. No se tomó en cuenta el intercambio aire-océano por la profundidad de la ZMO, quedando la ecuación N°1 de la forma:

$$\partial_t O_2 = -\partial_x(uO_2) - \partial_y(vO_2) - \partial_z(wO_2) + \partial_z(K_z \partial_z O_2) + Bio \qquad \text{(Ec.7)}$$

Donde,

$-\partial_x(uO_2)$	=	Oxígeno advectado en el componente zonal
$-\partial_y(vO_2)$	=	Oxígeno advectado en el componente meridional
$-\partial_z(wO_2)$	=	Oxígeno advectado en el componente vertical
$\partial_z(K_z \partial_z O_2)$	=	Cambio de oxigeno por mezcla vertical

Bio = Cambio de oxígeno por el efecto de la biología

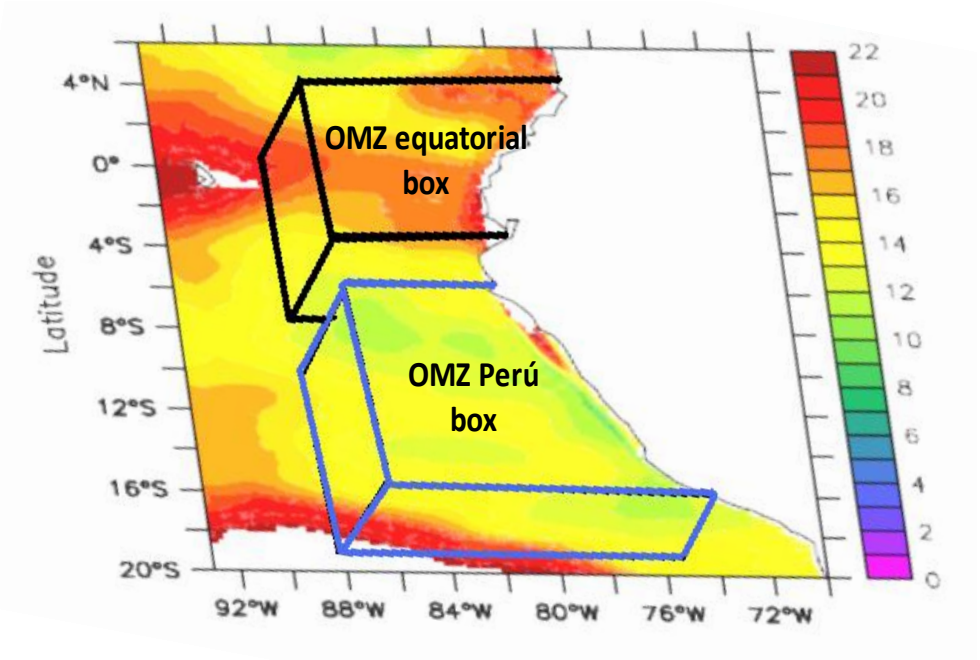

Figura 11. Volúmenes donde se ha calculado el balance de oxígeno. La caja ecuatorial (negra) se encuentra delimitada de los 4ºN-4ºS, 86ºW-76ºW y de los 250 a 400 metros de profundidad; y la caja frente a Perú de los 6ºS-14ºS, 86ºW-76ºW y de los 200 a 400 metros de profundidad. Los colores representan la concentración de O_2 (µmol/kg) dentro de la ZMO de CARS.

La sumatoria de los términos dentro de la caja nos dará el flujo neto de cada término de la ecuación. La obtención de los términos de la ecuación se realizó de forma online activando en la configuración del modelo el compartimento "DIAGNOSTIC_TS_ADV".

III.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Se realizaron análisis estadísticos para la temperatura y la clorofila en el programa R (R Core Team, 2012) para la validación del modelo. Esta validación consistió en calcular la correlación (Ec.8) y el error cuadrático medio (root mean square error – RMSe) (Ec.9) para las series de la variable observada (*O*) y la modelada (*P*) en un mismo punto de grilla:

$$\rho_{O,P} = \frac{cov(O,P)}{\sigma_O \sigma_P} = \frac{E\left((O-\mu_X)(P-\mu_X)\right)}{\sigma_O \sigma_P} \qquad \text{(Ec.8)}$$

Siendo *cov(O,P)* la covarianza entre las series temporales *O* y *P*, y σ_O y σ_P las desviaciones estándar de *O* y *P*. El nivel de significancia para el cálculo de las correlaciones significativas fue de 5%.

$$RMSe = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(O_n - P_n)^2} \qquad \text{(Ec.9)}$$

Donde, O_n son las observaciones y P_n los valores modelados para n=1,2,…, N.

III.9. DELIMITACIÓN DE SECCIONES

Se analizó la estacionalidad frente a Perú de determinadas variables (clorofila,

nutrientes y oxígeno) y de las características principales de la ZMO (profundidad de la oxiclina, espesor y concentración de O_2 dentro de la ZMO) en una zona denominada costera (dentro de los 200 km a la costa y los 4°S a 16°S) y otra denominada oceánica (de los 200 a 400 km de la costa y los 4°S a 16°S) (Figura 12).

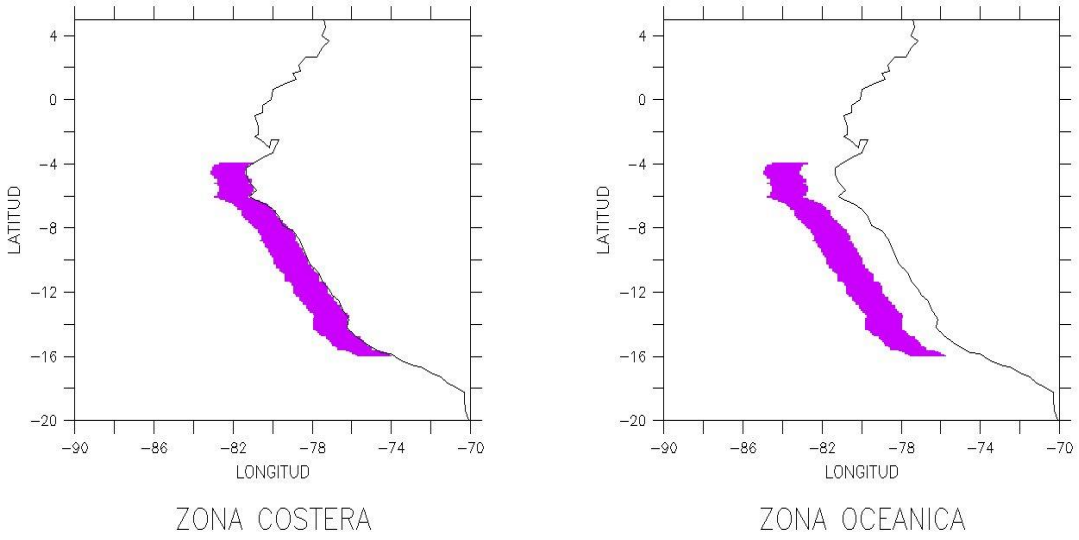

Figura 12. Delimitación de la zona costera y oceánica para nuestro estudio.

IV. RESULTADOS

IV.1. VALIDACIÓN DE LAS SALIDAS DEL MODELO ROMS-PISCES

IV.1.1. TEMPERATURA

IV.1.1.1. Temperatura Superficial del mar

Se interpoló la climatología mensual de la temperatura superficial del mar (TSM) proveniente de *Pathfinder* sobre la grilla del modelo para facilitar la comparación. En promedio anual, las simulaciones representan bien el patrón espacial de la TSM, mostrando temperaturas más frías cerca de la costa debido al afloramiento. Esta señal es más intensa en la simulación RPSoda que en RPMercator, presentando temperaturas de 15ºC a 16ºC dentro de los 50 km de la costa peruana (Figura 13b). En promedio, las dos simulaciones tienden a reproducir una condición más fría en casi todo el área de estudio (Figura 13b, c), teniendo un sesgo negativo en promedio de -0.78ºC y -0.41ºC para RPSoda y RPMercator, respectivamente, comparado al producto *Pathfinder*.

Se estimaron las correlaciones entre las simulaciones y *Pathfinder* para cada punto de grilla, obteniéndose para ambas simulaciones valores de correlación mayores a 0,8 entre los 4ºS-20ºS de latitud, lo cual nos indica que el ciclo anual de la TSM simulada presenta una concordancia con la TSM de los valores satelitales observados frente a Perú. Sin embargo, en la zona ecuatorial (4ºN-4ºS) la correlación es inferior a 0.7

existiendo algunos puntos en los cuales se obtienen valores negativos (figura 14a, b). En cuanto a los valores del RSMe, las dos simulaciones presentan poca precisión para reproducir los valores observados de *Pathfinder* cerca de la costa, en particular RPSoda. Dentro de los 200 km de la costa, RPSoda muestra valores de RMSe mayores a 1.0 a diferencia de RPMercator que muestra valores mucho menores dentro de la zona costera (figura 14c, d).

El modelo también es capaz de reproducir las variaciones estacionales de la TSM correctamente. Los mayores valores de temperatura se observaron durante verano (24.3 y 24.6ºC para RPSoda y RPMercator, respectivamente) mientras que las temperaturas más frías se presentan durante el invierno para las dos simulaciones (20.7 y 21.1ºC para RPSoda y RPMercator respectivamente). Cabe señalar que la simulación RPMercator tiende a sobrestimar un poco, en todas las estaciones, los valores de TSM comparados con *Pathfinder* dentro de los 200 km a la costa y entre los 4ºS – 16ºS, siendo en invierno la estación con un mayor sesgo positivo promedio de +0.4. En contraste, la simulación RPSoda tiende a subestimar la TSM satelital en todas las estaciones (mayor afloramiento) dentro de la franja costera presentando su mayor sesgo negativo promedio en otoño (-1.8) (Figura 43).

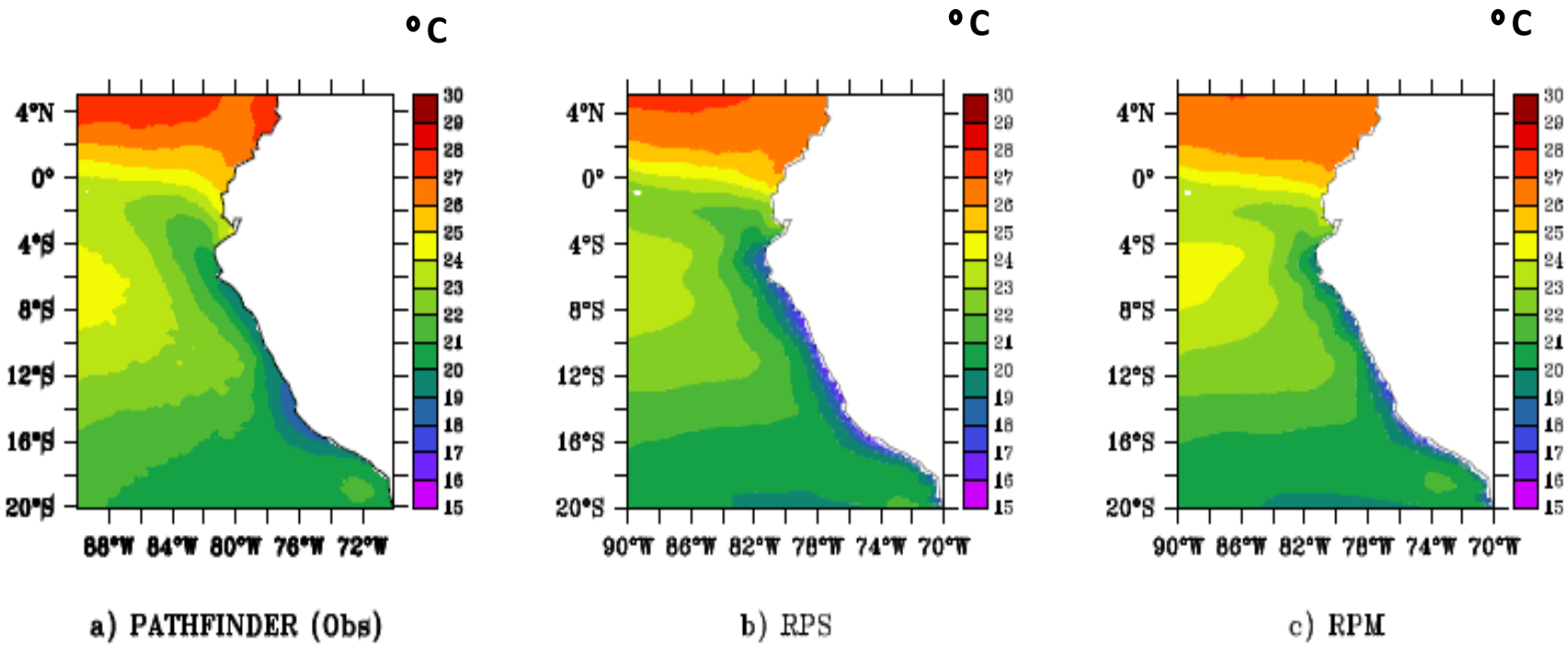

Figura 13. Promedio anual de la temperatura superficial del mar para el área de estudio de pathfinder (a) y las simulaciones RPSoda (b) y RPMercator (c) en ºC.

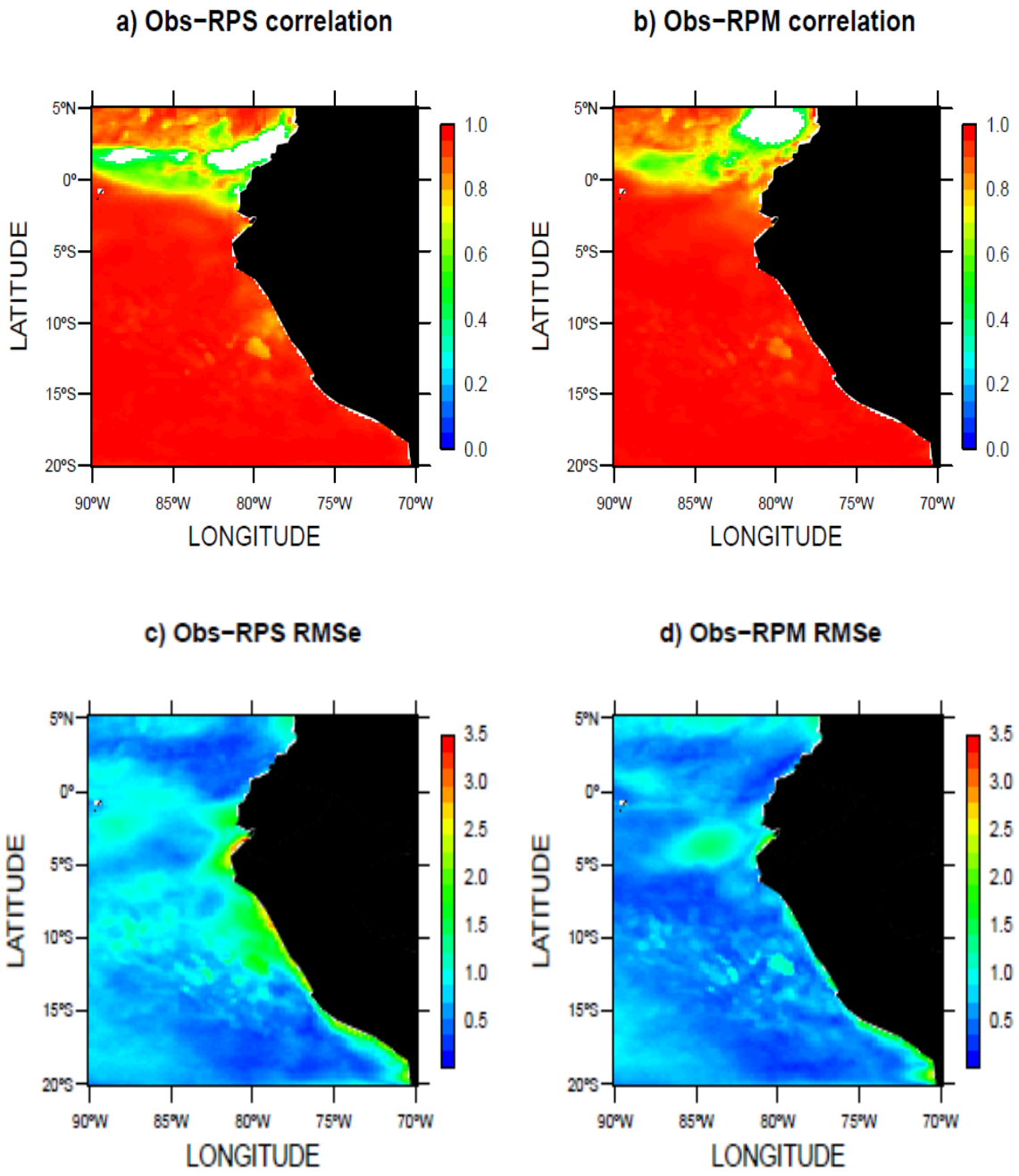

Figura 14. Mapa de correlaciones (en color solo los valores significativos) y RMSe entre *Pathfinder* con RPSoda (a, c) y RPMercator (b, d) respectivamente.

IV.1.1.2. Perfiles Verticales de Temperatura

Para validar la distribución vertical de temperatura se utilizó la base de datos de CARS. Las simulaciones en promedio reproducen los patrones de distribución de la temperatura en la columna de agua. Entre los 4ºS-16ºS, en promedio, se visualiza la somerización de las isotermas cerca de la costa debido al afloramiento costero, siendo esta señal más intensa en la simulación RPSoda. Además, si seguimos la isoterma de 18ºC (como proxy de base de la termoclina), esta se encuentra más profunda en la simulación RPMercator (60 m) que en RPSoda (40 m) entre los 200 a 500 km de la costa (Figura 15). Comparado a CARS, RPSoda representa de forma más realista la estratificación de la temperatura que RPMercator.

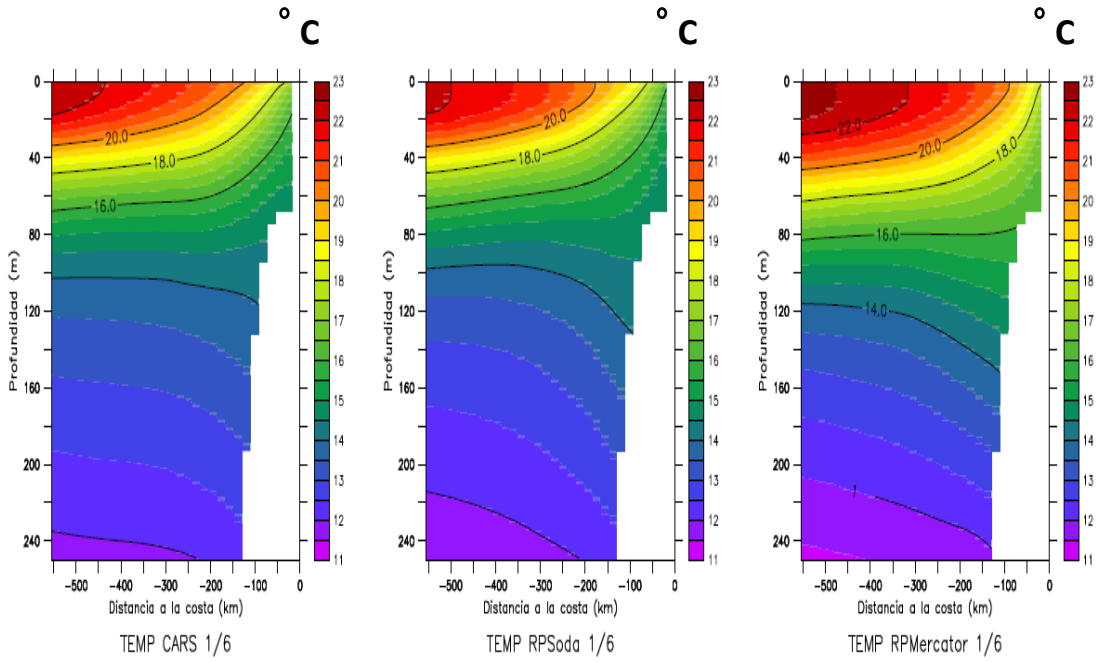

Figura 15. Perfiles verticales de Temperatura promedio (en grados ºC) entre los 4ºS a 16ºS para los datos de CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

IV.1.2. CLOROFILA

IV.1.2.1. Clorofila Superficial

La base de datos de SeaWIFS (climatología de 1997-2008) fue interpolada a 1/6º de resolución para facilitar la comparación con los estimados de clorofila del modelo. De acuerdo a los resultados, las simulaciones tienden a representar bien la variabilidad estacional y la distribución espacial de la clorofila superficial en promedio anual, reproduciendo mayores valores de clorofila a medida que nos acercamos a la costa. Ambas simulaciones sobreestiman los valores de clorofila cerca de la costa y en la zona ecuatorial, reproduciendo RPSoda un sistema más productivo que RPMercator. A diferencia de SeaWIFS, que posee mayores valores de clorofila entre los 12ºS-14ºS cerca de la costa, latitudinalmente los mayores valores de clorofila simulados se encuentra a los 8ºS (figura 17 b, c). Por otro lado, el ciclo anual de la clorofila superficial dentro de los 100 km a la costa (Figura 16), muestra que RPSoda presenta valores más altos entre verano-otoño (6 mg Chl/m^3), y valores más bajos durante invierno-primavera (5.3 mg Chl/m^3) a diferencia de RPMercator que presenta dos picos de similar magnitud (4 mg Chl/m^3) en otoño y primavera.

Por otro lado, en el análisis de correlación los valores más altos se obtienen en la zona oceánica para las dos simulaciones (0.85). Sin embargo, cerca de la costa, RPSoda tiende a representar mejor el ciclo anual de la clorofila, presentando valores de 0.6 entre los 8ºS-12ºS (Figura 18 a), a diferencia de RPMercator que alcanza valores negativos (-0.55) en esta misma zona (Figura 18 b). Para los

valores de RMSe, valores más altos se obtuvieron dentro de la franja costera (>1); observándose una menor precisión para reproducir los valores de clorofila superficial en RPSoda que en RPMercator, sobre todo a los 8ºS (un RMSe de ~8) (Figura 18 c, d).

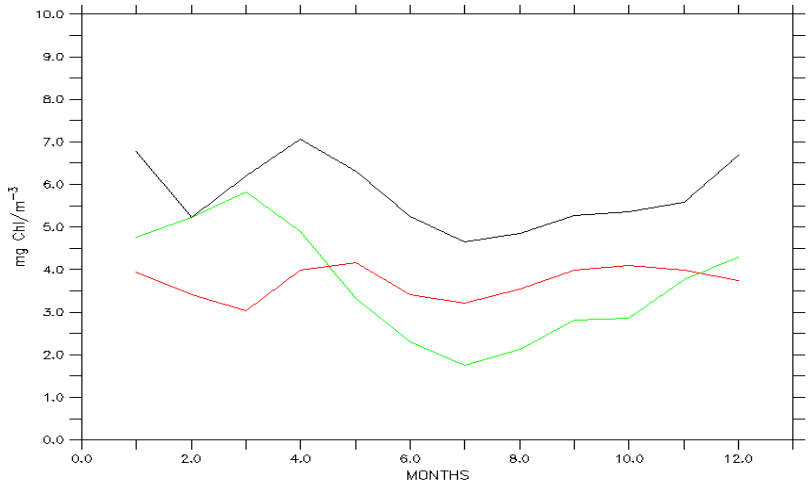

Figura 16. Promedio anual de la clorofila superficial dentro de los 100 km a la costa entre los 4ºS y 16ºS de SeaWIFS (línea verde), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja).

En la Figura 44 se observa la clorofila superficial por estaciones de SeaWIFS y las diferencias con ambas simulaciones. RPSoda sobreestima los valores de SeaWIFS dentro de la costa en todas las estaciones, siendo verano la estación donde tiende a reproducir una floración muy intensa a los 8ºS. La simulación RPMercator no presenta un sesgo tan marcado dentro de la costa, pero a diferencia de RPSoda, en verano tiende a subestimar la clorofila cerca de la costa en la zona norte-centro frente a Perú.

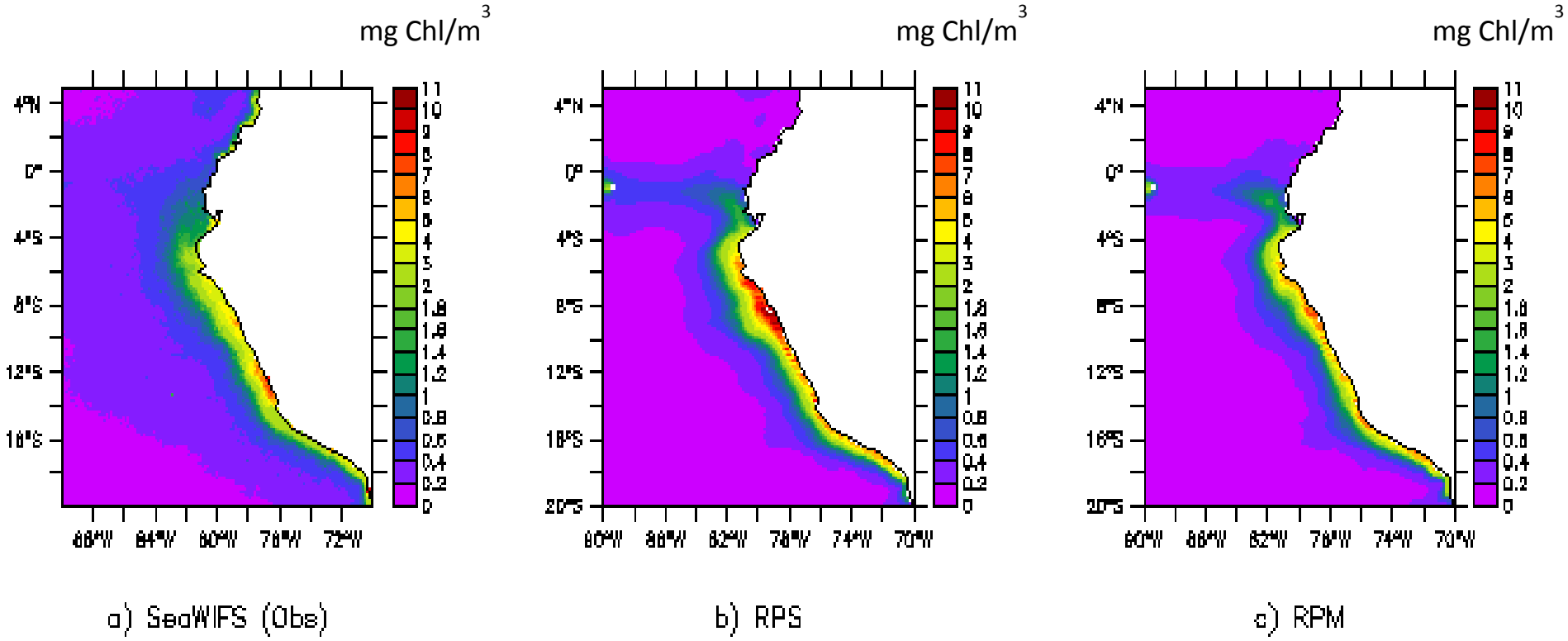

Figura 17. Promedio anual de la clorofila superficial para el área de estudio de SeaWIFS (a) y las simulaciones RPSoda (b) y RPMercator (c) en mgChl/m^3.

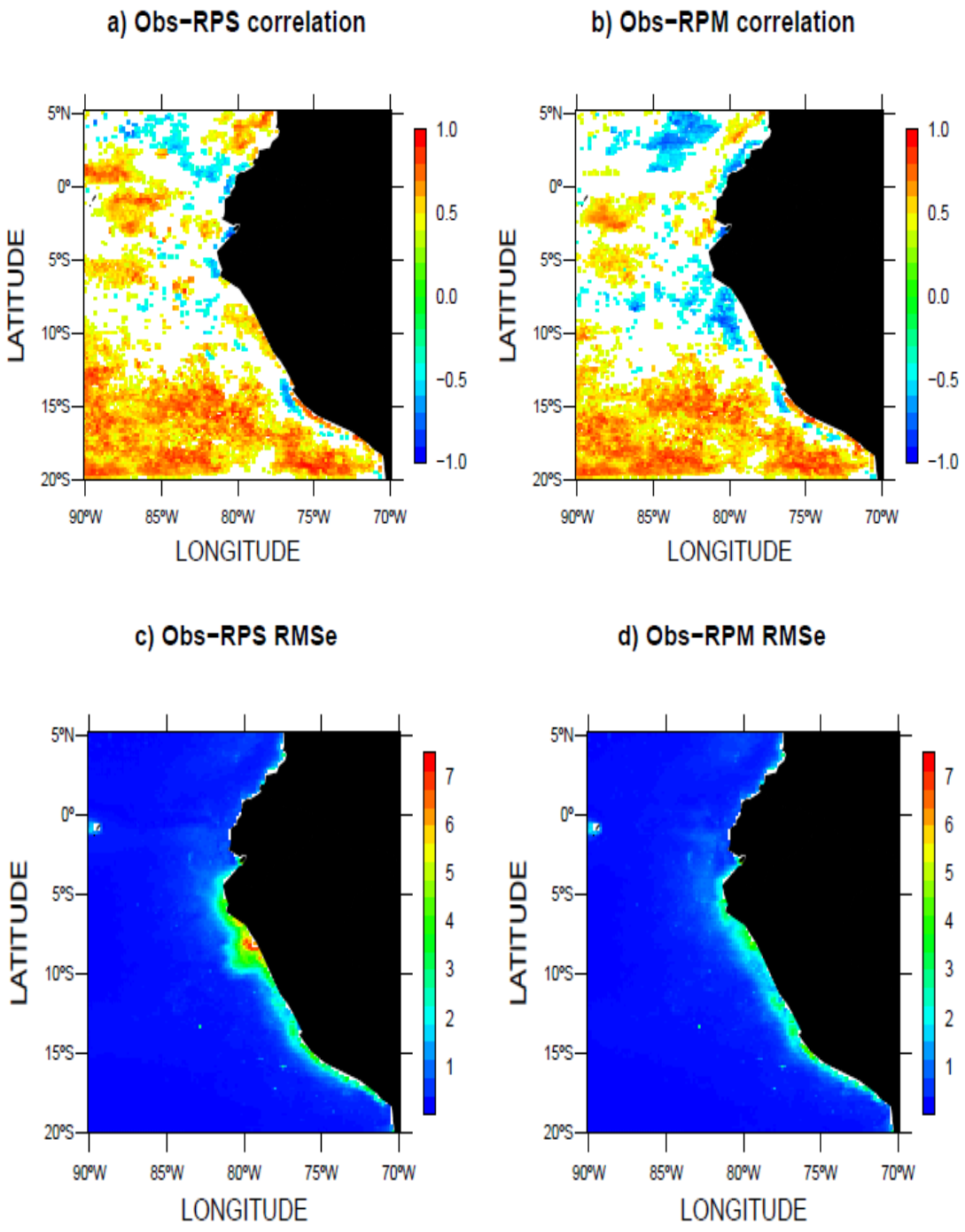

Figura 18. Mapa de correlación (en color solo los valores significativos) y RMSe entre SeaWIFS con RPSoda (a, c) y RPMercator (b, d) respectivamente.

IV.1.2.2. Perfiles Verticales de Clorofila

La distribución de clorofila en el plano vertical es validada con la climatología de IMARPE. Las dos simulaciones representan relativamente bien la distribución vertical de la clorofila, ubicándose la zona más productiva (>1 mg Chl/m^3) en ambas simulaciones por encima de los de los 30 metros de profundidad y llegando hasta los 250 km de la costa, en comparación con la climatología de IMARPE que presenta esta zona más profunda (40 m) y más cercana a la costa (150 km). En la zona oceánica (>250km a la costa), las simulaciones tienden a subestimar la clorofila *in situ* por encima de los 40 m y a sobrestimarla de los 40m-120m (Figura 19).

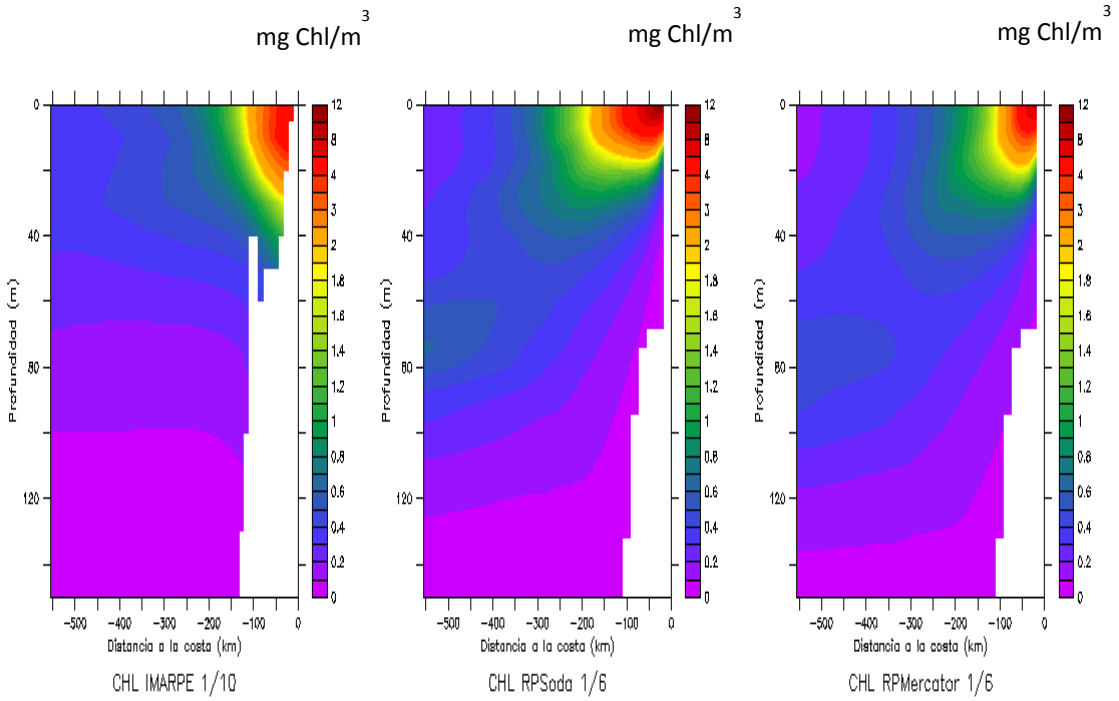

Figura 19. Perfiles verticales de Clorofila en mgChl/m^3 entre los 4ºS a 16ºS para los datos de IMARPE (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

IV.1.3. NUTRIENTES: NITRATOS, SILICATOS Y FOSFATOS

IV.1.3.1. Nutrientes Superficiales

Se utilizaron los nutrientes disponibles en la base de datos de CARS interpolados a 1/6º (silicatos, nitratos y fosfatos) para validar los nutrientes simulados por el modelo PISCES. El modelo tiende a reproducir relativamente bien el ciclo anual de los nutrientes dentro de los 200 km a la costa, reproduciendo en ambas simulaciones sistemas con mayores concentraciones de nutrientes durante el periodo de invierno-primavera, lo que concuerda con lo observado en CARS.

En lo que se refiere a los silicatos, las simulaciones tienden a reproducir menores concentraciones superficiales respecto a lo observado en CARS a lo largo de la costa del Perú durante casi todo el año, a excepción de la zona comprendida entre los 8ºS-9ºS, en la cual se obtienen valores muy altos de silicato para RPSoda (>25 µmol/l) y RPMercator (14 – 22 µmol/l) (figura 20 a). Esto podría estar soportando la gran concentración de clorofila superficial en esta área mostrado en la Figura 17.

La concentración de nitratos simulados es mayor que los observados en CARS durante el invierno y comienzos de primavera, siendo RPSoda la que sobreestima en mayor proporción los valores observados en casi toda el área a lo largo de la costa. La simulación RPSoda dentro de la zona costera presenta dos focos con altas concentraciones de nitratos a los 4ºS-6ºS (~17 µmol/l) y de 12ºS-16ºS (~14 µmol/l), a diferencia de RPMercator que solo presenta un núcleo de concentración entre los 4ºS-6ºS (~17 µmol/l) (Figura 20 b).

En cuanto a las concentraciones superficiales de los fosfatos, estas son sobreestimadas por ambas simulaciones durante casi todo el año, sobre todo durante la época de invierno-primavera. Para RPSoda y RPMercator existen dos zonas con altas concentraciones de fosfatos ubicadas entre los 7ºS-9ºS y los 11ºS-16ºS, siendo RPMercator ligeramente más rica en fosfato durante el invierno que RPSoda (~+1µmol/l) a lo largo de la costa (Figura 20 c).

IV.1.3.2. Distribución Vertical de nutrientes

La distribución vertical de los nutrientes estimados por el modelo PISCES en las dos simulaciones siguen la distribución de los elementos biolimitantes, en los cuales se tienen menores concentraciones cerca de la superficie y van aumentando a medida que avanzamos en profundidad (*Libes*, 1992). Esto se debe a que estos nutrientes son consumidos por el fitoplancton en la superficie pudiendo llegar a valores cercano a cero.

El silicato llega a alcanzar valores cercanos a 0 µmol/l cerca de la superficie a partir de los 100 km hacia fuera de la costa y en profundidad aumenta rápidamente su concentración entre los 40m a 50m (de ~8 a ~18 µmol/l). El modelo tiende a subestimar las concentraciones del silicato de CARS en los primeros 30 m de profundidad en la zona oceánica y a sobreestimarlo cerca de la plataforma continental siendo esta señal más intensa en la simulación RPSoda (Figura 21 a).

Respecto a las concentraciones de nitratos simulados, estos no llegan a alcanzar valores cercanos a 0 µmol/l cerca de la superficie, y tienden a sobreestimar los

valores observados en CARS en casi toda la columna de agua, siendo RPSoda la cual presenta las concentraciones más elevadas. Otra característica que diferencia a las simulaciones es que RPSoda presenta una nutriclina (15 umol/l) más somera, que se ubica a los ~40 m de profundidad en la parte oceánica y llega a somerizarse cerca de la costa hasta los ~15 m, a diferencia de RPMercator que presenta una nutriclina más profunda con un sesgo negativo en promedio (~-6 metros) con respecto a la de RPSoda (Figura 21b).

Por último, la concentración de los fosfatos es ligeramente sobreestimada por las simulaciones, siendo RPMercator la que presenta mayores concentraciones a partir de los 100m de profundidad. Sin embargo, RPSoda presenta una gradiente de fosfato más somero (~40m de profundidad) y lejano a la costa que RPMercator (~45m de profundidad) (Figura 21c).

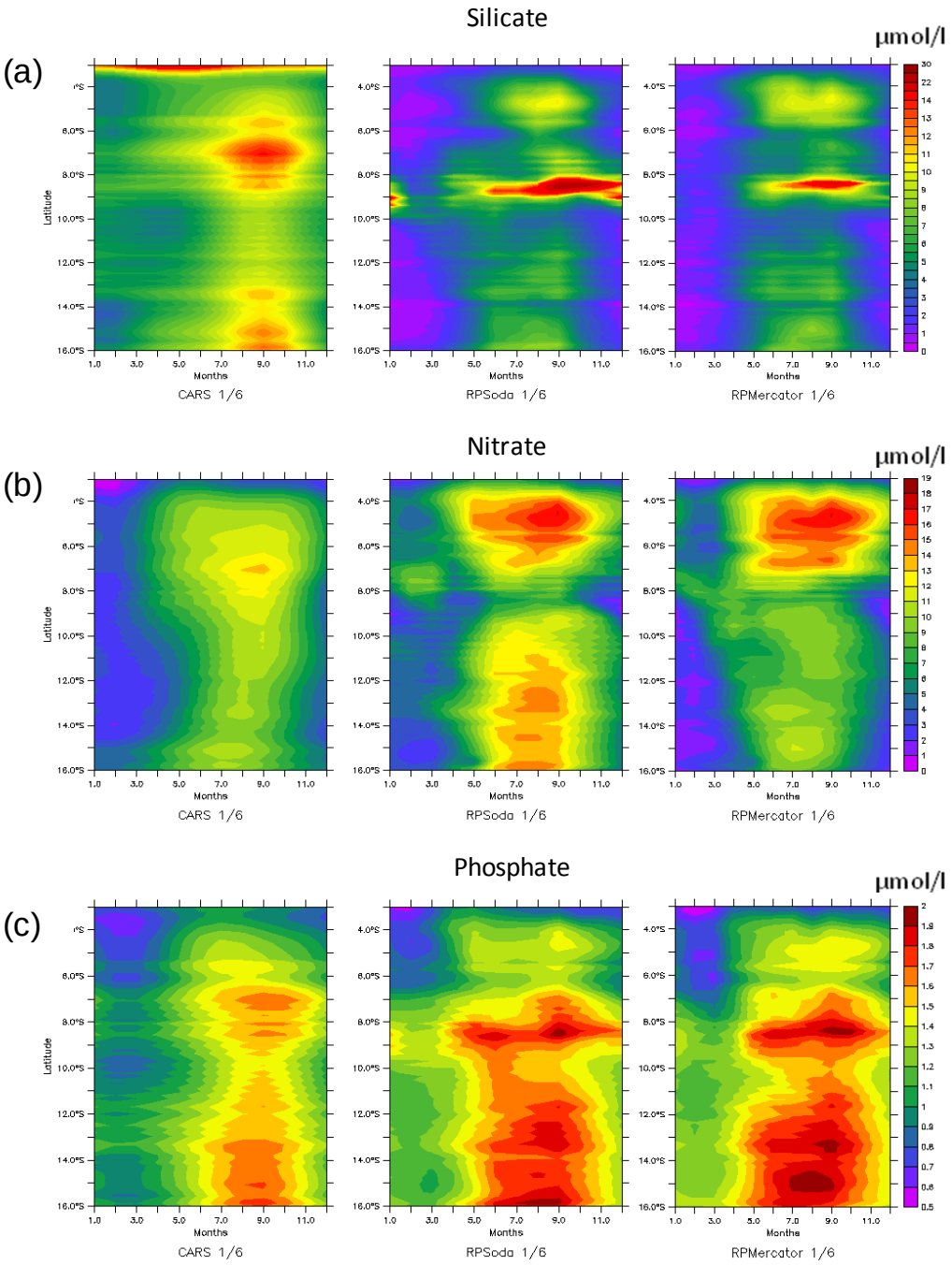

Figura 20. Promedio de la concentración de nutrientes en umol/l dentro de los 200 km a la costa entre los 4ºS-16ºS. Silicatos (a), nitratos (b) y fosfatos (c) para la data de CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

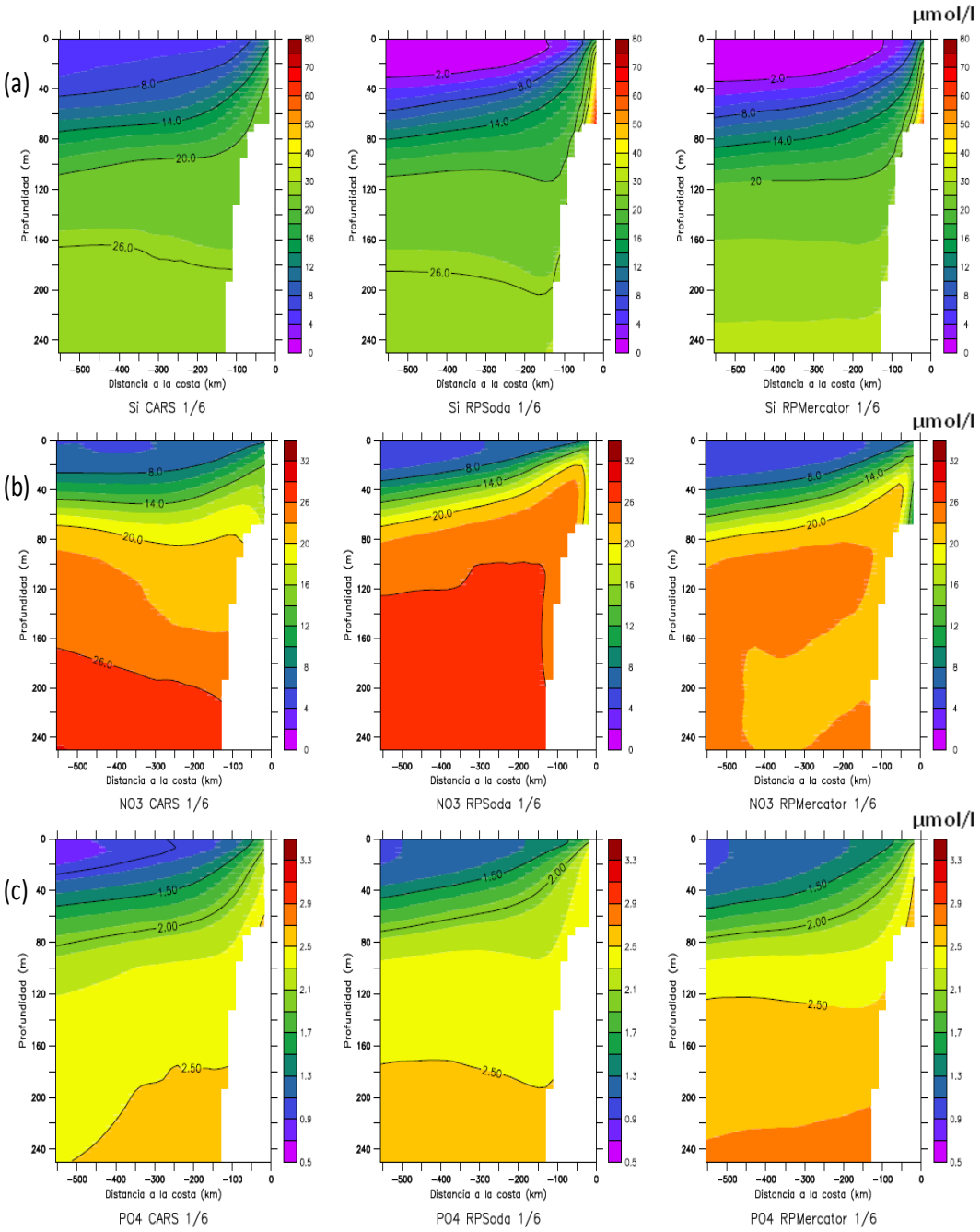

Figura 21. Perfil vertical de la concentración de nutrientes en umol/l entre los 4ºS-16ºS. Silicatos (a), nitratos (b) y fosfatos (c) para la data de CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

IV.1.4. OXÍGENO

IV.1.4.1. Oxígeno Disuelto Superficial

El oxígeno disuelto (OD) fue validado con la base de datos de CARS. El modelo PISCES tiende a reproducir bien el ciclo anual del OD en superficie con las dos simulaciones, observándose en ambas un pequeño sesgo positivo en promedio con respecto a CARS (+10 y +13 µmol/kg para RPSoda y RPMercator respectivamente). Como se observa en la Figura 22, las concentraciones de OD presentan un ciclo anual bien definido, con mayores concentraciones durante los meses más cálidos (primavera-verano) y las menores durante invierno. Este comportamiento del OD en superficie se podría explicar debido a que en primavera-verano existe una mayor biomasa de fitoplancton, la cual mediante el proceso de fotosíntesis estaría aportando oxígeno al sistema. En oposición, durante el invierno las concentraciones de fitoplancton son menores, y a su vez el afloramiento es mayor, lo que favorecería el transporte de aguas menos oxigenadas profundas a la superficie.

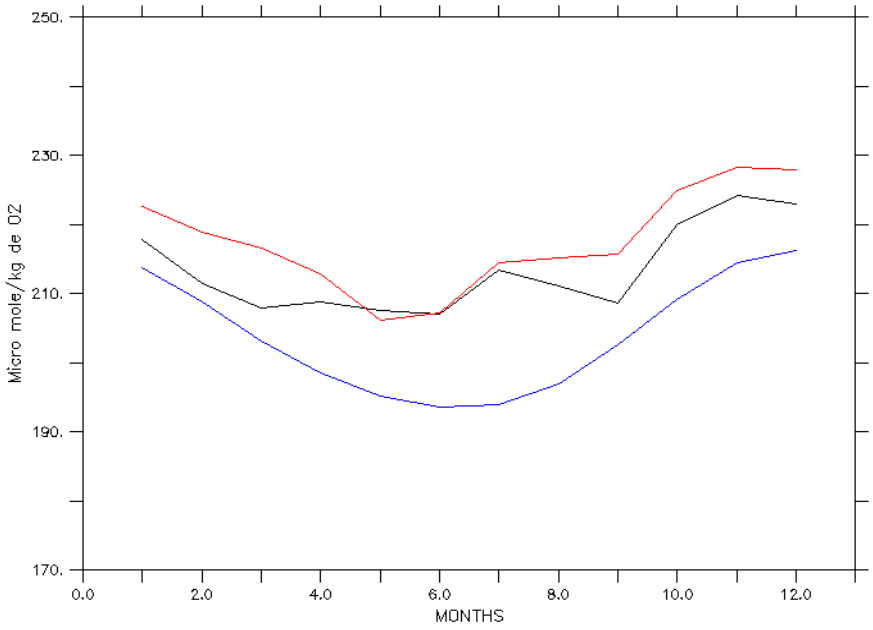

Figura 22. Promedio anual del oxígeno superficial dentro de los 200 km a la costa entre los 4ºS a 16ºS de CARS (línea azul), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja).

IV.1.4.2. Estructura Vertical del OD

Para analizar la estructura vertical del OD se realizaron tres cortes zonales a tres latitudes diferentes: 0ºS, 6ºS y 14ºS. En las tres secciones la distribución presenta mayores concentraciones en superficie, una mínima a profundidades subsuperficiales y un ligero aumento progresivo en zonas más profundas, lo cual es concordante con el perfil típico de oxígeno en zonas de alta productividad.

Si analizamos la estructura de la ZMO en las simulaciones, se puede observar en la Figura 23 que en la zona frente a Perú (6ºS y 14ºS) no existen diferencias significativas entre la estructura reproducida por las simulaciones y los datos de CARS, presentándose una ZMO a los 6ºS que se desarrolla de los 200 m a 450 m

de profundidad y a los 14ºS una ZMO que se someriza gradualmente a medida que nos acercamos a las costa. En la zona ecuatorial (0ºS) con los datos de CARS se observa una atenuación de la ZMO reduciendo su espesor entre los 300 m a 450 m de profundidad. Sin embargo, RPSoda y RPMercator presentan comportamiento y distribuciones distintas de la ZMO en esta zona, observándose en RPSoda una ZMO muy reducida a deferencia de RPMercator que presenta una ZMO más intensa y con una mayor área de distribución. Las causas de estas diferencias serán explicadas en el capítulo de discusión.

En relación a las concentraciones de OD dentro de la ZMO, CARS posee una ZMO más oxigenada que nuestras simulaciones, presentando un núcleo con concentraciones entre los 5-10 µmol/kg, a diferencia de RPSoda y RPMercator que llega a presentar valores menores a los 5 µmol/kg. La distribución de los núcleos de la OMZ simuladas presenta también diferencias con los datos observados en CARS, observándose que el modelo PISCES tiende a reproducir un núcleo más cercano a la costa (Figura 23).

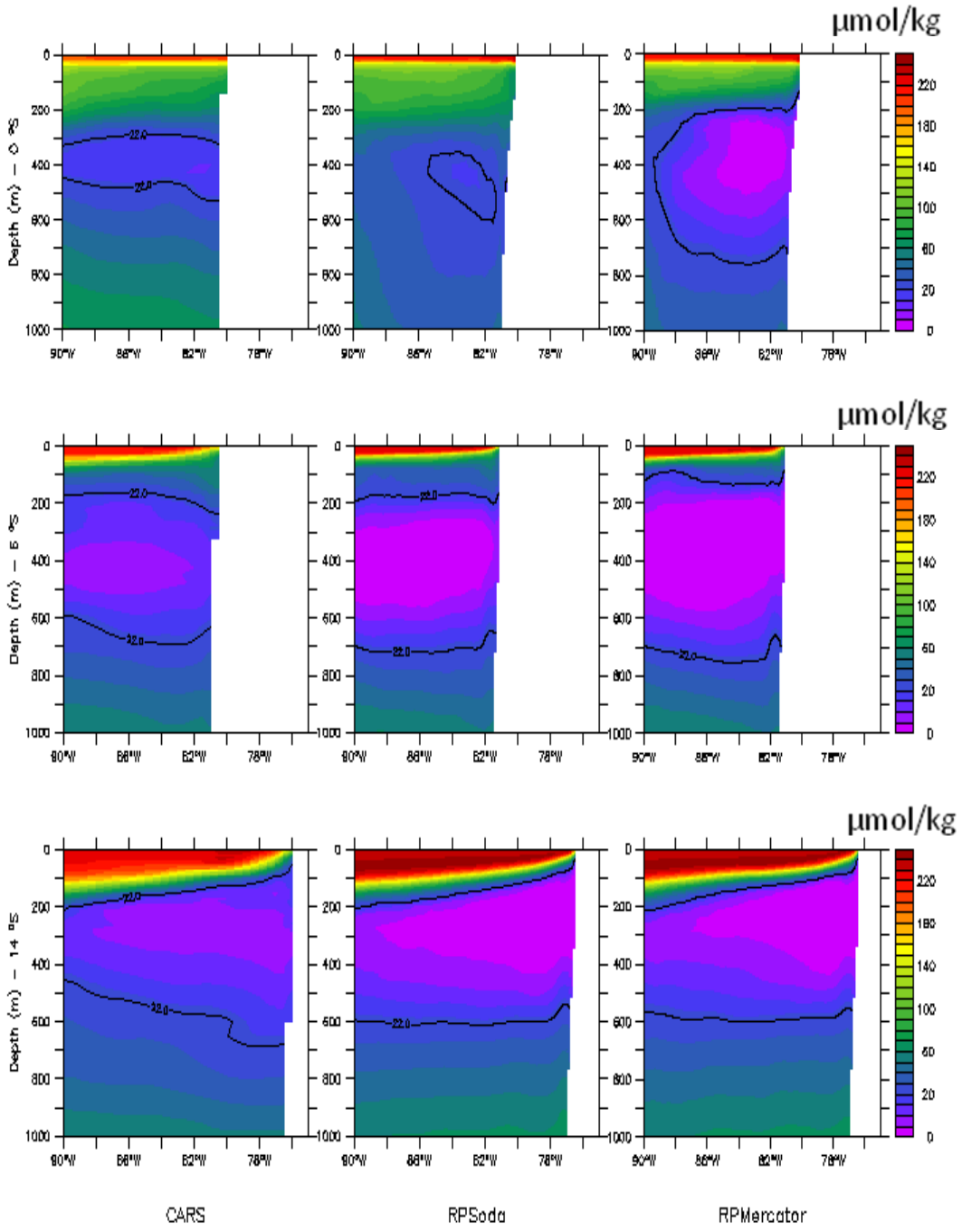

Figura 23. Secciones verticales de oxígeno disuelto en µmol/kg a los 0ºS (primera fila), 6ºS (segunda fila) y 14ºS (tercera fila) para los datos de CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha) con sus respectivas isoxigenas de 22 µmol/kg (línea negra).

IV.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ZMO MODELADA FRENTE A PERÚ

La ZMO fue limitada con la concentración de 22 µmol/kg. Se analizaron tres características de la ZMO: (a) la concentración promedio dentro de la ZMO, (b) el límite superior de la ZMO, llamada en este trabajo como profundidad de la ZMO y, (c) el espesor de la ZMO, que es igual a la diferencia entre el límite superior e inferior de la ZMO. Cada característica fue comparada entre las simulaciones y los datos observados de CARS y entre las mismas simulaciones, para observar el efecto de un cambio en la circulación ecuatorial sobre la distribución y concentración de la ZMO.

IV.2.1. CONCENTRACIÓN DE LA ZMO

La concentración dentro de la ZMO en promedio anual presenta una concordancia con los datos de CARS en su distribución espacial promedio, presentando mayores concentraciones en la zona ecuatorial y concentraciones más bajas frente a Perú. Como se observa en la Figuras 24 y 45, las dos simulaciones tienden a producir ZMOs mucho más intensas frente a Perú (zona costera y oceánica) que la observada en CARS. La concentración de OD dentro de la ZMO en la zona oceánica no presenta un ciclo anual muy definido, presentando mayores concentraciones la simulación RPSoda (6,5 umol/kg) que RPMercator (5,3 umol/kg) (Figura 24 a). Sin embargo, en la zona costera (dentro de los 200km), se puede divisar un ciclo anual ligeramente definido con mayores concentraciones en las estaciones de otoño-invierno y menores durante la primavera-verano (Figura

22b), sobre todo entre los grados 8ºS-10ºS (Figura 45). La amplitud del ciclo anual del OD dentro de la ZMO del modelo y observados es débil pero comparables.

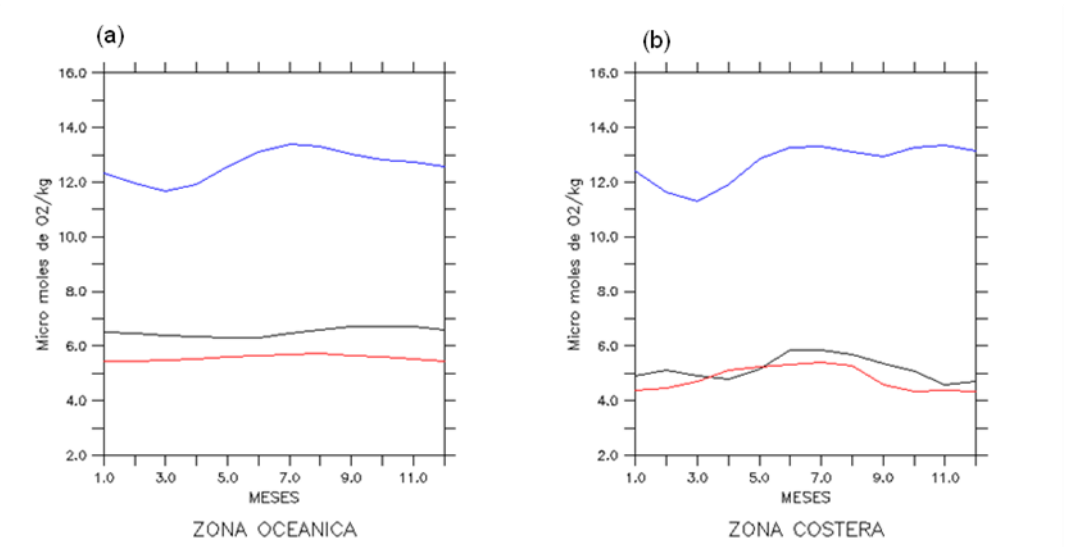

Figura 24. Promedio de la Concentración de OD dentro de la ZMO entre los 4ºS y 16ºS en la zona oceánica (200-400km) (a) y en la costera (0-200km) (b) para la base de datos de CARS (línea azul), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja).

En promedio las concentraciones de OD dentro de la ZMO también presentan un gradiente longitudinal, disminuyendo la concentración a medida que nos acercamos a la costa. En la Figura 25 (b y c) se puede observar que en ambas simulaciones, en la zona oceánica frente a Perú, se desarrollan 2 núcleos de la ZMO (<5 µmol/kg) entre los grados 8ºS-9ºS y 12 ºS-16ºS, siendo más intensos en la simulación RPMercator. Como ya se mencionó, ambas simulaciones subestiman los valores de OD dentro de la ZMO de CARS, pero este sesgo es

observado en la simulación RPMercator en la zona ecuatorial y peruana (~-7 µmol/kg), a diferencia de RPSoda que subestima las concentraciones frente a Perú (~-5 µmol/kg) pero sobreestima las concentraciones cerca de la costa en la zona ecuatorial (~+4 µmol/kg) (figura 25 d, e). Se calculó también la diferencia entre las concentraciones de la ZMO de RPSoda y RPMercator (Figura 25f). Las diferencias más importantes se observaron en la zona ecuatorial (4N-4S), teniendo RPSoda un sesgo positivo con respecto a RPMercator de +12 µmol/kg en promedio.

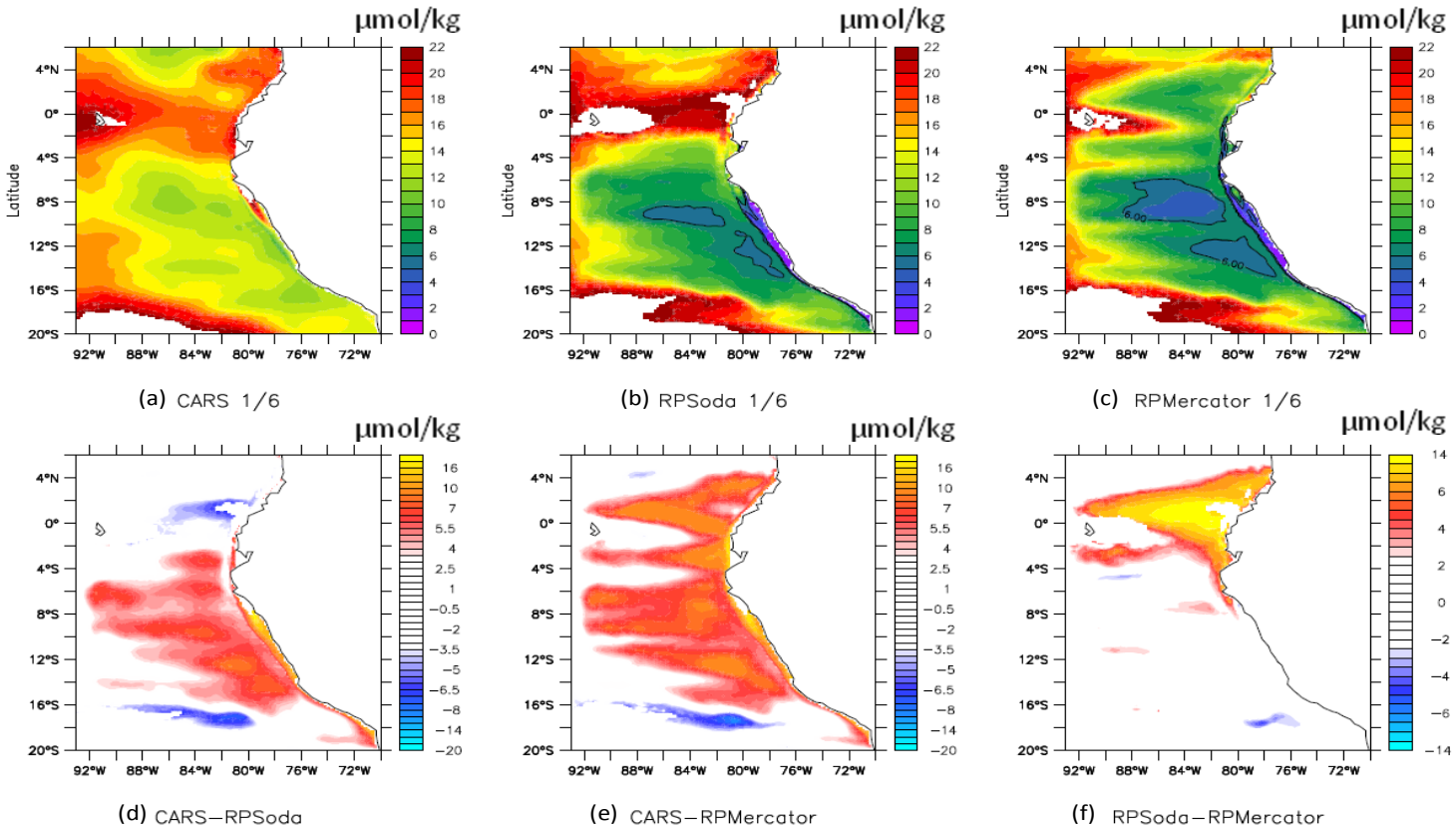

Figura 25. Promedio anual de las concentraciones de OD en µmol/kg dentro de la ZMO para CARS (a), RPSoda (b), y RPMercator (c). A su vez, las diferencias entre las concentraciones de OD anuales de CARS y RPSoda (d); CARS y RPMercator (e); y entre RPSoda y RPMercator (f).

IV.2.2. PROFUNDIDAD DE LA ZMO

Otra característica analizada fue el límite superior de la ZMO, llamada en el presente trabajo profundidad de la ZMO. El ciclo anual de la profundidad de ZMO es relativamente bien reproducida por ambas simulaciones. Sin embargo, se observan ZMOs mas someras en el modelo respecto a los datos de CARS frente a Perú, tanto en la zona oceánica como en la costera (Figura 26). La profundidades de la ZMO frente a Perú en la zona oceánica y costera presentan un ciclo anual similar a lo largo de la costa (Figuras 47 y 48), con mayores profundidades durante otoño-invierno y menores profundidades durante primavera-verano. En este último periodo se desarrolla una zona muy somera entre los grados 8ºS-10ºS, alcanzando aproximadamente los 20m y 30m de profundidad en la costa en RPSoda y RPMercator, respectivamente. (Figura 47).

Latitudinalmente, la ZMO es más somera frente a Perú y se profundiza en la zona ecuatorial. Longitudinalmente, se someriza a medida que nos acercamos a la costa, siendo ambas simulaciones concordantes con lo observado en CARS (Figura 27 a, b, c). Las principales diferencias entre CARS y las simulaciones se ubican en la zona ecuatorial, produciendo RPSoda una ZMO más somera y más profunda en RPMercator (figura 27 d, e). Cuando se realizó la diferencia entre las simulaciones, se observaron las principales diferencias también en la zona ecuatorial, observándose un sesgo promedio entre RPSoda con respecto a RPMercator de ~200m de profundidad (Figura 27 f).

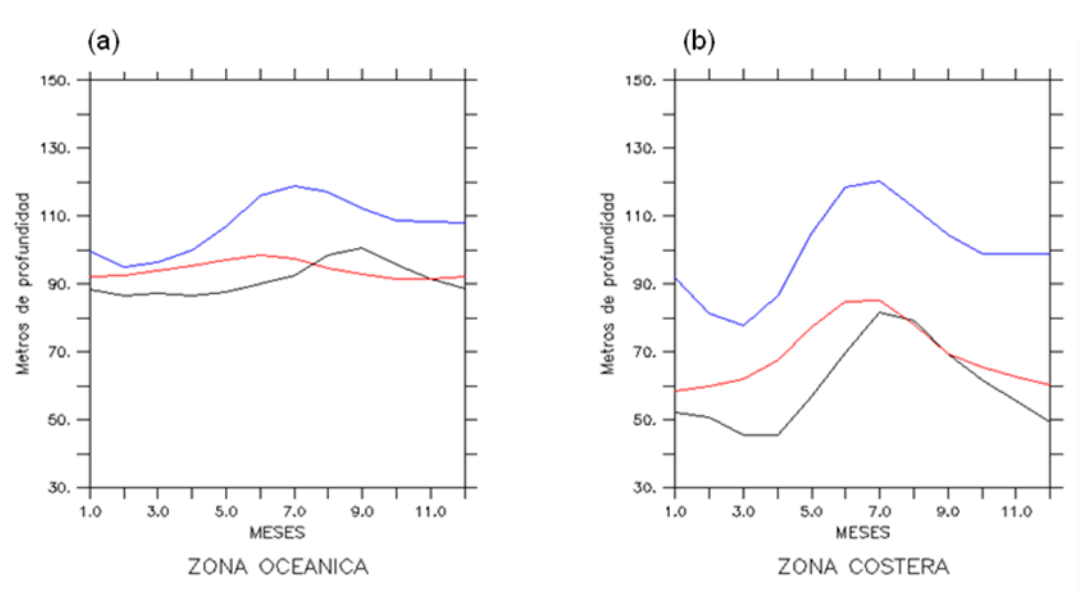

Figura 26. Promedio de la profundidad de la ZMO entre los 4ºS y 16ºS en la zona oceánica (200-400km) (a) y en la costera (0-200km) (b) para la base de datos de CARS (línea azul), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja).

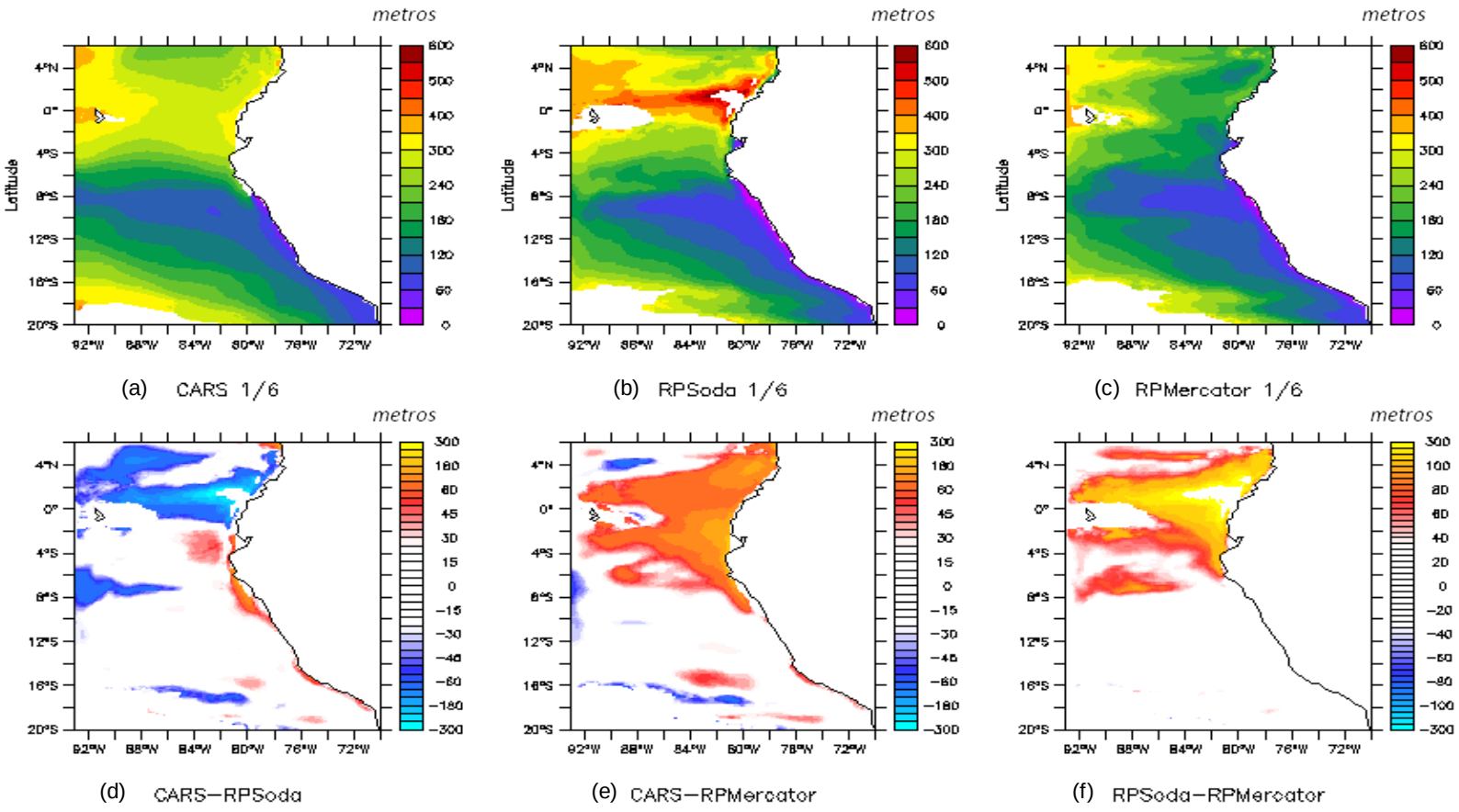

Figura 27. Promedio anual de la profundidad de la ZMO (metros) para CARS (a), RPSoda (b), y RPMercator (c). A su vez, las diferencias entre las profundidades anuales de la ZMO de CARS y RPSoda (d); CARS y RPMercator (e); y entre RPSoda y RPMercator (f).

IV.2.3. ESPESOR DE LA OMZ

El espesor de la ZMO fue otra característica evaluada en el presente estudio. El espesor de la ZMO es mayor en la zona oceánica (650m en RPSoda y 642m RPMercator) que en la costera (370m RPSoda y 365m RPMercator). En ambas simulaciones se observa un ciclo anual similar en la costa y océano, con un mayor espesor durante primavera-verano y menor durante otoño-invierno. Respecto a los datos de CARS en la zona oceánica, el modelo tiende a subestimar el espesor de la ZMO, a diferencia de la zona costera en la que lo sobrestima (Figura 28). Latitudinalmente, en la zona oceánica, es entre los grados 8ºS y 10ºS donde el modelo reproduce un mayor espesor de la ZMO, lo que concuerda con la data de CARS (figura 49). Sin embargo, cuando observamos la zona costera, CARS posee su mayor espesor en el grado 14ºS, en contraste con RPSoda que posee su mayor espesor a los 6ºS y RPMercator entre los 4ºS-6ºS (Figura 50).

El mayor espesor de la ZMO en promedio se ubica frente a Perú entre los 4ºS a 16ºS, siendo el modelo concordante con los datos de CARS. Sin embargo, CARS presenta el máximo espesor (~600m) más paralelo al perfil costero, mientras las dos simulaciones tienden a reproducir un máximo espesor (~700m) perpendicular a la costa (Figura 29 a, b, c). Calculando las diferencias entre el espesor de la ZMO de CARS y la simulaciones, se puede observar en la Figuras 29 d y e que las diferencias más significativas con RPSoda (-140m) se ubican entre los 9ºS a 16ºS y de los 400 km mar afuera; mientras que con RPMercator presenta las diferencias más significativas (-350m) entre los 4ºN a 4ºS. Cuando se compara el espesor de ambas simulaciones, RPSoda tiende a reproducir una ZMO más delgada en la

zona ecuatorial que RPMercator, obteniendo una diferencia de ~400m en esta zona (Figura 29 f).

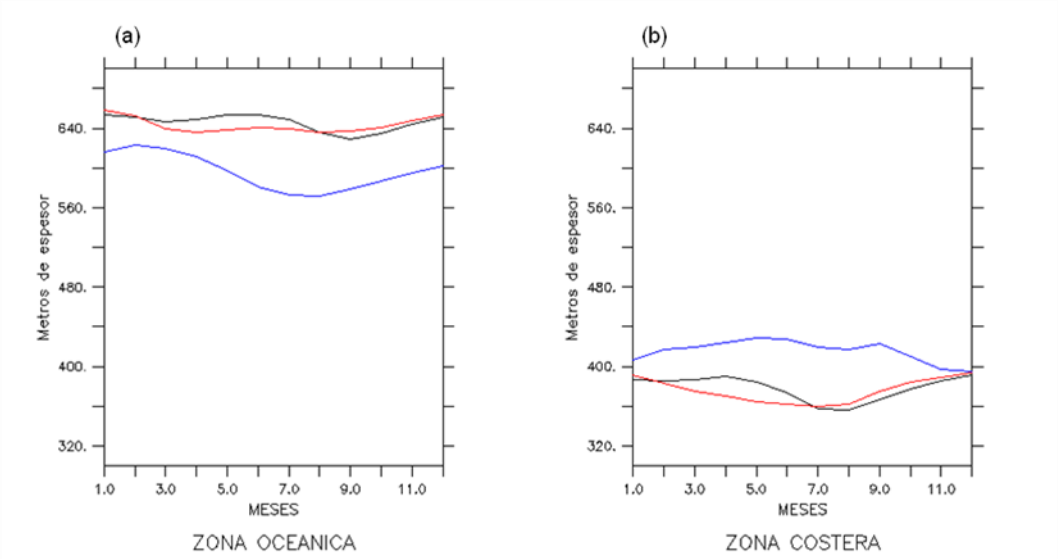

Figura 28. Promedio del espesor de la ZMO entre los 4ºS y 16ºS en la zona oceánica (a) y en la costera (b) para la base de datos de CARS (línea azul), RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja).

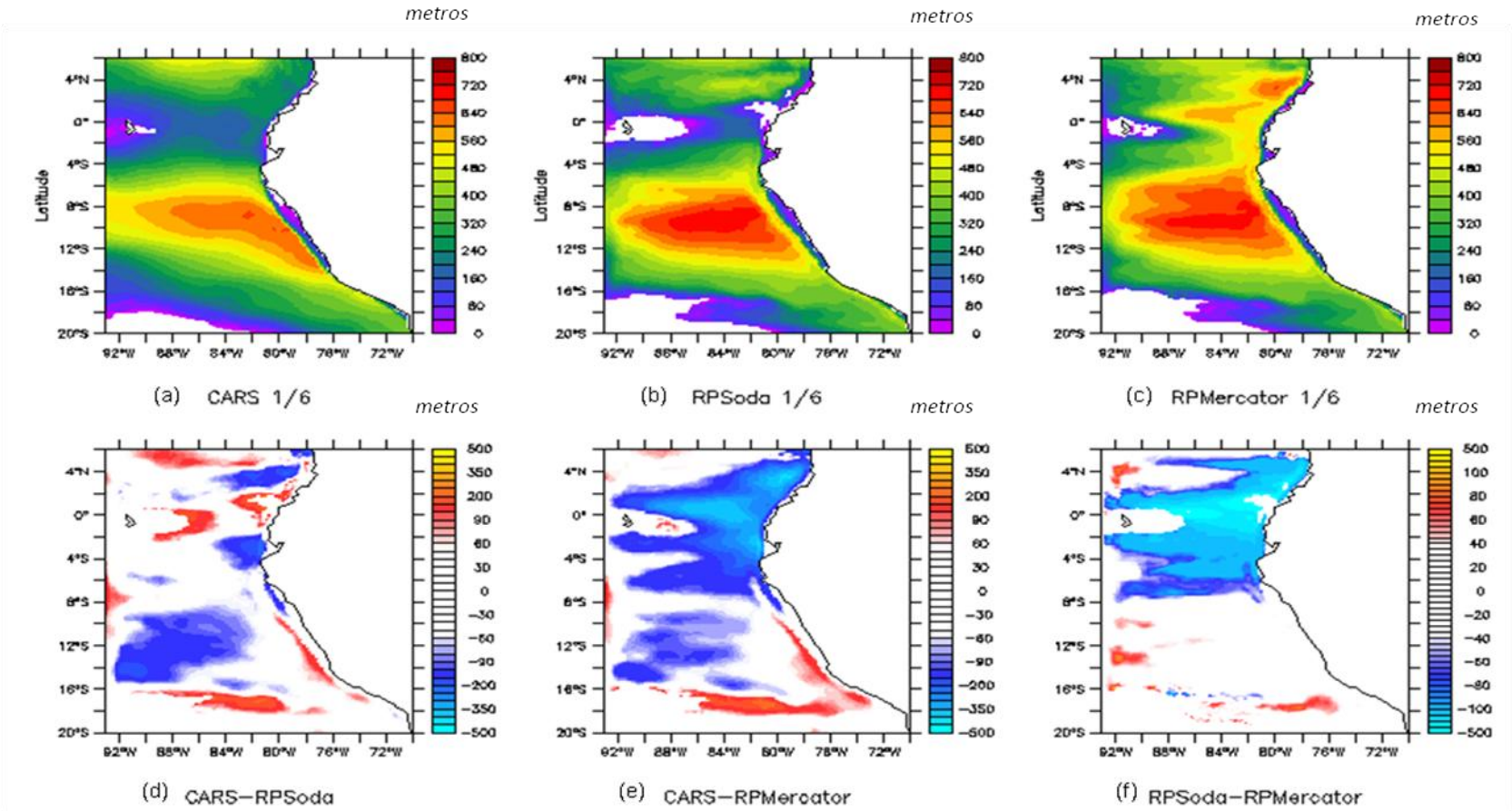

Figura 29. Promedio anual del espesor de la ZMO en metros para CARS (a), RPSoda (b), y RPMercator (c). A su vez, las diferencias entre el espesor anual de la ZMO de CARS y RPSoda (d); CARS y RPMercator (e); y entre RPSoda y RPMercator (f).

IV.2.4. VARIACIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO A LO LARGO DE LA COSTA

Se calculó el promedio del oxígeno disuelto en la columna de agua entre las isobatas de 1000-2000m frente a la costa y entre los 5ºN a 20ºS para evaluar la distribución vertical de la OMZ en el área de estudio. La data de CARS muestra una atenuación de la ZMO en la zona ecuatorial y su mayor distribución entre los 9ºS y 14ºS, abarcando de los 90m a 700m de profundidad. Sin embargo, en las simulaciones se observan comportamientos distintos, observandose en RPSoda casi una desaparición de la ZMO entre los 4ºN a 2ºS y su mayor espesor entre los 9ºS a 14ºS (de los 90m a 600m de profundidad), y en RPMercator en la zona ecuatorial la ZMO mantiene su espesor igual que frente a Perú (700m) pero se hace más ligeramente más profunda. En cuanto a la concentración de OD dentro de la ZMO en ambas simulaciones se obtienen núcleos de la ZMO (<5 µmol/kg) con una amplia presencia entre los 4ºS a 20ºS y distribuciones similares, siendo el núcleo presente en RPMercator el más desoxigenado y llegándose a distribuir hasta los 0ºS (Figura 30 a, b, c).

Cuando calculamos las diferencias entre CARS y las simulaciones (Figura 30 d, e), se puede observar que RPSoda tiende a poseer diferencias con los datos observados a excepción entre los grados 8ºS a 12ºS por encima de los 100m de profundidad en donde tiende a subestimar la concentración de OD; comportamiento que no se observa en RPMercator que en la zona frente a Perú (4ºS-20ºS) sobrestima los valores de CARS por encima de los 50m de profundidad y en la zona ecuatorial los subestima entre los 50 a 250m de profundidad. La diferencia entre las simulaciones (Figura 30f) muestra que RPSoda contiene mayores concentraciones de oxígeno en la zona

ecuatorial entre los 100 a 350m de profundidad (~+40 µmol/kg) y menor entre los 8ºS a 12ºS por encima de los 90m de profundidad (~-60 µmol/kg).

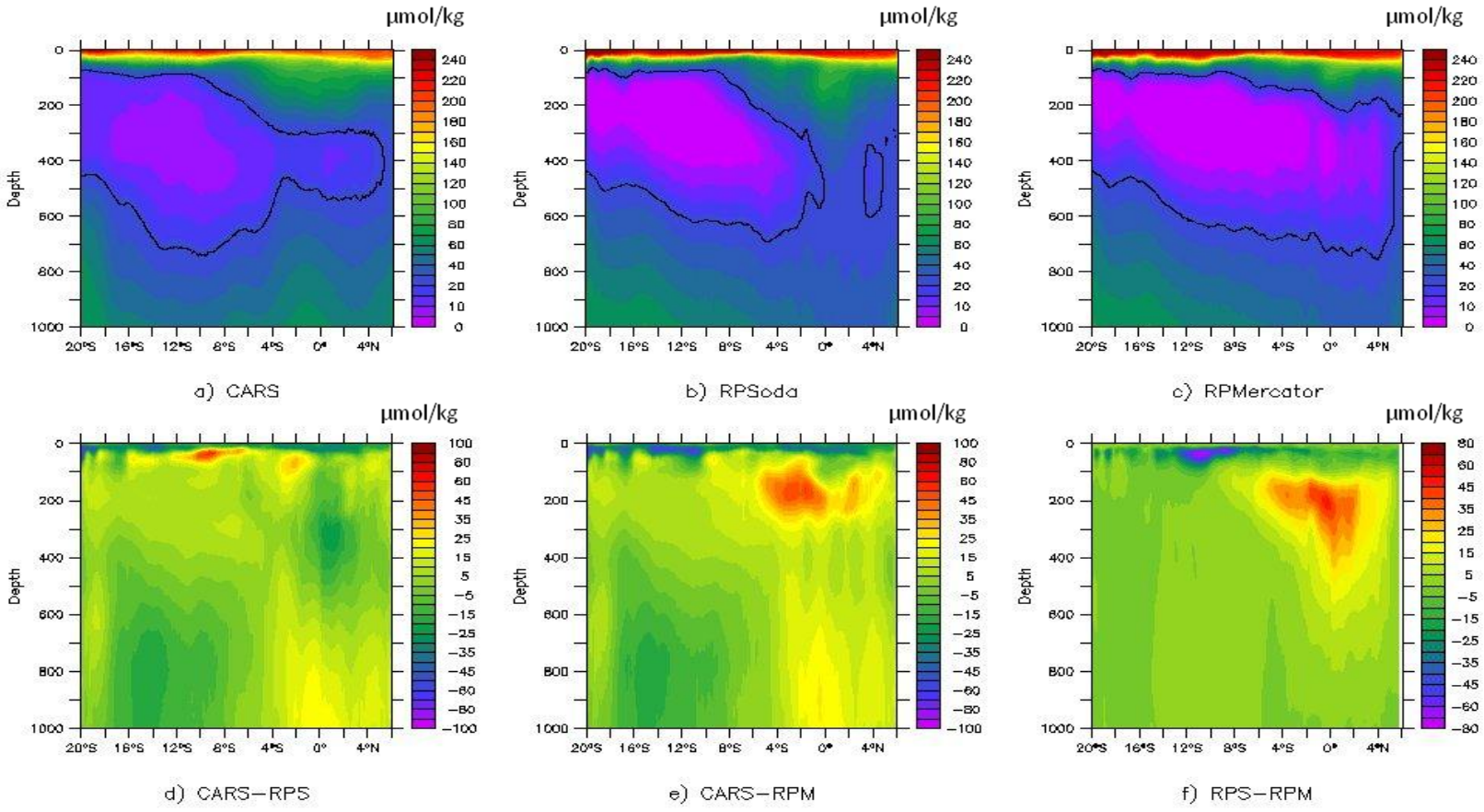

Figura 30. Promedio anual de la concentración de oxígeno disuelto en umol/kg entre las isobatas de 1000m y 2000m de profundidad a lo largo de la costa para CARS (a), RPSoda (b), y RPMercator (c). A su vez, las diferencias entre CARS y RPSoda (d); CARS y RPMercator (e); y entre RPSoda y RPMercator (f).

IV.3. FLUJOS DE OXÍGENO

Para calcular los flujos de oxígeno fue necesario definir previamente las corrientes ecuatoriales. Las corrientes ecuatoriales en promedio anual se ubican entre las densidades de 25 y 26,4 kg/m^3 en ambas simulaciones, encontrándose su límite superior a 50m de profundidad y el límite inferior variando de acuerdo a la simulación, reproduciendo RPSoda una EUC y SSCCs más profundas (~200m) que RPMercator (~150m). Otra característica importante de resaltar es que la intensidad y área ocupada por las corrientes ecuatoriales va disminuyendo hacia el sur, obteniendo una velocidad promedio anual de 11.26 y 15.75 cm/s de la EUC, de 9.27 y 9.44 cm/s de la pSSCC y de 6.44 y 6.19 cm/s de la sSSCC a los 88ºW para RPSoda y RPMercator respectivamente.

El límite de velocidad para definir las corrientes fue de 5 cm/s debido a que es la menor velocidad que presentan las tres corrientes (EUC y SSCCs) durante todo el año, en promedio. Sin embargo, en la simulación RPSoda se puede observar la presencia de un tercer Jet entre los 10ºS y 12ºS y los 100 a 400m de profundidad, el cual podría influir de manera significativa en la distribución del oxígeno (Figura 27 y 31).

Al sobreponer los valores de oxígeno y de las corrientes como en la Figura 29 a los 88ºW, se observa que la distribución del oxígeno se encuentra muy influenciada por las corrientes, obteniendo valores de oxígeno superiores en la capa sub-superficial donde se ubican la EUC y SSCCs.

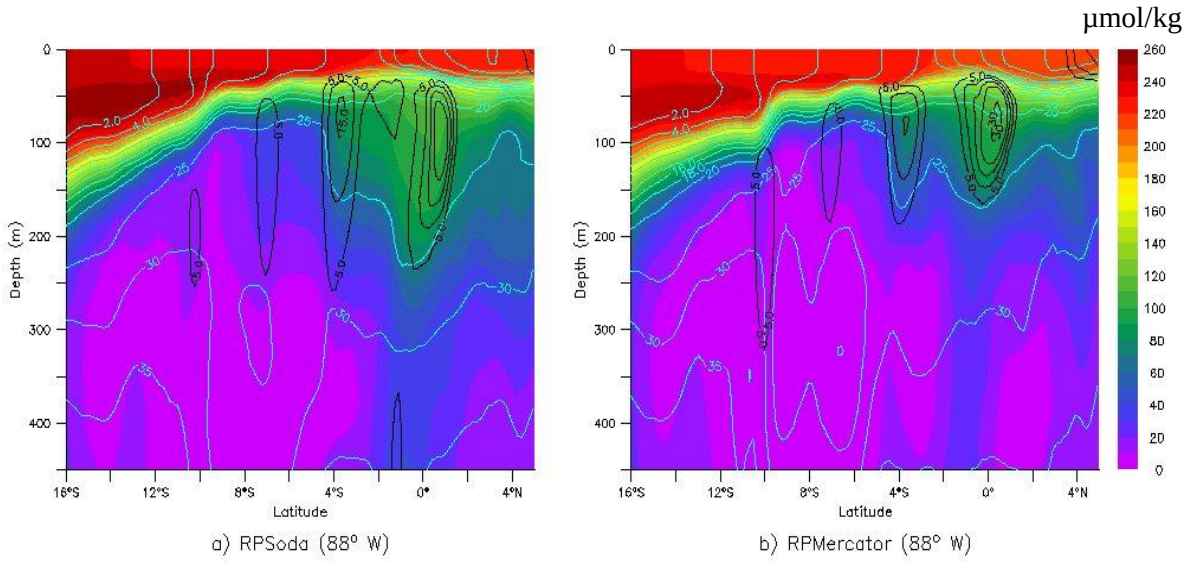

Figura 31. Promedio anual de las velocidades zonales (>5cm/s) de las corrientes ecuatoriales (contornos negros), concentraciones de OD (colores) y nitratos (contornos celestes, µmol/l) de RPSoda (a) y RPMercator (b) a los 88ºW.

El flujo de oxígeno para cada corriente fue calculado como la integración del producto de las concentraciones de oxígeno y la velocidad de la corriente (>5 cm/s) entre los 50m a 400m de profundidad, siendo los limites latitudinales para la EUC de 2ºN a 2ºS, para la pSSCC de 2ºS a 6ºS y para la sSSCC de los 6ºS a 10ºS. En la Figura 32 se observa que el flujo de oxígeno presenta una disminución latitudinal, siendo la EUC en promedio 3 y 7 veces más intensa que la pSSCC y la sSSCC, respectivamente, a los 88ºW. Longitudinalmente, se observa también una disminución en el flujo de oxígeno en las dos simulaciones, decreciendo el flujo a medida que nos acercamos a la costa (de 86°W a 88°W).

La simulación RPSoda presenta mayores flujos de oxigeno que RPMercator en todas las corrientes. La EUC a los 88°W presenta un ciclo anual bien definido con un pico durante el otoño (1300 y 1000 x 10^3 moles de O_2/s para RPSoda y RPMercator, respectivamente) y menores flujos en la otras estaciones. El ciclo anual de la pSSCC presenta un mayor flujo entre los meses de otoño e invierno (500 y 300 x 10^3 moles de O_2/s para RPSoda y RPMercator, respectivamente) a los 88°W, pero a medida que nos acercamos a la costa (86°W) la diferencia entre estaciones se va atenuando. Por último, el ciclo anual de la sSSCC es opuesto al de las otras dos corrientes presentando un pico durante primavera a los 88ºW y 86ºW (160 y 120 x 10^3 moles de O_2/s para RPSoda y RPMercator, respectivamente). Estos resultados se muestran en la Figura 32.

En la figura 33 se presenta el comportamiento horizontal (promedio entre los 150m a 400m de profundidad) de la concentración de oxígeno y de las corrientes. Se puede observar que donde la velocidad de la corriente es más fuerte, la ZMO se ve reducida, sobretodo en RPSoda que presenta corrientes ecuatoriales más intensas que transportarían mayor cantidad de oxígeno, lo que estaría originando una desaparición de la ZMO en la zona ecuatorial. También se observa que la distribución hacia el oeste de la ZMO estaría limitada por los Jets (cercanos al Ecuador y no cercanos).

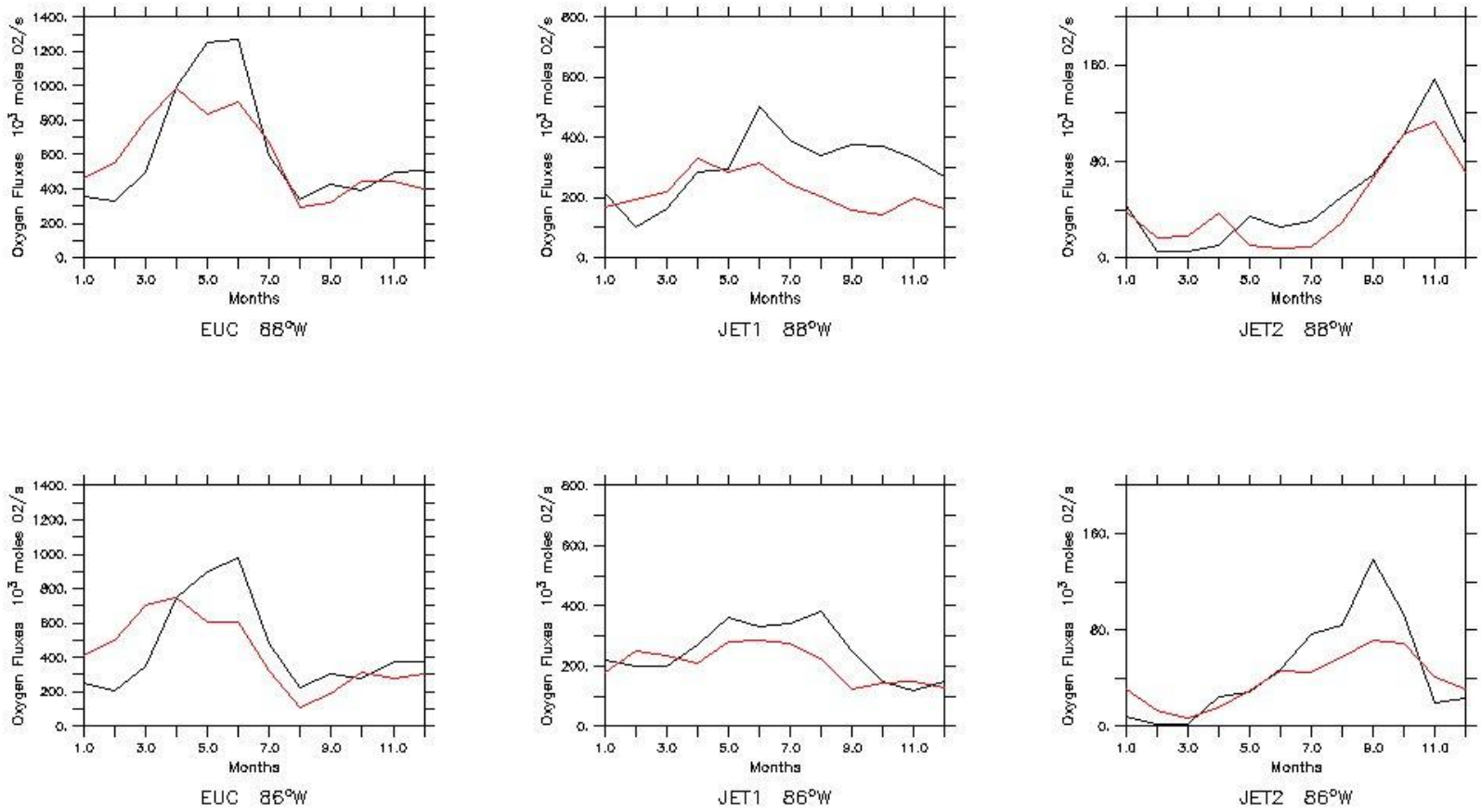

Figura 32. Flujo de oxígeno (10^3 moles de O_2/s) en a los 88ºW (superior) y 86ºW (inferior) de la EUC (izquierda), pSSCC (centro) y sSSCC (derecha) para las simulaciones RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja).

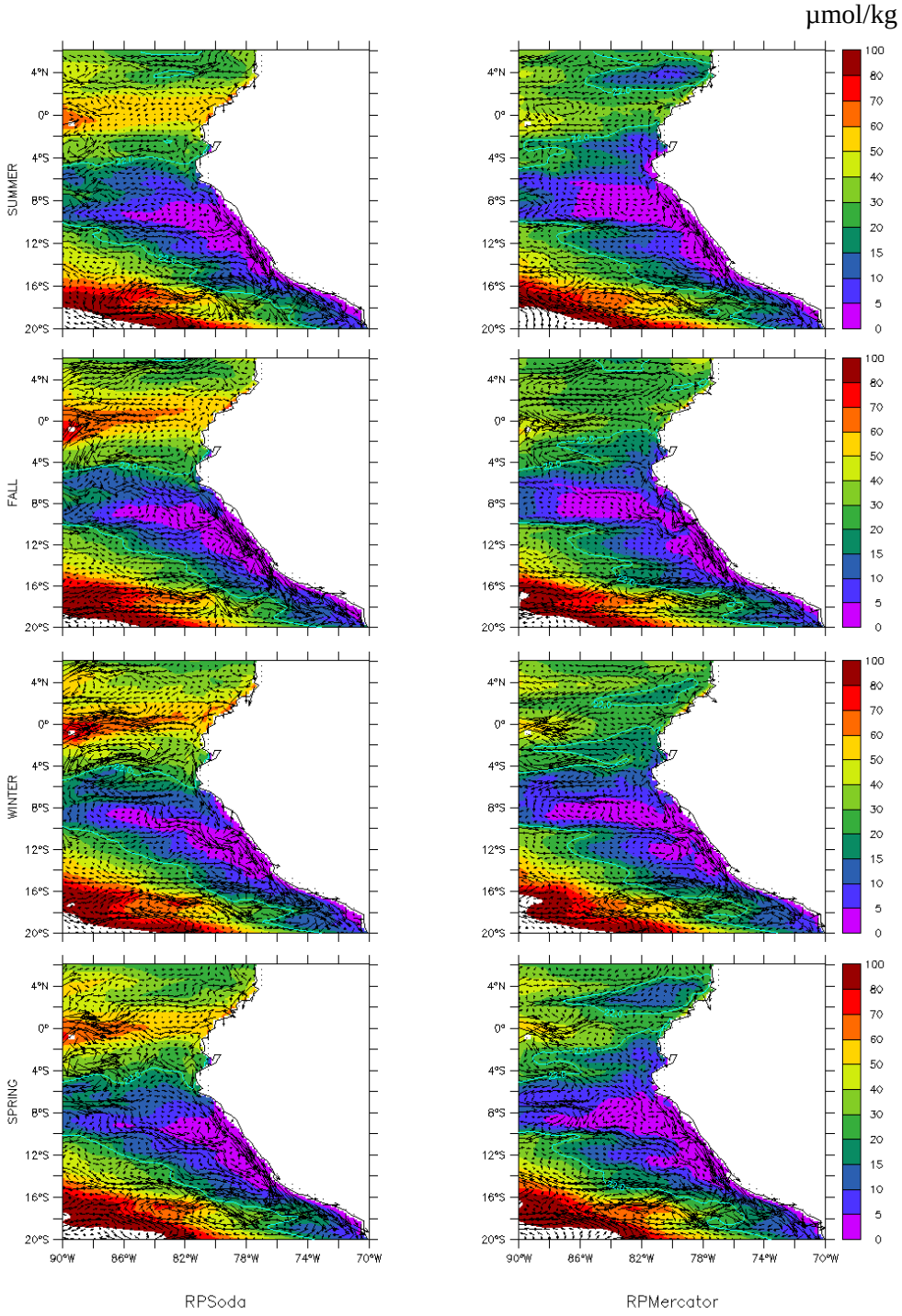

Figura 33. Promedio entre los 150m a 400m de profundidad de la variación estacional del oxígeno disuelto en µmol/kg (colores) y de la velocidad horizontal (vectores) para RPSoda (izquierda) y RPMercator (derecha).

IV. 4. BALANCE DE OXÍGENO

Como se muestra en la ecuación Nº7, el modelo PISCES nos permite obtener términos que nos proporcionan información acerca de la variación de oxígeno debido a la física y a la biología, con los cuales es posible realizar el balance de oxígeno.

IV.5.1. ZONA ECUATORIAL

El balance dentro de la zona ecuatorial comprende de los 4ºN-4ºS, 86ºW-76ºW y de los 250 a 400 metros de profundidad, siendo la simulación RPSoda la que muestra una mayor variabilidad de los términos de la ecuación del oxígeno dentro del año.

Este volumen en el componente zonal (O2_xadv) presenta una ganancia de oxígeno en promedio durante todo el año para RPSoda (~76x 10^3 moles de O_2/s) y RPMercator (~11x 10^3 moles de O_2/s), presentando una disminución durante los meses de otoño y comienzos de primavera. En el componente meridional (O2_yadv) RPSoda pierde oxígeno en promedio durante todo el año (~-18x 10^3 moles de O_2/s) a diferencia de RPMercator que gana oxígeno (~8x 10^3 moles de O_2/s). En el componente vertical se observa en la dos simulaciones un ciclo anual marcado con una mayor pérdida de oxígeno durante los meses de verano, perdiendo RPSoda en promedio durante el año ~-30x 10^3 moles de O_2/s y RPMercator ~-5x 10^3 moles de O_2/s. El termino de mezcla vertical no presenta un aporte significativo a la ganancia o pérdida de oxígeno en la zona ecuatorial y es muy débil. El término correspondiente a la biología consume oxígeno en promedio durante todo el año, siendo la perdida de

oxígeno en RPSoda el doble (~-30x 10^3 moles de O_2/s) que la de RPMercator (Figura 34 a, b, c, d, e).

En general, en el balance de oxígeno final, considerando todos los componentes que intervienen en la concentración de oxígeno que se obtiene para ambas simulaciones, el sistema ecuatorial tiende a ganar oxígeno durante otoño y primavera y perderlo durante verano e invierno (Figura 34 f).

IV.5.2 ZONA FRENTE A PERÚ

El volumen escogido frente a Perú para hacer el balance de oxígeno comprende de los 6ºS-14ºS, 86ºW-76ºW y de los 200 a 400 metros de profundidad, presentando las dos simulaciones una variación similar en todos los términos de la ecuación de oxígeno.

En el componente zonal de la zona frente a Perú el sistema tiende a perder oxígeno durante todo el año (~-140 y -95 x 10^3 moles de O_2/s para RPSoda y RPMercator respectivamente) siendo el primer semestre el que presenta una mayor pérdida de oxígeno. En el componente meridional existe una ganancia de oxígeno en promedio durante el año (~193 y 124 x 10^3 moles de O_2/s para RPSoda y RPMercator respectivamente) con un pico durante la transición otoño-invierno. En el componente vertical se pierde oxígeno en ambas simulaciones en promedio anual (~-11 y -17 x 10^3 moles de O_2/s para RPSoda y RPMercator respectivamente) y no se presenta un ciclo anual bien definido. En el componente de mezcla vertical no se observa variación significativa, al igual que en la zona ecuatorial. Por último, el componente biológico consume oxígeno durante todo el año (~-40 y -14 x 10^3 moles de O_2/s para

RPSoda y RPMercator respectivamente) (Figura 35 a, b, c, d, e). El balance final de oxígeno frente a Perú muestra que el sistema gana oxígeno durante verano e invierno y lo pierde durante otoño y primavera (Figura 35 f).

Tabla 3. Promedio anual de los términos de la ecuación de oxígeno (10^3 moles de O_2/s) en la ZMO de la zona Ecuatorial y frente a Perú.

zona	**ECUADOR**		**PERU**	
Simulación	**RPSoda**	**RPMercator**	**RPSoda**	**RPMercator**
O2_xadv	76.3	11.42	-143.1	-95.07
O2_yadv	-18.12	8.39	193	124.6
O2_vadv	-30.81	-5.97	-11.77	-17.29
O2_mix	2.81	1.14	1.82	1.91
O2_bio	-30.24	-14.97	-40.22	-14.52
O2_rate	-0.074	0.012	-0.316	-0.347

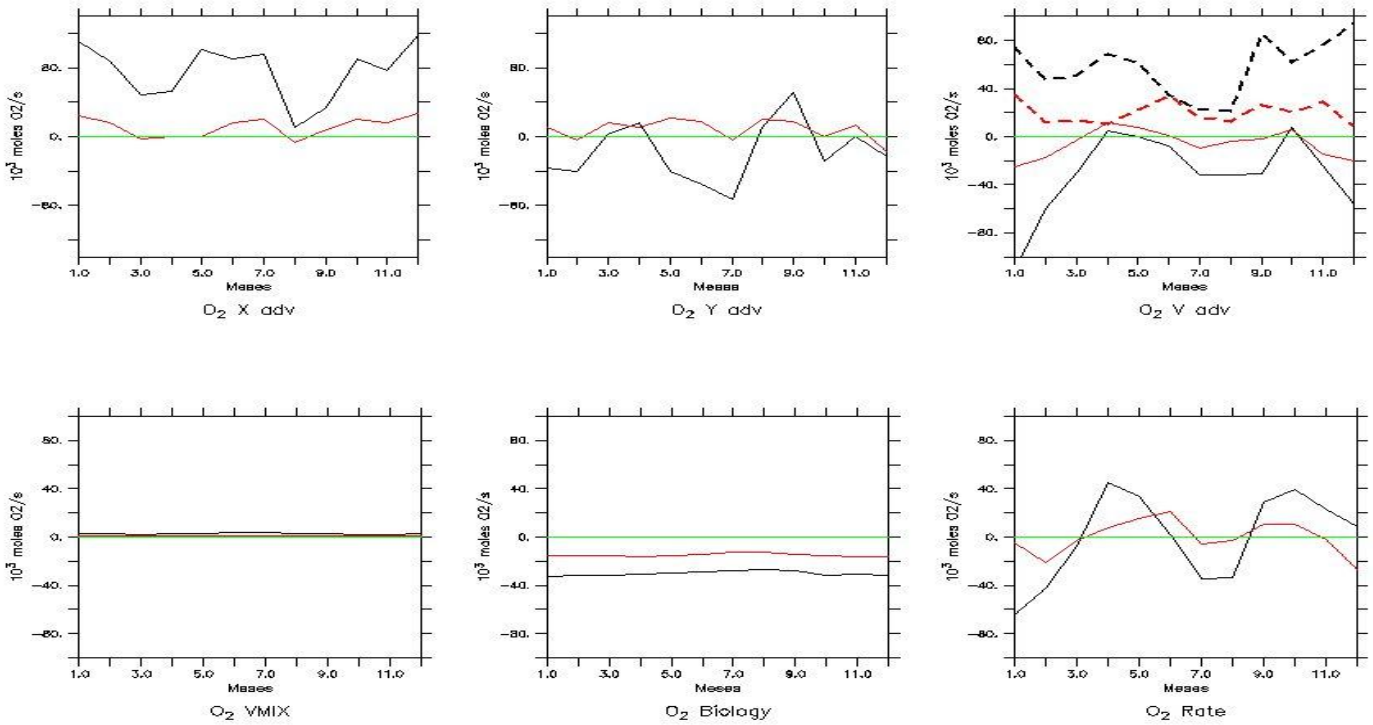

Figura 34. Variación estacional de los términos de la ecuación de oxígeno en la ZMO de la zona ecuatorial: advección zonal (O2_xadv), advección meridional (O2_yadv), advección vertical (O2_vadv), advección por mezcla vertical (O2_vmix_adv). Por último el balance neto de oxígeno en el ecuador (O2_rate) para RPSoda (línea roja) y RPMercator (línea negra). Las líneas punteadas representan o2_xadv+o2yadv.

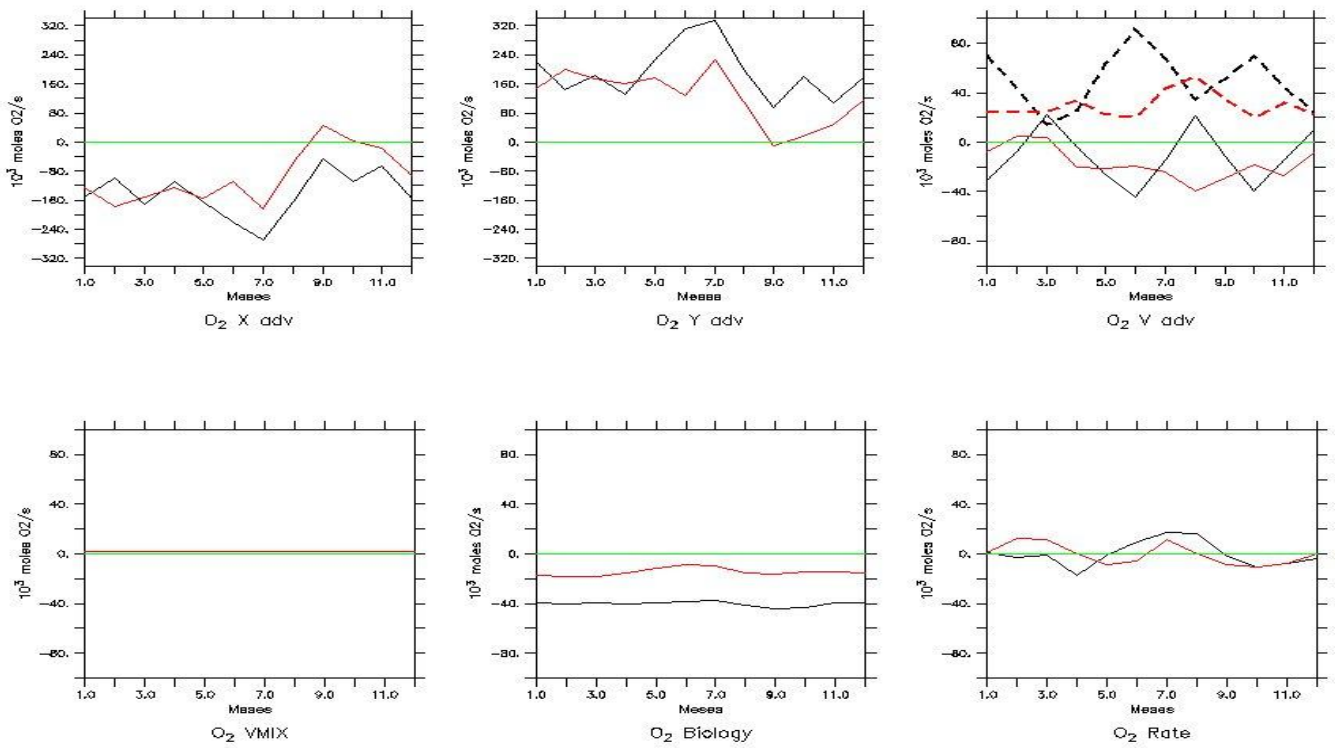

Figura 35. Variación estacional de los términos de la ecuación de oxígeno en la ZMO de la zona frente a Perú: advección zonal (O2_xadv), advección meridional (O2_yadv), advección vertical (O2_vadv), advección por mezcla vertical (O2_vmix_adv). Por último el balance neto de oxígeno frente a Perú (O2_rate) para RPSoda (línea roja) y RPMercator (línea negra). Las líneas punteadas representan o2_xadv+o2yadv.

V. DISCUSIÓN

V.1. VALIDACIÓN DEL MODELO ACOPLADO

Existen numerosos estudios en los cuales el modelo ROMS ha podido reproducir la dinámica física de los principales sistemas de afloramiento: el Sistema de la Corriente de California (*Marchesiello et al*., 2003), el Sistema de Benguela (*Penven et al*., 2001; *Veitch et al*., 2010), Canarias (*Mason et al*., 2011) y el Sistema de la Corriente de Humboldt (*Penven et al.*, 2005), entre otros. Además, frente a Perú, el modelo acoplado ROMS/PISCES también ha sido validado en trabajos que explicaron la dinámica del fitoplancton y nutrientes (*Echevin et al*., 2008 y *Albert et. al*., 2010).

A pesar de que en nuestro estudio las simulaciones presentaron algunas deficiencias en reproducir los valores exactos de algunas variables (e.g. temperatura y clorofila), el modelo fue lo suficientemente realista y capaz de simular los patrones espaciales y temporales de las principales variables físicas y biogeoquímicas para permitir la realización de experimentos significativos de sensibilidad acerca del efecto de la circulación ecuatorial en la ZMO frente a Perú.

En cuanto a la dinámica física se pudo observar que el modelo tiende a reproducir condiciones más frías cerca de la costa (en ambas simulaciones) que las observadas por el satélite Pathfinder. Este sesgo frío del modelo ROMS cerca de la costa ya ha sido observado frente a Perú por *Penven et al*. (2005) y en otros sistemas como el de la Corriente de Benguela por *Veitch et al.* (2010); siendo la explicación discutida en un trabajo anterior de *Penven et al*. (2001), en el cual menciona que la baja resolución

de los vientos y la falta de una buena representación del gradiente de ellos dentro del dominio costero contribuyen a la generación de un afloramiento más intenso, lo cual provocaría la inyección de aguas más fría a la superficie. Por otro lado, si analizamos el comportamiento del satélite, *Dufois et al*. (2012) muestra que *Pathfinder* presenta un sesgo caliente con respecto a otros productos de satélite como el de MODIS cerca de la costa en los sistemas de afloramiento de borde oriental, lo cual es inducido por las técnicas de procesamiento del satélite *Pathfinder*.

La variabilidad de los principales nutrientes en columna y superficie fue relativamente bien representada por el modelo, obteniéndose mayores concentraciones de Si, NO_3, y PO_4 dentro de la costa en los meses de invierno (mayor afloramiento) y mínimos durante verano en concordancia con lo observado por *Calienes et al*. (1985). Respecto a las concentraciones de oxígeno, se pudo observar que el modelo respecto a los datos de CARS tienden a sobrestimar el O_2 superficial y subestimar el O_2 dentro de la ZMO. La sobrestimación en superficie podría ser debido a que la clorofila modelada tiende a ser mayor a la observada, por lo que habría un mayor aporte de oxígeno en esta capa debido a una mayor actividad fotosintética, mientras que la menor concentración de O_2 dentro de la ZMO modelada respecto a la observada en la ZMO de CARS se debería a que los datos de CARS se basan en los datos de WOA, los cuales tienden a sobrestimar el O_2 en columna y producir una menor extensión de la OMZ (*Fuenzalinda et al*., 2009) (Figura 36) debido a diversos factores como: sesgos positivos en mediciones antiguas, artefactos de la interpolación y los efectos de la variabilidad en la circulación oceánica (*Bianchi et al*., 2012).

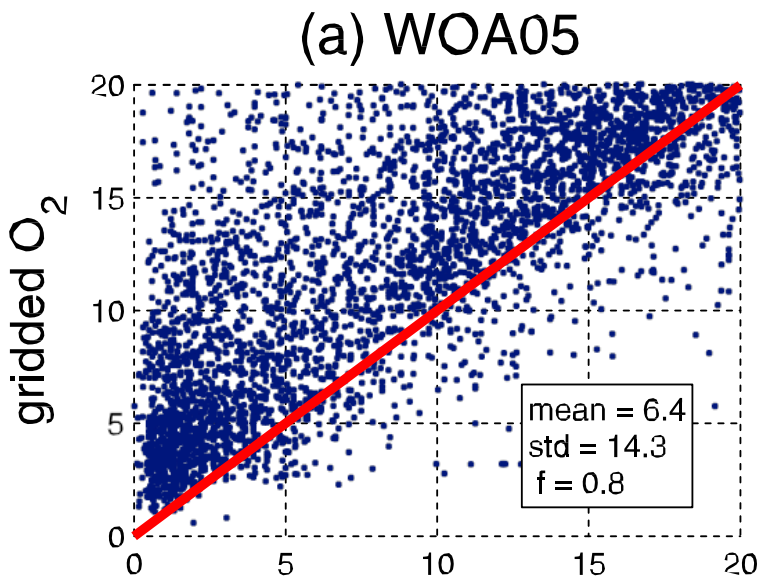

Figura 36. Gráfico de dispersión entre datos *in situ* de GLODAP (datos observados de alta resolución) (eje x) versus los datos grillados de WOA05 (eje y), y su la línea de proporción 1:1 (línea roja) (*Bianchi et al*., 2012).

La dinámica de las variables biológicas también es bien representada. Sin embargo, alrededor de los 8ºS existe una mayor concentración de clorofila que la observada por los datos satelitales de SeaWIFS frente a Perú. Esto podría deberse a que uno de los principales limitantes para el crecimiento del fitoplancton en el modelo biogeoquímico PISCES es la concentración de hierro biodisponible en el mar (*Aumont and Bopp* 2006) (Figura 37). Frente a Perú se ha demostrado que el hierro es biolimitante (*Hutchins et al*. 2002) y que la plataforma continental es la principal fuente de hierro (al igual que en el modelo), la cual se hace más ancha en la zona norte-centro (7ºS-12ºS) de Perú permitiendo la formación de "aguas marrones",

caracterizadas por tener alto contenido de hierro y fitoplancton (*Bruland et al*., 2005). Otro factor que estaría influyendo en esta sobreestimación es que PISCES es un modelo LTL (*Low Trophic Level*) y no se encuentra acoplado con un modelo HTL (*High Trophic Level*), lo cual podría influir en la variabilidad espacial de la mortalidad del plancton (*Travers and Shin*, 2010). En el aspecto temporal, el ciclo anual de la clorofila superficial es bien reproducido, pero durante los meses de febrero-marzo el modelo tiende a producir una bajada en las concentraciones en oposición de los datos observados, la cual podría ser originada por la propagación de una onda de tipo hundimiento (*downwelling*) que tiende a reproducir el modelo en este mismo periodo (*Albert* 2011).

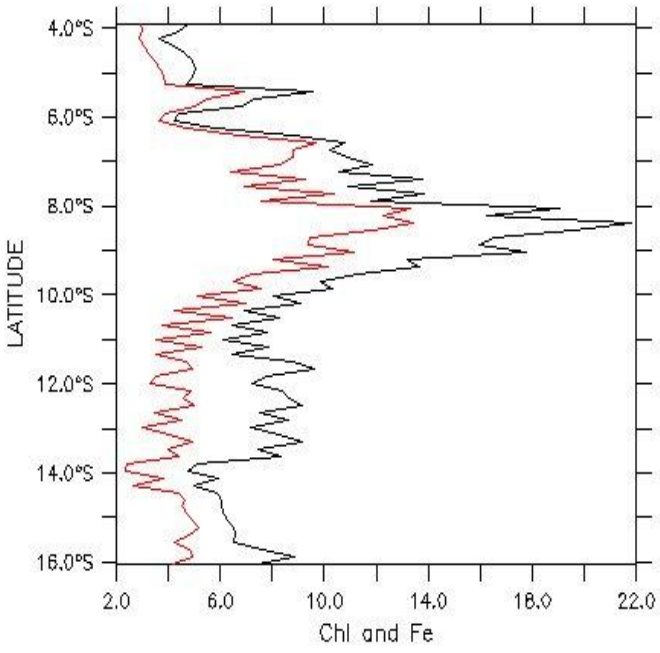

Figura 37. Concentraciones anuales promedio de Chl en mg Chl/m^3 (negro) y Fe en 10^{3}µmol/l (rojo) dentro de los 200km a la costa de los 4ºS a 16ºS de RPSoda.

V.2. SENSIBILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD A DIFERENTES CONDICIONES DE FRONTERA

Los resultados del estudio mostraron que la simulación RPSoda produce un sistema más productivo y más frío cerca de la costa frente a Perú en comparación con la simulación RPMercator. Este comportamiento podría estar siendo generado por la diferencia de velocidades de la PCUC y velocidades verticales entre ambas simulaciones. *Echevin et al*. (2011) también realiza estudios de sensibilidad sobre el modelo ROMS comparando simulaciones con diferentes fronteras SODA, ORCA y OCCAM, en el cual encuentra que el transporte de la PCUC y el transporte vertical es mayor frente a Perú en la simulación con SODA. En el presente estudio, nuestras simulaciones presentan un comportamiento similar al observado por *Echevin et al* (2011), siendo la PCUC-RPSoda la que posee velocidades mayores, abarca una mayor zona, tiene un núcleo más intenso (Figura 38) y posee mayores velocidades verticales (Figura 39) que las asociadas a la PCUC-RPMercator.

Una circulación ecuatorial más intensa en RPSoda en comparación a RPMercator estaría generando también un mayor flujo de nutrientes hacia el sistema, que sumado con la presencia de un núcleo más intenso y más somero de la PCUC podría estar transportando una mayor cantidad de nutrientes a lo largo de la costa peruana y permitiendo una mayor acumulación de hierro (*Albert et al*., 2010). A su vez, una mayor velocidad vertical estaría transportando más aguas frías y una mayor cantidad de nutrientes hacia la superficie e induciendo a una mayor productividad.

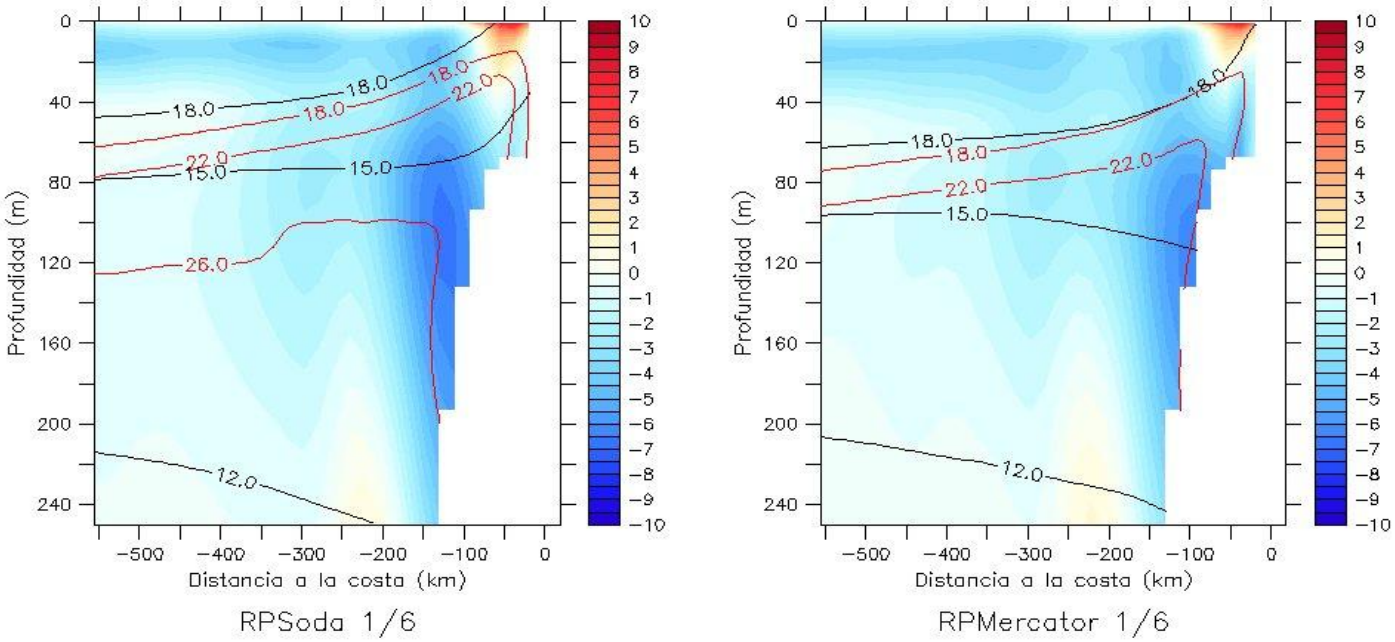

Figura 38. Promedio anual de la velocidad meridional de las corrientes en cm/s (colores), temperatura en ºC (contorno negro), nitratos en µmol/l (contorno rojo) entre los 7ºS a 13ºS para las simulaciones RPSoda (izquierda) y RPMercator (derecha).

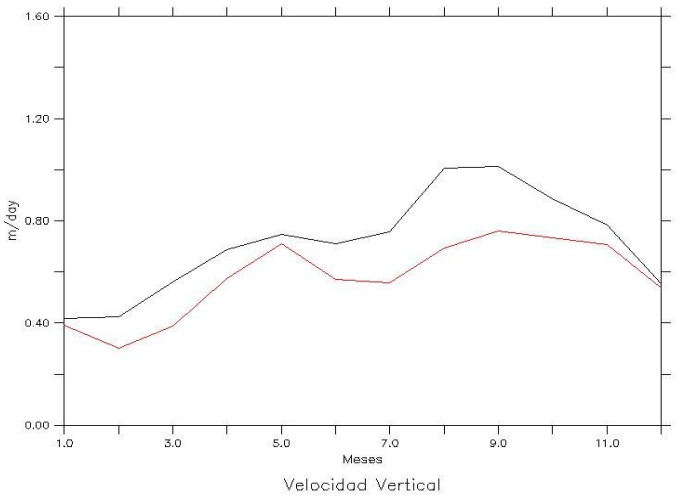

Figura 39. Velocidad vertical en m/día dentro de los 200km a la costa a los 50m de profundidad de RPSoda (línea negra) y RPMercator (línea roja).

V.3. SENSIBILIDAD DE LA ZMO A DIFERENTES CONDICIONES DE CIRCULACIÓN ECUATORIAL

En la presente sección analizamos la sensibilidad de la ZMO a diferentes intensidades de la EUC y sus ramificaciones (Jet primario y secundario). La principal diferencia entre las ZMOs simuladas (su estructura y concentración) se observa en la zona ecuatorial (entre los 4ºS-4ºN), mientras que frente a Perú existen diferencias pero son menores.

Para entender porque las diferencias son mayores entre las simulaciones en la zona ecuatorial en comparación con la zona frente a Perú, se calcularon los flujos de oxígeno de las corrientes ecuatoriales subsuperficiales y el balance de oxígeno en ambas zonas. Se observó que la simulación RPSoda presenta mayores flujos de

oxígeno que RPMercator, en particular en el flujo de oxígeno de la EUC. A su vez, cuando realizamos el balance de oxígeno para entender cuáles son las fuentes y sumideros de oxígeno, se observó que para ambas zonas la advección horizontal (sumatoria de la advección zonal con la meridional) se comporta como fuente de oxígeno para la ZMO. Sin embargo, la advección vertical y la biología se comportan como sumidero para la ZMO en ambas zonas (figura 40 y 41). Para el análisis no se tomó en cuenta la mezcla vertical debido a que presenta valores insignificantes con respecto a los demás componentes y también se puede asumir que el modelo para el oxígeno ha alcanzado la estabilidad debido a que el flujo neto en ambas zonas para las dos simulaciones es muy cercano a cero (tabla 3).

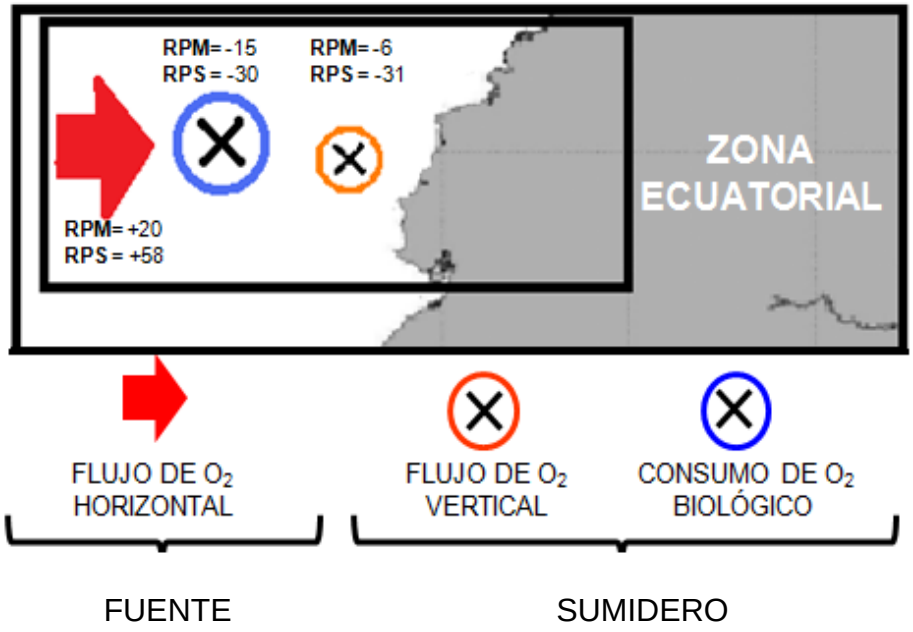

Figura 40. Esquema de las fuentes y sumideros de oxígeno de la ZMO en la zona ecuatorial.

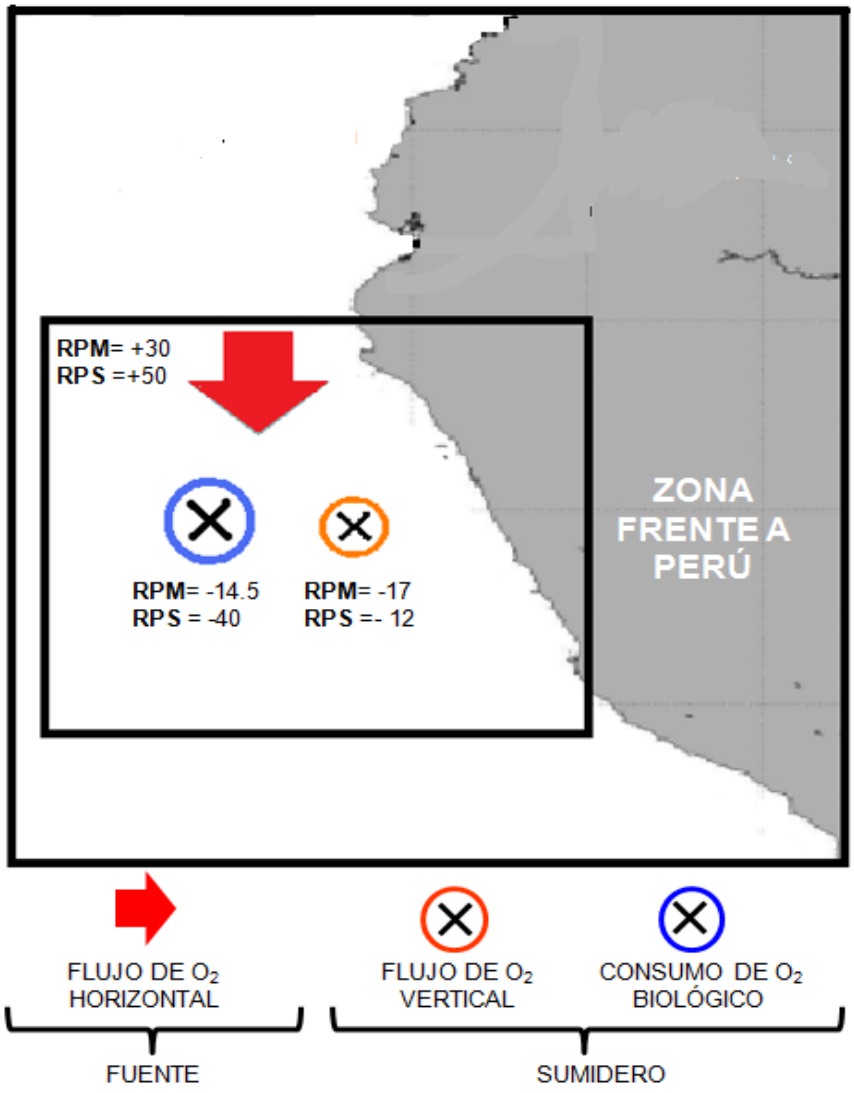

Figura 41. Esquema de las fuentes y sumideros de oxígeno de la ZMO en la zona frente a Perú.

En la zona ecuatorial, la simulación RPSoda, en comparación a la simulación RPMercator, presenta una ZMO menos intensa y posee una menor área de distribución (más realista). Esta diferencia se debería a que SODA posee una

circulación ecuatorial más intensa (EUC y Jets), lo cual genera un mayor flujo de oxígeno (mayor ventilación) dentro de esta área, reduciendo la ZMO. Como se ha mencionado en nuestro estudio, la intensidad de la EUC de SODA permite obtener una ZMO más realista en el Ecuador; sin embargo, en otras simulaciones sin acoplamiento biogeoquímico al parecer la intensidad de SODA sería demasiado fuerte (*Belmadani et al*., 2012).

Frente a Perú, la profundidad de la oxiclina cerca de la costa en RPSoda es mayor debido a que presenta una mayor productividad, por lo que una mayor de cantidad de materia orgánica sería remineralizada al morir el fitoplancton, consumiendo una mayor cantidad de oxígeno durante este proceso. Sin embargo, en términos generales, las diferencias entre la estructura y concentración de las ZMOs modeladas no son significativas.

Como se ha mencionado, las principales diferencias solo se encontrarían en la zona ecuatorial y no frente a Perú si existiera una intensificación de la circulación ecuatorial, siendo los procesos físico-biológicos los que estarían influyendo en este comportamiento de la ZMO.

En ambas zonas (el ecuador y Perú) la simulación RPSoda presenta una mayor productividad que RPMercator, por lo que al morir el fitoplancton existirá una mayor cantidad de materia orgánica que será exportada hacia el fondo, dando lugar a un mayor consumo de oxígeno durante el proceso de la remineralización. Esto es corroborado cuando observamos la influencia de la biología (término “O2 biology”) en el balance de oxígeno, donde el consumo de oxígeno por biología en RPSoda es el doble que el de RPMercator tanto en el ecuador como frente a Perú. Sin embargo, en

el ecuador los flujos de advección de oxígeno (Figura 34 a, b, c) presentan grandes diferencias entre las simulaciones en comparación con los observados frente a Perú (Figura 35 a, b, c). Esto podría estar explicando la diferencia entre la zona ecuatorial y peruana, debido a que la simulación RPSoda posee una gran advección de oxigeno (a diferencia de RPMercator) en la zona ecuatorial, siendo el aporte de oxígeno mucho mayor que el consumo por biología; obteniéndose una ZMO más reducida en esta zona. Sin embargo, frente a Perú la cantidad de oxígeno advectado en RPSoda no es muy diferente al de RPMercator, debido a que el oxígeno durante el recorrido ha ido consumiéndose como resultado de la alta productividad y que los flujos de oxígeno de los Jets en ambas simulaciones no son muy distintos, siendo este ligero mayor aporte de oxigeno por advección en RPSoda compensado con un mayor consumo de oxígeno, mientras que en RPMercator llega un poco menos de oxigeno advectado pero el consumo por biología también es menor (Figura 42).

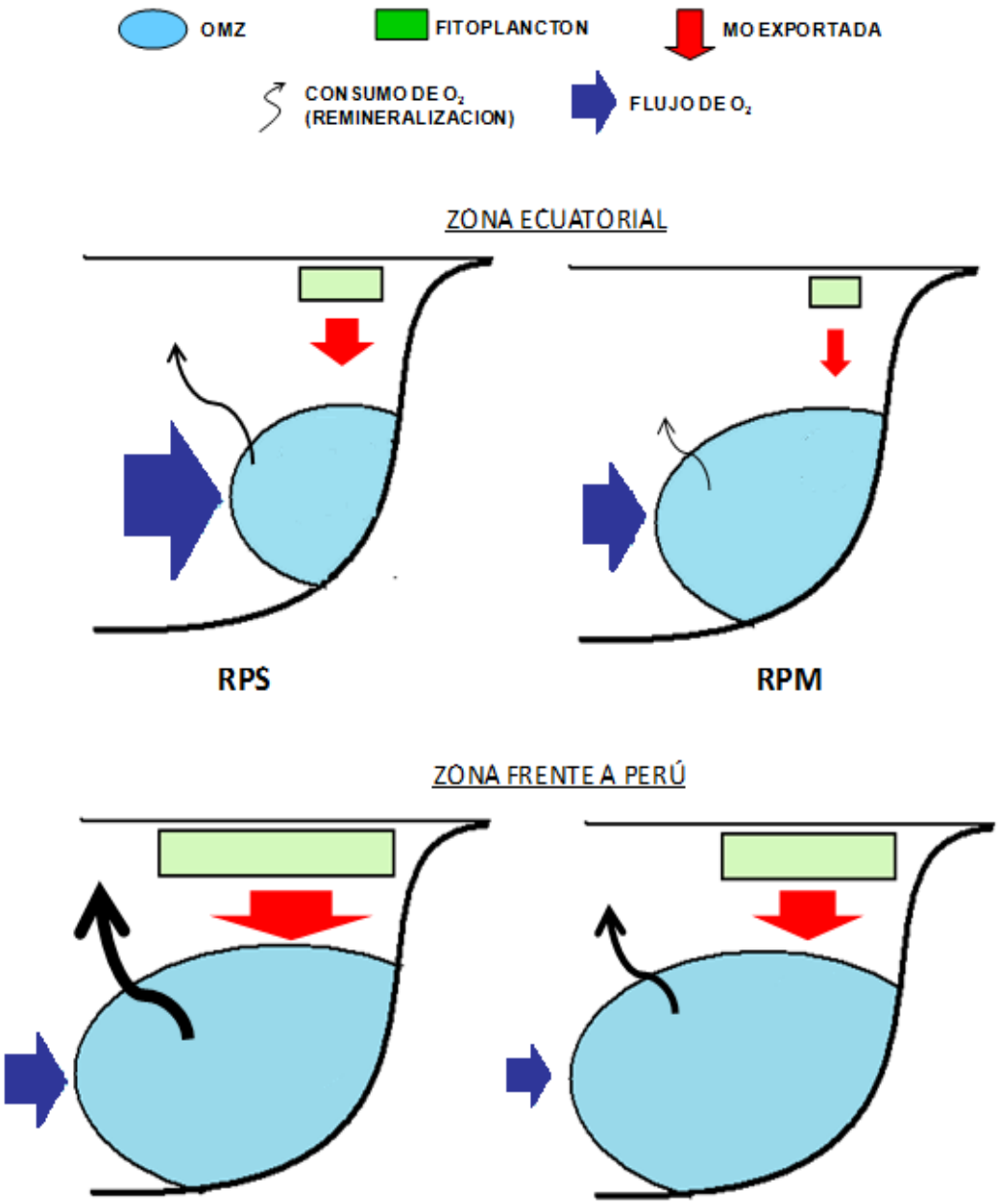

Figura 42. Esquema de los procesos físicos y biológicos que afectan a la formación de la ZMO y las principales características que influyen en las diferencias entre la ZMO de la zona ecuatorial (superior) y frente a Perú (inferior) para la simulación RPSoda (izquierda) y RPMercator (derecha).

VI. CONCLUSIONES

1. El modelo acoplado ROMS/PISCES es capaz de reproducir correctamente la dinámica (temporal y espacial) de las principales variables físicas y biogeoquímicas del Norte del Ecosistema de la Corriente de Humboldt, existiendo algunas deficiencias propias del modelo pero resultando útil para realizar nuestro estudio de sensibilidad sobre la ZMO.
2. El estudio de sensibilidad revela que la estructura y concentración de la ZMO frente una intensificación de la circulación ecuatorial se vería afectada principalmente en la zona ecuatorial y no frente a Perú, debido a que una mayor ventilación sería compensada con un mayor consumo de oxigeno por remineralización, producto de una alta productividad generada por un mayor flujo de nutrientes.

VII. PERSPECTIVAS

1. Realizar simulaciones con una mayor resolución para evaluar el rol de la meso escala en el transporte de oxígeno de costa al océano y abarcar una mayor área de estudio, debido a que posiblemente los jets no son muy sensibles a las condiciones de borde.
2. Validar las concentraciones de zooplancton modelado con datos *in situ*. En el presente estudio no se realizó la validación del zooplancton por la disponibilidad de datos observados. Sin embargo, hay que tener en cuenta que

la respiración del zooplancton que puede vivir dentro de la ZMO podría afectar a las concentraciones de oxígeno.

3. Estudios de sensibilidad de parámetros en el modelo ROMS/PISCES, debido a que algunos de los parámetros utilizados en el estudio han sido tomados de parámetros globales y podrían ser ajustados. Se analizará también la sensibilidad del modelo ROMS-PISCES a cambios en los principales parámetros que pudieran intervenir en la formación de la ZMO para optimizar la representación de las concentraciones de oxígeno en columna, para lo cual de la configuración de la simulación RPSoda se cambiaran determinados como se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Tabla de los parámetros cambiados (rojo) que intervienen en el OD en la configuración de la simulación RPSoda.

Nombre de la Simulación	**Parámetros**		
	λ_{DOC} (tasa de remineralización del carbono orgánico disuelto)	λ_{POC} (tasa de degradación del carbono orgánico particulado)	λ_{NH4} (tasa de nitrificación)
RPS-xremik	0,15	0,025	0,05
RPS-xremip	0,3	0,012	0,05
RPS-nitrif	0,3	0,025	0,02

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Albert A, Echevin V, Levy M, Aumont O. Impact of the nearshore wind stress curl on coastal circulation and primary productivity in the Peru upwelling system. *J Geophys Res* 2010; 115:C12033.
2. Albert A. Etude de la variabilité du phytoplancton dans l'upwelling du Pérou aux échelles saisonnières et intrasaisonnières [Tesis doctoral]. Francia: Universidad de Pierre et Marie Curie (Paris VI); 2011.
3. Aumont O. PISCES biogeochemical model [Report online]. 2005 [citado 20 Jul 2011]; [16 pantallas]. Disponible en: URL: http://www.lodyc.jussieu.fr/~aumont/Doc/equation.pdf.
4. Aumont O, Bopp L. Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Gl Biogeochem Cyc* 2006; 20:GB2017.
5. Behrenfeld M, Falkowski P. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol Oceanogr* 1997; 42(1):1-20.
6. Belmadani A, Echevin V, Dewitte B, Colas F. Equatorially forced intraseasonal propagations along the Peru-Chile coast and their relation with the nearshore eddy activity in 1992–2000: A modeling study. *J Geophys Res* 2012; 117:C04025.
7. Bertrand A, Chaigneau A, Peraltilla S, Ledesma J, Graco M, Monetti F, et al. Oxygen: A fundamental property regulating pelagic ecosystem structure in the coastal southeastern Tropical Pacific. *PLoS One* 2011; 6(12):e29558.
8. Bianchi D, Dunne JP, Sarmiento JL, Galbraith ED.

Data-based estimates of suboxia, denitrification, and N2O production in the ocean and their sensitivities to dissolved O2. *Global Biogeochem Cy* 2012; 26:GB2009.

9. Brink KH, Halpern D, Huyer A, Smith L. The Physical Environment of the Peruvian Upwelling System. *Prog Oceanogr* 1983; 12:285-305.
10. Brockmann C, Fahrbach E, Huyer A, Smith RL. The poleward undercurrent along the Peru coast: 5 to 15ºS. *Deep-Sea Res* 1980; 27A:847-56.
11. Broecker WT, Peng TH. Internal Cycling and Throughput Pathways from River Mouth to Sea Floor. In: Broecke WT, Peng TH, editores. Tracers in the Sea. New York: Columbia University; 1983. p. 1-44.
12. Bruland, K., Rue, E., Smith, G., Ditullio, G. Iron, macronutrients and diatom blooms in the Perú upwelling regime: brown and blue waters of Perú. *Mar Chem* 2005; 93: 81-103.
13. Calienes R, Gullén O, Lostaunau N. Variabilidad espacio-temporal de clorofila, producción primaria y nutrientes frente a la costa peruana. *Bol. Inst. Mar Perú-Callao* 1985; 10:1-44.
14. Carr ME. Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing. *Deep-Sea Res II* 2002; 49:59-80.
15. Carton JA, Giese BS. A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Mon Weather Rev* 2008; 136:2999-3017.
16. Casey KS, Brandon TB, Cornillon P, Evans R. The Past, Present and Future of the AVHRR Pathfinder SST Program. In: Barale V, Gower JFR, Alberotanza L, editores. Oceanography from Space: Revisited. Springer; 2010. p. 323-340.

17. Chavez F, Messié M. A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Prog Oceanogr* 2009; 83:80-96.

18. Chaigneau A, Graco M, Angullo K, Ledesma J, Echevin V, Flores O. Seasonal climatologies of the northern Humboldt Current System and impact of ENSO events. Part II: Nutrients and Chlorophyll concentration. 2012. En prep.

19. Codispoti LA, Brandes JA, Christensen JP, Devol AH, Naqvi SWA, Paerl HW, et al. The oceanic fixed nitrogen and nitrous oxide budgets: moving targets as we enter the anthropocene?. *Sci Mar* 2001; 65(2):85-105.

20. Conkright M, Locarnini R, Garcia H, O'Brien T, Boyer T, Stephens C, et al. World Ocean Atlas 2001: objectives, analyses, data statistics and figures CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD; 2002.

21. Czeschel R, Stramma L, Schwarzkopf FU, Giese BS, Funk A, Karstensen J. Middepth circulation of the eastern tropical South Pacific and its link to the oxygen minimum zone. *J Geophys Res* 2011; 116:C01015.

22. Diaz R, Rosenberg R. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science* 2008; 321:926-29.

23. Dufois F, Penven P, Whittle C, Veitch J. On the warm nearshore bias in Pathfinder monthly SST products over Eastern Boundary Upwelling System. *Ocean Modelling* 2012; 47:113–8.

24. Echevin V, Aumont O, Ledesma, J, Flores, G. The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peruvian upwelling system: A model study. *Prog Oceanogr* 2008; 79: 167-76.

25. Echevin V, Colas F, Chaigneau A, Penven P. Sensitivity of the Northern Humboldt Current System nearshore modeled circulation to initial and boundary conditions. *J Geophys Res* 2011; 116:C07002.

26. Emeis KC, Struck U, Leipe T, Ferdelman T. Variability in upwelling intensity and nutrient regime in the coastal upwelling system offshore Namibia: results from sediment archives. *Int J Earth Sci* 2009; 98:309–26.

27. FAO. Examen de la situación de los recursos pesqueros marinos mundiales. Servicio de Recursos Marinos (Roma), Dirección de Recursos Pesqueros; 2005. FAO Documento Técnico de Pesca. No.:457.

28. Fiedler PC and Talley LD. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog Oceanogr* 2006; 69: 143–80

29. Francis E, Beman M, Kuypers M. New processes and players in the nitrogen cycle: the microbial ecology of anaerobic and archaeal ammonia oxidation. *The ISME Journal* 2007; 1:19–27.

30. Freon P, Cury P, Shannon L, Roy C. Sustainable exploitation of small pelagic fish stocks challenged by enviromental and ecosystem changes: a review. *B Mar Sci* 2005; 76(2):385-462.

31. Fuenzalida R, Schneider W, Garcés-Vargas J, Luis B, Lange C. Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep-Sea Res II* 2009; 56:1027–38.

32. Garric G, Bourdalle-Badie R, Le Galloudec O, Bricaud C, Derval C, Durand E, et al. Description of the interannual experiment ORCA025-T09, 1998-2006. Groupe d'Intérêt Public Mercator Ocean (Francia); 2008. Report No.:

235.

33. Graco M, Ledesma J, Flores G, Girón M. Nutrientes, oxígeno y procesos biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú. *Rev Per Biol* 2007; 14(1):117-28.
34. Helly J, Levin LA. Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Res I* 2004; 51:1159-68.
35. Hutchins DA, Hare CE, Weaver RS, Zhang Y, Firme GF, DiTullio GR, et al. Phytoplankton iron limitation in the Humboldt Current and Peru Upwelling. *Limnol Oceanogr* 2002; 47(4): 997-1011.
36. Huyer A, Smith RL and Paluszkiewicz T. Coastal upwelling off Peru during normal and El Niño times, 1981-1984. *J Geophys Res* 1987; 92: 14297-307.
37. Ishida A, Mitsudera H, Kashino Y, Kadokura T. Equatorial Pacific subsurface countercurrents in a hig-resolution global ocean model. *J Geophys Res* 2005; 110:C07014.
38. Joergensen SE, Bendoricchio G. Fundamental of Ecological Modelling. 3 ed. Netherlands: Elsevier Science; 2001.
39. Johnson G, Moore D. The Pacific Subsurface Countercurrents and an Inertial Model. *J Geophys Res* 1997; 27: 2448-59.
40. Karstensen J, Stramma L, Visbeck M. Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific Oceans. *Prog Oceanogr* 2008; 77: 331–50.
41. Kessler WS. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog Oceanogr* 2006; 69: 181–217.
42. Lachkar Z, Gruber N. A comparative study of biological production in eastern

boundary upwelling systems using an artificial neural network. *Biogeosciences* 2012; 9:293–308.

43. Libes S. Introduction to Marine Biogeochemistry. Nueva York: John Wiley and Sons; 1992.
44. Liu WT, Tang W, Polito PS. NASA scatterometer provides global ocean surface wind fields with more structures than numerical weather prediction. *Geophys Res Lett* 1998; 25:761–4.
45. Lukas R. The termination of the equatorial undercurrent in the eastern Pacific. *Prog Oceanogr* 1986; 16:63–90.
46. Luyten JR, Pedlosky J, Stommel H. The ventilated thermocline. *J Phys Oceanogr* 1983; 13:292–309.
47. Mason E, Colas F, Molemaker J, Shchepetkin AF, Troupin C, McWilliams JC, et al. Seasonal variability of the Canary Current: A numerical study. *J Geophys Res* 2011; 116:C06001.
48. Marchesiello P, McWilliams JC, Shchepetkin A. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling* 2001; 3:1-20.
49. Marchesiello P, McWilliams JC, Shchepetkin A. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *J Phys Oceanogr* 2003; 33:753-83.
50. Montes I, Colas F, Capet X, Schnaider W. On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru Chile Undercurrent. *J Geophys Res* 2010; 115:C09003.

51. Oschlies A, Schulz KG, Riebesell U, Schmittner A. Simulated 21st century's increase in oceanic suboxia by CO2-enhanced biotic carbon export. *Global Biogeochem Cy* 2008; 22:GB4008.

52. Paulmier A, Ruiz-Pino D, Garçon V, Farias L. Maintaining of the Eastern South Pacific Oxygen Minimum Zone (OMZ) off Chile. *Geophys Res Lett* 2006; 33:L20601.

53. Paulmier A, Ruiz-Pino D. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Prog Oceanogr* 2009; 80:113-28.

54. Penintong J, Mahoney K, Kuwahara V, Kolber D, Calienes R, Chavez F. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Prog Oceanogr* 2006; 69:285-317.

55. Penven P, Roy C, Brundrit G, Colin de Verdière A, Fréon P, Johnson A, Lutjeharms J, Shillington A. A regional hydrodynamic model of upwelling in the Southern Benguela. *S Afr J Sci* 2001; 97(11): 472–5.

56. Penven P, Echevin V, Pasapera J, Colas F, Tam J. Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: a modeling approach. *J Geophys Res* 2005; 110(C10): C10021.

57. Penven P, Marchesiello P, Debreu L, Lefevre. Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Envir Modell Soft* 2008; 23:660-2.

58. Phillips JB. A review of the rockfishes of California. *Fish Bulletin* 1957; (104):1-157.

59. R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org/.

60. Reichart GJ, Lourens LJ, Zachariasse JW. Temporal variability in the northern Arabian Sea Oxygen Minimum Zone (OMZ) during the last 225,000 years. *Paleoceanography* 1998; 13(6):607-21.

61. Resplandy L, Levy M, Bopp L, Echevin V, Pous S, Sarma VVSS, and Kumar D. Controlling factors of the oxygen balance in the Arabian Sea's OMZ. *Biogeosciences* 2012; 9: 5095-5109.

62. Ridgway KR, Dunn JR, Wilkin JL. Ocean interpolation by four-dimensional least squares -Application to the waters around Australia. *J Atmos Ocean Tech* 2002; 19(9):1357-75.

63. Rogers AD. The role of oceanic oxygen minima in generating biodiversity in the deep sea. *Deep-Sea Res II* 2000; 47:119-48.

64. Sarmiento J, Gruber N. Ocean Biogeochemical Dynamics. New Jersey: Princeton University Press; 2006.

65. Shchepetkin AF, McWilliams JC. The regional oceanic modeling system: a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model. *Ocean Modelling* 2005; 9:347–404.

66. Silva N and Neshyba S. On the southernmost extension of the Peru-Chile Undercurrent. *Deep Sea Res* 1979; 26A: 1387-93.

67. Song Y, Haidvogel DB. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *J Comp Phys* 1994;

115(1):228-44.

68. Stramma L, Johnson GC, Sprintall J, Mohrholz V. Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans. *Science* 2008; 320:655-8.

69. Stramma L, Visbeck M, Brandt P, Tanhua T, Wallace D. Deoxygenation in the oxygen minimum zone of the eastern tropical North Atlantic. *Geophys Res Lett* 2009; 36: L20607.

70. Stramma L, Johnson G, Firing E, Schmidtko S. Eastern Pacific oxygen minimum zones: Supply paths and multidecadal changes. *J Geophys Res* 2010a; 115:C09011.

71. Stramma L, Schmidtko S, Levin LA, Johnson GC. Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts. *Deep-Sea Res I* 2010b; 57:587-95.

72. Strub PT, Mesias JM and James C. Altimeter observation of the Peru-Chile Countercurrent. *Goephys Res Lett* 1998; 22(3): 211-4.

73. Strub PT, Mesias JM, Montecino V, Rutlant J, Salinas S. Coastal ocean circulation off western South America. Coastal Segment (6,E). In: Robison AR, Brink KH, editors. The Sea. New York: Wiley; 1998. p. 273-313.

74. Tabash FA. Un Modelo Biogeoquímico para el Golfo de Nicoya, Costa Rica. Rev Biol Trop 2006; 55(1):33-42.

75. Toggweiler JR, Dixon K, Broecker WS. The Peru upwelling and the ventilation of the South Pacific thermocline. J Geophys Res 1991; 96: 20467–97.

76. Tegen I, Fung I. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *J Geophys Res* 1995; 100:18707–26.

77. Traver M, Shin YJ. Spatio-temporal variability in fish-induced predation mortality on plankton: A simulation approach using a coupled trophic model of the Benguela ecosystem. *Prog Oceanogr* 2010; 84:118-20.

78. Tsuchiya M. Subsurface countercurrents in the eastern equatorial Pacific. *J Mar Res* 1975; Supl 33:145–75.

79. Tsuchiya M and Talley LD. A Pacific Hydrographic section at 88°W: Water-property distribution. *J Geophys Res* 1998; 103(C6): 12899-918.

80. Ulloa O, Pantoja S. The oxygen minimum zone of the eastern South Pacific. *Deep-Sea Res II* 2009; 56:987-91.

81. Veitch J, Penven P, Shillington F. Modelling equilibrium dynamics of the Benguela Current Ecosystem. *J Phys Oceanogr* 2010; 40:1942-64.

82. Wyrtki K. The oxygen minima in relation to ocean circulation. *Deep-Sea Res I* 1962; 9:11-23.

83. Wyrtki K. Circulation and water masses in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Int J Oceanol Limnol* 1967; 1:117–47.

ANEXOS

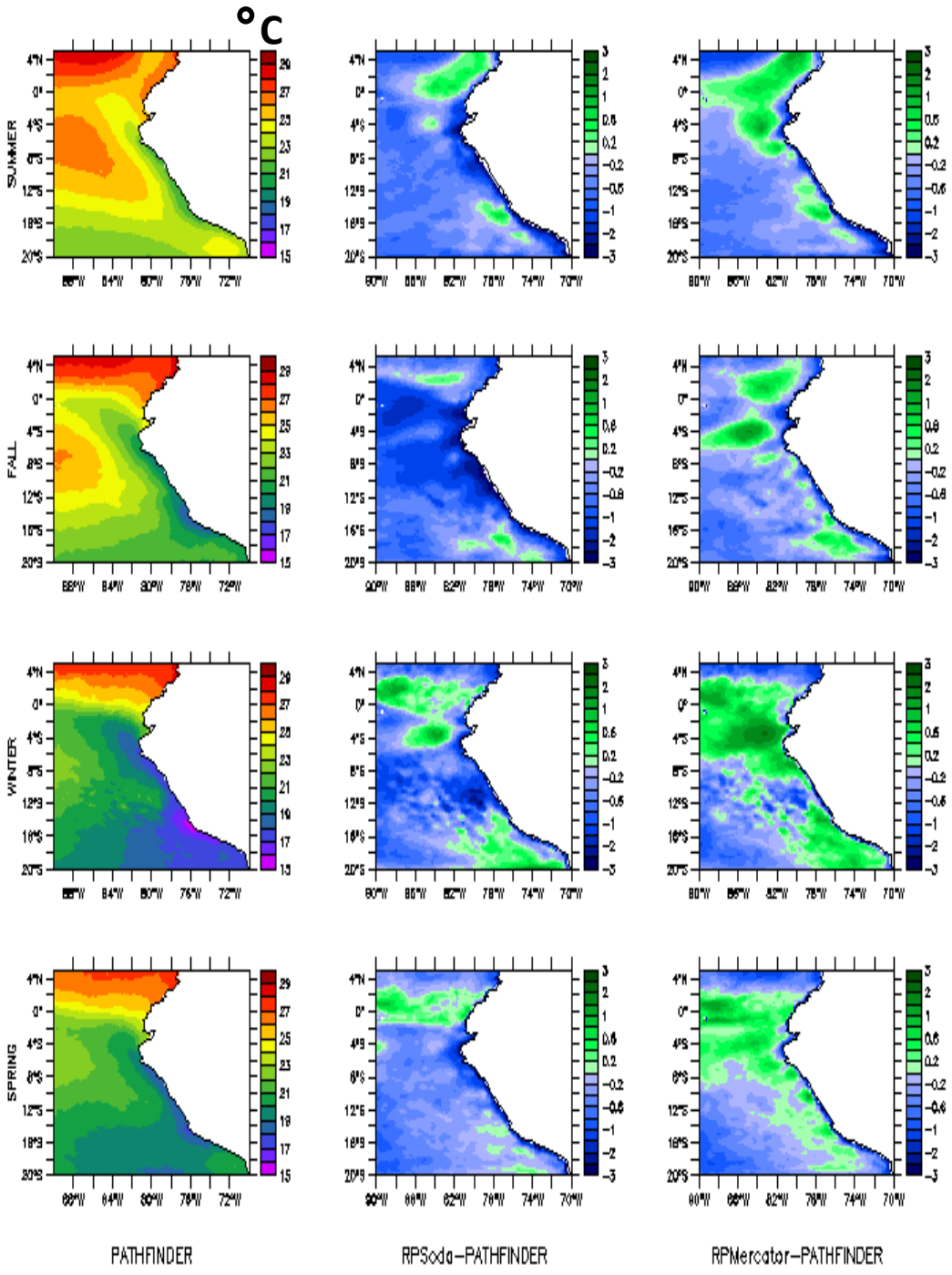

Figura 43. Temperatura superficial del mar por estaciones de *Pathfinder* (izquierda) en ºC; las diferencias estacionales entre RPSoda y pathfinder (centro); y entre RPMercator y *Pathfinder* (derecha)

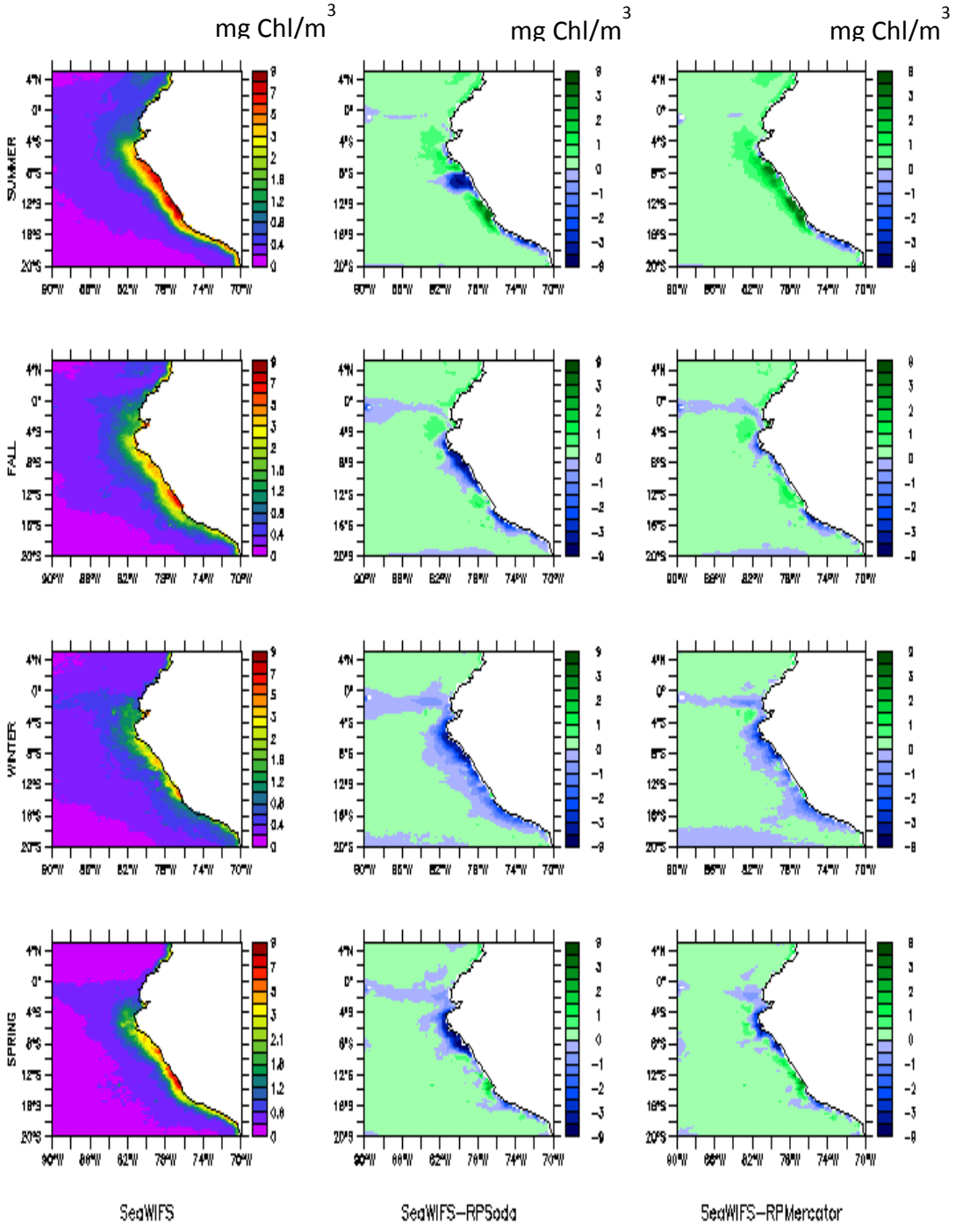

Figura 44. Clorofila superficial por estaciones de SeaWIFS (izquierda) en mgChl/m^3; las diferencias estacionales entre SeaWIFS y RPSoda (centro); y entre SeaWIFS y RPMercator (derecha).

CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DENTRO DE LA OMZ

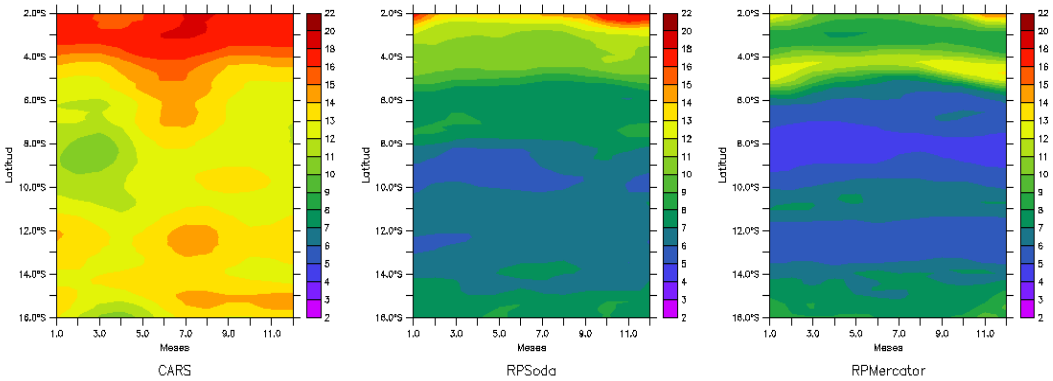

Figura 45. Variación estacional de concentración de oxígeno disuelto (µmol/kg) dentro de la ZMO en la zona oceánica (entre 200-400km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

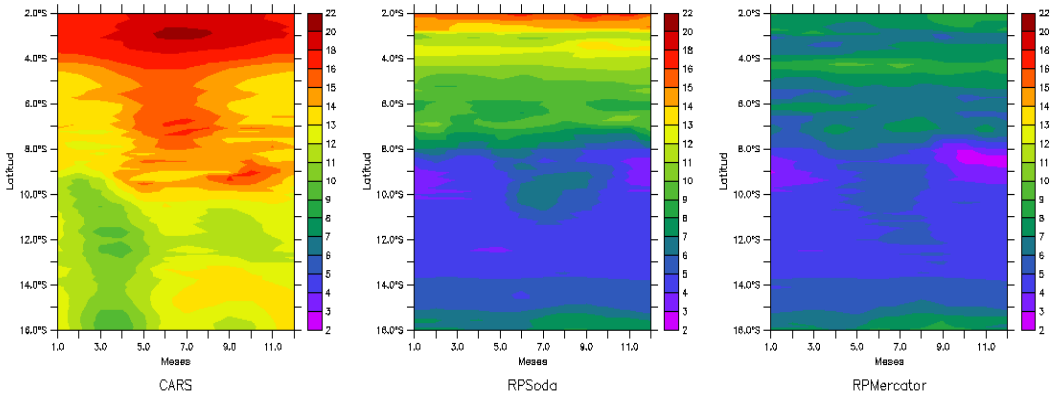

Figura 46. Variación estacional de concentración de oxígeno disuelto (µmol/kg) dentro de la ZMO en la zona costera (entre 0-200km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

PROFUNDIDAD DE LA OXICLINA

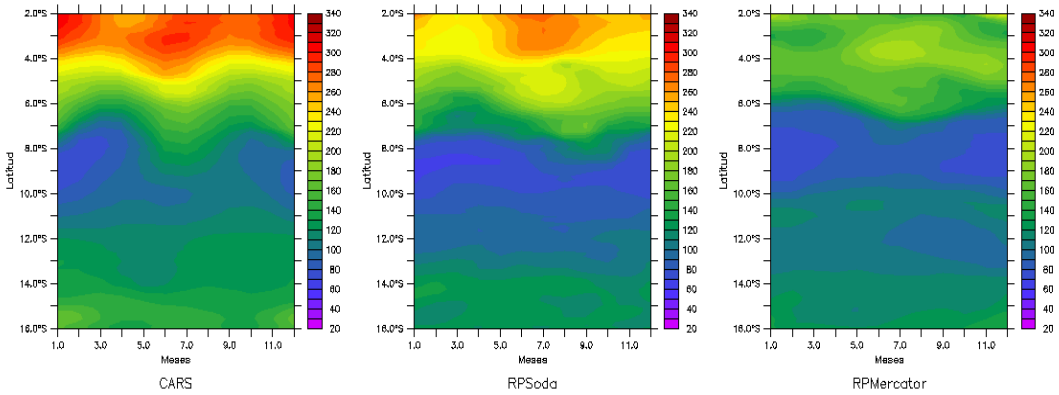

Figura 47. Variación estacional de la profundidad de la capa superior de la ZMO (metros) en la zona oceánica (entre 200-400km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

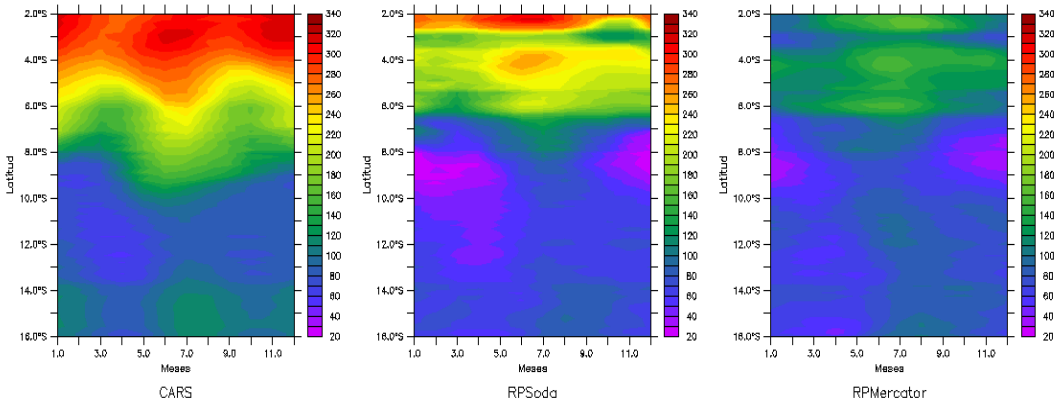

Figura 48. Variación estacional de la profundidad de la capa superior de la ZMO (metros) en la zona costera (entre 0-200km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

ESPESOR DE LA OMZ

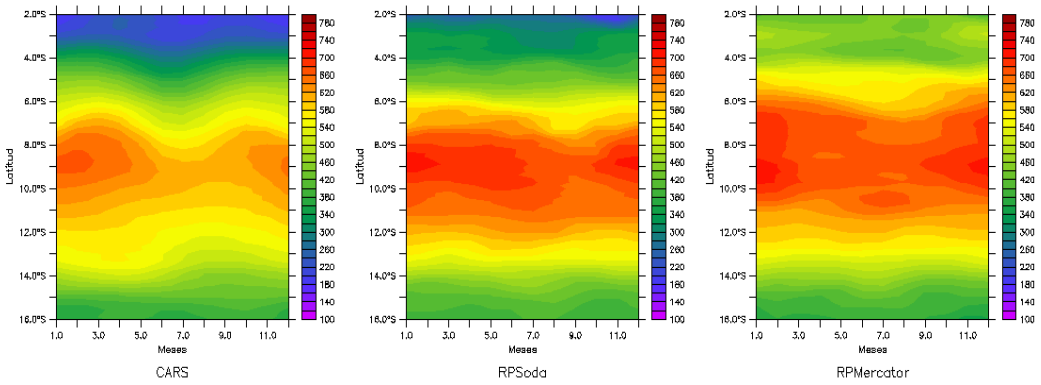

Figura 49. Variación estacional del espesor de la ZMO (metros) en la zona oceánica (entre 200-400km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).

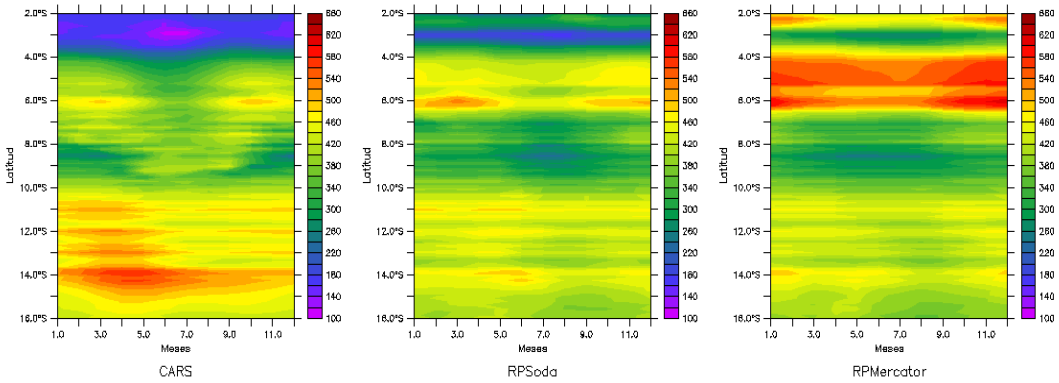

Figura 50. Variación estacional del espesor de la ZMO (metros) en la zona costera (entre 0-200km de la costa) de los 2ºS-16ºS para CARS (izquierda), RPSoda (centro) y RPMercator (derecha).