



UNIVERSIDAD ARTURO PRAT
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL MAR



INFORME FINAL

**EFFECTOS DE LA VARIABILIDAD DE LA CAPA DE MÍNIMO
DE OXÍGENO (CMO) EN LA DISTRIBUCIÓN Y LA
ABUNDANCIA DE LOS PRINCIPALES RECURSOS
PESQUEROS DE LA ZONA NORTE**

**PROYECTO DEL FONDO DE INVESTIGACION PESQUERA
2007-45**



IQUIQUE, SEPTIEMBRE 2009

UNIVERSIDAD ARTURO PRAT

DEPTO. CIENCIAS DEL MAR

INFORME FINAL

PROYECTO DEL FONDO DE INVESTIGACION PESQUERA

N° 2007-45

**EFFECTOS DE LA VARIABILIDAD DE LA CAPA DE MÍNIMO
DE OXÍGENO (CMO) EN LA DISTRIBUCIÓN Y LA
ABUNDANCIA DE LOS PRINCIPALES RECURSOS
PESQUEROS DE LA ZONA NORTE**

**DEPTO. DE CIENCIAS DEL MAR
UNIVERSIDAD ARTURO PRAT**

IQUIQUE, SEPTIEMBRE 2009

**Departamento de Ciencias del Mar
Universidad Arturo Prat**

PROYECTO

FIP N° 2007-45 Efectos de la variabilidad de la capa de mínimo de oxígeno (CMO) en la distribución y la abundancia de los principales recursos pesqueros de la zona norte

REQUIRENTE

Fondo de Investigación Pesquera
Presidente Consejo de Investigación Pesquera:
Sr. Jorge Chocair

UNIDAD EJECUTORA

Departamento de Ciencias del Mar
Universidad Arturo Prat

SUBCONTRATOS

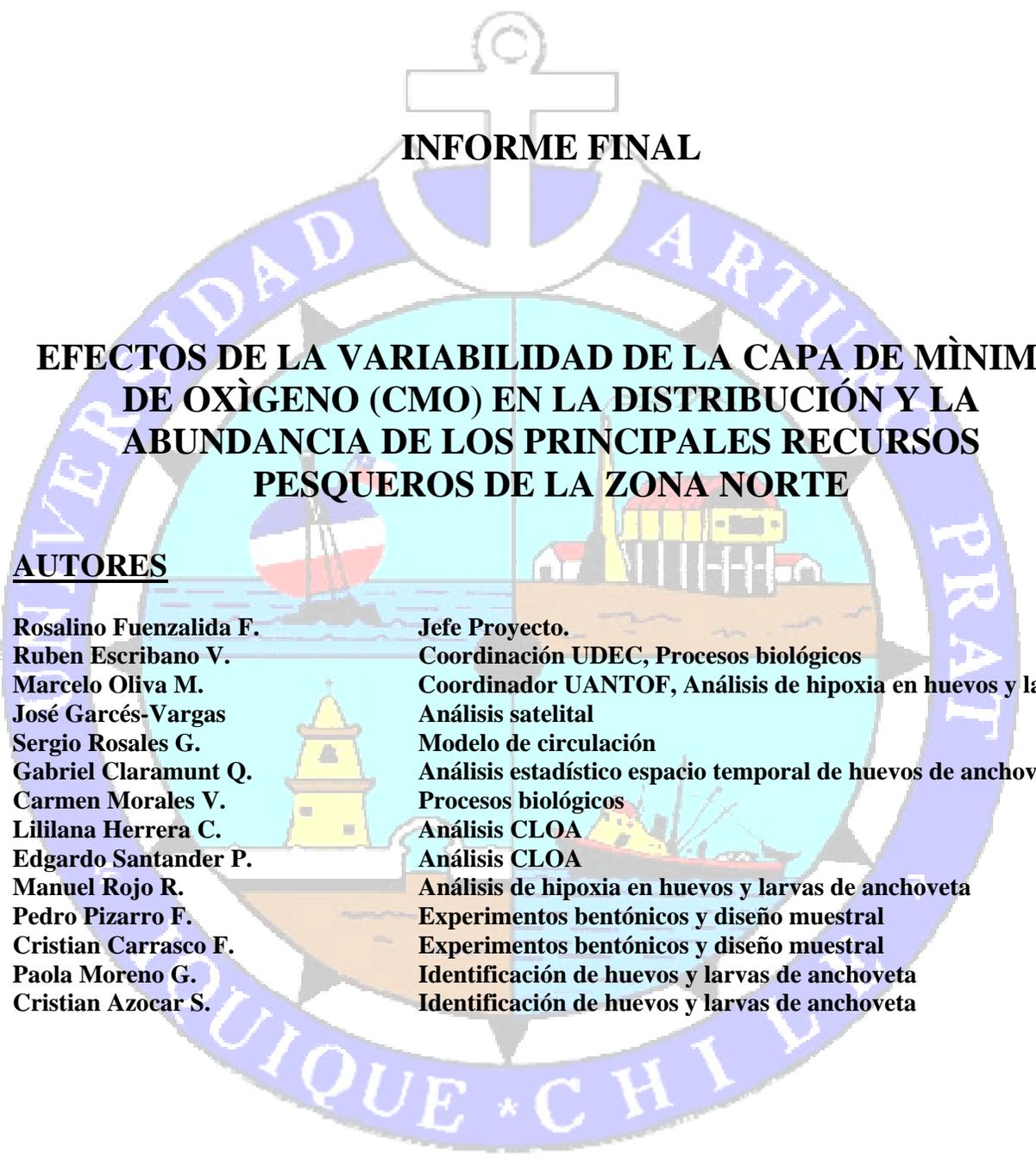
Universidad de Concepción
Dr. Rubén Escribano
Departamento de Oceanografía
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas

Universidad de Antofagasta
Marcelo Oliva
Dr. en Oceanología Biológica
Facultad de Recursos del Mar

JEFE PROYECTO

Dr. Rosalino Fuenzalida Fuenzalida
Depto. de Ciencias del Mar
Universidad Arturo Prat
Casilla 121, Iquique, Chile
Tel.: 56-57-394562
Fax: 56-57-380393
E-mail: rfuenzal@unap.cl

Iquique Septiembre de 2009



INFORME FINAL

EFFECTOS DE LA VARIABILIDAD DE LA CAPA DE MÍNIMO DE OXÍGENO (CMO) EN LA DISTRIBUCIÓN Y LA ABUNDANCIA DE LOS PRINCIPALES RECURSOS PESQUEROS DE LA ZONA NORTE

AUTORES

Rosalino Fuenzalida F.

Ruben Escribano V.

Marcelo Oliva M.

José Garcés-Vargas

Sergio Rosales G.

Gabriel Claramunt Q.

Carmen Morales V.

Lililana Herrera C.

Edgardo Santander P.

Manuel Rojo R.

Pedro Pizarro F.

Cristian Carrasco F.

Paola Moreno G.

Cristian Azocar S.

Jefe Proyecto.

Coordinación UDEC, Procesos biológicos

Coordinador UANTOF, Análisis de hipoxia en huevos y larvas

Análisis satelital

Modelo de circulación

Análisis estadístico espacio temporal de huevos de anchoveta.

Procesos biológicos

Análisis CLOA

Análisis CLOA

Análisis de hipoxia en huevos y larvas de anchoveta

Experimentos bentónicos y diseño muestral

Experimentos bentónicos y diseño muestral

Identificación de huevos y larvas de anchoveta

Identificación de huevos y larvas de anchoveta

Septiembre 2009

I. RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto FIP 2007-45 se centra en comprender los efectos de la variabilidad de la capa de mínimo de oxígeno (CMO) en la distribución y la abundancia de los principales recursos pesqueros de la Zona Norte. Este proyecto, financiado en el marco del Fondo de Investigación Pesquera (FIP), contempla varios estudios. **1)** El efecto de la CMO en la determinación del éxito o fracaso de la Anchoveta para lo cual se desarrolló: **a)** el estudio de la distribución espacial de la CMO y su asociación a la distribución horizontal de huevos de anchoveta, para ello se realizó el Crucero ZMO_01, durante el período invernal (entre el 26 y el 30 de agosto del 2008), a bordo de la embarcación industrial “Roble”. El crucero abarcó la zona comprendida entre Chucumata (20°30’S) y Tocopilla (22°00’S), realizándose un total de 7 transectas perpendiculares a la costa, equidistantes entre sí por 15 mn, en las que se efectuó 41 estaciones de muestreo bio-oceanográfico ubicadas a 1, 3, 5, 10, 20, 30 y 50 mn de la costa. Además, se incorporó información combinada y satelital correspondiente a la temperatura superficial del mar, velocidades geostróficas y magnitud y dirección del viento del área entre 18° S-25° S y 80° W-70° W; **b)** el estudio de la distribución temporal y vertical de la CMO y su influencia en la distribución vertical de huevos de anchoveta dentro de la zona de surgencia, para ello se efectuó cruceros semanales a bordo de la embarcación de investigación de la Universidad Arturo Prat “Rigel”, durante el período de desove invernal (9 de julio al 10 de septiembre de 2008), para examinar los cambios temporales de la CMO y su influencia en el desove de anchoveta, incorporándose además un área modelo desde los 21°15’S y los 21°30’S, donde se realizó una transecta perpendicular a la costa, localizada a los 21°18’S de latitud con una longitud máxima de 7 mn, efectuándose 4 estaciones bio-oceanográficas distribuidas a 1, 3, 5, 7 millas de la costa sobre la transecta; y **c)** el estudio de la mortalidad *in situ* de huevos de anchoveta, asociada a potenciales depredadores y a cambios en la distribución espacial y temporal de la CMO, para ello se realizó un muestreo aleatorio por cinco días consecutivos cada 12 horas (día y noche) durante invierno en un área modelo definida como un cuadrante de 5 x 10 mn, correspondiente a 5 mn en el sentido latitudinal y 10 mn en el sentido longitudinal. Sobre el eje longitudinal (costa-océano), se espera una mayor variabilidad en la distribución vertical de la CMO, huevos y larvas de anchoveta. **2)** Determinar la relación entre los estadios tempranos de la anchoveta y la CMO, realizando para ello, la captura de huevos y larvas de anchoveta desde el área costera de la Bahía Mejillones (23°S) y luego experimentar

con ellos en el laboratorio los efectos de la hipoxia sobre sus tasas de desarrollo y mortalidad. **3)** Implementar un modelo numérico que permita reproducir el comportamiento de la distribución de la CMO en la zona y su asociación con la población de Anchoqueta, para ello se realizó cinco experimentos o simulaciones con un modelo tridimensional de volumen finito. Finalmente **4)** Determinar el efecto de la CMO en las poblaciones bentónicas de interés comercial, para ello se realizó la toma de muestras y observaciones en 7 áreas de manejo, entre el 11 y 19 de agosto del 2008 y entre 23 y 24 de enero del 2009; en cada una de las áreas se generó 1 transecta perpendicular a la línea de costa, efectuándose 4 estaciones a 0, 5, 10 y 15 metros de profundidad.

El presente documento entrega resultados de los efectos de la variabilidad de la CMO en la distribución y la abundancia de los principales recursos pesqueros de la Zona Norte. Cabe destacar que durante el Crucero ZMO_01 de invierno del 2008, se presentó un marcado evento de surgencia costera centrado en 21.18°S asociado a bajas temperaturas y salinidades, alta densidad y bajo contenido de oxígeno. Además en este evento se observó una activa participación de dos masas de agua: el agua Intermedia del Pacífico Suroriental (AIPSO) y el Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS). Por otra parte, la información combinada y satelital correspondiente a la temperatura superficial del mar, velocidades geostroficas y magnitud y dirección del viento guardaron una estrecha relación con las observaciones *in situ* del Crucero ZMO_01.

Además, en la distribución espacial y temporal donde se ubicó la CMO, se encontraron huevos y larvas, lo cual afirma en una primera aproximación los resultados obtenidos en los experimentos de hipoxia, los que muestran una alta tolerancia de huevos y larvas a concentraciones de oxígeno definitivamente hipóxicas y que se aproximan a la anoxia. No obstante, las mayores abundancias de huevos, larvas yolk-sac y larvas en preflexión se encontraron en el estrato superior.

La cantidad de oxígeno disuelto expresado en ml/L, en los lugares y a las profundidades muestreadas, en todos los valores determinados estuvieron sobre la capa mínima de oxígeno, las Caletas Chanavaya y Río Seco presentaron los valores más bajo y fueron en verano. Los promedios por profundidad en ambas campañas disminuyen y cuyo patrón es más nítido en las áreas de manejo de las caletas del sur, tanto en invierno como en verano.

Las mayores densidades medias, para los recursos loco, lapas, erizo y pulpo, tanto en invierno como en verano, se detectan en los primeros 10 metros de profundidad, en cambio locate las mayores densidades se presentan a profundidades superiores a 15 metros, al igual que cholga y choro zapato.

La densidad en función de la profundidad para las especies de interés comercial en las áreas de manejo entre 1998 y 2008, se presento en un rango entre 3 y 24 metros. La situación por caletas y años se observa que el recurso locate, cholga y choro zapato se distribuye a profundidades superiores a los 10 metros en comparación a los otros recursos de importancia económica, en donde los recursos se detectan a menos de 10 metros de profundidad.

II. INDICE GENERAL

I. RESUMEN EJECUTIVO	1
II. INDICE GENERAL	4
III. INDICE DE FIGURAS	6
IV. INDICE DE TABLAS	14
V. OBJETIVOS	15
1. OBJETIVO GENERAL	15
2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
VI. ANTECEDENTES GENERALES	16
VII. METODOLOGÍA	19
1. Objetivo específico N°2.1	19
1.1 Distribución espacial de la CMO y huevos de anchoveta	19
1.1.1 Información oceanográfica	19
1.1.2 Información biológica	21
1.1.3 Información combinada y satelital	23
1.2 Distribución temporal de la CMO y distribución vertical de huevos de anchoveta dentro de la zona de surgencia.	25
1.3 Mortalidad <i>in situ</i> de huevos de anchoveta y potenciales depredadores asociada a cambios en la distribución espacial y temporal de la CMO.	27
1.4 Análisis de la correlación entre la CMO y distribución de huevos de anchoveta en el área principal de desove.	30
1.4.1.- Modelos GAM:	30
1.4.2.- Preferencia - rechazo	31
1.4.3.- Análisis de la distribución temporal de la CMO y huevos y larvas de anchoveta	32
2. Objetivo específico N°2.2	33
2.1 Experimentos en laboratorio de los efectos de hipoxia sobre las tasas de desarrollo y mortalidad de huevos de anchoveta.	33
3. Objetivo específico 2.3	37
3.1 Modelo	37
3.2 Dominio de modelación	39
4. Objetivo específico 2.4	42
4.1 Zona de estudio y muestreo.	42
4.1.1. Experimental.	42
4.1.2. Áreas de manejo.	42
4.2. Efecto de la hipoxia sobre organismos bentónicos	43
4.2.1. Experimento	43
4.2.2. Áreas de manejos.	44
VIII. RESULTADOS	47
1. Objetivo específico N° 2.1	47
1.1 Distribución espacial de la CMO y huevos de anchoveta	47
1.1.1 Información oceanográfica	47
1.1.2 Información biológica	70
1.1.3 Información combinada y satelital	86
1.2 Distribución temporal de la CMO y distribución vertical de huevos de anchoveta dentro de la zona de surgencia.	90

1.2.1	Variabilidad temporal de las condiciones oceanográficas	90
1.2.2	Variabilidad temporal de Biomasa Fitoplanctónica.	121
1.2.3	Variabilidad temporal de huevos y larvas de anchoveta.	125
1.3	Mortalidad <i>in situ</i> de huevos de anchoveta y potenciales depredadores asociada a cambios en la distribución espacial y temporal de la CMO.	131
1.3.1	Variabilidad diaria de las condiciones oceanograficas	131
1.3.2	Variabilidad diaria de huevos y larvas de anchoveta.	136
1.3.3	Variabilidad temporal del zooplancton gelatinoso	140
2.	Objetivo específico N° 2.2	150
2.1	Experimento de hipoxia en huevos de anchoveta	150
2.2	Experimento de hipoxia en larvas de anchoveta	152
3.	Objetivo específico N° 2.3	156
3.1	Malla no estructurada	156
3.2	Condiciones Iniciales de invierno y verano Austral	157
3.3	Campos de temperatura y salinidad después de 30 días de estabilización	157
3.4	Oxígeno Disuelto después de 30 días de estabilización	169
3.5	Viento	172
3.6	Variación del Oxígeno	174
3.7	Derivadores	174
4.	Objetivo específico N° 2.4	179
4.1	Determinar el efecto de la capa de mínimo de oxígeno en las poblaciones bentónicas de interés comercial.	179
4.1.1	Efecto de la hipoxia sobre organismos bentónicos	179
4.1.2	Áreas de manejos	186
IX.	DISCUSION	197
X.	CONCLUSIONES	206
XI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	208
XII.	PERSONAL PARTICIPANTE Y HORAS HOMBRE	214
XIII.	ANEXO TALLER	216

III. INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Posición geográfica de las estaciones bio-oceanográficas. Crucero ZMO, durante: a) invierno; 26 al 30 de agosto del 2008 y b) verano 13 al 17 de enero 2009, a bordo de la embarcación industrial “Roble”.....20

Figura 2: Posición geográfica de las estaciones bio-oceanográficas. Estaciones de muestreo semanal, para distribución vertical en el área modelo la sección perpendicular a la costa frente a Caleta Chipana (21° 18’S), durante el invierno de 2008 (09 de julio al 10 de septiembre) y verano de 2009 (15 de enero al 20 de marzo).....26

Figura 3: Posición geográfica de las estaciones bio-oceanográficas. Estaciones de muestreo diurno y nocturno en el área modelo, frente a Caleta Chipana (21.5°S), durante el periodo a) invierno; 10 al 15 de agosto del 2008 y b) verano; 15 al 20 de marzo 2009, a bordo de la embarcación de investigación “Rigel”.29

Figura 4: Vista de los sistemas experimentales.....35

Figura 5: Detalle del arreglo de las Unidades experimentales36

Figura 6. Dominio de modelación, se indica con un la línea blanca las fronteras del dominio.40

Figura 7: Montaje experimental de hipoxia en organismos bentónicos en laboratorio.....44

Figura 8: Toma de muestra para la determinación de oxígeno en las áreas de manejo.....45

Figura 9: Observaciones de recursos de importancia comercial en las áreas de manejo.46

Figura 10. Distribución superficial de: a) Temperatura (°C), b) Salinidad (psu), c) Oxígeno Disuelto (mL/L) y d) Densidad (kg/m³) entre el 26 al 30 de agosto del 2008. Crucero ZMO.48

Figura 11. Distribución superficial de: a) Temperatura (°C), b) Salinidad (psu), c) Oxígeno Disuelto (mL/L) y d) Densidad (kg/m³) entre el 12 al 16 de enero del 2009. Crucero ZMO.50

Figura 12: Diagrama T-S-O₂; a) Invierno de 2008 (26 al 30 de agosto), b) Verano de 2009 (12 al 16 de enero). Cruceros ZMO.....51

Figura 13. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 30’S . Crucero ZMO, invierno 2008.54

Figura 14. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 45’S . Crucero ZMO, invierno 2008.55

Figura 15. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 00’S. Crucero ZMO, invierno 2008.56

Figura 16. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 18’S. Crucero ZMO, invierno 2008.57

Figura 17. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 30’S . Crucero ZMO, invierno 2008.58

Figura 18. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 45’S. Crucero ZMO, invierno 2008.59

Figura 19. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 22° 00’S. Crucero ZMO, invierno 2008.60

Figura 20. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 30’S. Crucero ZMO, verano 2009.....63

Figura 21. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 45’S. Crucero ZMO, verano 2009.....64

Figura 22. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 00’S. Crucero ZMO, verano 2009.....65

Figura 23. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m ³) en la latitud 21° 18'S. Crucero ZMO, verano 2009.....	66
Figura 24. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m ³) en la latitud 21° 30'S. Crucero ZMO, verano 2009.....	67
Figura 25. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m ³) en la latitud 21° 45'S. Crucero ZMO, verano 2009.....	68
Figura 26. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m ³) en la latitud 22° 00'S. Crucero ZMO, verano 2009.....	69
Figura 27. Distribución superficial de clorofila-a (µg/l), para el área comprendida entre Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°00'S). Crucero de invierno 2008.....	70
Figura 28. Distribución superficial de clorofila-a (µg/L), para el área comprendida entre Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°00'S). Crucero de Verano.....	71
Figura 29. Distribución vertical por secciones de clorofila-a (µg/l), para el área comprendida entre Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°00'S). Crucero de invierno de 2008.....	72
Figura 30. Distribución vertical por secciones de clorofila-a (µg/L), para el área comprendida entre Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°00'S). Crucero de verano del 2009.....	73
Figura 31. Distribución vertical de componentes del zooplancton gelatinoso obtenido frente a la zona de El Loa (21 °S) durante julio del 2008. Los estratos se promediaron desde 46 estaciones de muestreo entre 1 mn y 50 mn desde la costa. Las barras horizontales corresponden al error estándar desde la media.....	75
Figura 32. Distribución espacial de componentes del zooplancton gelatinoso obtenido en la zona frente a El Loa (21° S) en julio del 2008. El contorno de colores ilustra la distribución de la profundidad de la CMO. Las abundancias se expresan en No. individuos/m ³	76
Figura 33. La relación entre la abundancia de componentes del zooplancton gelatinoso y la profundidad de la CMO desde muestras obtenidas frente a la zona de El Loa (21°S) durante julio del 2008. Las relaciones son significativas (P<0.05, r ² >0.25)......	77
Figura 34. Distribución espacial de huevos de anchoveta en el crucero del 2008. Colores representan la profundidad de la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos (N°/10m ³) y cruces la de predadores (Gelatinosos) en N°/m ³	78
Figura 35. Distribución espacial de huevos de anchoveta en el crucero del 2009. Colores representan la profundidad de la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos (N°/10m ³)......	79
Figura 36. Relación entre la profundidad de la ZMO (1 ml/L) y la abundancia de huevos (Ln) para los cruceros 2008 y 2009.....	79
Figura 37. Relación entre la abundancia de predadores (Gelatinosos) y la abundancia (Ln) de huevos de anchoveta para el 2008.....	80
Figura 38. Análisis de preferencia-Rechazo para abundancia de huevos y predadores. Rechazo se produce a una abundancia de predadores mayor a 5 ind/m ³ con una probabilidad de 0,026 en base a 2000 remuestreos (P<0,05).....	81
Figura 39. Secciones por transectas de distribución vertical de huevos de anchoveta en invierno de 2008. Colores representan la concentración de oxígeno. Línea blanca es la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos (N°/10m ³) y cruces la Profundidad Media Ponderada de la abundancia huevos (m). Transectas desde el norte hacia el sur de izquierda a derecha.....	82
Figura 40. Secciones por transectas de distribución vertical de huevos de anchoveta en verano de 2009. Colores representan la concentración de oxígeno. Línea blanca es la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos (N°/10m ³) y cruces la	

Profundidad Media Ponderada de la abundancia huevos (m). Transectas desde el norte hacia el sur de izquierda a derecha.....83

Figura 41. Relación entre la concentración de oxígeno (ml/L) y la abundancia de huevos de anchoveta ($\ln(N^{\circ}/10\text{ m}^3)$), para el 2008 (Arriba) y 2009 (Abajo).84

Figura 42. Relación entre la abundancia de predadores (Gelatinosos) y la abundancia (\ln) de huevos de anchoveta por estrato de profundidad en crucero 2008.....85

Figura 43. Condiciones oceanográficas superficiales de Agosto para la zona norte de Chile. a) 25-30 Agosto de 2008 y b) Promedio de Agosto. Panel superior, TSM (en $^{\circ}\text{C}$), panel central, corrientes geostróficas (en cm s^{-1} , vectores (dirección), color (magnitud)) y panel inferior, vientos superficiales (en m s^{-1} , vectores (dirección), color (magnitud)).88

Figura 44. Condiciones oceanográficas superficiales de Enero para la zona norte de Chile. a) 12-17 de Enero de 2009 y b) Promedio de Enero. Panel superior, TSM (en $^{\circ}\text{C}$), panel central, corrientes geostróficas (en cm s^{-1} , vectores (dirección), color (magnitud)) y panel inferior, vientos superficiales (en m s^{-1} , vectores (dirección), color (magnitud)).89

Figura 45. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 09 de julio del 2008.....92

Figura 46. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 15 de julio del 2008.....93

Figura 47. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 23 de julio del 2008.....94

Figura 48. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 6 de agosto del 2008.95

Figura 49. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 12 de agosto del 2008.96

Figura 50. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 20 de agosto del 2008.97

Figura 51. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 28 de agosto del 2008.98

Figura 52. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 3 de septiembre del 2008.99

Figura 53. Distribución vertical de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^{\circ} 18'S$ para el 10 de septiembre del 2008.100

Figura 54. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 1 mn de la costa en la latitud $20^{\circ} 18'S$ de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) entre el 09 de julio al 10 de septiembre de 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.101

Figura 55. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 3 mn de la costa en la latitud $20^{\circ} 18'S$ de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) entre el 09 de julio al 10 de septiembre de 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.102

Figura 56. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 5 mn de la costa en la latitud $20^{\circ} 18'S$ de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) entre el 09 de julio al 10 de septiembre de 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.103

Figura 57. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 7 mn de la costa en la latitud $20^{\circ} 18'S$ de: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3)

entre el 09 de julio al 10 de septiembre de 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.104

Figura 58. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 15 de enero del 2009.107

Figura 59. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 23 de enero del 2009.108

Figura 60. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 28 de enero del 2009.109

Figura 61. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 3 de febrero del 2009.110

Figura 62. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 10 de febrero 2009.111

Figura 63. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 18 de febrero del 2009.112

Figura 64. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 24 de febrero del 2009.113

Figura 65. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 3 de marzo del 2009.114

Figura 66. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 16 de marzo de 2009.115

Figura 67. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 20 de marzo de 2009.116

Figura 68. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 1 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.117

Figura 69. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 3 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.118

Figura 70. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 5 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.119

Figura 71. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 7 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.120

Figura 72. Distribución vertical de la sección frente a Chipana (21°20'S), de clorofila-a (µg/L), para los muestreos semanales.122

Figura 73. Distribución temporal de clorofila-a (µg/L) para las estaciones de la sección frente a Chipana (21°20'S). A: 1 mn, B: 3 mn, C: 5 mn, y D: 7 mn.123

Figura 74. Distribución vertical de la sección frente a Chipana (21°20'S), de clorofila-a (µg/L), para los muestreos semanales.124

Figura 75. Distribución temporal de clorofila-a (µg/L) para las estaciones de la sección frente a Chipana (21°20'S). A: 1 mn, B: 3 mn, C: 5 mn, y D: 7 mn.125

Figura 76. Distribución vertical de huevos de anchoveta en cruceros semanales 2008. Colores representan la concentración de oxígeno. Línea blanca es la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos ($N^{\circ}/10m^3$) y cruces la Profundidad Media Ponderada de la abundancia huevos (m). 126

Figura 77. Distribución vertical de huevos de anchoveta en cruceros semanales 2009. Colores representan la concentración de oxígeno. Línea blanca es la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos ($N^{\circ}/10m^3$) y cruces la Profundidad Media Ponderada de la abundancia huevos (m). 127

Figura 78. Frecuencia relativa de la abundancia de huevos por estrato de profundidad para cada semana muestreada en el 2008 (Arriba) y 2009 (Abajo). 128

Figura 79. Abundancia de huevos para los muestreos semanales 2008 (Eje izquierdo) y 2009 (Eje derecho) en relación a la distancia de la costa (mn). Abundancias de los dos períodos de muestreo se muestran en distintos ejes debido a la menor abundancia en el 2009 (Verano). 129

Figura 80. Relación entre la concentración de oxígeno (ml/L) y la abundancia de huevos de anchoveta ($\ln(N^{\circ}/ 10 m^3)$), para los cruceros semanales en el 2008 (Negro) y 2009 (Rojo). 130

Figura 81. Relación entre la abundancia de predadores (Gelatinosos) y la abundancia de huevos de anchoveta para el muestreo semanal 2008. Izquierda todas las semanas y estratos agrupados. A la derecha en columna, las relaciones por estrato de profundidad. Todas las relaciones son significativas, excepto la del estrato 30-60 m. 130

Figura 82: Serie de tiempo diurna de la distribución vertical en la latitud $20^{\circ} 18'S$ de: a) Temperatura ($^{\circ}C$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) entre el 10 al 15 de agosto del 2008. En la base de cada panel se indica el día del año. 132

Figura 83: Serie de tiempo nocturna de la distribución vertical en la latitud $20^{\circ} 18'S$ de: a) Temperatura ($^{\circ}C$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) entre el 10 al 15 de agosto del 2008. En la base de cada panel se indica el día del año. 133

Figura 84: Serie de tiempo diurna de la distribución vertical en la latitud $20^{\circ} 18'S$ de: a) Temperatura ($^{\circ}C$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) entre el 16 al 20 de enero del 2009. En la base de cada panel se indica el día del año. 134

Figura 85: Serie de tiempo nocturna de la distribución vertical en la latitud $20^{\circ} 18'S$ de: a) Temperatura ($^{\circ}C$), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año. 135

Figura 86. Abundancias promedio para los muestreos de día y de noche efectuados en los muestreos diarios del 2008 y 2009. 136

Figura 87. Abundancia de huevos en función de su edad (días). Z = tasa de mortalidad instantánea de huevos según ajuste no lineal del decaimiento exponencial en la abundancia de huevos. 137

Figura 88. Relación entre la abundancia de huevos (\ln) y la concentración de oxígeno (ml/L) para los muestreos diarios del 2008 y 2009. 137

Figura 89. Relación entre la abundancia de huevos (\ln) y de predadores para huevos agrupados según edad. Menores a 1 día (Círculos negros) y entre 1 y 2 días (Círculos rojos). 138

Figura 90. Relación entre la abundancia de huevos (\ln) y de predadores para huevos agrupados según edad, para cada día de muestreo. Menores a 1 día (Círculos negros) y entre 1 y 2 días (Círculos rojos). 138

Figura 91. Análisis de preferencia-Rechazo para abundancia de huevos y predadores. Rechazo se produce a una abundancia de predadores mayor a 10 ind/m ³ con una probabilidad de 0,015 en base a 2000 remuestros (P<0,05).	139
Figura 92. Relación entre la abundancia de larvas en estado de saco vitelino (yolk sac) y de predadores para los cruceros diarios del 2008.	140
Figura 93. Relación entre la abundancia de larvas en estado de pre y postflexión y de predadores para los cruceros diarios del 2008.	140
Figura 94. Variación semanal en componentes del zooplancton gelatinoso capturado en invierno del 2008 frente a la zona de El Loa (21°S) en 3 estratos de profundidad.	143
Figura 95. Variación semanal en componentes del zooplancton gelatinoso capturado en invierno del 2008 frente a la zona de El Loa (21°S) en 3 estratos de profundidad.	144
Figura 96. Relación entre el zooplancton gelatinoso y la profundidad de la CMO en la zona más somera (<50 m) frente a la zona de El Loa (21°S) a través de una serie semanal entre julio y septiembre del 2008.	145
Figura 97. Variaciones diarias en la abundancia del zooplancton gelatinoso en la zona más somera (<50 m) frente a la zona de El Loa (21°S) a través de una serie diaria durante el invierno del 2008.	146
Figura 98. Variación semanal en componentes del zooplancton gelatinoso capturado en verano del 2009 frente a la zona de El Loa (21°S) en 3 estratos de profundidad.	147
Figura 99. Variación semanal en componentes del zooplancton gelatinoso capturado en verano del 2009 frente a la zona de El Loa (21°S) en 3 estratos de profundidad.	148
Figura 100. La relación entre la abundancia de componentes del zooplancton gelatinoso y la profundidad de la CMO desde muestras obtenidas en la zona más somera (<50 m) frente a la zona de El Loa (21°S) durante una serie semanal entre enero y marzo del 2009.	149
Figura 101: Curvas de mortalidad de huevos, durante el experimento de hipoxia.	151
Figura 102. Sobrevivencia de huevos (previa transformación angular) para las cuatro concentraciones experimentales más saturación. Se indica la media y desviación estandar.	152
Figura 103: Curvas de mortalidad de larvas, durante el experimento de hipoxia.	154
Figura 104. Sobrevivencia de larvas (previa transformación angular) para las cuatro concentraciones experimentales más saturación. Se indica la media y desviación estándar	155
Figura 105. Malla no estructuras (panel izquierdo) y batimetría en el dominio de modelación (panel derecho).	156
Figura 106. Posición de las secciones numeradas de norte a sur, se indica su latitud (panel izquierdo), y sus respectivos perfiles batimétricos (panel derecho).	157
Figura 107. Variación de temperatura a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m de profundidad al término del período de estabilización en invierno y verano.	159
Figura 108. Variación de temperatura en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.	160
Figura 109. Variación de salinidad a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m de profundidad al término del período de estabilización en invierno y verano.	162
Figura 110. Variación de salinidad en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.	163
Figura 111. Variación de la velocidad a 0, 25 y 50 m de profundidad en invierno y verano.	165
Figura 112. Variación de la velocidad a 100, 250 y 500 m de profundidad en invierno y verano.	166

Figura 113. Variación de la componente u de la corriente en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.	167
Figura 114. Variación de la componente v de la corriente en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.	168
Figura 115. Variación del oxígeno disuelto a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m de profundidad al término del período de estabilización en invierno y verano.	170
Figura 116. Variación del oxígeno disuelto en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.	171
Figura 117. Viento promedio diario del dominio para invierno y verano, rectángulos indican grupos de liberación de derivadores en cada período.	172
Figura 118. Viento durante el segundo día de seguimiento de los derivadores en invierno y verano.	173
Figura 119. Variación espacio temporal del oxígeno disuelto a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m en invierno.	175
Figura 120. Variación espacio temporal del oxígeno disuelto a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m en verano.	176
Figura 121: Derivadores liberados frente a Chipana a 1, 3, 5, 7, 10, 15 y 20 millas náuticas de la costa a las profundidades de 5, 10, 15 y 20 m durante el verano.	177
Figura 122. Diferencia entre la mínima y la máxima profundidad de cada derivador.	178
Figura 123: Sobrevivencia de erizos (<i>Loxechinus albus</i>) en experimentos de hipoxia.	180
Figura 124: Sobrevivencia de pulpo (<i>Octopus mimus</i>) en experimentos de hipoxia.	181
Figura 125: Sobrevivencia de loco (<i>Concholepas concholepas</i>) en experimentos de hipoxia.	182
Figura 126: Sobrevivencia de locote (<i>Thais chocolata</i>) en experimentos de hipoxia.	183
Figura 127: Sobrevivencia de almeja (<i>Protothaca thaca</i>) en experimentos de hipoxia.	184
Figura 128: Sobrevivencia de lapa (<i>Fissurella</i> sp.) en experimentos de hipoxia.	185
Figura 129: Áreas de Manejo muestreadas en la I y II Región.	186
Figura 130: Valores promedio de oxígeno disuelto expresado en ml/L.	188
Figura 131: Valores promedio de oxígeno disuelto expresado en ml/L por profundidad en cada unas de las áreas de manejo.	188
Figura 132: Principales recursos observados en las áreas de manejo de la I y II región.	190
Figura 133: Valores promedio de densidad por profundidad en los recursos bentónicos de importancia comercial, invierno 2008.	191
Figura 134: Valores promedio de densidad por profundidad en los recursos bentónicos de importancia comercial, verano 2009.	191
Figura 135: Profundidad mínima y máxima en las áreas de manejo para diferentes recursos. 1998-2008.	192
Figura 136: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Pisagua. 2005-2008.	193
Figura 137: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Caramucho. 1999 y 2002.	194
Figura 138: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Chanavayita. 1998 y 2002.	194
Figura 139: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Chanavaya. 2000 y 2004.	195
Figura 140: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Río Seco. 2003 y 2004.	195
Figura 141: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Chipana. 2003 y 2005.	196
Figura 142: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Urco. 2003 y 2005.	196
Figura 143: Modelo conceptual que describe la relación entre la variabilidad de la surgencia, el ascenso/descenso de la CMO y sus efectos sobre las interacciones entre el zooplancton gelatinoso y huevos y larvas de anchoveta. Los círculos representan los huevos de anchoevta (o larvas) y las cruces los depredadores. Durante surgencia activa se espera ascenso de la	

CMO y divergencia entre presas y depredadores, mientras que en condiciones de relajación se espera convergencia en la zona más somera de desove incrementando el riesgo de depredación.....	201
Figura 144: Comparación de la sobrevivencia de las seis especies estudiadas, considerando la condición experimental de $1,0 \text{ mL O}_2 \text{ L}^{-1}$	203
Figura 145: Profundidad media de las especies comerciales presente en las áreas de manejo de la I y II región.1998-2008.....	205
Figura 146: Densidad media de las especies comerciales presente en las áreas de manejo de la I y II región.1998-2008.....	205

IV. INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los huevos de anchoveta, según su estadio de desarrollo embrionario..22

Tabla 2. Abundancia de depredadores gelatinosos de huevos y larvas de peces, capturados frente a la zona de El Loa durante agosto del 2008. N= Abundancia (número m⁻³), SE= error estándar, CV= coeficiente de variación, AR= abundancia relativa (%).74

Tabla 3. Estadística descriptiva básica para los muestreos semanales.121

Tabla 4. Estadística descriptiva básica para los muestreos semanales.123

Tabla 5: Resumen de experimento de sobrevivencia de huevos de *Engraulis ringens* a 5 concentraciones de oxígeno.150

Tabla 6 : Resumen de experimento de sobre vivencia de larvas de *Engraulis ringens* a 5 concentraciones de oxígeno.153

Tabla 7: Lugares y ubicación geográfica de sitios muestreados. Agosto 2008 y enero 2009.186

Tabla 8: Valores promedio de oxígeno disuelto (ml/L) por lugar de muestreo y profundidad. Agosto 2008.187

Tabla 9: Valores promedio de oxígeno disuelto (ml/L) por lugar de muestreo y profundidad. Enero 2009.187

Tabla 10: Presencia de recursos de importancia comercial por grupo en función de la profundidad (m) en las áreas de manejo de la I y II región. Agosto 2008 (C.CAR: Caleta Caramucho; C.CHYA: Caleta Chanavaya; C.R.SEC: Caleta Río Seco; C.CHI: Caleta Chipana; C.PTA.A: Caleta Punta Arenas y C.URCO: Caleta Urco).189

Tabla 11: Presencia de recursos de importancia comercial por grupo en función de la profundidad (m) en las áreas de manejo de la I y II región. Enero 2009 (C.CAR: Caleta Caramucho; C.CHYA: Caleta Chanavaya; C.R.SEC: Caleta Río Seco; C.CHI: Caleta Chipana; C.PTA.A: Caleta Punta Arenas y C.URCO: Caleta Urco).189

Tabla 12: Número de ejemplares de los recursos de importancia comercial en función de la profundidad (m) en las áreas de manejo de la I y II región. Agosto 2008 (C.CAR: Caleta Caramucho; C.CHYA: Caleta Chanavaya; C.R.SEC: Caleta Río Seco; C.CHI: Caleta Chipana; C.PTA.A: Caleta Punta Arenas y C.URCO: Caleta Urco).192

Tabla 13: Número de ejemplares de los recursos de importancia comercial en función de la profundidad (m) en las áreas de manejo de la I y II región. Enero 2009 (C.CAR: Caleta Caramucho; C.CHYA: Caleta Chanavaya; C.R.SEC: Caleta Río Seco; C.CHI: Caleta Chipana; C.PTA.A: Caleta Punta Arenas y C.URCO: Caleta Urco).192

V. OBJETIVOS

1. OBJETIVO GENERAL

- Comprender los efectos de la variabilidad de la capa mínima de oxígeno en las poblaciones de las principales especies recursos de la zona norte de Chile.

2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

2.1. Determinar el efecto de la capa de mínimo de oxígeno en la determinación del éxito o fracaso de la Anchoveta.

2.2. Determinar la relación entre estadios tempranos de la anchoveta y la capa de mínimo de oxígeno.

2.3. Implementar un modelo numérico que permita reproducir el comportamiento de la distribución de la capa de mínimo de oxígeno en la zona y su asociación a la población de Anchoveta.

2.4. Determinar el efecto de la capa de mínimo de oxígeno en las poblaciones bentónicas de interés comercial.

VI. ANTECEDENTES GENERALES

El océano Pacífico Suroriental (PSO) es reconocido como una de las áreas más productiva del océano mundial, debido a que dentro de esta región extensa, se localiza el ecosistema de surgencia costera de Perú y Chile. Esta región se caracteriza por una alta productividad primaria que se descompone dentro de la columna de agua, consumiendo el oxígeno disuelto (OD). La alta demanda de OD en la región, combinada con una débil ventilación producen en el agua subsuperficial e intermedia del PSO, la Zona Mínima de Oxígeno o Capa Mínima de Oxígeno (ZMO o CMO) (Wyrski, 1962,; Helly y Levin, 2004, Fuenzalida *et. al* 2009).

La CMO se caracteriza por un espesor aproximado de 500 m y de una concentración de OD muy baja ($<20 \mu\text{mol kg}^{-1}$). La profundidad más somera de su límite superior (25-50 m) es alcanzada en las costas de Perú y norte de Chile (e.g. Morales *et al.*, 1996; Strub *et al.*, 1998). Su concentración de OD disminuye y su límite superior se profundiza más hacia el sur (e.g. ~ 100 m fuera de Concepción a $\sim 37^\circ\text{S}$) (Atkinson *et al.*, 2002).

La CMO en las costas de Chile esta asociada al AESS que es transportada de norte a sur a lo largo de la pendiente continental por la Corriente subsuperficial Perú-Chile hasta alcanzar 48°S (Silva y Neshyba, 1979). AESS está limitada por agua con baja salinidad y alto contenido de oxígeno disuelto: El AIPSE (Emery y Meincke, 1986) en su parte superior y AIAA (McCartney, 1977) en su base. Ambas capas superior e inferior son las candidatas potenciales para ventilar la CMO.

La presencia de la CMO determina las características de la mayoría de las poblaciones pelágicas y bentónicas (Grantham *et al.*, 2004). Es probable que la intensidad de las CMO aumenten a partir del calentamiento global y del enriquecimiento de nutrientes que sustraen el oxígeno del océano (Levin, 2002). Levin sostiene que su expansión pudiera tener un efecto devastador en la pesca comercial. Asimismo, también se observa frecuentemente una intensa actividad biológica y biogeoquímica cerca del límite superior e inferior de la CMO (Mullins *et al.*, 1985; Thompson *et al.*, 1985; Wishner *et al.*, 1990; Levin *et al.*, 1991).

La posición, intensidad, y espesor de la CMO en la columna de agua puede ser modificada considerablemente por El Niño/La Niña, llevando a grandes cambios en la estructura de la comunidad y la transferencia trófica así como cambios en la productividad y en los ciclos biogeoquímicos (por ejemplo Morales *et al.*, 1999; Ulloa *et al.*, 2001; Escribano *et al.*, 2004).

A pesar de la importancia de la CMO en la zona norte de Chile, su extensión total horizontal y vertical ha estimado a gran escala previamente como también algunos procesos físicos que la mantienen (Fuenzalida *et al.*, 2009). Sin embargo se desconocen los efectos sobre la conducta, distribución y dinámica poblacional, que estas variaciones de la CMO pudieran ejercer sobre los recursos marinos.

Asociados a los factores físico-químicos que pueden afectar a los estadios tempranos de los recursos pelágicos, están algunos factores biológicos como la depredación. En este sentido ha sido señalado que entre los principales depredadores de las fases de historia de vida temprana de anchoveta se encuentra el zooplancton gelatinoso, compuesto por cnidarios, ctenóforos, sifonóforos y quetognatos. Los últimos depredan sólo sobre larvas, ya que detectan a las presas por sus movimientos (Purcell 1992).

En la zona de Chile los eventos de surgencia pueden favorecer la agregación del zooplancton gelatinoso (Palma y Apablaza, 2004) y así ejercer un mayor efecto de depredación sobre huevos y larvas de peces. La agregación en los estratos superficiales ocurriría esencialmente por un efecto de la CMO, la cual al ascender a la capa somera, restringe al zooplancton gelatinoso ya que éste requiere un ambiente oxigenado (Ulloa *et al.*, 2000). Por otra parte, se han reportado altas abundancia de gelatinosos depredadores, tales como el sifonóforo *Muggiaea atlantica* en los sistemas de corrientes de Benguela y de Humboldt (Palma, 1994; Palma y Rosales, 1995; Ulloa *et al.*, 2000).

Resulta relevante entonces entender la relación entre las variaciones de la surgencia, el ascenso/descenso de la CMO, la presencia y agregación del zooplancton gelatinoso, y como tales procesos pudieran modular la sobrevivencia de huevos y larvas de peces, considerando que los

cambios en estas tasas de sobrevivencia, son fundamentales para explicar las variaciones en el reclutamiento de la especie.

Finalmente, el conocimiento de efectos y la comprensión de las interacciones de la CMO con los recursos, pueden llegar a constituir una herramienta de gran utilidad para el sector pesquero local y permitirá optimizar el manejo y administración de las pesquerías pelágicas y bentónicas de la región norte del país.

VII. METODOLOGÍA

1. Objetivo específico N°2.1

Determinar el efecto de la capa de mínimo de oxígeno en la determinación del éxito o fracaso del desove de la Anchoveta.

Se contemplan tres tipos de actividades para el cumplimiento de este objetivo: 1) el estudio de la distribución espacial de la CMO y su asociación a la distribución horizontal de huevos de anchoveta, 2) el estudio de la distribución temporal y vertical de la CMO y su influencia en la distribución vertical de huevos de anchoveta dentro de la zona de surgencia y, 3) el estudio de la mortalidad *in situ* de huevos de anchoveta, asociada a potenciales depredadores y a cambios en la distribución espacial y temporal de la CMO.

1.1 Distribución espacial de la CMO y huevos de anchoveta

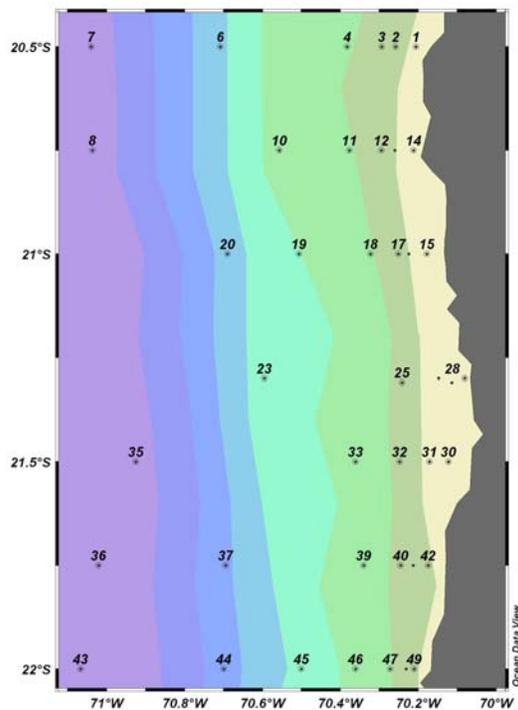
La zona de estudio está comprendida entre Caleta Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°00'S), zona donde se efectuaron transectas perpendiculares a la costa y paralelas entre si, sistemáticamente distribuidas con una separación de 15 mn, cubriendo el área de estudio con un total de 7 transectas, las que alcanzaron una longitud máxima de 50mn en invierno de 2008 y verano de 2009 (Figura 1). Esta zona se ha seleccionado porque históricamente ha mostrado agregaciones de huevos de anchoveta y persiste como un área de desove principal de la especie (Informes Finales Proyecto FIP MPH 1993-2006).

1.1.1 Información oceanográfica

En cada transecta se realizarán 7 estaciones oceanográficas distribuidas a 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50 millas de la costa, durante el período de máximo desove en invierno, entre el 26 al 30 de agosto del 2008 y en el período secundario de desove en verano, entre el 13 al 17 de enero del 2009. En cada una de las estaciones de la grilla de muestreo de la distribución espacial de la CMO, se obtuvieron registros continuos de temperatura (°C), salinidad, concentración de oxígeno disuelto (ml/l) con profundidad (dbar), hasta un máximo de 340 dbar, mediante el uso de un CTDO marca

SEA BIRD 19. Para la determinación de la concentración de oxígeno disuelto y para verificar los valores de salinidad del CTDO, se realizaron lances con botellas oceanográficas Niskin, en algunos niveles, a profundidades estándares de 0, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200 y 300 metros como máximo. En las estaciones hasta las 20 mn se agregó el nivel de 5 metros. El procesamiento de las muestras de oxígeno se realizará a bordo utilizando el método de Carpenter (1996). Los análisis de salinidad se efectuarán posteriormente en laboratorio en tierra mediante un salinómetro de inducción marca TSK MODELO DIGI-AUTO Además se incorporaron muestreos biológicos, clorofila, huevos y larvas de anchovetas, meso- y macrozooplancton en la totalidad de las estaciones. Por razones de mal tiempo no se realizaron 8 estaciones en el periodo invernal (5, 9, 21, 22, 24, 29, 34 y 38) y 4 estaciones en el periodo de verano (6, 24,34 y 38).

a)



b)

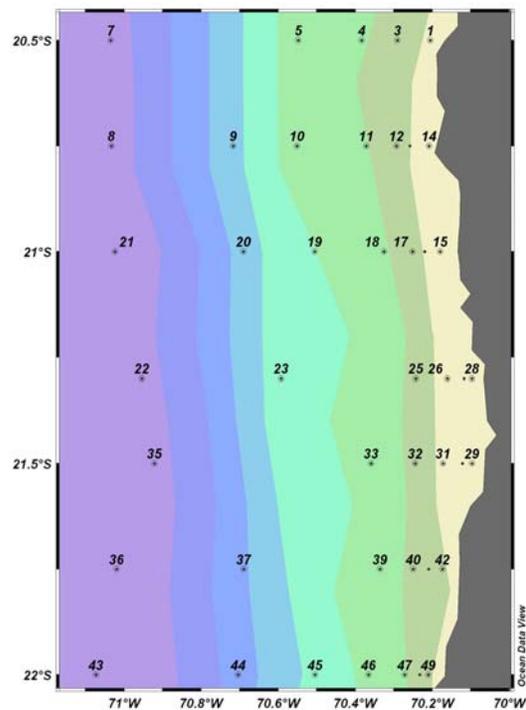


Figura 1: Posición geográfica de las estaciones bio-oceanográficas. Crucero ZMO, durante: a) invierno; 26 al 30 de agosto del 2008 y b) verano 13 al 17 de enero 2009, a bordo de la embarcación industrial “Roble”.

1.1.2 Información biológica

Las muestras para análisis de clorofila-a fueron filtradas *in situ* con un sistema de filtrado múltiple, utilizando filtros de fibra de vidrio (MFS, GC/75) o de acetato de celulosa (Millipore, HA), con un volumen estándar de filtrado de 150 ml. Las muestras así obtenidas fueron almacenadas a -20°C en ambiente anhidro, utilizando como desecante CaCl₂. La extracción de la muestra se realizó con una solución acuosa de acetona al 90% v/v, por un periodo no inferior a las 12 horas y a ca. 0°C. La lectura del sobrenadante se realizó en ambiente de baja luminosidad con la técnica fluorométrica con y sin acidificación descrita en Parsons *et al.* (1984), utilizando un fluorómetro digital marca Turner Designs, modelo 10AU, calibrado con un estándar puro de clorofila-a marca Sigma Chemicals.

En cada estación se obtuvieron muestras estratificadas de ictio-zooplankton mediante arrastre vertical con red tipo WP2 de malla de 300 µm, y de 0.273 m² de área de boca, para los estratos 0-30 m, 30-60 y 60-90 m, que representan la capa de mezcla (oxigenada) y capa subóxica (oxiclina), respectivamente, de acuerdo a estudios previos en la zona de surgencia, durante surgencia (Hidalgo *et al.*, 2005). Las muestras obtenidas en cada una de las estaciones durante el periodo de invierno de 2008 y verano de 2009, se preservaron inmediatamente después de extraída del copo colector de la red, con una solución de formalina al 5% en agua de mar y neutralizada en Boróx. Se separó la totalidad del ictioplancton colectado, identificando y contabilizando los huevos y larvas de anchoveta. Los huevos de anchoveta se clasificaron por estadio de desarrollo.

Para el caso de la clasificación por estadios de desarrollo de los huevos se utilizaron los criterios de Moser y Ahlstrom (1985), quienes dividen el período de desarrollo embrionario de los huevos de anchoveta en 11 estadios de acuerdo a los cambios morfológicos que se producen en el transcurso de la embriogénesis (Tabla 1). Los huevos que no pueden ser asignados a ninguno de dichos estadios debido a la opacidad o daño en su estructura interna, se clasificaron como deteriorados (DET.).

Tabla 1: Clasificación de los huevos de anchoveta, según su estadio de desarrollo embrionario.

Estadio I: Huevos recientemente desovados, no segmentados, con acumulación conspicua de citoplasma en el polo animal conformando el blastodisco.

Estadio II: Desarrollo de la capa blastodérmica con inicio de la división celular, hasta la agregación de células que toman la apariencia de mórula.

Estadio III: Desde la formación de la cavidad hasta el establecimiento definitivo de la cubierta embrionaria. El blastodermo comienza a desplazarse sobre el vitelo, extendiéndose hasta un tercio de la longitud del vitelo.

Estadio IV: El blastodermo se desplaza hasta los dos tercios de la masa vitelina, estructurándose la zona de desarrollo del embrión, sin destacar alguna estructura embrionaria distintiva.

Estadio V: El blastodermo ha cubierto la totalidad de la masa vitelina, culminando con el cierre del blastoporo. Se inicia la formación de los miómeros lo largo del cuerpo. El desarrollo de los ojos ocurre al final de este estadio.

Estadio VI: Se define desde el cierre del blastoporo hasta el inicio de la separación de la cola desde el vitelo. Excepto en la región caudal, los miómeros se presentan en la totalidad del cuerpo.

Estadio VII: La cola empieza a separarse del vitelo, desde el crecimiento inicial de ésta, hasta que la porción libre sea equivalente a la mitad de la longitud de la cabeza permaneciendo en el mismo plano del eje del cuerpo.

Estadio VIII: La cola en desarrollo comienza a doblarse, separándose del eje del cuerpo con crecimiento hacia la cabeza. Al final del estadio, la porción libre de la cola equivale a un quinto de la longitud del vitelo y a la longitud total de la cabeza del embrión.

Estadio IX: La separación de la cola fluctúa entre un cuarto y un medio de la longitud del vitelo. La torció de la cola se produce fuera del plano del embrión.

Estadio X: El extremo de la cola se aproxima a la cabeza por encima del tronco, siendo dos veces la longitud de la cabeza y de un medio hasta tres cuartos de la longitud del saco vitelino.

Estadio XI: La longitud libre de la cola es mayor que tres cuartos de la longitud del vitelo. La longitud de la cabeza es aproximadamente igual a un cuarto de la longitud del vitelo.

La densidad de huevos y larvas de las especies se estandariza a una unidad de 10 m^3 de agua de mar filtrada por la red. La distancia efectiva recorrida por la red se multiplica por el área de la boca de la red para estimar el volumen. El número de huevos o larvas en una unidad de área de mar (C) (10m^3) se obtiene de:

$$C = 10 \frac{d}{w} c$$

Donde d es la profundidad máxima del lance (m), w es el volumen de agua filtrado (m^3) y c es el número de huevos o larvas en la muestra. La profundidad máxima del lance (d) se obtiene de:

$$d = \cos \alpha \cdot (L_o)$$

Donde L_o es la cantidad de cable arriado (m) y $\cos \alpha$ es el \cos del ángulo registrado antes de virado de la red. El volumen de agua filtrada (w) se obtiene de:

$$w = Q \cdot t$$

Donde Q es el volumen de agua filtrado por unidad de tiempo ($m^3 s^{-1}$) y t es tiempo empleado en el arrastre (s). El valor de Q se estima mediante:

$$Q = V \cdot A$$

Donde V es la velocidad de arrastre de la red expresada en $m \cdot s^{-1}$ y A es el área de la boca de la red (m^2).

Los mapas de distribución de la densidad de huevos y larvas para las dos capas muestreadas se confeccionaron mediante software SURFER.

1.1.3 Información combinada y satelital

La información combinada y satelital corresponde a temperatura superficial del mar, velocidades geostróficas y magnitud y dirección del viento del área entre $18^\circ S$ - $25^\circ S$ y $80^\circ W$ - $70^\circ W$ y que se detalla a continuación.

1.1.3.1 Temperatura Superficial del Mar

Se utilizó información diaria de temperatura superficial del mar (TSM) entre julio de 2002 y enero de 2009. Estos datos fueron obtenidos del Centro de Datos Climáticos Nacional de NOAA/NESDIS y consiste en información de una resolución espacial de $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$. procesada mediante interpolación óptima (IO). Ellos se derivan del sensor “Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) y Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR)” e información in-situ procedente de barcos y boyas con las cuales se corrige sus sesgos. Este producto combinado

muestra los mejores resultados en su resolución espacial y temporal que anteriores productos semanales que usaron IO [Reynolds, et al., 2007]. Asimismo, este producto es mejor que aquel basado sólo en AVHRR ya que puede reducir las desviaciones sistemáticas porque sus características de error son independientes [Reynolds, et al., 2007].

1.1.3.2 Velocidades geostróficas

Se usó información de velocidades geostróficas absolutas, que resultan de la suma de las anomalías del nivel del mar y la topografía dinámica media entregada por Rio y Hernandez [2004], de una resolución de espacial de $0.33^\circ \times 0.33^\circ$ obtenida de AVISO. Se utilizaron 2 productos, el primero se basa en las anomalías del nivel del mar de las misiones de 2 satélites (TOPEX/POSEIDON, Jason-1 y ERS, Envisat) que poseen el mismo “groundtrack” y el segundo se basa en las misiones de hasta 4 satélites a un mismo tiempo (añade el GFO y/o el TOPEX/POSEIDON en su nueva órbita). El primer producto tiene la ventaja de ser estable en el tiempo (semanal) pero su información está disponible sólo hasta el 2007, mientras que el segundo producto es no homogéneo en el tiempo pero se encuentra disponible hasta la fecha con un rezago de una semana. Se consideró usar información entre enero de 2002 hasta diciembre de 2007 del primer producto e información de agosto de 2008 y enero de 2009 del segundo producto.

1.1.3.3 Magnitud y Dirección del Viento

Información diaria de magnitud y dirección del viento entre julio de 2002 y enero de 2009 procesada mediante interpolación objetiva y que tiene una resolución espacial de $0.50^\circ \times 0.50^\circ$ obtenida de IFREMER. Esta información se deriva del escaterómetro llamado NASA SeaWinds a bordo del satélite QuikSCAT [Piolle and Bentamy, 2002].

Con el fin de determinar las condiciones medias de Agosto (Invierno) y Enero (Verano) se tomó como referencia los últimos 6 años, lo cual entrega una información más reciente de las condiciones oceanográficas. Para la TSM y magnitud y dirección del viento se tomó como base el periodo entre julio de 2002 hasta junio de 2008. Se inició en la fecha señalada ya que la información de TSM del sensor AMSR empezó a partir de ese tiempo. Para las corrientes geostróficas se utilizó como base el

periodo del primer producto, es decir, entre enero de 2002 hasta diciembre de 2007 (fecha de término disponible). Asimismo, se promedió la información satelital y combinada durante el periodo en que se realizaron los cruceros, es decir, entre 25-30 de agosto de 2008 y 12-17 de enero de 2009.

1.2 Distribución temporal de la CMO y distribución vertical de huevos de anchoveta dentro de la zona de surgencia.

Se espera que la mayor variabilidad del límite superior de la CMO (0.5 mL/L), que puede afectar la distribución vertical y mortalidad de huevos y larvas de anchoveta (Morales *et al.*, 1996) se encuentre asociada a las fluctuaciones de la surgencia, la cual presenta períodos en la escala de 6-10 días en la zona costera del norte de Chile (Marín *et al.*, 2001). Entonces se realizaron a una escala semanal muestreos durante el período de desove para examinar los cambios temporales de la CMO y su influencia en el desove de anchoveta. Para ello, en la zona de estudio se incorporó un área modelo desde los 21°15'S y los 21°30'S, donde se realizó una transecta perpendicular a la costa, localizada a los 21°18'S de latitud con una longitud máxima de 7 mn (Figura 2). Se efectuaron 4 estaciones oceanográficas distribuidas a 1, 3, 5, 7 millas de la costa sobre la transecta, durante 10 semanas consecutivas, en el período de desove principal de invierno (entre el 9 de julio al 10 de septiembre de 2008) y en el periodo de desove secundario de verano (entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009), midiéndose las variables de temperatura (°C), salinidad y concentración de oxígeno disuelto (mL/L) y biológicas, clorofila, huevos y larvas de anchovetas hasta la máxima profundidad topográfica. Para la determinación de la concentración de oxígeno disuelto y para verificar los valores salinidad del CTDO, se utilizó la metodología anteriormente señalada. Para los huevos de anchoveta se realizaron muestreos estratificados para las capas 0-30 m, 30-60 m y 60-100 en cada estación mediante red WP2 con mecanismo de cierre.

El procesamiento de las muestras biológicas fue el mismo descrito en el punto anterior.

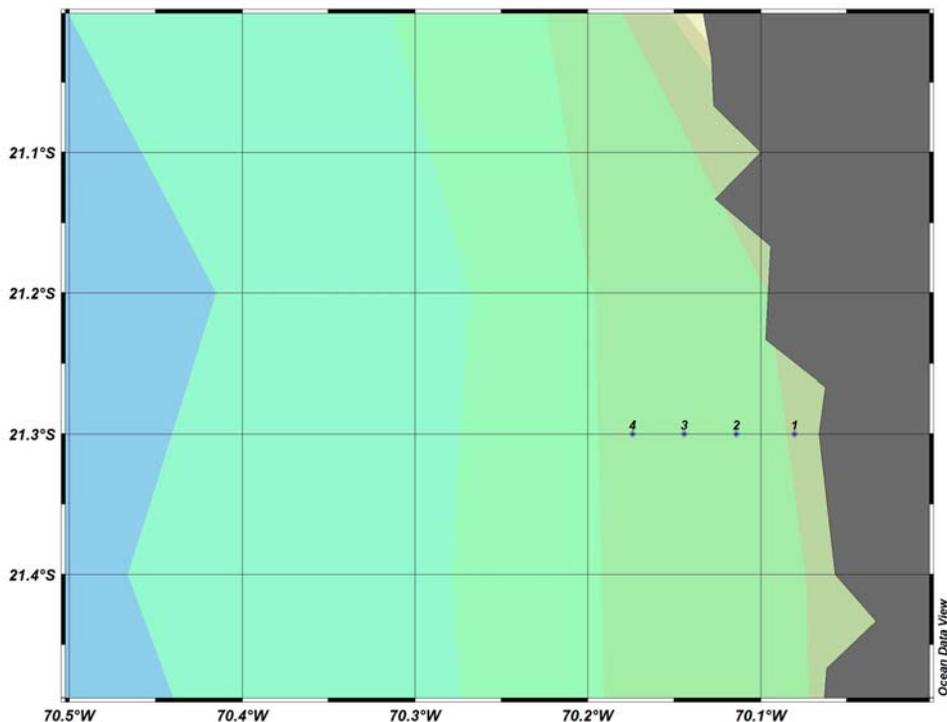


Figura 2: Posición geográfica de las estaciones bio-oceanográficas. Estaciones de muestreo semanal, para distribución vertical en el área modelo la sección perpendicular a la costa frente a Caleta Chipana (21° 18'S), durante el invierno de 2008 (09 de julio al 10 de septiembre) y verano de 2009 (15 de enero al 20 de marzo).

La distribución espacial horizontal de la CMO fue analizada de acuerdo a su límite superior definido por la profundidad de 1 mL/L. El efecto de esta distribución sobre la distribución horizontal de huevos y larvas de anchoveta para las dos capas muestreadas en los cruceros de invierno y verano fue examinado mediante correlación simple (Pearson) entre el límite superior de la CMO y la abundancia de huevos (N°/m^3) transformada a logaritmo natural para efectos de normalización de datos contagiosos.

La distribución espacial de la CMO y de huevos y larvas de anchoveta también será asociada a la distribución espacial de temperatura del mar y de la estructura física de la zona observada mediante información satelital.

1.3 Mortalidad *in situ* de huevos de anchoveta y potenciales depredadores asociada a cambios en la distribución espacial y temporal de la CMO.

El tiempo de desarrollo de huevos de anchoveta (desove-eclosión) fluctúa entre 2-6 días, dependiendo de la temperatura (Lo, 1985). Durante este período es cuando los huevos se exponen a mortalidad, producto de la depredación y por otros efectos de factores físicos, químicos y biológicos del ambiente. Entonces, es posible hacer estimaciones de mortalidad *in situ* sobre esta escala de tiempo, aunque el seguimiento de las cohortes es muy difícil debido a efectos advectivos y mezcla que se suceden en la zona de surgencia en escalas de horas a días (Marín *et al.*, 2001; Giraldo *et al.*, 2002). Para filtrar la alta heterogeneidad espacial y temporal de la zona de surgencia, se realizó un muestreo aleatorio en un área modelo (Figura 3) dentro del área de estudio mayor, durante invierno de 2008 y verano de 2009. Se definió un cuadrante de 5 x 10 mn, correspondiente a 5 mn en el sentido latitudinal y 10 mn en el sentido longitudinal. Sobre el eje longitudinal (costa-océano), se espera mayor variabilidad en la distribución vertical de la CMO y de huevos y larvas de anchoveta. Durante 5 días se realizaron muestreos diurnos (11 al 15 de agosto de 2008 y 15 al 19 de marzo de 2009) y nocturnos (10 al 14 de agosto de 2008 y 16 al 20 de marzo de 2009) cada 12 horas. Cada muestreo contempló la obtención de un máximo de 5 muestras de ictioplancton integradas en la columna de agua de 0-60 m junto con perfiles CTDO. Los puntos de muestreo se definieron aleatoriamente cada día en el área modelo para un muestreo diurno y otro nocturno. El muestreo diurno se realizó entre la 11:00 AM y 03:00 PM y el nocturno entre las 09:00 PM y 01:00 AM. Durante el muestreo nocturno es posible detectar el inicio de cohortes. Se separó la totalidad del ictioplancton colectado, identificando y contabilizando los huevos y larvas de anchoveta, los que son clasificados posteriormente por estadio de desarrollo.

Una vez clasificados por estadio de desarrollo, los huevos se les asignó la edad según la metodología descrita por Lo (1985), es decir, a través de la estimación de la edad para cada estadio en función de la temperatura ambiental al momento de la captura. La temperatura a los 10 metros es obtenida desde los perfiles verticales de temperatura, como se sugiere en Santander *et al.* (1984).

El tiempo cero, o bien la hora del día del máximo de desove fue considerada como las 23:00 h, de acuerdo a los resultados de Claramunt *et al* (2007), el cual fue estimado con la información de la frecuencia horaria de estadios de desarrollo temprano (Estadio I). La edad de los huevos (en fracción de día) se calculó haciendo uso del modelo edad-temperatura (Lo, 1985) y ajustando la edad por la porción del día desde las 23:00 h previas hasta el momento de la recolección para el día más cercano, según el procedimiento “automatizado” descrito por Lo (1985), según la función:

$$y_{i,t,k} = y_{i,t} + k - \hat{T}$$

Donde: $y_{i,t}$ = se obtiene del modelo temperatura dependiente.

K = hora del lance

T = remanente de $(y_{i,t} + 22) - 24$

Las decisiones de corrección según la hora de recolección son:

$$y_{i,t,k} = \begin{pmatrix} y_{i,t} - G & \text{si } k < \hat{T} - G \\ y_{i,t} + k - \hat{T} & \text{si } \hat{T} - G < k < \hat{T} + G \\ y_{i,t} + G & \text{si } \hat{T} + G < k \end{pmatrix}$$

Donde G es el doble de la desviación estándar de la edad dentro de cada estadio.

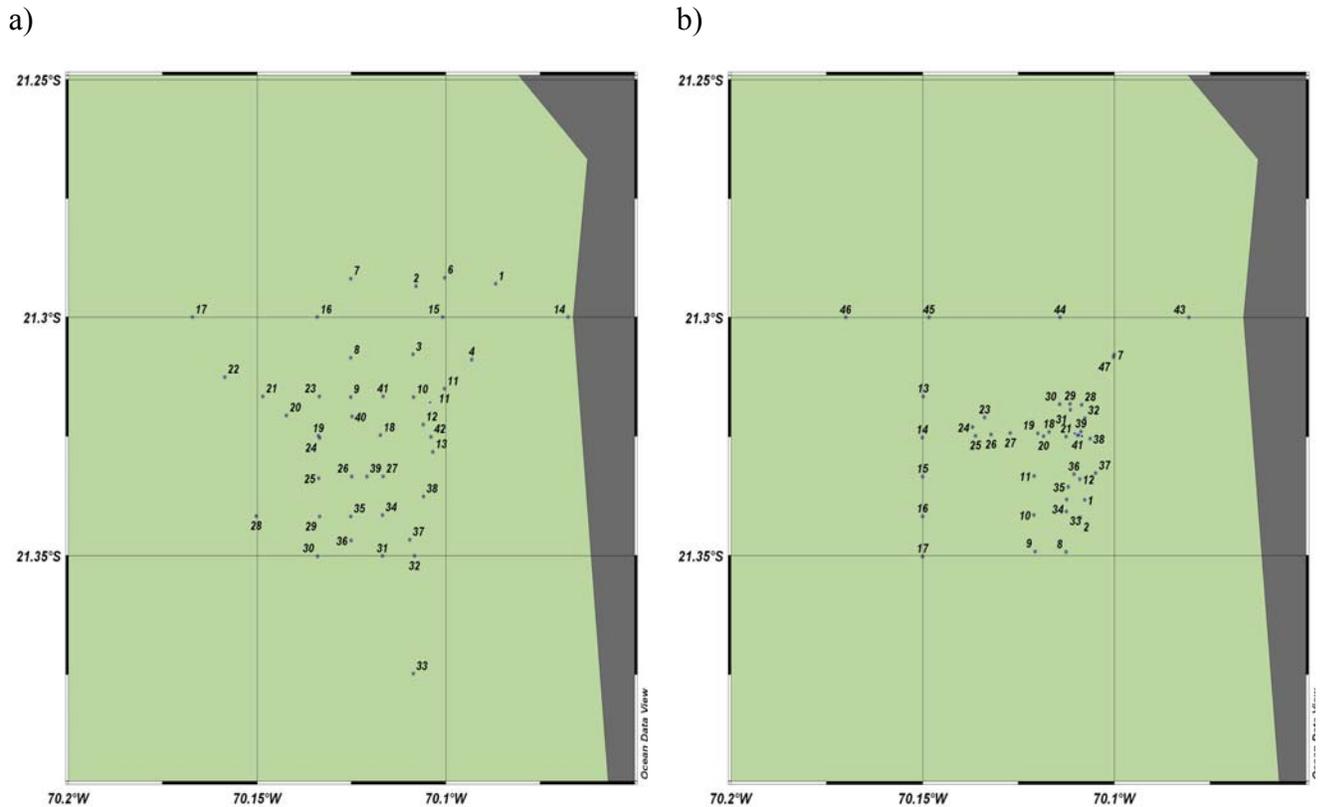


Figura 3: Posición geográfica de las estaciones bio-oceanográficas. Estaciones de muestreo diurno y nocturno en el área modelo, frente a Caleta Chipana (21.5°S), durante el periodo a) invierno; 10 al 15 de agosto del 2008 y b) verano; 15 al 20 de marzo 2009, a bordo de la embarcación de investigación “Rigel”.

Los métodos para cuantificar la abundancia del zooplancton gelatinoso (depredadores), son aquellos descritos para los muestreos de huevos de larvas de peces. Una vez extraídos todos los estadios tempranos de peces, las muestras se analizaron bajo microscopio para identificar y contabilizar los componentes del zooplancton gelatinoso, separados en quetognatos, cnidarios, ctenóforos y sifonóforos. Se identificaron sólo las especies dominantes para cada uno de estos grupos. La data de abundancia se expresó como número de individuos por metro cúbico y la información se analizó mediante mapas de distribución horizontal, vertical y temporal, mediante la construcción de contornos y gráficos. Toda esta información se asoció a los cambios en profundidad de la CMO, considerando su límite inferior como 1 mL/L. Los cambios en profundidad de la CMO se consideraron a su vez como indicador de variabilidad de la surgencia.

1.4 Análisis de la correlación entre la CMO y distribución de huevos de anchoveta en el área principal de desove.

Se utilizaron las siguientes metodologías complementarias:

1.4.1.- Modelos GAM:

Estos modelos serán aplicados para explorar posibles asociaciones entre la distribución de huevos y larvas con todas las variables oceanográficas observadas.

Este enfoque utiliza modelos aditivos generalizados (GAM) que han sido especialmente diseñadas para resolver los problemas y limitaciones de la aplicación convencional del Método de Producción Diaria de Huevos.

Los Modelos Aditivos Generalizados (GAM) han demostrado ser una poderosa herramienta para modelar la distribución de huevos y la producción diaria de huevos (e.g. Borchers *et al.*, 1997; Bernal, 1999; Stratoudakis *et al.*, 2003), pero varios problemas metodológicos no habían podido ser resueltos para ser utilizados adecuadamente. Dichos problemas metodológicos han sido superados recientemente a través de un proyecto de la Unión Europea “Using environmental variables with improved DEPM methods to consolidate the series of sardine and anchovy estimates” (EU Study 99/080, <http://ruwpa-st.andrews.ac.uk/depmodel>), cuyas mejoras se pueden resumir en:

- Rutinas para la selección de modelos utilizando GAM, lo que previamente había sido realizado sobre una base ad hoc con elementos subjetivos.
- Modelación independiente del sistema de coordenadas en GAM, de esta manera los modelos deberían ser insensitivos a cambios en el sistema de coordenadas.
- Modelación de interacciones con GAM, cuyo principal tópico es cómo escalar la covarianza relativa de las variables.
- Mejor desempeño de la inferencia con modelos GAM
- Asegurar estabilidad del modelo con datos que se caracterizan por una alta presencia de ceros
- Facilitar el uso de las nuevas rutinas a usuarios interesados en mejorar estimaciones con el MPH.

La formula general simplificada de GAM que será aplicada en la estimación de la producción diaria de huevos se expresa por:

$$E(N_i) = g^{-1} \left(\beta_0 + \sum_K S_K(x_K) \right)$$

Donde N_i es la abundancia de huevos en la estación i , g^{-1} es el inverso de la función de enlace (link function), i.e. la función que relaciona la variable respuesta y el predictor lineal (e.g. logaritmo en el caso de Poisson); X_K es la K -ésima covariable (e.g. Profundidad CMO); β_0 es un intercepto y S_K es la función suavizadora que describe la relación entre la densidad de los huevos y el conjunto de co-variables x_K .

Las funciones suavizadoras son automáticamente seleccionadas por el nuevo conjunto de algoritmos desarrollado para GAM utilizando validación cruzada general (General Cross-Validation, GCV). No obstante, el conjunto de co-variables utilizadas para explicar la densidad de huevos serán seleccionadas por el equipo de trabajo sobre la base de los parámetros en torno a la CMO (i.e profundidad, concentración de oxígeno, extensión).

1.4.2.- Preferencia - rechazo

El análisis cuantitativo (no espacial) se realizará mediante la aplicación de técnicas de remuestreo computacional. Se debe considerar que el muestreo de huevos permite la observación pareada de densidad de huevos y las variables físico-químicas del ambiente marino. Este hecho permite utilizar la prueba introducida por Perry y Smith (1994), en su versión univariada. Sea entonces f_i una variable físico-química medida en el crucero, donde $i = 1, \dots, n$ indexa a la muestra. Sea t otra variable que tiene el mismo rango que f (i.e. $\max[t] - \min[t] = \max[x] - \min[x]$) pero que es discreta y que está ordenada de menor a mayor. Sea $I(f_i, t)$ una variable indicadora que toma el valor 1 si $x_i \leq t$ y 0 en cualquier otro caso. Entonces

$$F(x, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(f_i, t)$$

es la función de distribución acumulada para f . Tomando ventaja del pareo de observaciones físico-químicas y de densidad de huevos (z observada), construimos la función de distribución acumulada conjunta bajo la hipótesis nula de independencia entre ambas variables

$$G(z,t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{\bar{z}} I(f_i,t)$$

donde z representa la media global de la densidad de huevos. La significancia estadística de la diferencia entre las dos curvas (G y F), se calcula mediante la máxima distancia vertical absoluta de la siguiente manera:

$$\max |G(f,z,t) - F(f,t)| = \max \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i - \bar{z}}{\bar{z}} \right) I(f_i,t) \right|$$

y su probabilidad, que bajo la hipótesis de una relación al azar entre ambas curvas debe tener un valor bastante pequeño, es evaluada a través de una distribución de frecuencia producida mediante bootstrap para el estadístico de esta última ecuación. Después de determinar la diferencia máxima absoluta entre las dos curvas, se procederá a comparar con la distribución de la diferencia absoluta máxima de más de 2000 repeticiones de remuestreo bootstrap para la abundancia de huevos y larvas y la variable ambiental.

1.4.3.- Análisis de la distribución temporal de la CMO y huevos y larvas de anchoveta

Con la información de los muestreos semanales durante los períodos de desove se estimarán para cada semana los siguientes parámetros:

- a) Límite superior de la CMO (definidos como 0.5 y 1.0 mL/L)
- b) Abundancias absolutas y relativas (al total integrado) de huevos y larvas de anchoveta para cada estrato.
- c) Profundidad media ponderada (PMP) de la abundancia de huevos y larvas, estimada como,

$$PMP = \sum_{i=1}^k (n_i \times Z_i) / N$$

Donde n es la abundancia de huevos del estrato i para k estratos, Z es el ancho (m) de cada estrato y N la abundancia total de huevos sumadas de los estratos. PMP representa entonces el centro de masa de la distribución de huevos y/o larvas.

Los parámetros límite superior de la CMO, así como otros parámetros ambientales que varían con la surgencia, tales como la profundidad de la termoclina, temperatura a 10 m y estratificación, serán asociados a los parámetros de distribución vertical de huevos y larvas mediante técnicas de correlación no paramétrica (Ejemplo, test de rangos de Spearman) y por análisis gráfico al contruir contornos verticales de oxígeno y temperatura y sobreponer sobre ellos los parámetros de distribución vertical de huevos y larvas.

2. Objetivo específico N°2.2

Determinar la relación entre los estadios tempranos de la Anchoqueta y la capa de mínimo de oxígeno.

2.1 Experimentos en laboratorio de los efectos de hipoxia sobre las tasas de desarrollo y mortalidad de huevos de anchoqueta.

Los días 25 y 26 de septiembre de 2008, utilizando como plataforma de trabajo una embarcación artesanal, se realizó la captura de huevos de Anchoqueta *Engraulis ringens* desde el área costera de la bahía Mejillones del Sur (23°S). En cada oportunidad las muestras fueron colectadas mediante una red tipo WP-2 de abertura de maya de 300 micras. El procedimiento utilizado para la obtención de huevos de anchoqueta consistió en arrastres horizontales a una distancia de cabo de 10 m y en un tiempo máximo de arrastre de 3 min. Una vez finalizado el arrastre se procedió a colocar el contenido de este en frascos de vidrio herméticos (2000 ml), siendo posteriormente las muestras almacenadas en contenedores isotérmicos de manera de mantener la temperatura constante y similar a la del sitio de colecta. Luego de colectado el material, este fue trasladado inmediatamente hasta el laboratorio CENSOR de la Facultad de Recursos del Mar de la Universidad de Antofagasta.

Una vez en el laboratorio se procedió a separar y seleccionar los huevos de anchoveta, utilizando como criterio para asignar edad, aquellos descritos por Moser y Ahlstrom (1985). Mediante lupa binocular Leica MZ6 y luz fría, se procedió a seleccionar huevos, lo que correspondieron a estadios tempranos de desarrollo III y IV. Una vez obtenido el número necesario de huevos según el diseño experimental propuesto, estos fueron mantenidos en depósitos de vidrio en una incubadora regulada a 16°C (temperatura del agua de mar al momento de la colecta de huevos) evitando así potenciales cambios bruscos de temperatura que pudiesen afectar la viabilidad de los huevos que se utilizarían finalmente en los experimentos, o la tasa de desarrollo que es temperatura dependiente. Estos huevos fueron mantenidos en condiciones de concentración de oxígeno similar a la del ambiente, hasta el montaje del sistema experimental. Una cantidad adicional de huevos en estadios avanzados (> IV) se mantuvieron en la misma incubadora. Estos huevos fueron mantenidos hasta eclosión, de manera de ser utilizados en posteriores experimentos de sobrevivencia larval. Larvas fueron también mantenidas a 16°C y en las mismas condiciones de oxigenación que huevos.

Transcurrido un periodo de tiempo no mayor de una hora desde la separación de los huevos desde la muestra de zooplancton, se procedió a montar las unidades experimentales. Para ello se definieron cuatro concentraciones nominales de 0.10, 0.25, 0.50 y 1.00 mL/L de oxígeno disuelto más una solución control a un 100 % de saturación (alrededor de 7.0 ml/l de oxígeno disuelto), siguiendo la metodología descrita en Laudien *et al* (2007) y que consiste básicamente en inyectar nitrógeno gaseoso en agua de mar, para reducir la concentración de oxígeno disuelto. Para ajustar el flujo de nitrógeno requerido para cada una de estas concentraciones, se realizaron pruebas preliminares, determinándose la concentración final de oxígeno a distintos flujos de nitrógeno. La concentración de oxígeno fue determinada mediante sensores ópticos microoptode, los que estaban conectados a un equipo medidor de oxígeno por fibra óptica de cuatro canales PreSens OXY-4 micro, siendo registrados en forma continua cada 1 minuto, almacenándose la información a través del software OXY-4. Secuencialmente se procedió al montaje de las unidades experimentales, las que consideraron de acuerdo a la propuesta metodológica, un total de 5 replicas. Cada réplica consideró un total de 10 huevos, del mismo estadio de desarrollo. Entonces el experimento se realiza sobre 50 unidades observacionales.

Cada unidad experimental fue introducida en contenedores plásticos los cuales se encontraban sumergidos en un acuario (Figura 4 y Figura 5) a la misma temperatura que la incubadora ($16^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$), siendo mantenida la temperatura mediante un controlador T-computer (0.1°C precisión). Una vez montada cada unidad, se registró el tiempo inicial de manera de realizar los respectivos registros posteriores. Las observaciones se realizaron a intervalos de 4 horas, siendo registrado en cada oportunidad el número de huevos muertos, los cuales fueron distinguibles por la pérdida de transparencia y flotabilidad, hasta obtener 100% de mortalidad o en su defecto eclosión larval

Para el caso de las larvas se siguió el mismo protocolo experimental detallado para huevos. El criterio de finalización de este experimento fue la mortalidad evidenciada por pérdida de motilidad o en su defecto, al tiempo de re-absorción total del saco vitelínico e inicio de pigmentación de la zona ocular.



Figura 4: Vista de los sistemas experimentales



Figura 5: Detalle del arreglo de las Unidades experimentales

La tasa de mortalidad total para huevos se estimó a partir de la ecuación

$$\frac{N_t}{N_0} = \exp(-Zt)$$

La que puede re-ordenarse como:

$$N_t = N_0 * \exp(-Zt)$$

Y su linearización:

$$\ln(N_t) = \ln(N_0) - Zt$$

Permite estimar la tasa de mortalidad instantánea en base al decaimiento de la sobrevivencia. La pendiente del segmento de la nube de puntos que tiende a decaer linealmente, es un adecuado estimador de la mortalidad (Sparre y Venema, 1992; King, 1995).

3. Objetivo específico 2.3

Implementar un modelo numérico que permita reproducir el comportamiento de la distribución de la capa de mínimo de oxígeno en la zona y su asociación a la población de Anchoveta.

3.1 Modelo

Para dar cumplimiento con este objetivo se implementó el modelo tridimensional de Volumen Finito FVCOM (Chen *et al.* 2003, 2006), el cual resuelve las ecuaciones de balance de momentum, continuidad de volumen, balance de temperatura, balance de salinidad y densidad:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S) \quad (7)$$

Donde x, y, z son las coordenadas este, norte y vertical en el sistema de coordenadas Cartesiano; u, v, w son las componentes de la velocidad en x, y z respectivamente; T la temperatura; S la salinidad, ρ la densidad; P la presión, f el parámetro de Coriolis; g la aceleración de gravedad; K_m el coeficiente turbulento de viscosidad vertical; y K_h el coeficiente vertical de difusión de temperatura turbulento.

En la vertical el modelo utiliza la transformación de coordenada sigma para descritizar las

ecuaciones anteriores. La coordenada sigma es definida por la expresión:

$$\sigma = \frac{z - \xi}{H + \xi} = \frac{z - \xi}{D}$$

Donde σ varía desde -1 en el fondo a 0 en la superficie, H es la profundidad, ξ es la variación de la superficie, $D=H+ \xi$ es la profundidad total, y z es la profundidad a transformar.

Con esta coordenada vertical las ecuaciones (1) a (6) son transformadas, quedando por ejemplo la ecuación (1) expresada de la forma siguiente:

$$\frac{\partial uD}{\partial t} + u \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial \sigma} - f_v D = -gD \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' \right) + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial x} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + DF_u$$

En Chen *et al.* (2003) se describe en detalle el modelo y se presenta algunos ejemplos desarrollados por los autores.

Para reproducir el comportamiento de la capa mínima de oxígeno en la zona se utilizo el modulo de calidad de agua incluido en FVCOM, en el cual se formula la conservación de masa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S + W_0$$

Donde C es la concentración del componente de calidad de agua (en este caso oxígeno disuelto), u , v y w son las componentes de la velocidad del agua en las coordenadas cartesianas (x , y , z), A_h es el coeficiente horizontal de viscosidad y K_h es el coeficiente de difusión vertical de mezcla, S representa los ingresos y egresos internos de la componente de calidad de agua y W_0 son los ingresos externos. La implementación en el modelo además de incluir el oxígeno disuelto incluye 7 componentes más los cuales no fueron incluidos en esta implementación por la falta de información empírica con la cual realizar las parametrizaciones necesarias, así como datos con cobertura espacio temporales que cubran el dominio de forma apropiada.

Para evaluar el comportamiento de los huevos después del desove se utilizo el modulo de

seguimiento de partículas lagrangiano incluido en FCVOM, el cual resuelve el sistema no-lineal de la ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}(\vec{x}(t), t)$$

Donde \vec{x} es la posición de la partícula en el tiempo t , $d\vec{x}/dt$ es la tasa de cambio de la partícula en el tiempo $\vec{v}(\vec{x}, t)$ es el campo de velocidad tridimensional de generado por el modelo. Los detalles la resolución numérica de esta ecuación son dados en Chen *et al.* (2006).

3.2 Dominio de modelación

La extensión del dominio de modelación propuesto corresponde al mostrado en la Figura 6, el cual cubre más allá de las 100 millas náuticas requeridas producto de la curvatura de la línea a de la costa en la zona norte y que debe ser bien representado de forma que la circulación sea realista.

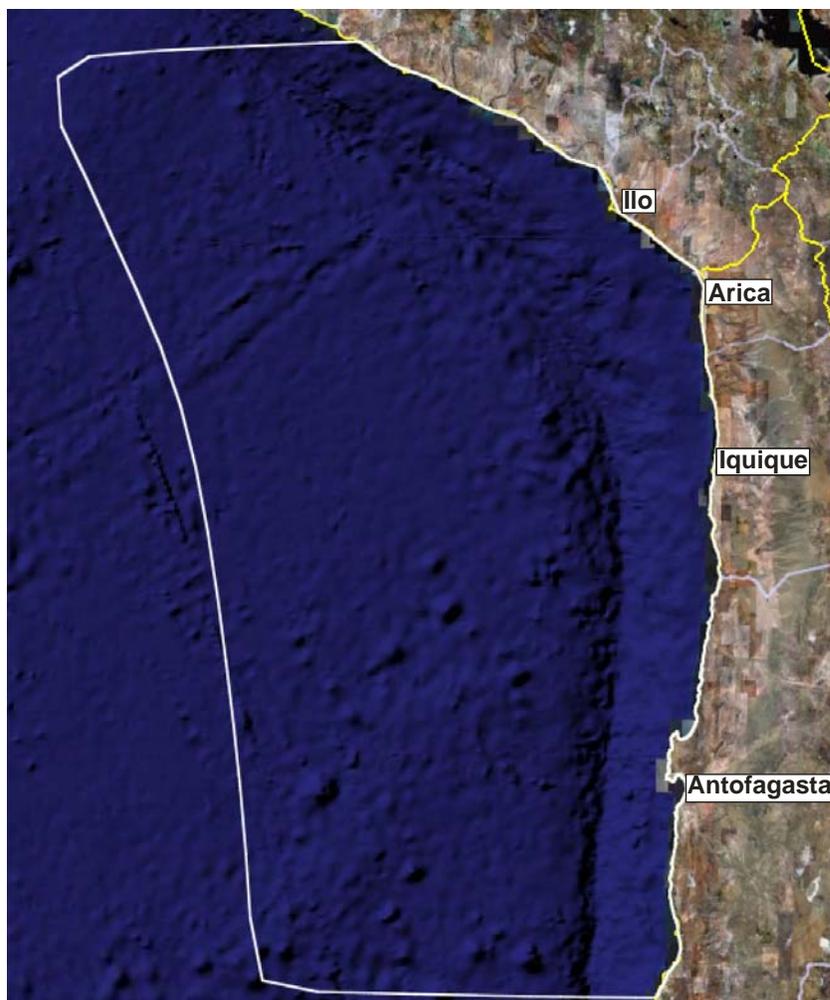


Figura 6. Dominio de modelación, se indica con un la línea blanca las fronteras del dominio.

En la generación de la malla no estructurada se utilizaron los datos de la línea de la costa obtenida de la base de dominio público “A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database” (Wessel, y Smith, 1996), mientras que la batimetría desde la base de datos ETOPO2 (U.S. Department of Commerce, NOAA 2006). Información que se importó al programa Surface Water Modeling System (SMS) para la generación de la malla no estructurada. Previa a la generación de la malla toda la información batimétrica fue convertida desde coordenadas geográficas a coordenadas UTM en datum WGS84, dado que el dominio de modelación comprende dos zonas (la 18 y 19S) se utilizó la Zona 18S para realizar la conversión.

La malla se generó considerando las características topográficas y la línea de la costa del área de modelación, y los criterios sugeridos por Chen *et al.* (2006) de forma que los elementos de la

malla sean numéricamente estables, así mismo se verificó que los tiempos de avance en los modos internos y externos sean los apropiados para tener un modelo con un ejecución estable.

Una vez generada y verificada la malla se procedió a la preparación de los campos bidimensionales (viento), tridimensionales (temperatura y salinidad), y las condiciones de borde (marea).

Producto de la dimensiones de la malla a utilizar se optó por sólo utilizar las salidas promedio del modelo regional OCCAM (Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling Project) de resolución 1/12 grado (Gwilliam *et. al.*, 1995), no incluyéndose la información histórica de los proyectos FIP como se había propuesto. Esto debido a que su cobertura espacial es menor y no incluye la zona al norte de los 18°S, por otra parte la incorporación de información proveniente de diferentes bases de datos suele producir inestabilidades numéricas que son difíciles de eliminar en forma satisfactoria.

Para llevar los datos de viento, temperatura y salinidad a cada nodo de la malla se siguió el siguiente procedimiento con el programa Surfer: primero se genero una grilla regular y se interpolo a cada punto la información por el método de krigging, después se calculo el valor de cada variable en cada nodo de la malla no estructurada mediante el cálculo de residuales.

En la frontera abierta se impuso la variación de marea por medio de los coeficientes armónicos S_2 , M_2 , N_2 , K_1 , P_1 y O_1 obtenidos del modelo global de la marea TPXO (Egbert y Erofeeva, 2002), y se permitió la salida de flujos por geostrofia. Además, se utilizó una esponja para evitar la propagación de perturbaciones que produzcan inestabilidades al interior del dominio, esponja que fue creada en función de la dimensión de cada uno de los elementos de la frontera.

La información tridimensional de de oxígeno disuelto fue obtenida desde el Atlas Oceanográfico Mundial del 2005 (WOCE 2005), información que tiene una resolución de un grado de latitud y longitud, no incluyéndose fuentes internas y externas de oxígeno disuelto.

Experimentos

Se realizaron en total cuatro experimentos o simulaciones:

- Experimentos base (dos): consistieron en la determinación de la respuesta del modelo con a la batimetría, línea de la costa, campo de masa y marea para julio y enero. Este experimento además de ser usado para realizar ajustes en la malla y las condiciones de borde dan las condiciones base del sistema. Obteniéndose como resultados las condiciones iniciales para los siguientes experimentos.
- Condición de Invierno: En este caso se eligió el mes de julio por ser uno de los meses en donde se observa las menores intensidades de los vientos.
- Condición de Verano: Para realizar esta simulación se eligió el mes de enero por presentar vientos favorables a la surgencia.

4. Objetivo específico 2.4

Determinar el efecto de la capa de mínimo de oxígeno en las poblaciones bentónicas de interés comercial.

4.1 Zona de estudio y muestreo.

4.1.1. Experimental.

La muestra se extrajeron en zona aledañas a Iquique, para lo cual se solicito permiso de pesca de Investigación a la Subsecretaría de Pesca para la extracción de los organismos para los experimentos de hipoxia, la cual fue autorizada de acuerdo a la Resolución Exenta N° 2205 del 21 de agosto del 2008.

4.1.2. Áreas de manejo.

Se realizaron dos campañas, una en la temporada de invierno, entre el 11 y 19 de agosto del 2008 y otra en verano entre 23 y 24 de enero del 2009. En cada oportunidad se procedió a la toma de

muestras y observaciones en 7 áreas de manejo, en cada una de ellas se efectuó 1 transecta perpendicular a la línea de costa.

4.2. Efecto de la hipoxia sobre organismos bentónicos

4.2.1. Experimento

Una vez extraídos los organismos, estos fueron trasladados en recipientes con aireación a los estanques ubicados en el Campus Huayquique para su aclimatación, en donde se mantuvieron con agua circulante por un periodo de 48 horas.

De las especies indicadas de acuerdo a su importancia económica se sometió a la fase experimental a seis recursos; loco (*Concholepas concholepas*), pulpo (*Octopus mimus*), lapa (*Fissurella* sp), caracol locote (*Thais chocolata*), almeja (*Protothaca thaca*) y erizo (*Loxechinus albus*).

Previo al desarrollo de los experimentos, se ajustó la concentración de oxígeno disuelto a las siguientes condiciones de hipoxia: 0,10, 0,25, 0,50 y 1,0 mL/L, siguiendo la metodología descrita en Laudien *et al.* (2007) y que consiste básicamente en inyectar nitrógeno gaseoso en agua de mar, para reducir la concentración de oxígeno disuelto. Para ajustar el flujo de nitrógeno requerido para cada una de estas concentraciones, se realizó pruebas preliminares, determinándose la concentración final de oxígeno a distintos flujos de nitrógeno. La concentración de oxígeno se determinó mediante sensor de membrana conectado a un equipo medidor de oxígeno WTW (mod. P340), siendo registrados en forma continua cada 1 minuto, almacenándose la información en un PC conectado.

Los individuos de loco, pulpo, lapa, locote, almeja y erizo fueron sometidos, en forma separada para cada especie, a las condiciones de hipoxia previamente definidas. El diseño consideró 5 unidades experimentales (una para cada concentración de oxígeno ya definida, más una unidad control con oxígeno en saturación), cada una de estas unidades incluyó 2 unidades

observacionales que contó con 10 individuos de cada especie en cada una para lapa, locate y almeja, con 6 individuos para loco y erizo y 2 para pulpo (Figura 7).

La temperatura del agua en las unidades experimentales se controló mediante baños termostáticos. Se reguló la temperatura a 14 ± 0.5 °C. El agua de mar se filtró y se esterilizó. Se registró la mortalidad en todas las unidades experimentales a intervalos de 2 horas. El criterio para definir mortalidad de loco, pulpo, lapa, caracol locate, almeja y erizo incluyó la desadhesión del sustrato, falta de movimientos de podos y detención de estructuras respiratorias.



Figura 7: Montaje experimental de hipoxia en organismos bentónicos en laboratorio.

4.2.2. Áreas de manejos.

En cada transecta se realizaron 4 estaciones ubicadas en sentido batimétrico a los 0, 5, 10 y 15 metros de profundidad. En cada estación, se determinó el oxígeno disuelto promedio a partir de la toma de tres muestras por profundidad (Figura 8) y se constató la presencia de los recursos bentónicos de importancia económica y su biota coterritorial (Figura 9), donde se realizaron tres muestras utilizando un cuadrante metálico de 1m², una muestra base y dos réplicas ubicadas a un metro de distancia a la izquierda y derecha respectivamente, en donde se procedió a contabilizar

el número de individuos de las especies recursos para determinar su densidad media. Las observaciones biológicas se determinaron en cada uno de los niveles batimétricos señalados mediante buceo autónomo, donde se tomo nota y registros fotográficos en cada una de las estaciones de muestreo con la finalidad de evitar un muestreo destructivo. Con la finalidad de verificar la distribución batimétrica y el gradiente de densidad de los diferentes recursos de importancia comercial con la cantidad de oxígeno determinada para cada una de las profundidades, se procedió a analizar la información disponible para cada unas de las áreas de manejo para diferentes años y analizar sus posibles relaciones con la capa mínima de oxígeno.



Figura 8: Toma de muestra para la determinación de oxígeno en las áreas de manejo.



Figura 9: Observaciones de recursos de importancia comercial en las áreas de manejo.

VIII. RESULTADOS

1. Objetivo específico N° 2.1

Determinar el efecto de la capa de mínimo de oxígeno en la determinación del éxito o fracaso del desove de la Anchoveta.

1.1 Distribución espacial de la CMO y huevos de anchoveta

1.1.1 Información oceanográfica

1.1.1.1 Condiciones Oceanográficas Superficiales

Durante el invierno de 2008, la temperatura superficial del mar presentó un núcleo de bajos valores ($< 16^{\circ}\text{C}$) en la banda costera entre $21.0^{\circ}\text{S} - 21.75^{\circ}\text{S}$. Esta banda estuvo asociada a salinidades relativamente bajas (< 34.85), bajo contenido de oxígeno ($< 5 \text{ mL/L}$), alta densidad ($> 25.6 \text{ kg/m}^3$), y vientos del orden de 8.65 ms^{-1} , lo cual indicó un marcado evento de surgencia costera. Hacia el oeste entre 70.3°W y 70.8°W se ubicó una lengua de agua de mayor temperatura relativa ($> 17^{\circ}\text{C}$) proveniente del sector norte, con valores que se incrementaron hacia el norte, y hacia el este y oeste, alcanzando valores de 17.5°C . Esta lengua de agua presentó salinidades superiores a 34.9 que disminuyeron hacia el sur, en cambio el campo de la densidad presentó relativamente bajos valores (25.4 kg/m^3) hacia el sur, disminuyendo aún más hacia la costa. El contenido de oxígeno se incrementó levemente hacia el norte, aumentando notoriamente hacia la costa ($> 6 \text{ mL/L}$). Al oeste de 70.8°W se observó un núcleo de relativamente bajas temperaturas, asociada a relativamente bajas salinidades (< 34.85), aguas ligeramente más oxigenadas ($\sim 5.5 \text{ mL/L}$) y un leve incremento en densidad ($\sim 25.5 \text{ kg/m}^3$) (Figura 10).

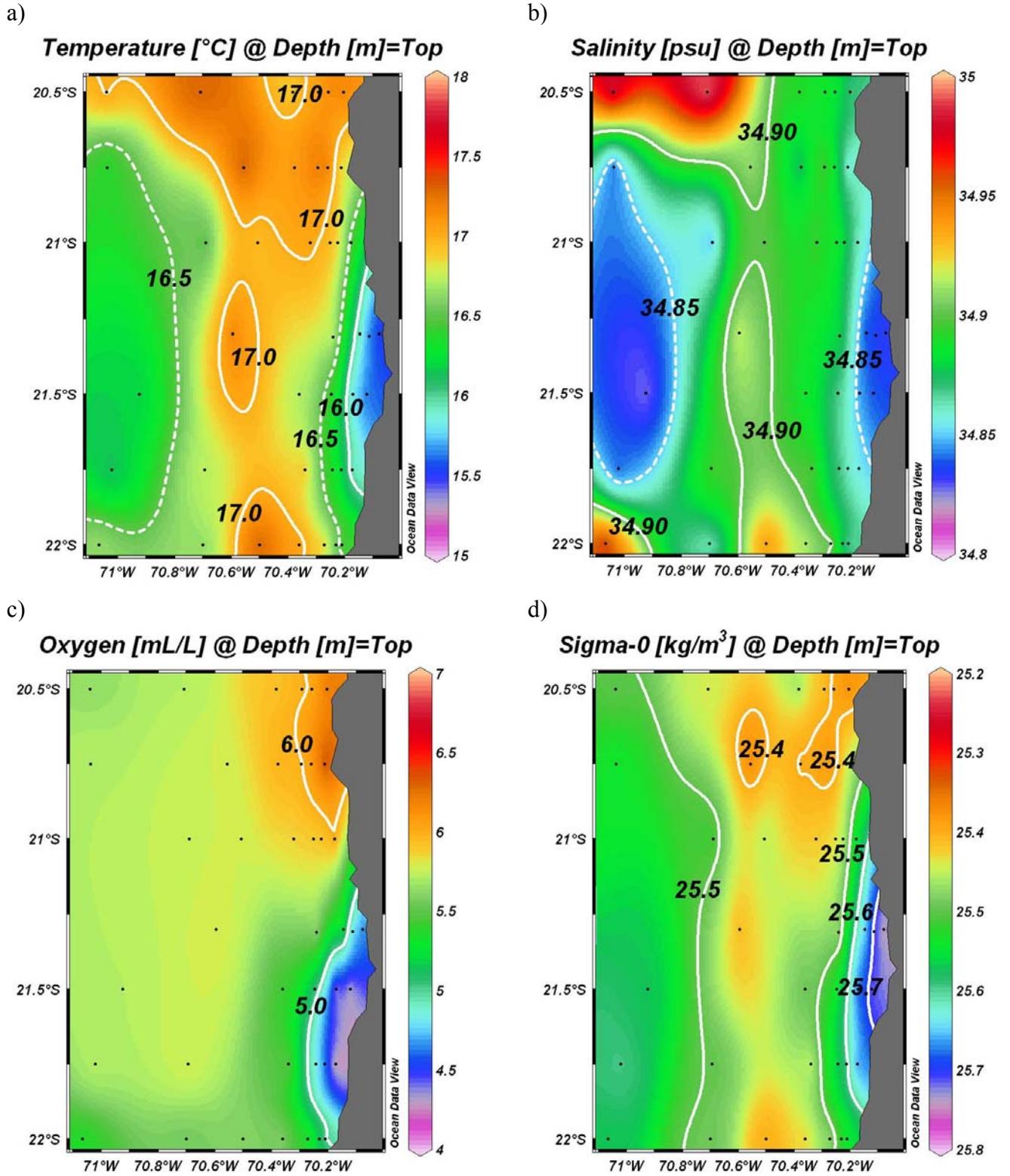


Figura 10. Distribución superficial de: a) Temperatura (°C), b) Salinidad (psu), c) Oxígeno Disuelto (mL/L) y d) Densidad (kg/m³) entre el 26 al 30 de agosto del 2008. Crucero ZMO.

Durante el verano de 2009, las isotermas se distribuyeron en general en forma paralela a la costa, localizándose aguas cálidas, características del verano austral ($> 20^{\circ}\text{C}$), sobre ~ 10 mn. Estas isotermas se mantuvieron por los procesos del transporte hacia el oeste debido a la surgencia costera que en este periodo del año fue más intensa en la región de estudio, favorecida por vientos paralelo a la costa que fluctuaron entre 3.4 y 4.3 ms^{-1} . Paralelamente, el campo de densidad superficial se encontró determinado por la distribución de temperatura, y por tanto las isopícnas siguieron el mismo patrón que el de las isotermas (Figura 11).

Por otra parte, en la franja costera aproximadamente entre 20.50° - 21.40°S la TSM mostró un gran núcleo de valores bajos ($< 17^{\circ}\text{C}$), asociado a bajas salinidades (< 34.65), relativamente bajo contenido de oxígeno ($< 5.5 \text{ mL/L}$), alta densidad ($> 25.2 \text{ kg/m}^3$) y viento meridional del orden de 4.0 ms^{-1} . Hacia el oeste (70.6°W) en la TSM se aprecia el ingreso hacia el sursureste de agua cálida ($> 23^{\circ}\text{C}$), al igual que la salinidad (> 34.8) y el contenido de oxígeno (5.5 mL/L), siendo menos notorio en el campo de la densidad. Más hacia el oeste (70.6°W) se observó un núcleo de relativamente baja salinidad (< 34.70) asociado a temperaturas del orden de 22°C , aguas ligeramente oxigenadas ($\sim 5.5 \text{ mL/L}$) y con un relativamente homogéneo campo de densidad (Figura 11).

1.1.1.2 Diagrama T-S-O₂

Mediante la utilización de diagramas T-S-O₂ se pudo diferenciar entre la latitud 20.5°S y 22°S y desde la costa hacia 71°W , las masas de agua que se encontraron en el invierno de 2008 y verano de 2009. En la capa superficial se puede diferenciar claramente una mayor participación del Agua Subtropical (AST) en el verano de 2009 que en invierno de 2008. Esta diferenciación se debe al cambio estacional que está asociado a un incremento tanto térmico como salino. Inmediatamente bajo el AST se ubicó el Agua Intermedia del Pacífico Suroriental (AIPSO) la cual se caracteriza por un mínimo relativo salino y aguas relativamente oxigenadas. Esta masa de agua se forma a partir de la latitud 33°S , asociada a la Convergencia Subtropical, de acuerdo a lo señalado por Schneider *et al.* (2003). El AIPSO se desplazó hacia el norte por debajo de la capa de mezcla hasta alcanzar la latitud 20°S , con un espesor que fluctuó entre 50 y 100 m, profundizándose hacia el sector oeste, y dependiendo del campo de densidad.

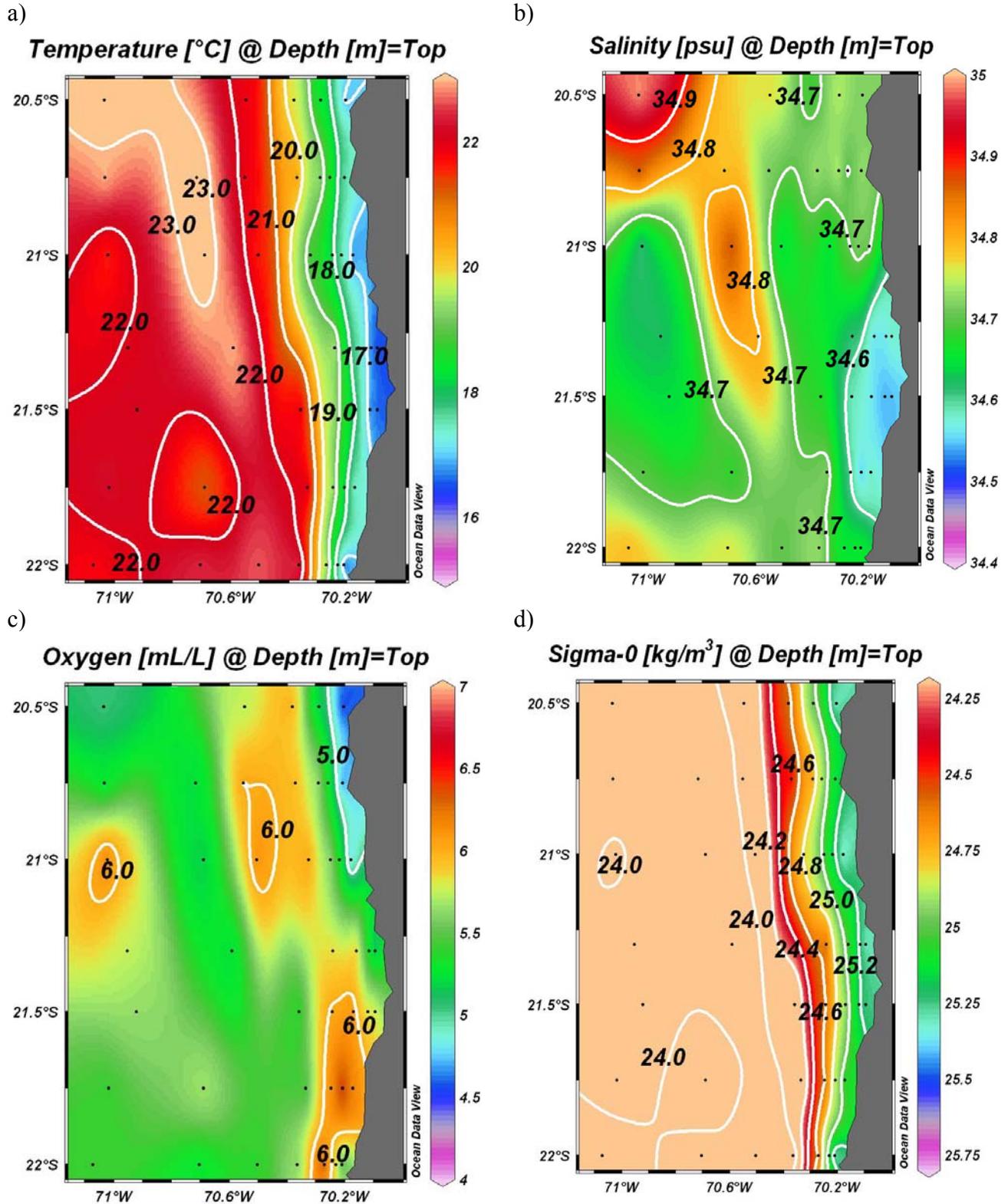


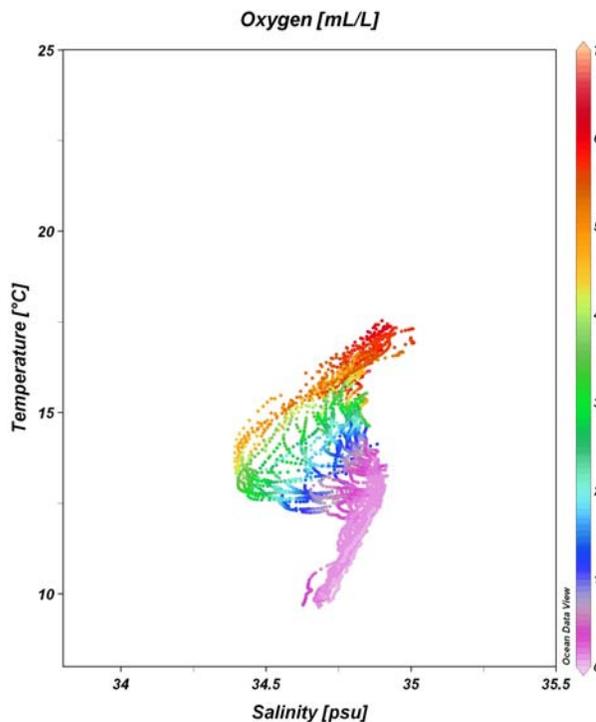
Figura 11. Distribución superficial de: a) Temperatura (°C), b) Salinidad (psu), c) Oxígeno Disuelto (mL/L) y d) Densidad (kg/m³) entre el 12 al 16 de enero del 2009. Crucero ZMO.

Bajo el AIPSO se ubicó el Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS), caracterizada por un máximo relativo salino y un mínimo en el contenido de oxígeno disuelto (Figura 12).

Estas masas de aguas modificaron sus porcentajes de participación dependiendo de su ubicación geográfica debido a procesos advectivos y difusivos. Estos procesos son más activos cuando ocurren procesos de surgencia, generando en la capa superficial agua completamente mezclada. Además, presentaron una leve variabilidad estacional de invierno de 2008 a verano de 2009 (Figura 12).

La ZMO en el área de estudio ocupó la región de la base de la termoclina, en invierno de 2008 como en el verano de 2009 en donde la temperatura y salinidad decrecieron desde el límite superior hasta aproximadamente el inferior. La temperatura varió desde 14°C hasta 9°C, la salinidad desde 34.85 a 34.7 (desde arriba hacia abajo) y sigma-t osciló entre 26.0-26.7 kg/m³ (Figura 12).

a)



b)

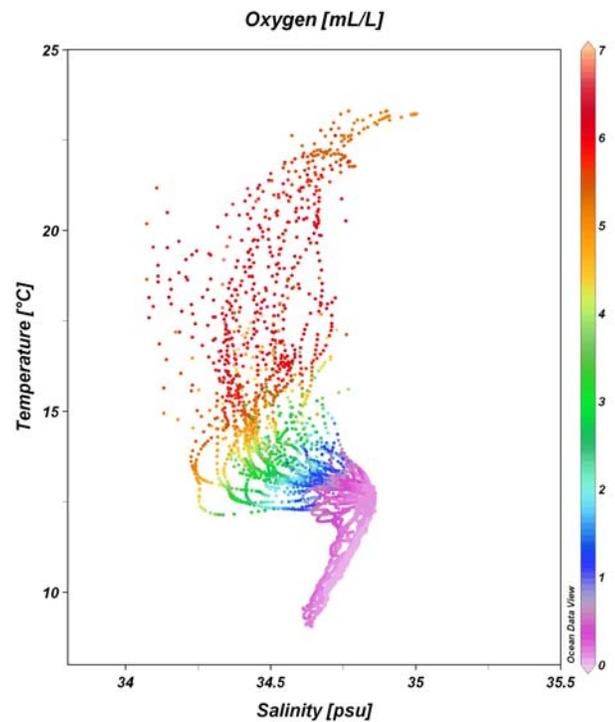


Figura 12: Diagrama T-S-O₂; a) Invierno de 2008 (26 al 30 de agosto), b) Verano de 2009 (12 al 16 de enero). Cruceros ZMO.

1.1.1.3 Distribuciones Verticales de los parámetros oceanográficos

1.1.1.3.1 Condiciones de invierno 2008

La distribución vertical de temperatura, presentó una capa isotermal muy superficial (2-30 m) en el área de estudio. La isoterma de 15°C representó la termoclina ubicándose en el sector oceánico entre 50 a 30 mn a una profundidad entre 35 y 60 m, asociados a gradientes verticales del ~ 0.12 °C m⁻¹ y una frecuencia de Brunt-Vaisala entre 5 a 8 ciclos h⁻¹. Más cerca de la costa, a 10 mn, la termoclina se encontró a una profundidad entre 25 y 38 m, con un gradiente vertical entre 0.10 a 0.12 °C m⁻¹ y una frecuencia de Brunt-Vaisala de ~ 8 ciclos h⁻¹. Finalmente, a 1mn, la termoclina se halló a una profundidad entre 18 y 25 m, con un gradiente vertical entre 0.05 a 0.12 °C m⁻¹ y una frecuencia de Brunt-Vaisala entre 5 a 8 ciclos h⁻¹. La isoterma de 14°C representó mejor la base de termoclina (Figura 13a a la Figura 19a).

La distribución vertical de salinidad, mostró una delgada capa superficial (~ 30 m) hacia fuera de la costa con un relativamente máximo salino, asociado al AST. Esta masa mostró un valor típico del agua subtropical propia de la época invernal, disminuyendo hacia la costa hasta prácticamente desaparecer, debido a la mezcla con agua menos salina en la banda costera. Debajo de esta masa de agua se observó la mínima salina superior que fluctuó dentro de una banda de salinidades entre 34.4 y 34.8 y cuyo espesor osciló entre 50 y 120 m, asociada al AIPSO. Ésta presentó un desplazamiento hacia el norte por debajo de la capa de mezcla hasta alcanzar la latitud 20.5°S. El AIPSO introdujo un decrecimiento en el gradiente vertical de salinidad (0.015 psu m⁻¹) ubicándose entre la termoclina y su base, asociado al máximo gradiente vertical de temperatura (~ 0.12 °C m⁻¹) y al máximo gradiente de estabilidad vertical en la columna de agua (~ 8 ciclos h⁻¹).

Bajo el AIPSO se ubicó el AESS, caracterizada por un máximo relativo salino que alcanzó valores mayores de 34.8 , localizándose su núcleo cercano a la costa a una profundidad que fluctuó entre 75 y 150 m dependiendo de los procesos de surgencia (Figura 13b a la Figura 19b).

La distribución vertical de oxígeno disuelto, se caracterizó por una capa superficial bien oxigenada (>5 mL/L). La oxiclina siguió el mismo patrón que la termoclina en el sector oceánico y costero, con un gradiente vertical entre 0.07 a 0.18 mL/L m^{-1} y 0.10 a 0.18 mL/L m^{-1} , respectivamente. Bajo la oxiclina se ubicó un mínimo de oxígeno con valores inferiores a 0.5 mL/L, asociado al AESS, la cual es transportada por la Contracorriente Subsuperficial Perú-Chile (Figura 13c a la Figura 19c). La alta demanda de oxígeno en la región, combinada con una ventilación débil producen en el agua subsuperficial la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO, Fuenzalida *et al.* 2009). El AIPSO introdujo un incremento en la estabilidad vertical (expresada por la frecuencia Brunt-Väisälä en ciclos h^{-1}) en la columna de agua, haciendo difícil la ventilación de la ZMO en la parte superior (Fuenzalida *et al.* 2009).

La distribución vertical de densidad, presentó una estructura similar a la de temperatura y oxígeno disuelto, mostrando claramente una capa de mezcla y una piconclina marcada con el ascenso de las isopícnas que también revelaron más claramente los estados de los eventos de surgencia; es así como en la región norte los eventos fueron débiles, en el centro fuertes y en el sur moderados con un viento meridional ~ 2.0 $m\ s^{-1}$, ~ 8.6 $m\ s^{-1}$ y ~ 4.6 $m\ s^{-1}$ (Figura 13d a la Figura 19d). La isopícnas de 25.6 kg/m^3 representó mejor la piconclina, ya sea en el sector oceánico como costero, con un gradiente vertical entre 0.015 a 0.025 $kg/m^3\ m^{-1}$ y 0.10 a 0.25 $kg/m^3\ m^{-1}$ respectivamente.

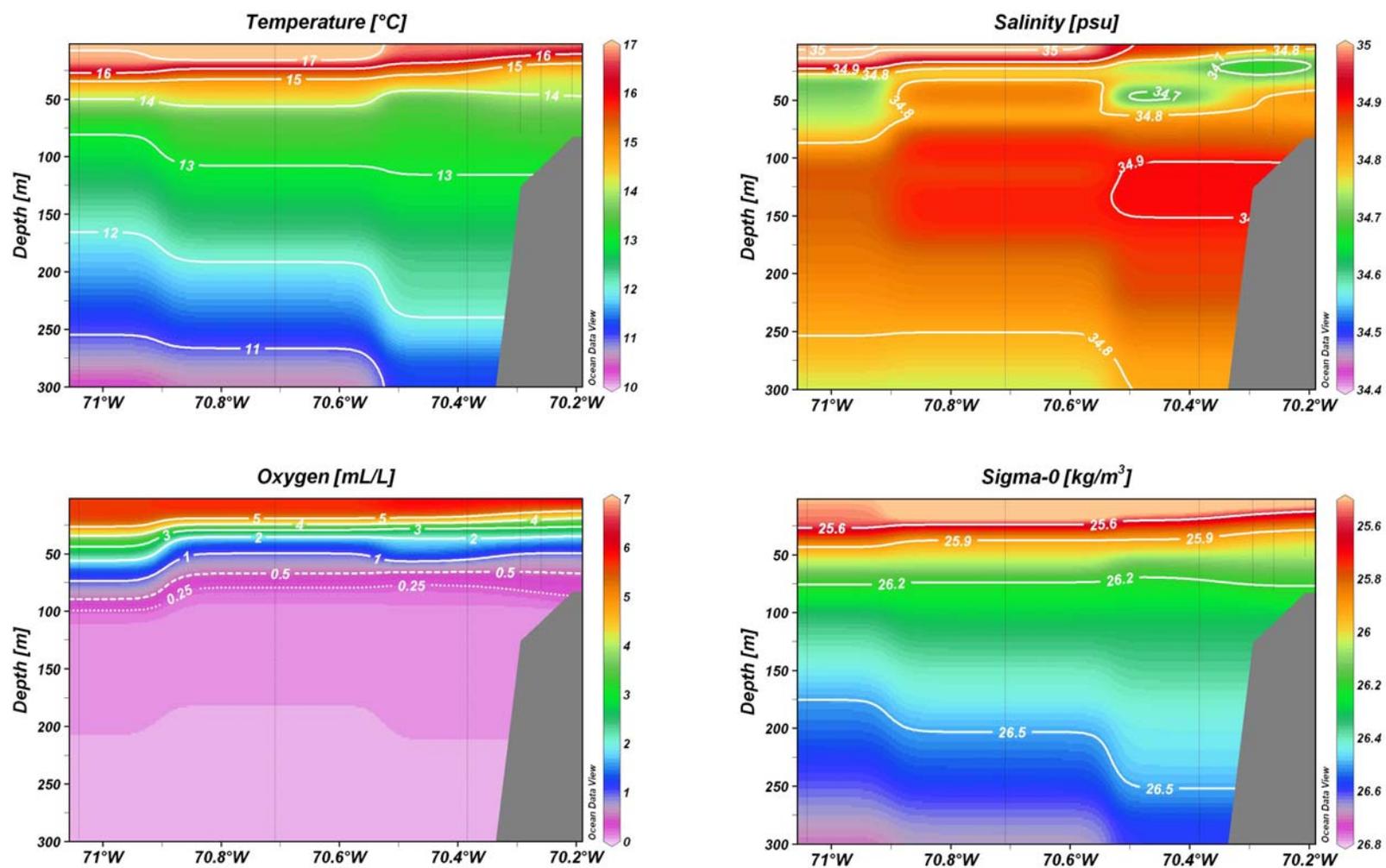


Figura 13. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 30'S . Crucero ZMO, invierno 2008.

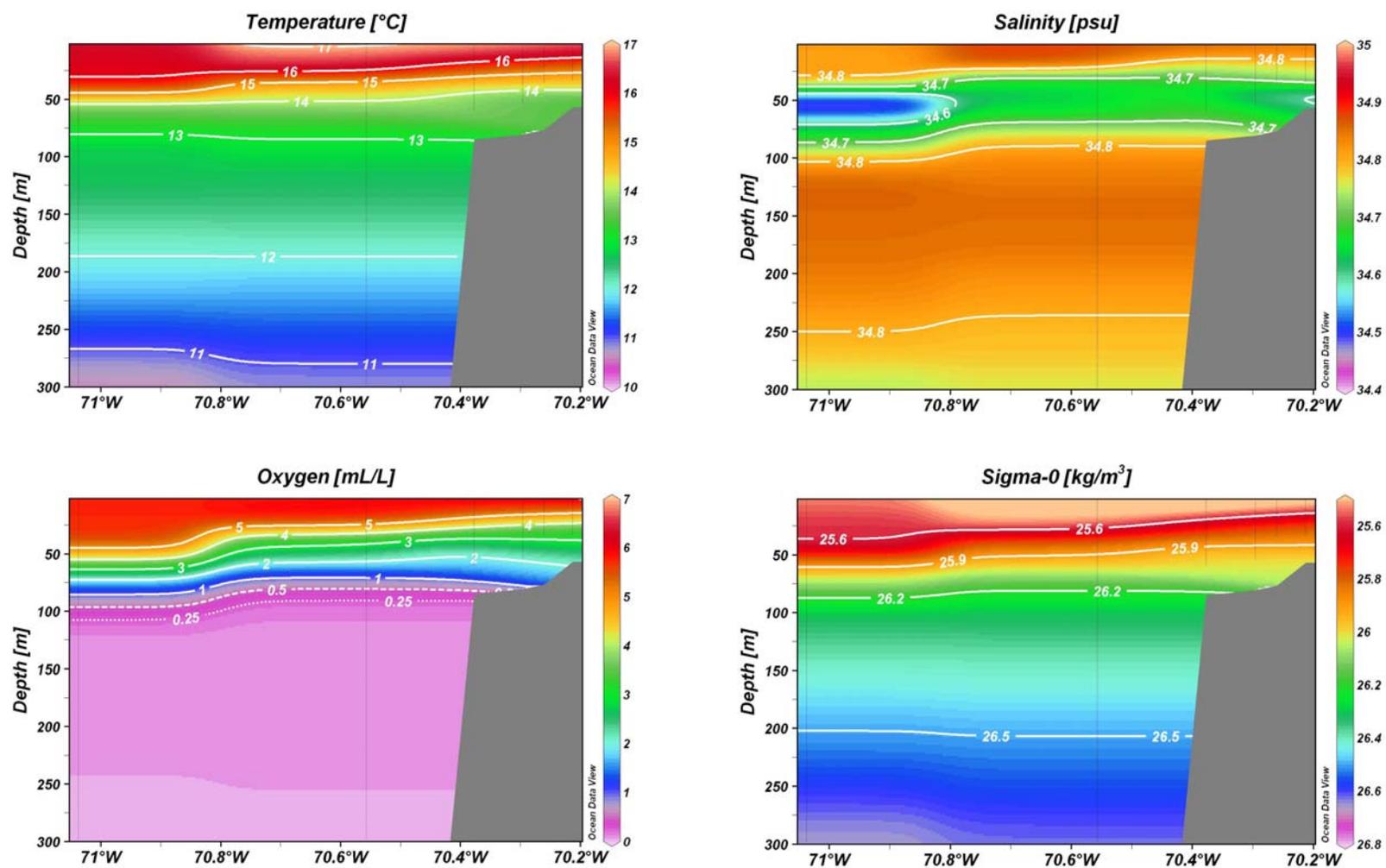


Figura 14. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud $20^\circ 45'S$. Crucero ZMO, invierno 2008.

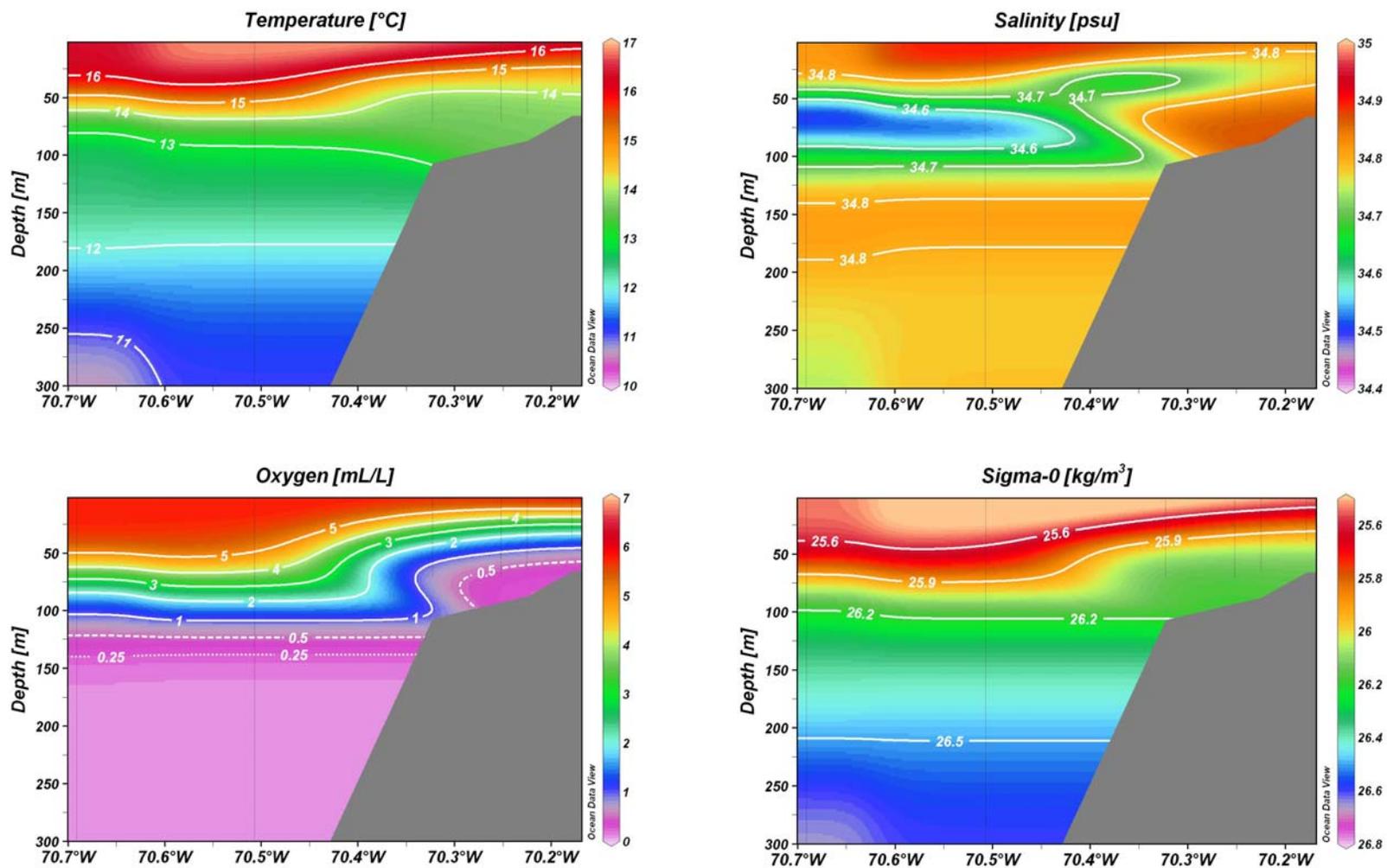


Figura 15. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 00'S. Crucero ZMO, invierno 2008.

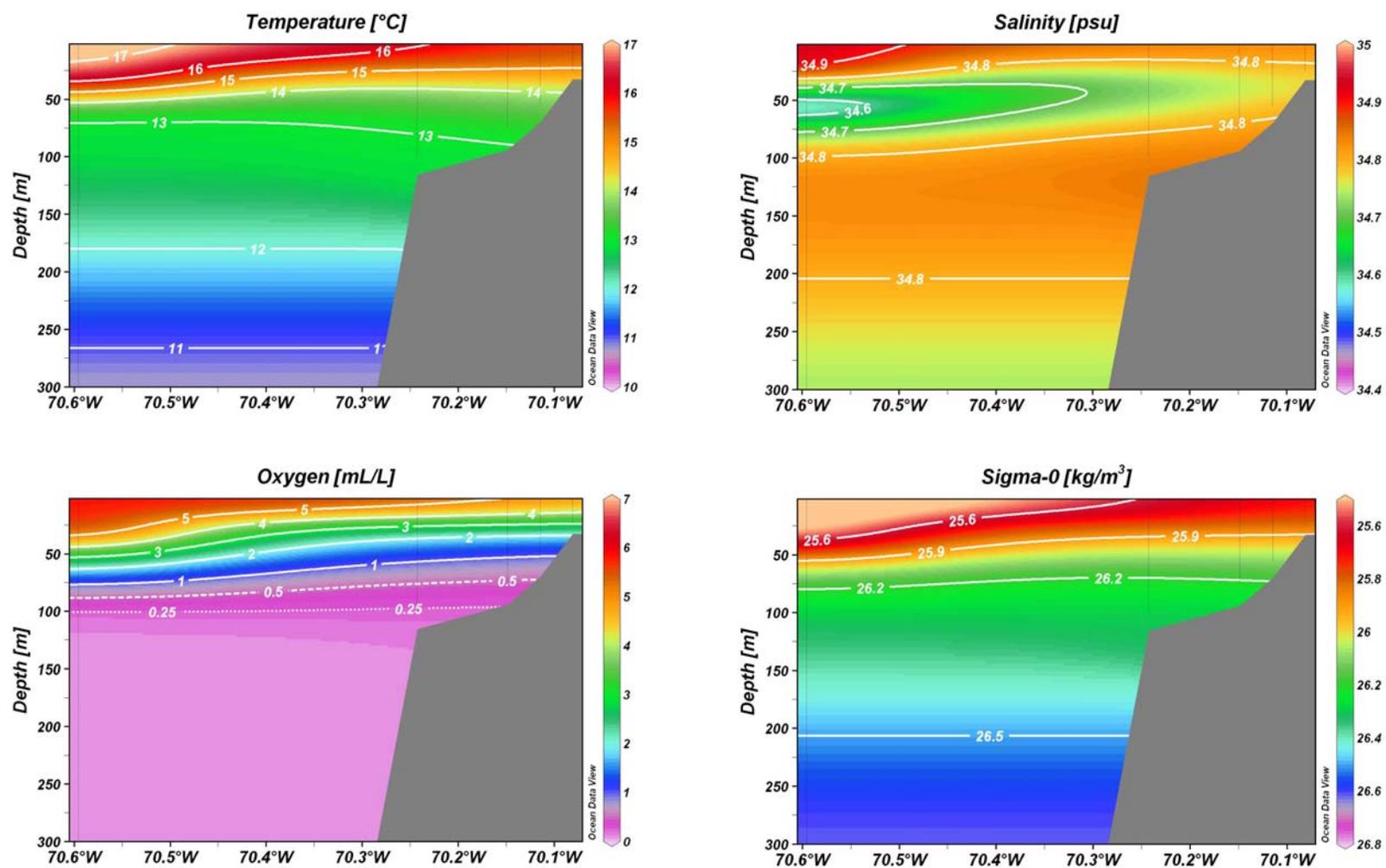


Figura 16. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 18'S. Crucero ZMO, invierno 2008.

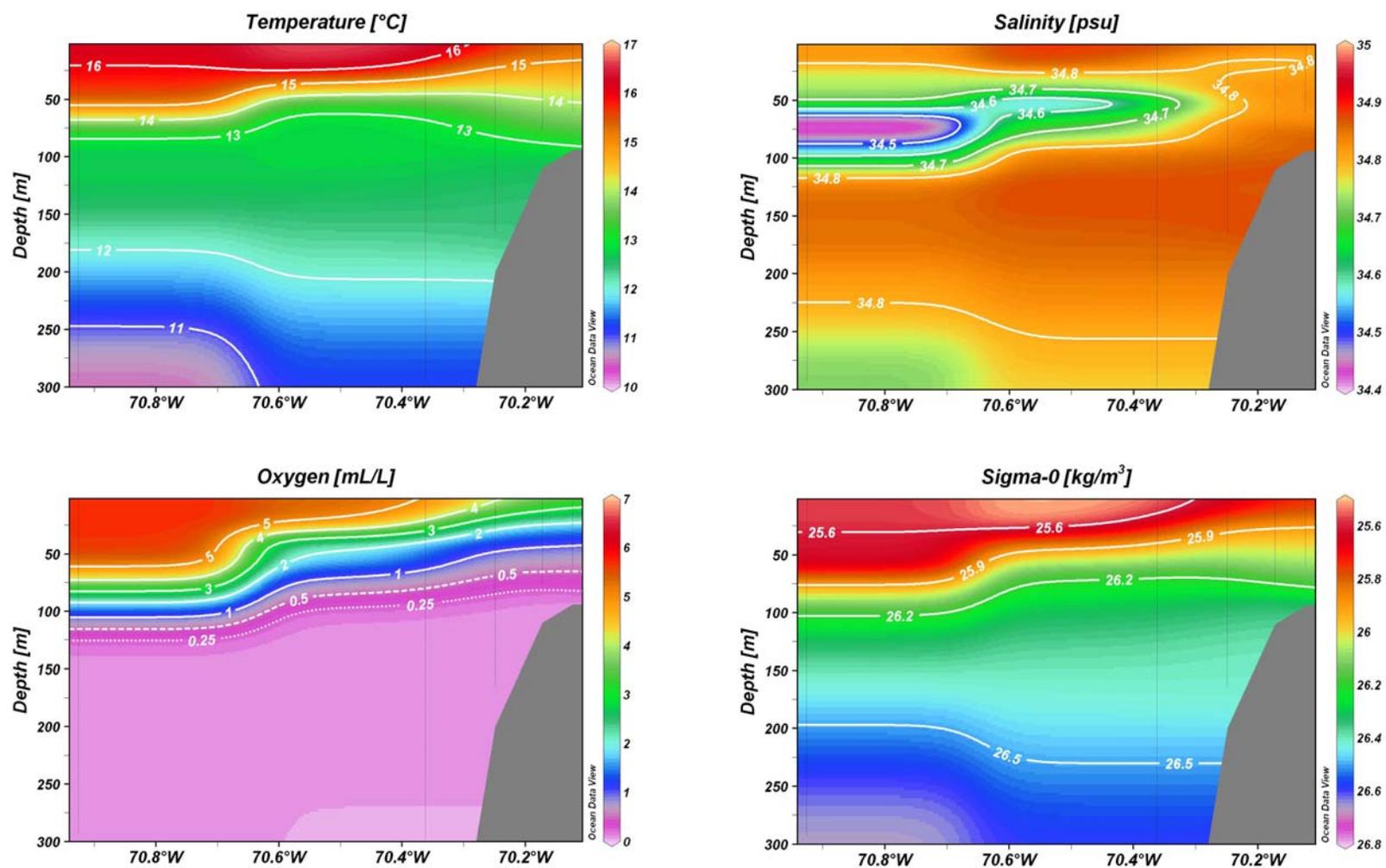


Figura 17. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m^3) en la latitud 21° 30'S . Crucero ZMO, invierno 2008.

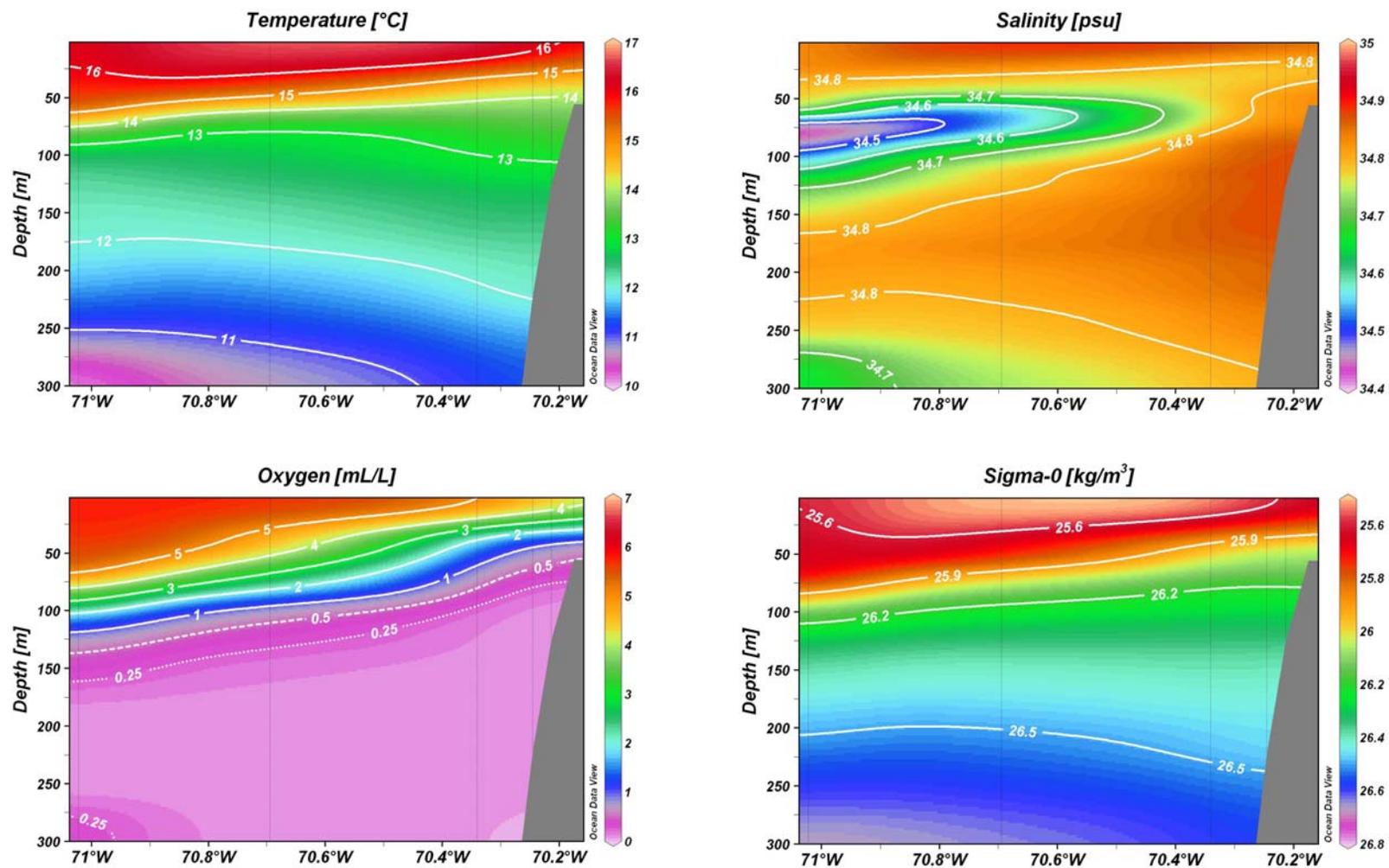


Figura 18. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 45'S. Crucero ZMO, invierno 2008.

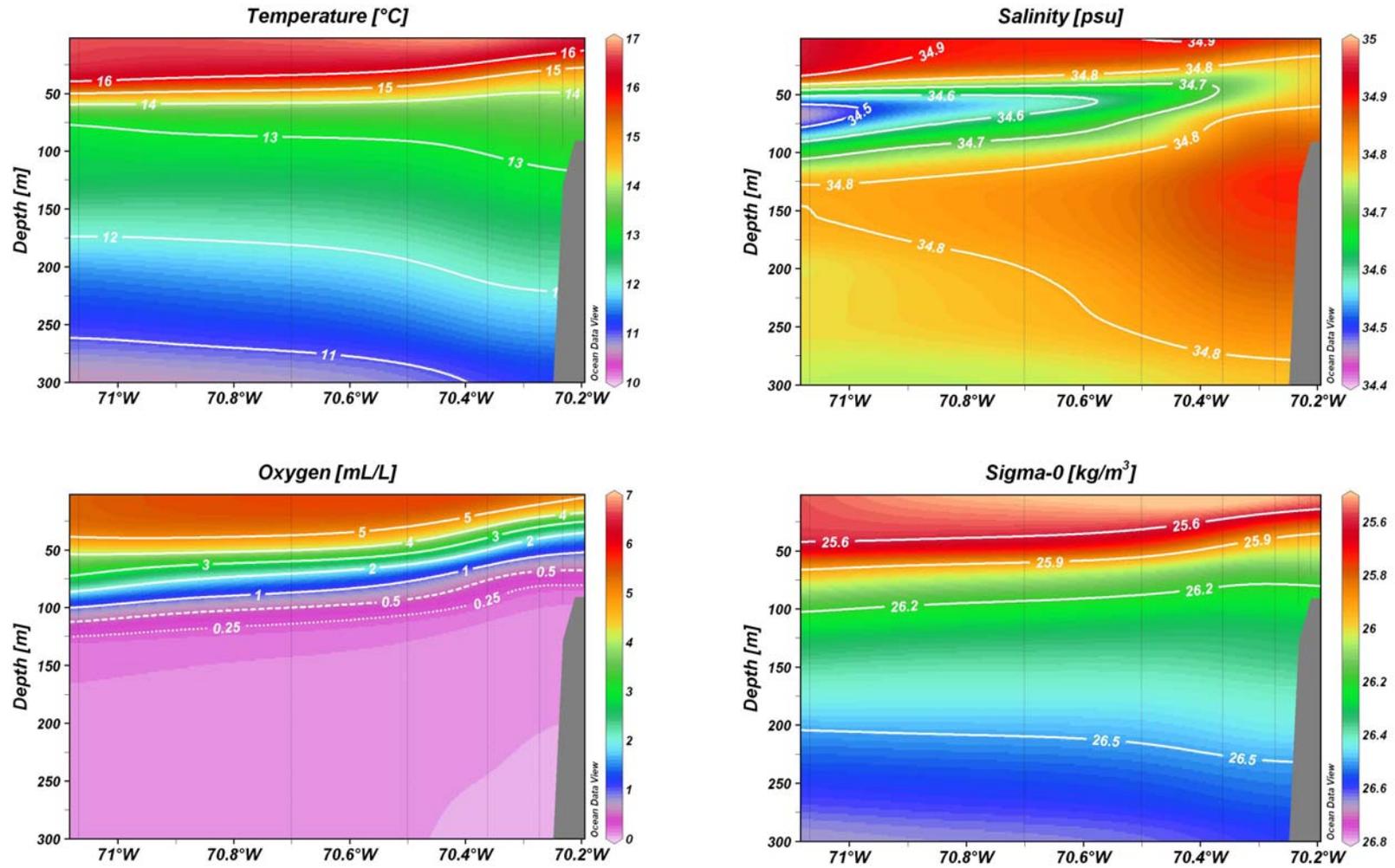


Figura 19. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 22° 00'S. Crucero ZMO, invierno 2008.

1.1.1.3.2 Condiciones de verano 2009

La distribución vertical de temperatura, presentó una capa isotermal muy superficial (2-25 m) en el área de estudio. La termoclina se ubicó en el sector oceánico entre 50 a 30 mn a una profundidad entre 20 y 50 m, con un gradiente vertical entre 0.15 a 0.20 $^{\circ}\text{C m}^{-1}$ y una frecuencia de Brunt-Vaisala entre 8 a 15 ciclos h^{-1} . A 10 mn, la termoclina se encontró a una profundidad entre 15 y 30 m, con un gradiente vertical entre 0.12 a 0.30 $^{\circ}\text{C m}^{-1}$ y una frecuencia de Brunt-Vaisala entre 10 a 15 ciclos h^{-1} . Por último, a 1mn, la termoclina se halló a una profundidad entre 5 y 15 m, con un gradiente vertical entre 0.15 a 0.35 $^{\circ}\text{C m}^{-1}$ y una frecuencia de Brunt-Vaisala entre 12 a 15 ciclos h^{-1} . La isoterma de 13°C representó mejor la base de termoclina (Figura 20a a la Figura 26a).

La distribución vertical de salinidad, mostró una delgada capa superficial (~ 20 m) entre la latitud 20.5° - 20.75°S en el sector oceánico con un relativamente máximo salino, asociado al AST, mostrando un valor típico del agua subtropical propio de la época de verano. El AST hacia el sur de 21.0°S , disminuyó hasta prácticamente desaparecer, debido a la presencia del AIPSO que alcanzó niveles superficiales incrementando de ésta manera la mezcla con AST.

El AIPSO, entre la latitud 20.5° - 20.75°S y entre 30 a 50 mn de la costa, se ubicó debajo del AST con un núcleo poco desarrollado ubicado entre 50 a 60 m de profundidad, con salinidades del orden de 34.6. Hacia la costa el AIPSO se desplazó siguiendo el ascenso de la termoclina, reduciendo de esta forma la salinidad de la capa superficial.

Al sur de la latitud 21.0°S el AIPSO presentó un núcleo bien desarrollado hacia el sector oceánico, entre 30 a 50 mn de la costa, centrado entre 20 a 50m de profundidad, con una banda de salinidades entre 34.3 y 34.4 y cuyo espesor osciló entre 20 y 30m. Hacia la costa el AIPSO se desplazó siguiendo la termoclina, reduciendo aún más la salinidad superficial debido a la permanente surgencia desarrollada durante todo el periodo de estudio. El AIPSO introdujo un decrecimiento en el gradiente vertical de salinidad (~ 0.015 psu m^{-1}), ubicándose entre la termoclina y su base, asociado al máximo gradiente de estabilidad vertical en la columna de agua (~ 15 ciclos h^{-1}).

Bajo el AIPSO se ubicó el AESS, caracterizada por un máximo relativo salino que alcanzó valores mayores de 34.8. Su núcleo se localizó cercano a la costa a una profundidad que fluctuó entre 80 y 150 m dependiendo de la actividad de la surgencia (Figura 20b a la Figura 26b).

La distribución vertical de oxígeno disuelto, se caracterizó por una capa superficial bien oxigenada (>5 mL/L). La oxiclina siguió el mismo patrón que la termoclina en el sector oceánico y costero, con un gradiente vertical entre 0.08 a 0.28 mL/L m^{-1} y 0.15 a 0.28 mL/L m^{-1} , respectivamente. Bajo la oxiclina se ubicó un mínimo de oxígeno con valores inferiores a 0.5 mL/L, asociado al AESS (Figura 20c a la Figura 26c). De igual manera que en el invierno de 2008, el AIPSO introdujo un incremento en la estabilidad vertical en la columna de agua.

La distribución vertical de densidad, presentó una estructura similar a la de temperatura y oxígeno disuelto. Esta mostró claramente una capa de mezcla y una picnoclina, la cual ascendió a la superficie cerca de la costa marcando claramente los eventos de surgencia. Así, en las secciones de la región norte los eventos fueron débiles y moderado, en las secciones del centro moderados y en las secciones del sur moderados y débiles con un viento meridional que fluctuó entre ~ 1.6 a 3.4 m s^{-1} , ~ 4.3 a 3.4 m s^{-1} y ~ 3.3 a 2.0 m s^{-1} , respectivamente (Figura 20d a la Figura 26d). La isopicna de 25.6 kg/m^3 representó mejor la picnoclina, en el sector oceánico y costero, con un gradiente vertical entre 0.020 a 0.090 kg/m^3 m^{-1} y 0.40 a 0.90 kg/m^3 m^{-1} , respectivamente.

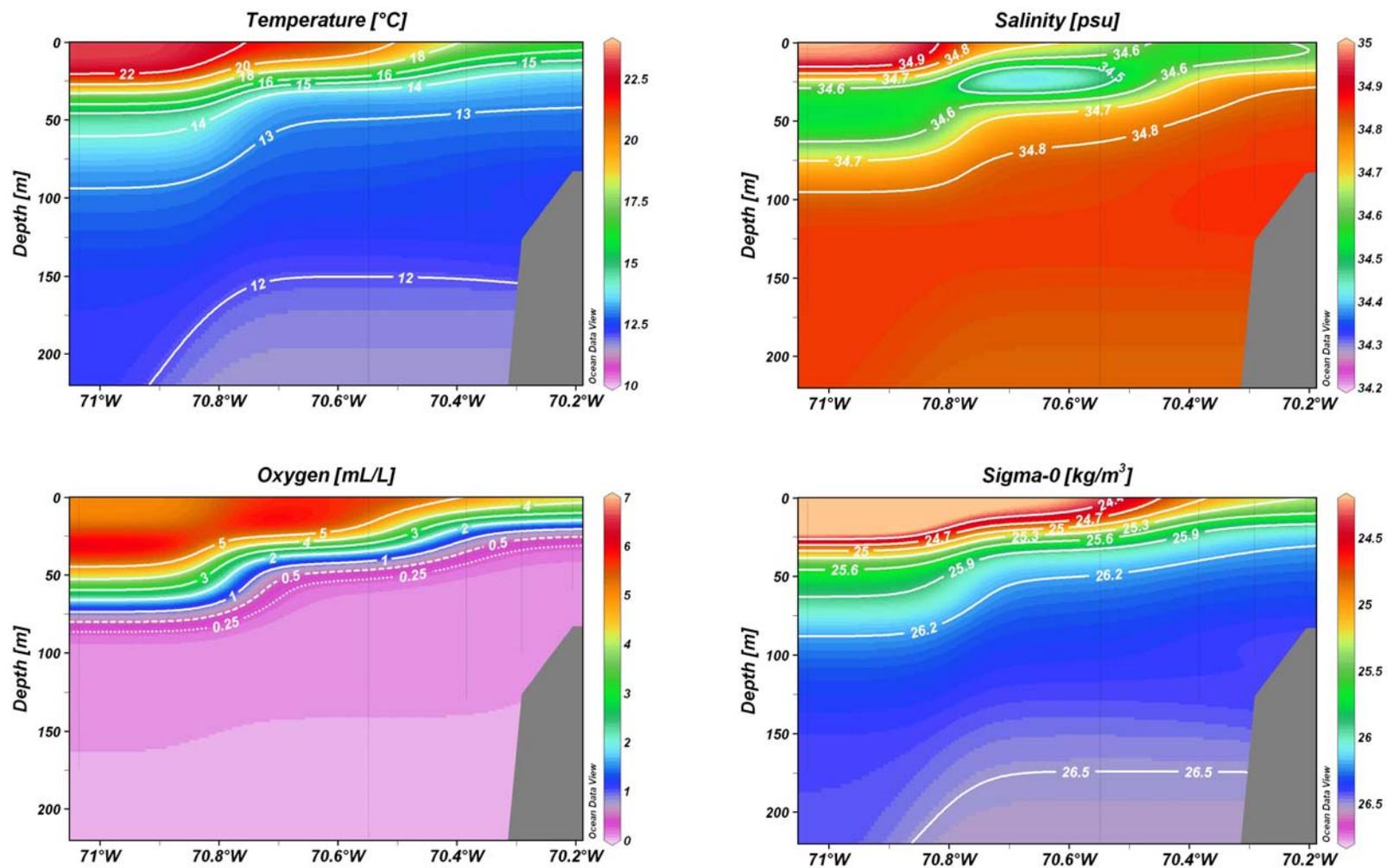


Figura 20. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 30'S. Crucero ZMO, verano 2009.

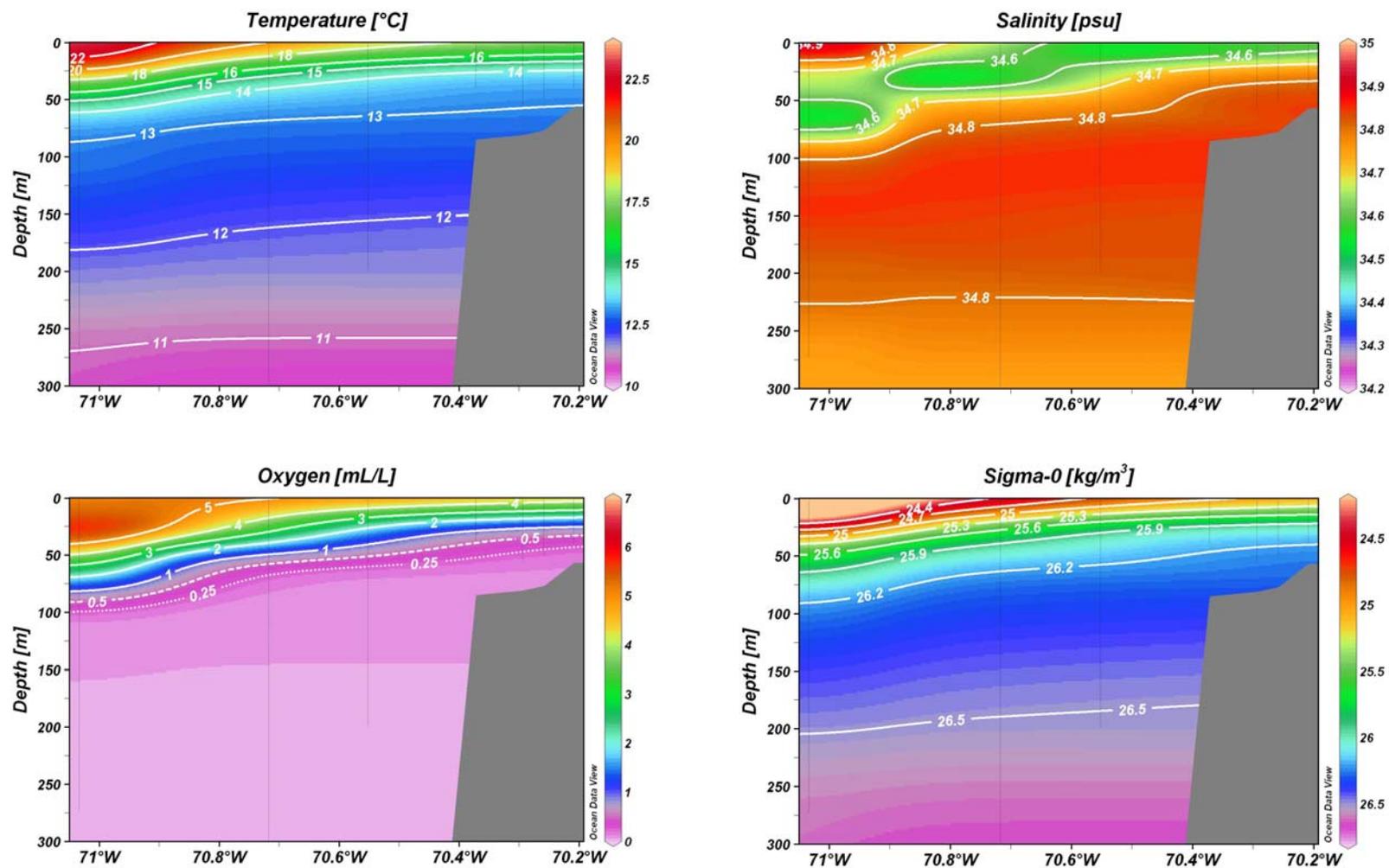


Figura 21. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 45'S. Crucero ZMO, verano 2009.

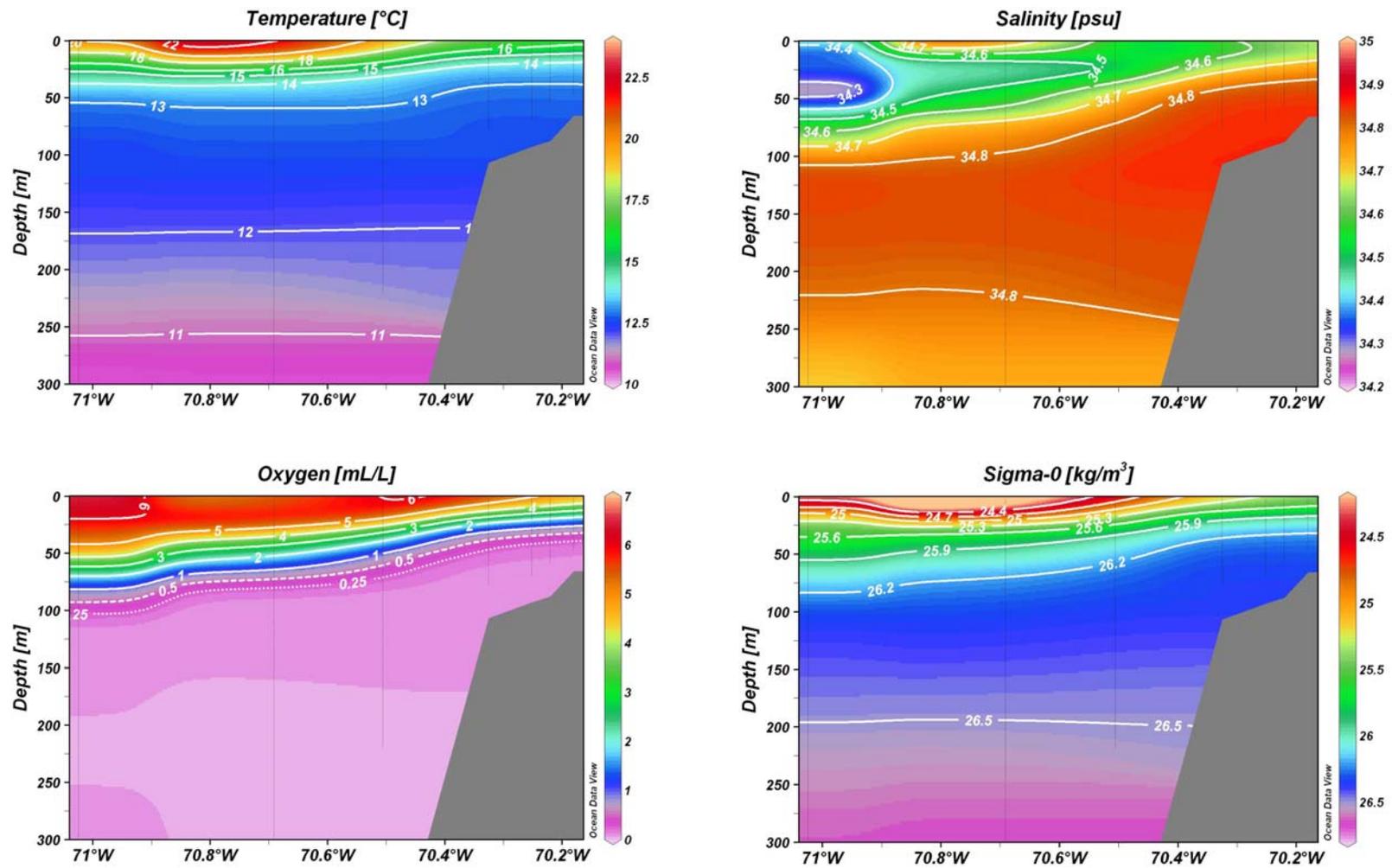


Figura 22. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 00'S. Crucero ZMO, verano 2009.

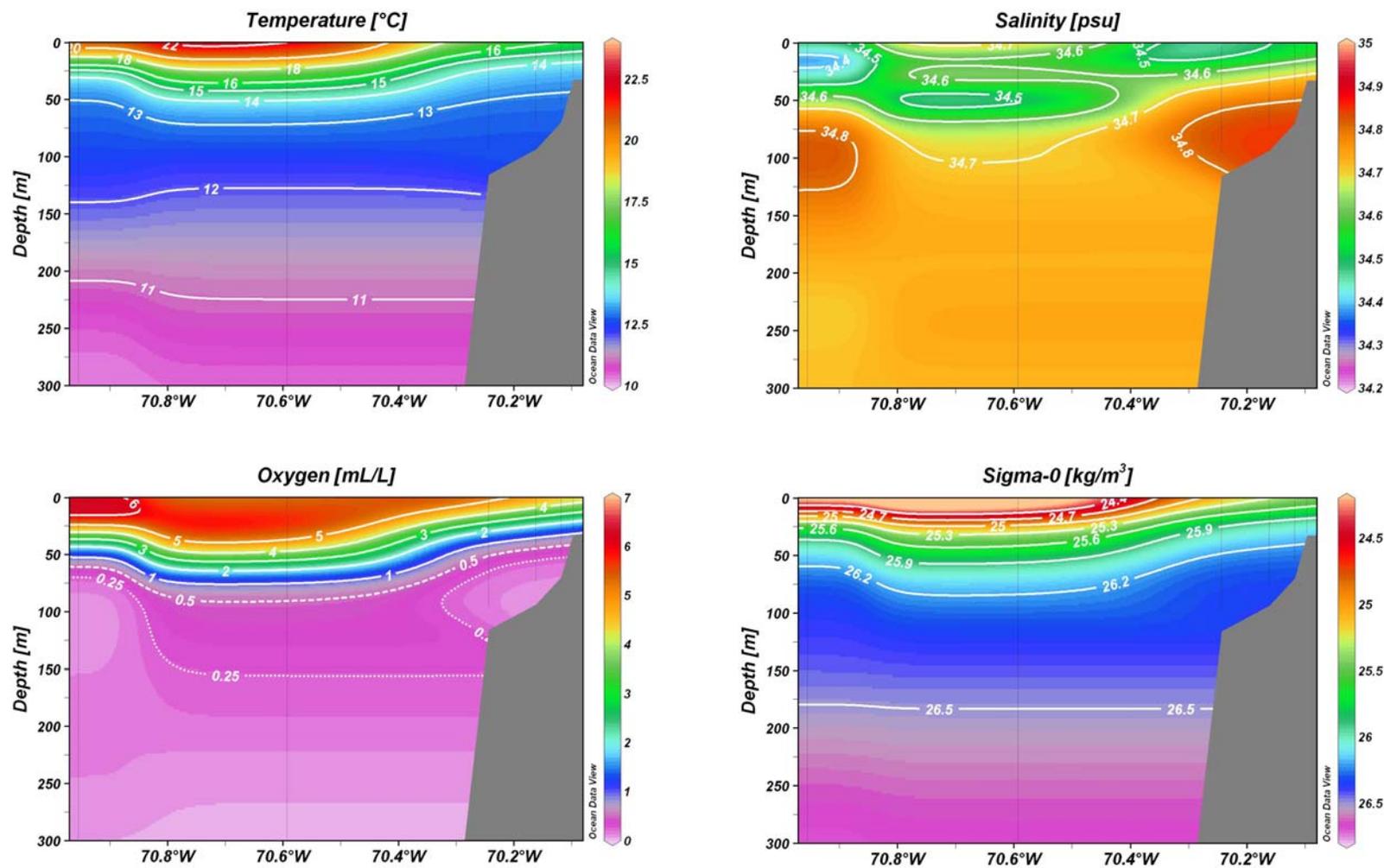


Figura 23. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 18'S. Crucero ZMO, verano 2009.

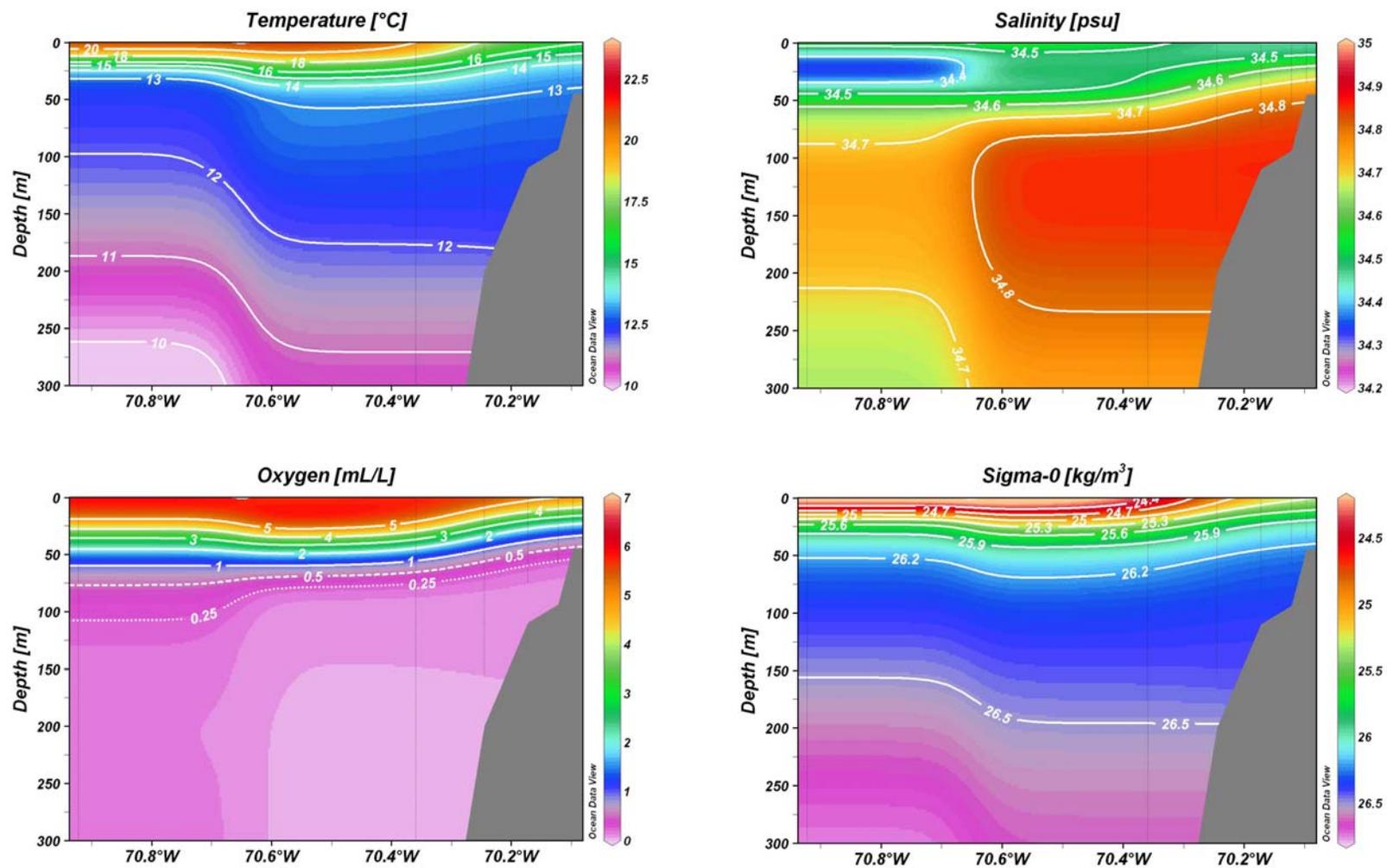


Figura 24. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 30'S. Crucero ZMO, verano 2009.

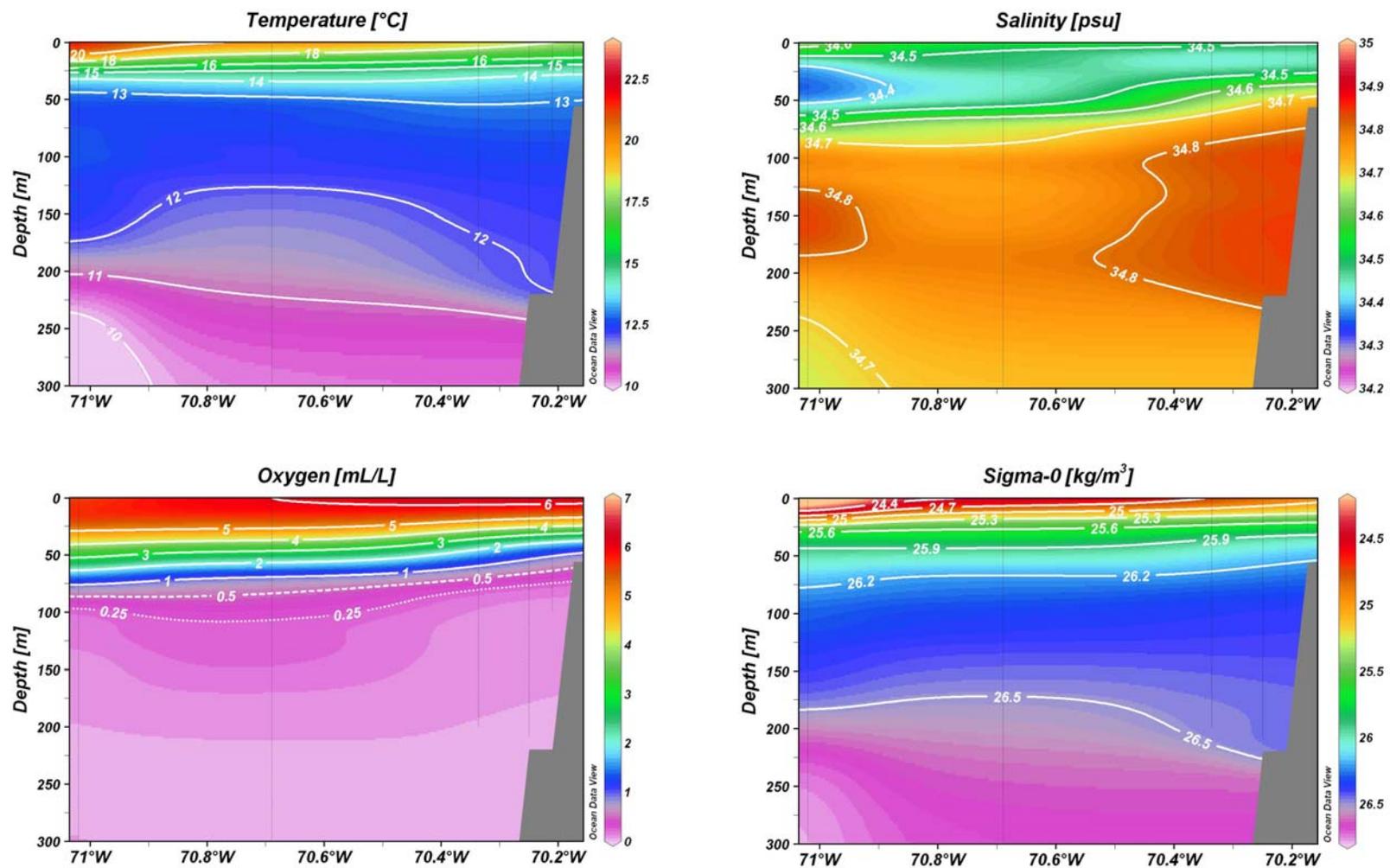


Figura 25. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 21° 45'S. Crucero ZMO, verano 2009.

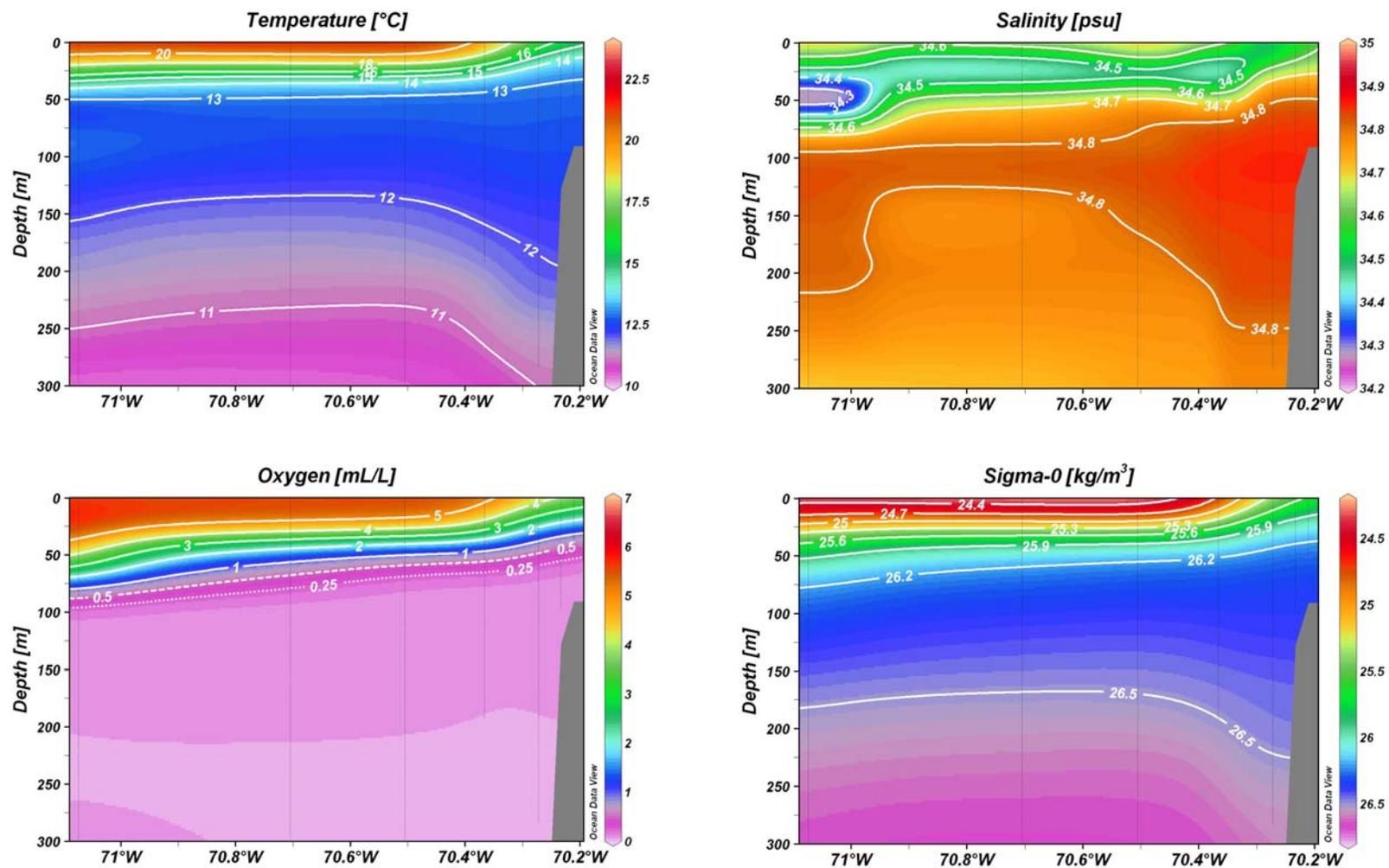


Figura 26. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 22° 00'S. Crucero ZMO, verano 2009.

1.1.2 Información biológica

1.1.2.1 Distribución Superficial de la Biomasa Fitoplanctónica

La concentración de clorofila-a (Cla), considerando el área total de estudio en invierno de 2008, presentó un promedio de $1,47 \pm 3,04 \mu\text{g Cla/L}$, con valores mínimos cercanos a 0 y un máximo de $17,81 \mu\text{g Cla/L}$.

En la componente horizontal las mayores biomazas se encontraron replegadas a la costa (1 - 5 mn), con una mayor extensión costa afuera sobre la latitud de los $21^{\circ}15'S$. Al norte y sur de esta latitud los niveles decayeron, lo cual fue más evidente hacia el sector sur del área de estudio en las cercanías de Tocopilla (Figura 27). Cabe destacar que el análisis por profundidad reveló que las más altas concentraciones se presentaron a los 10 m profundidad.

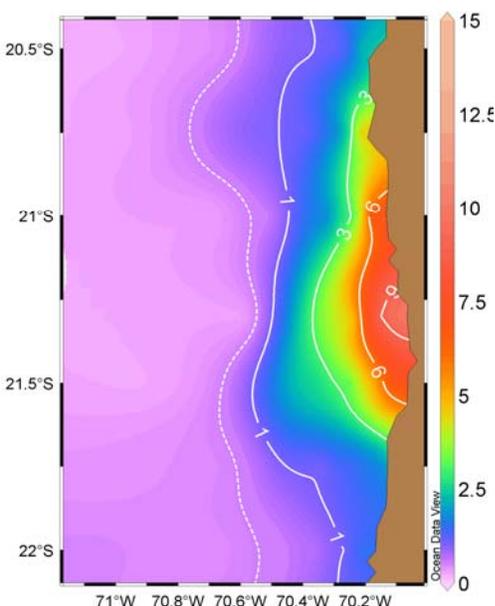


Figura 27. Distribución superficial de clorofila-a ($\mu\text{g/l}$), para el área comprendida entre Chucumata ($20^{\circ}30'S$) y Tocopilla ($22^{\circ}00'S$). Crucero de invierno 2008

Durante el periodo de verano, y considerando toda el área de estudio, la biomasa fitoplanctónica presentó un valor promedio de $1,36 \pm 2,33 \mu\text{g Cl a/L}$, fluctuando entre 0,01 y $12,83 \mu\text{g Cl a/L}$. De igual forma que en invierno, las mayores biomásas se presentaron en el margen costero, pero esta vez se extendieron latitudinalmente en toda el área de estudio y se proyectaron costa afuera en los extremos norte y sur de la zona (Figura 28). Durante esta época altas concentraciones de Cla fueron detectadas hasta los 25 m de profundidad.

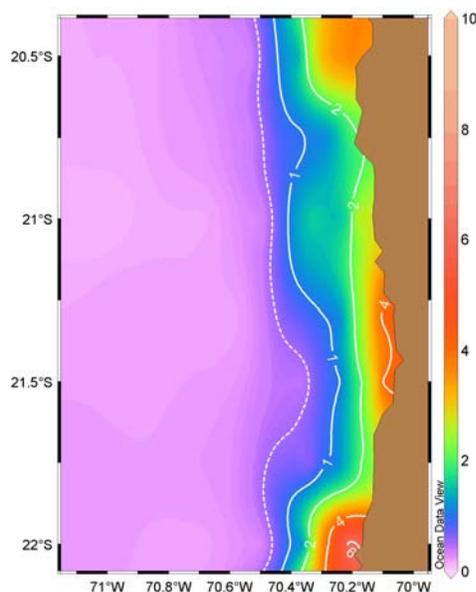


Figura 28. Distribución superficial de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$), para el área comprendida entre Chucumata ($20^{\circ}30'S$) y Tocopilla ($22^{\circ}00'S$). Crucero de Verano.

1.1.2.2 Distribuciones Verticales de la Biomasa Fitoplanctónica

En la componente vertical de la biomasa fitoplanctónica, en invierno de 2008, se observó el típico patrón de distribución con los mayores valores en el estrato entre 5 y 25 m de profundidad. El análisis de las secciones verticales evidencia el patrón detectado en la componente horizontal. Las secciones de los extremos del área de estudio presentaron bajas concentraciones pigmentarias, así como también una menor extensión costa afuera, mientras que las secciones localizadas a 21°S y $21^{\circ}15'S$ exhibieron los mayores niveles de biomasa y la mayor extensión costa afuera y en profundidad (Figura 29).

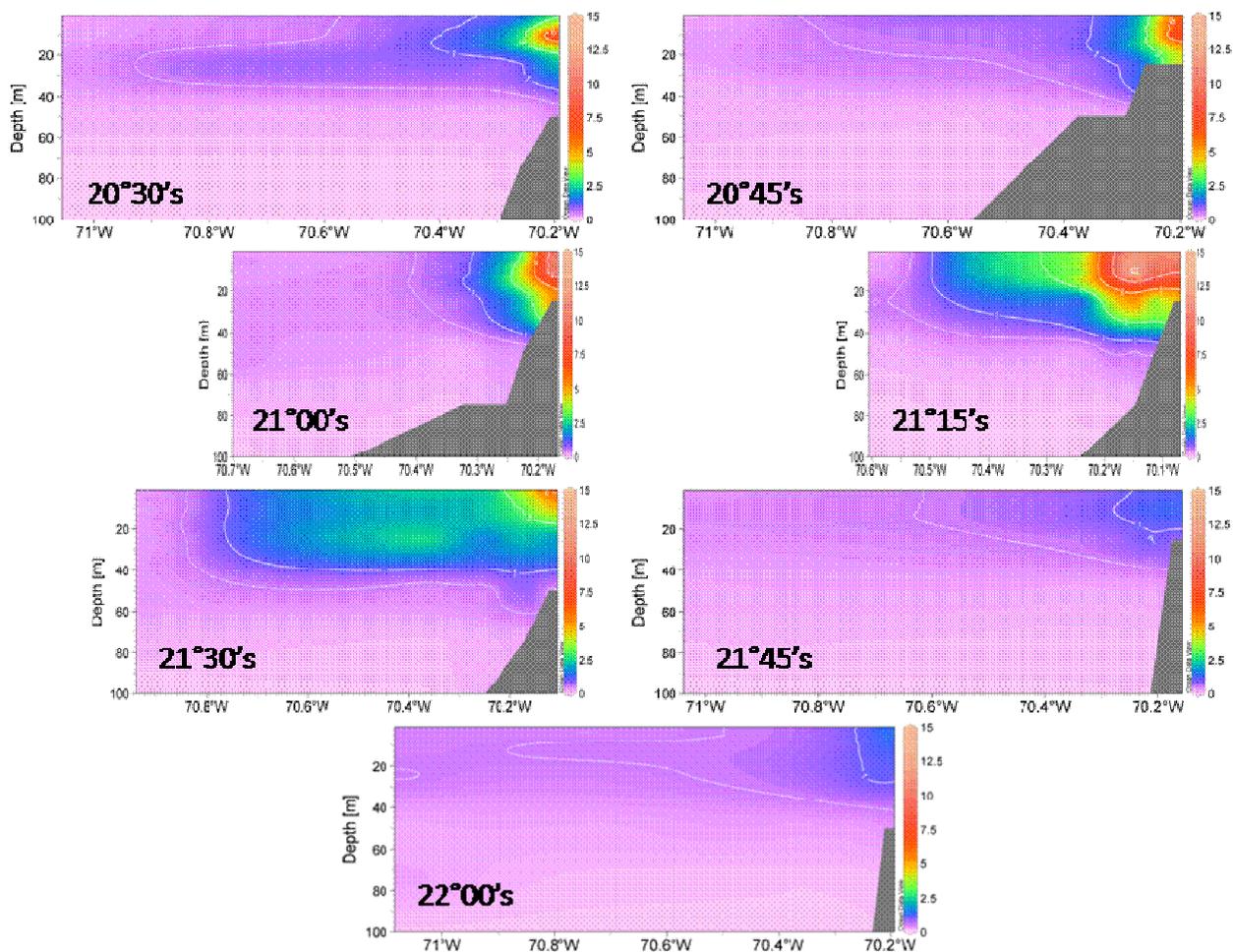


Figura 29. Distribución vertical por secciones de clorofila-a ($\mu\text{g/l}$), para el área comprendida entre Chucumata ($20^{\circ}30'S$) y Tocopilla ($22^{\circ}00'S$). Crucero de invierno de 2008.

En las secciones verticales del crucero de verano de 2009, se observan núcleos de altos valores en todas las transectas analizadas, los cuales se localizaron en el estrato entre la superficie y los 25 m de profundidad. Las secciones localizadas al norte de los $21^{\circ}S$ exhibieron la mayor concentración de biomasa y extensión costa afuera (Figura 30).

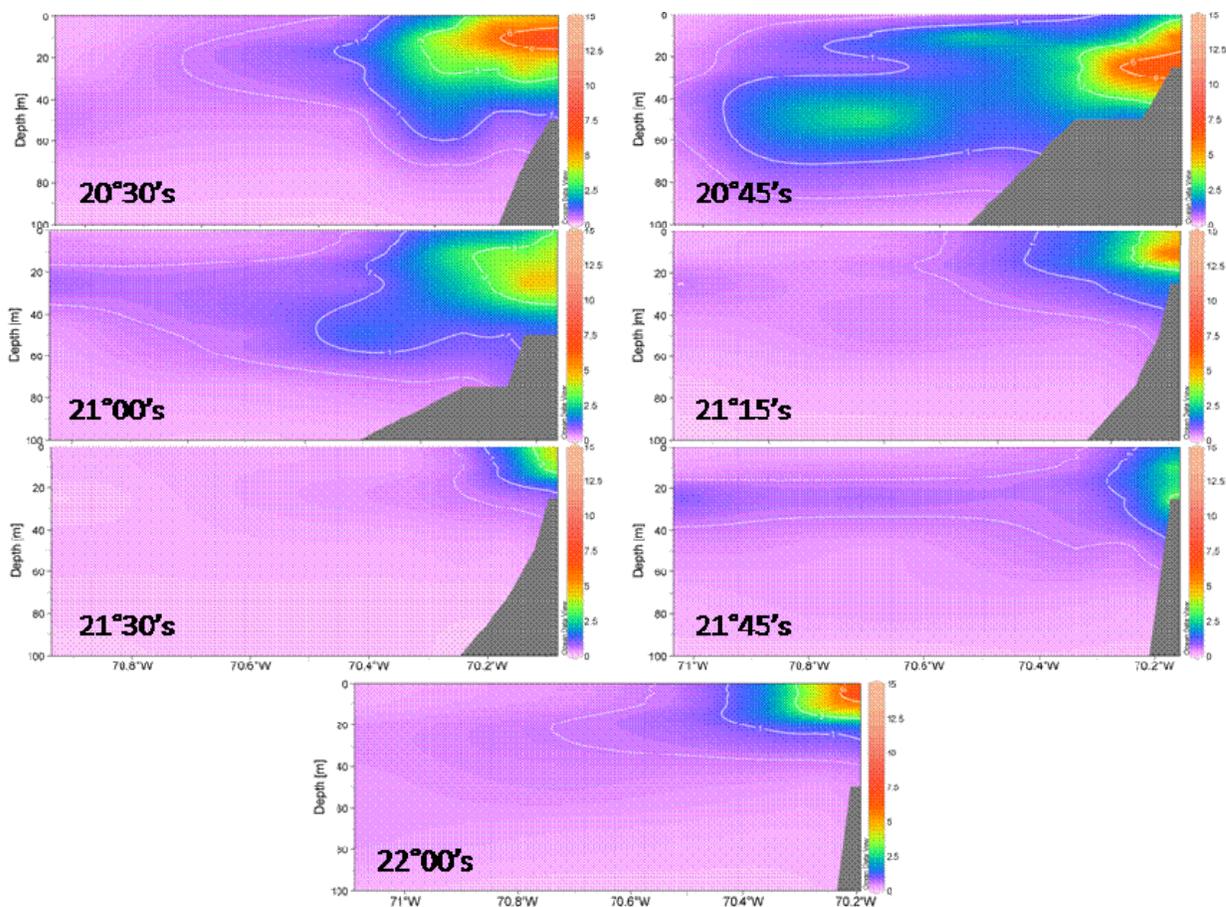


Figura 30. Distribución vertical por secciones de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$), para el área comprendida entre Chucumata ($20^{\circ}30'S$) y Tocopilla ($22^{\circ}00'S$). Crucero de verano del 2009.

1.1.2.3 Distribución espacial de Zooplancton gelatinoso

Desde la grilla de muestreo espacial realizada durante el invierno del 2008, se estimó la abundancia y ocurrencia de depredadores gelatinosos de huevos y larvas de peces. En esta condición invernal, cuando ocurre el desove principal de anchoveta, el grupo de quetognatos fue dominante, junto a los sifonóforos, con una abundancia promedio de 5.5 individuos por metro cúbico (Tabla 2). Los cnidarios y ctenóforos estuvieron muy poco representados en esta condición.

Tabla 2. Abundancia de depredadores gelatinosos de huevos y larvas de peces, capturados frente a la zona de El Loa durante agosto del 2008. N= Abundancia (número m⁻³), SE= error estándar, CV= coeficiente de variación, AR= abundancia relativa (%).

Grupo	N	SE	CV	AR
Quetognatos	5.47	0.49	0.09	66.2
Sifonóforos	0.32	0.59	0.18	31.0
Ctenóforos	0.01	0.006	0.59	0.3
Cnidarios	0.11	0.034	0.30	2.3
Total	8.91	0.979	0.11	

1.1.2.4 Distribución vertical de Zooplancton gelatinoso

La distribución vertical de estos organismos muestra que los quetognatos se distribuyen principalmente en estratos subsuperficiales (>50 m), coincidiendo con la base de la termoclina y en condiciones subóxicas, mientras que los sifonóforos tienden a encontrarse sobre la oxiclina y los cnidarios y ctenóforos no manifiestan un patrón claro en el plano vertical (Figura 31). La distribución horizontal por otra parte, muestra que las mayores abundancias y ocurrencias de los 4 componentes se manifiestan principalmente alejadas de la costa, donde la CMO se encuentra más profunda (>50 m) (Figura 32).

La relación entre la abundancia del zooplancton gelatinoso y la distribución vertical de la CMO es significativa y positiva para el zooplancton gelatinoso total, los quetognatos y los sifonóforos (Figura 33). Esta relación indica que la abundancia de estos componentes se incrementa en sectores donde la CMO es más profunda, coincidiendo con la observación obtenida en la Figura 32. Los ctenóforos y cnidarios, muy escasos, no manifiestan relación alguna con la profundidad de la CMO.

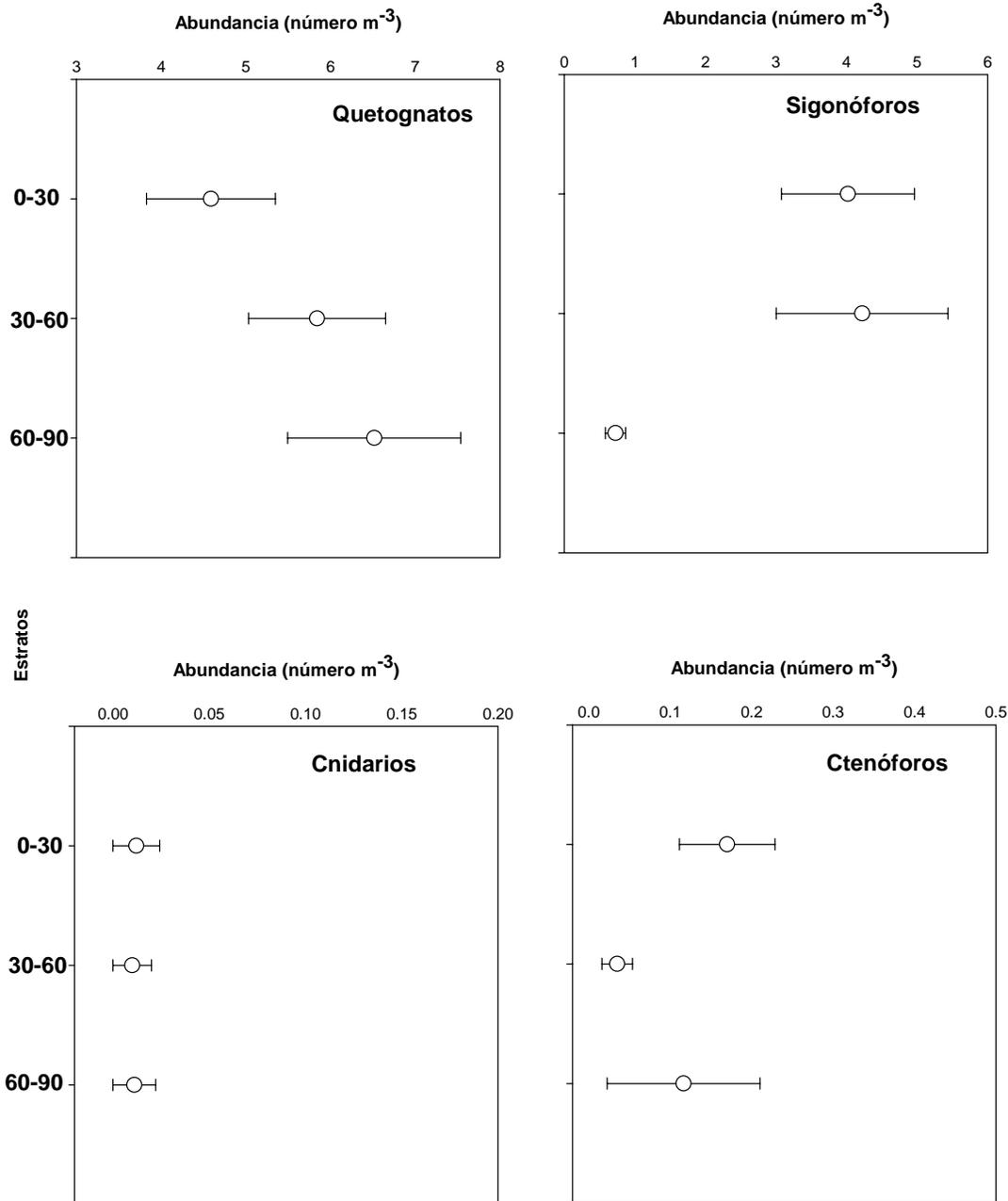


Figura 31. Distribución vertical de componentes del zooplancton gelatinoso obtenido frente a la zona de El Loa (21 °S) durante julio del 2008. Los estratos se promediaron desde 46 estaciones de muestreo entre 1 mn y 50 mn desde la costa. Las barras horizontales corresponden al error estándar desde la media.

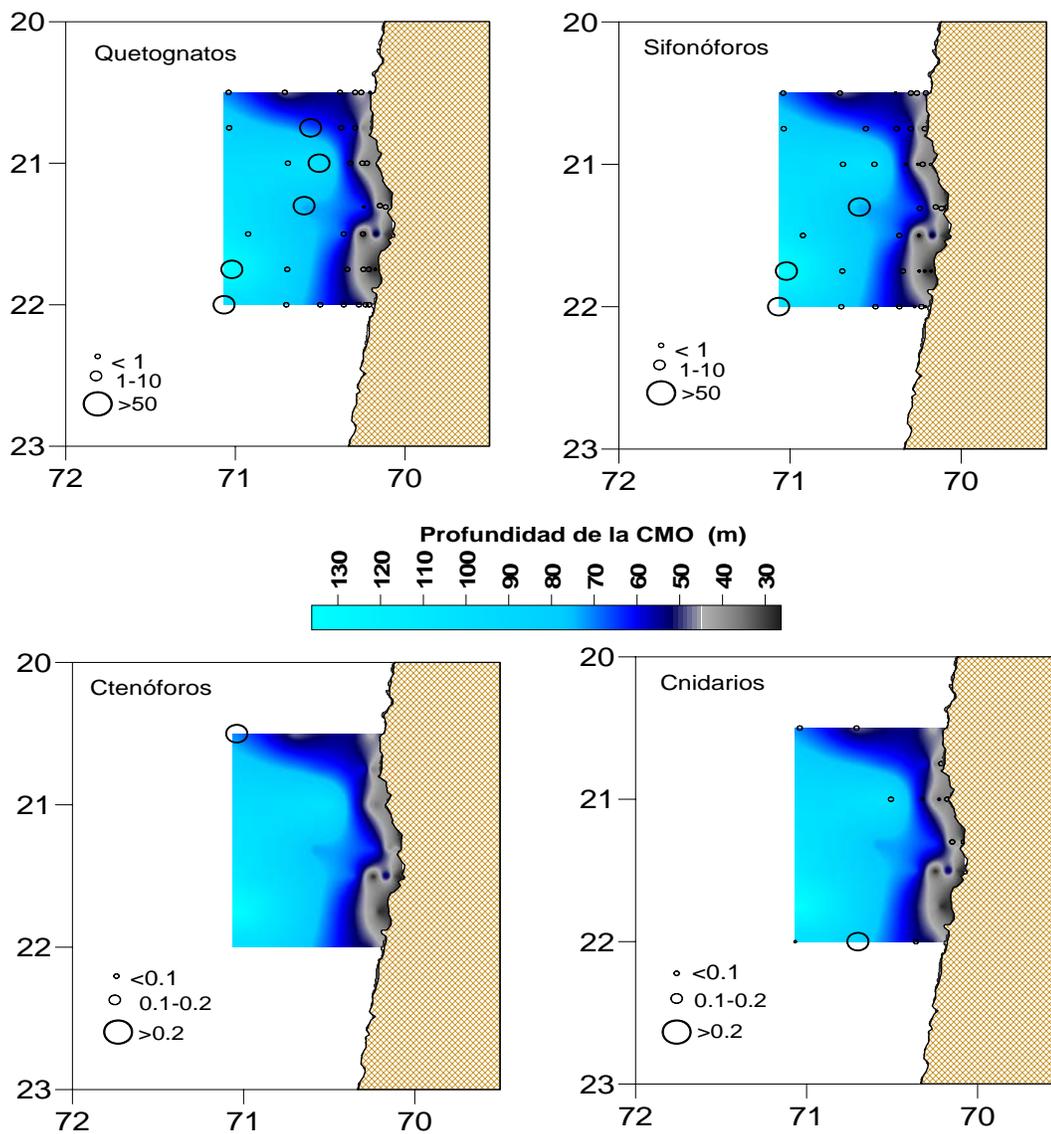


Figura 32. Distribución espacial de componentes del zooplancton gelatinoso obtenido en la zona frente a El Loa (21° S) en julio del 2008. El contorno de colores ilustra la distribución de la profundidad de la CMO. Las abundancias se expresan en No. individuos/m³.

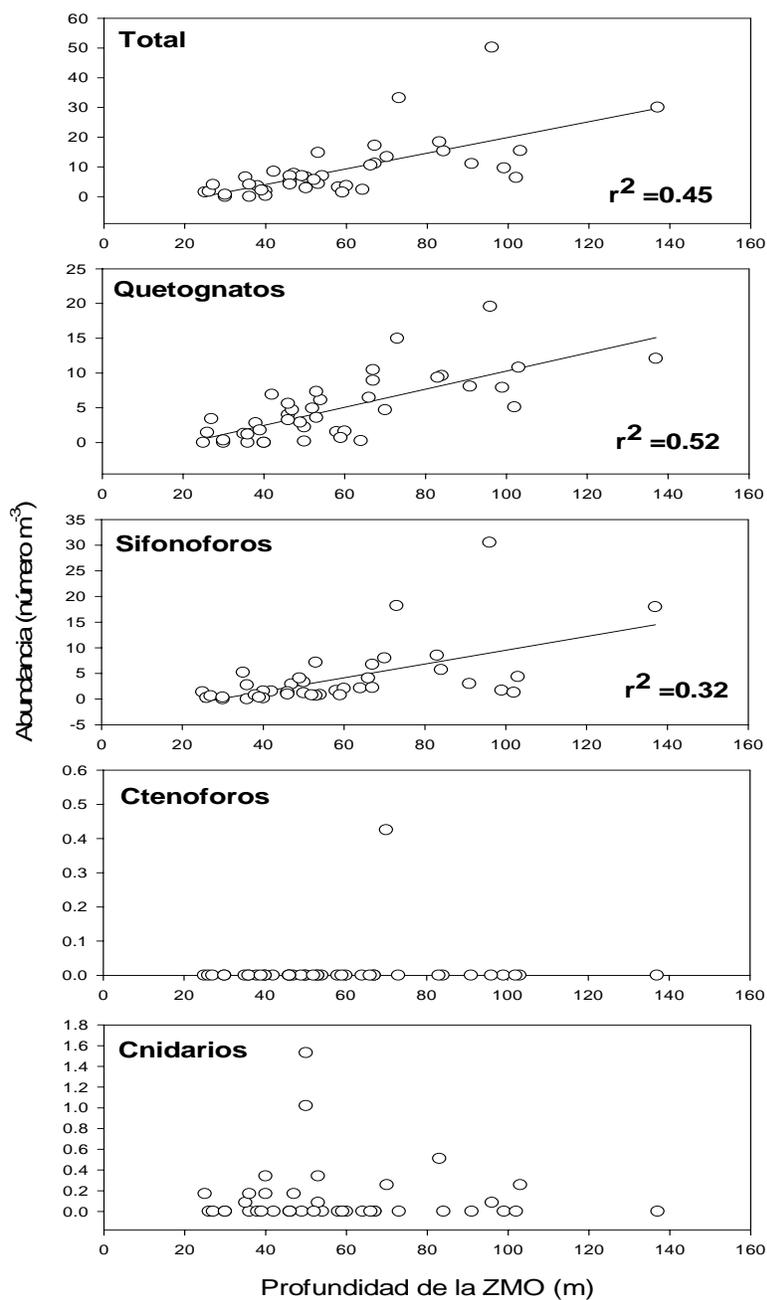


Figura 33. La relación entre la abundancia de componentes del zooplancton gelatinoso y la profundidad de la CMO desde muestras obtenidas frente a la zona de El Loa (21°S) durante julio del 2008. Las relaciones son significativas ($P < 0.05$, $r^2 > 0.25$).

1.1.2.5 Distribución Espacial de Huevos y Larvas de anchoveta

La distribución espacial de huevos de anchoveta para los cruceros del 2008 (Invierno) y 2009 (Verano), integrados para toda la columna (0-90 m) muestran las mayores abundancias en la zona costera, dentro de las 5 mn, con profundidades del límite superior de la ZMO (1 ml/L) bajos los 50 m y escasa presencia de predadores (Gelatinosos) (Figura 34 y Figura 35).

La relación entre la profundidad de la ZMO (1 ml/L) y la abundancia de huevos (Logaritmo natural) (Figura 36) indica una asociación negativa para el 2008 y 2009, con correlaciones de -0,55 y -0,50 respectivamente, siendo ambas significativos ($P < 0,05$). Sin embargo estas correlaciones no significan causalidad ya que la profundidad de la ZMO tiene una asociación significativa con la distancia de la costa ($r^2 = 0,58$), así como los huevos con la distancia a la costa ($r^2 = 0,31$) para ambos cruceros agrupados.

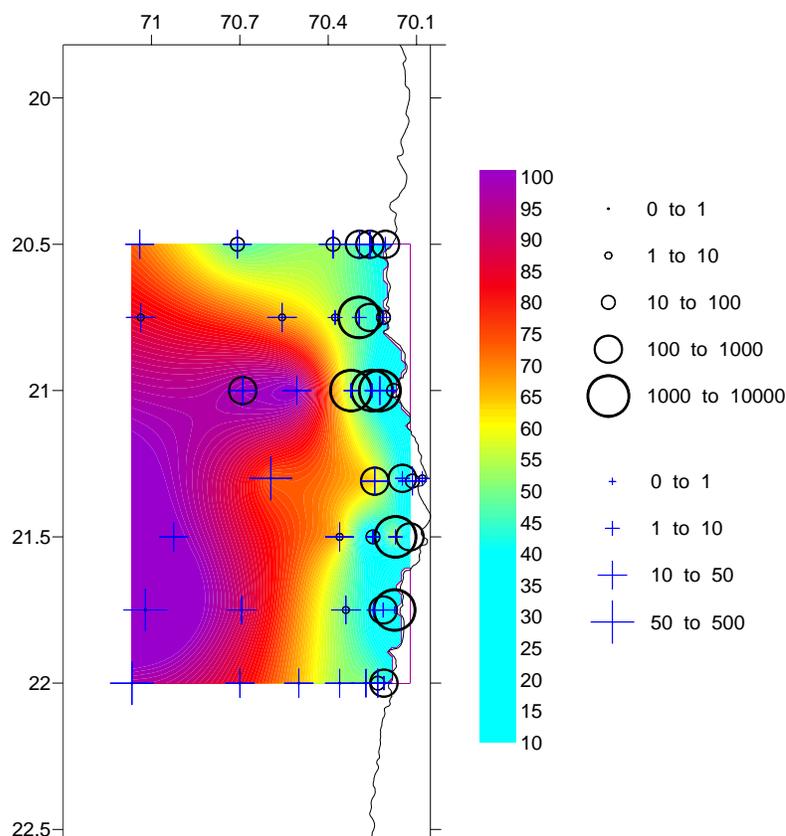


Figura 34. Distribución espacial de huevos de anchoveta en el cruce del 2008. Colores representan la profundidad de la isolinia de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos ($N^{\circ}/10m^3$) y cruces la de predadores (Gelatinosos) en N°/m^3 .

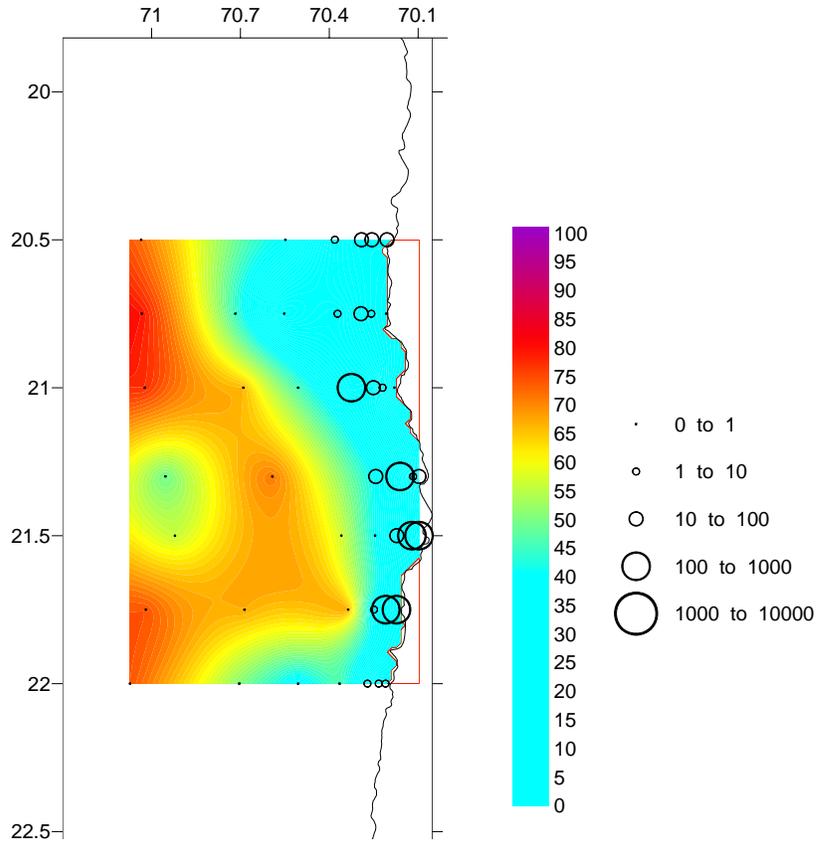


Figura 35. Distribución espacial de huevos de anchoveta en el crucero del 2009. Colores representan la profundidad de la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos ($N^{\circ}/10m^3$).

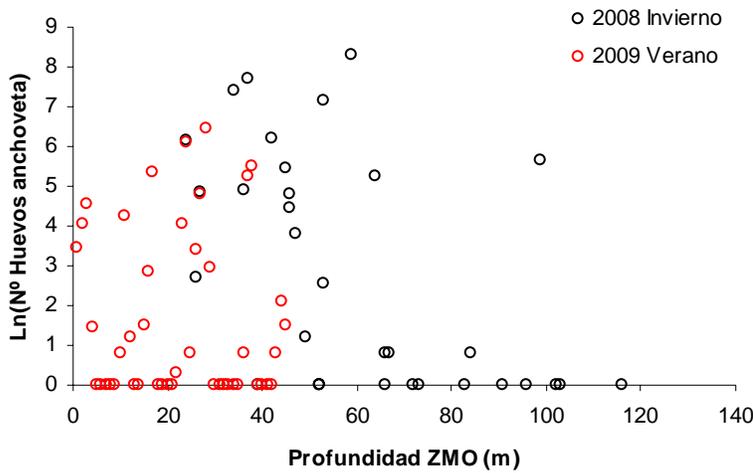


Figura 36. Relación entre la profundidad de la ZMO (1 ml/L) y la abundancia de huevos (Ln) para los cruces 2008 y 2009.

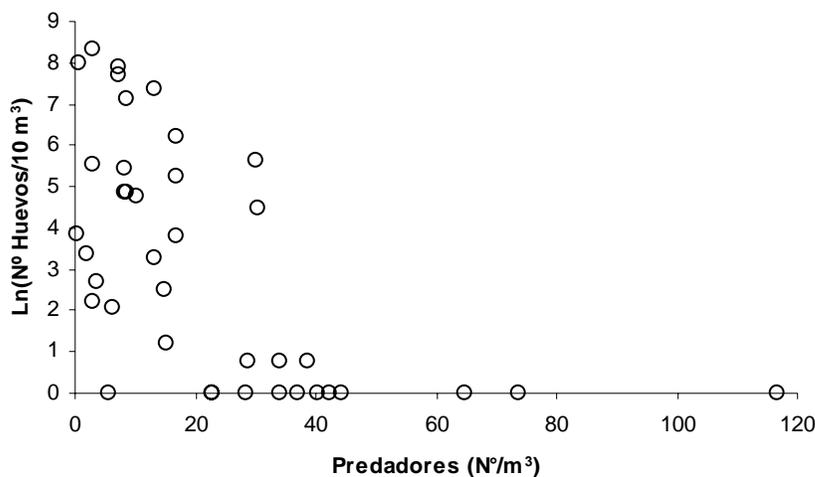


Figura 37. Relación entre la abundancia de predadores (Gelatinosos) y la abundancia (Ln) de huevos de anchoveta para el 2008.

En términos espaciales, la distribución de huevos es muy bien explicada por la abundancia de predadores (Gelatinosos), indicando una asociación negativa (Figura 37), la que es corroborada por el análisis de preferencia-rechazo (Figura 38) indicando un rechazo de abundancias mayores a 5 ind/m^3 ($P = 0,026$ en base a 2000 remuestreos). Es así que un modelo GAM simple indica una muy buena asociación, con un 97,8% de la devianza explicada por el modelo:

Family: gaussian

Link function: identity

Formula:

Ln.H. \sim s(Pred)

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.55808	0.03336	76.68	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Est.rank	F	p-value
s(Pred)	8.363	9	147.5	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.972 Deviance explained = 97.8%

GCV score = 0.057123 Scale est. = 0.043409 n = 39

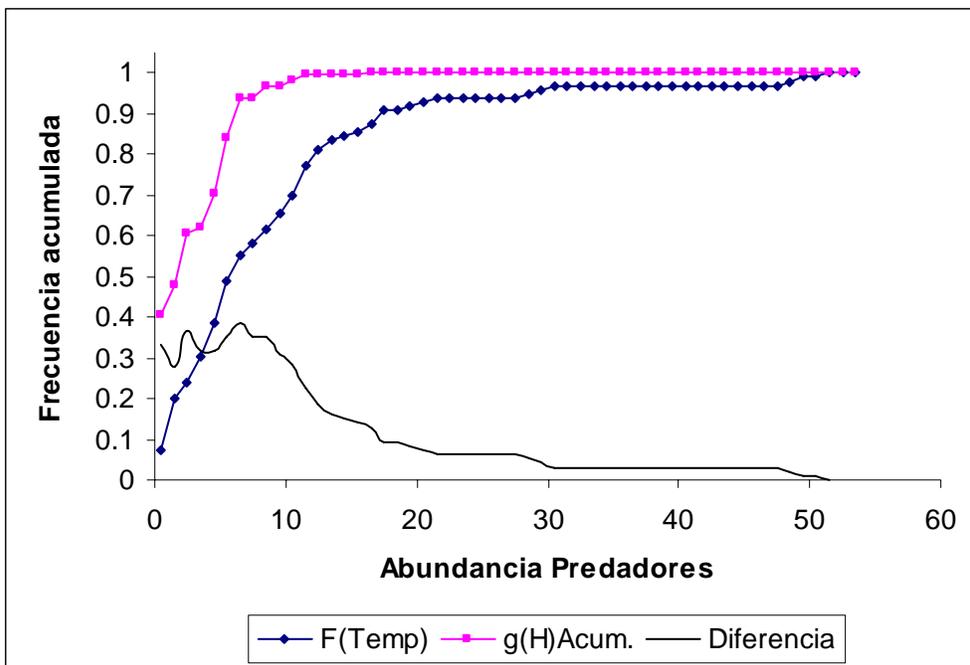


Figura 38. Análisis de preferencia-Rechazo para abundancia de huevos y predadores. Rechazo se produce a una abundancia de predadores mayor a 5 ind/m^3 con una probabilidad de 0,026 en base a 2000 remuestreos ($P < 0,05$).

1.1.2.6 Distribuciones Verticales de huevos y larvas de anchoveta

La distribución vertical muestra las mayores concentraciones de huevos sobre la ZMO, salvo excepciones. Las profundidades medias ponderadas se encuentran en la mayoría de las secciones sobre la ZMO (Figura 39 y Figura 40).

La relación entre la concentración de oxígeno y la abundancia de huevos (L_n) no muestra ninguna relación (Figura 41). Sin embargo, la abundancia de huevos en las secciones verticales muestra una buena asociación con la abundancia de predadores (Figura 42).

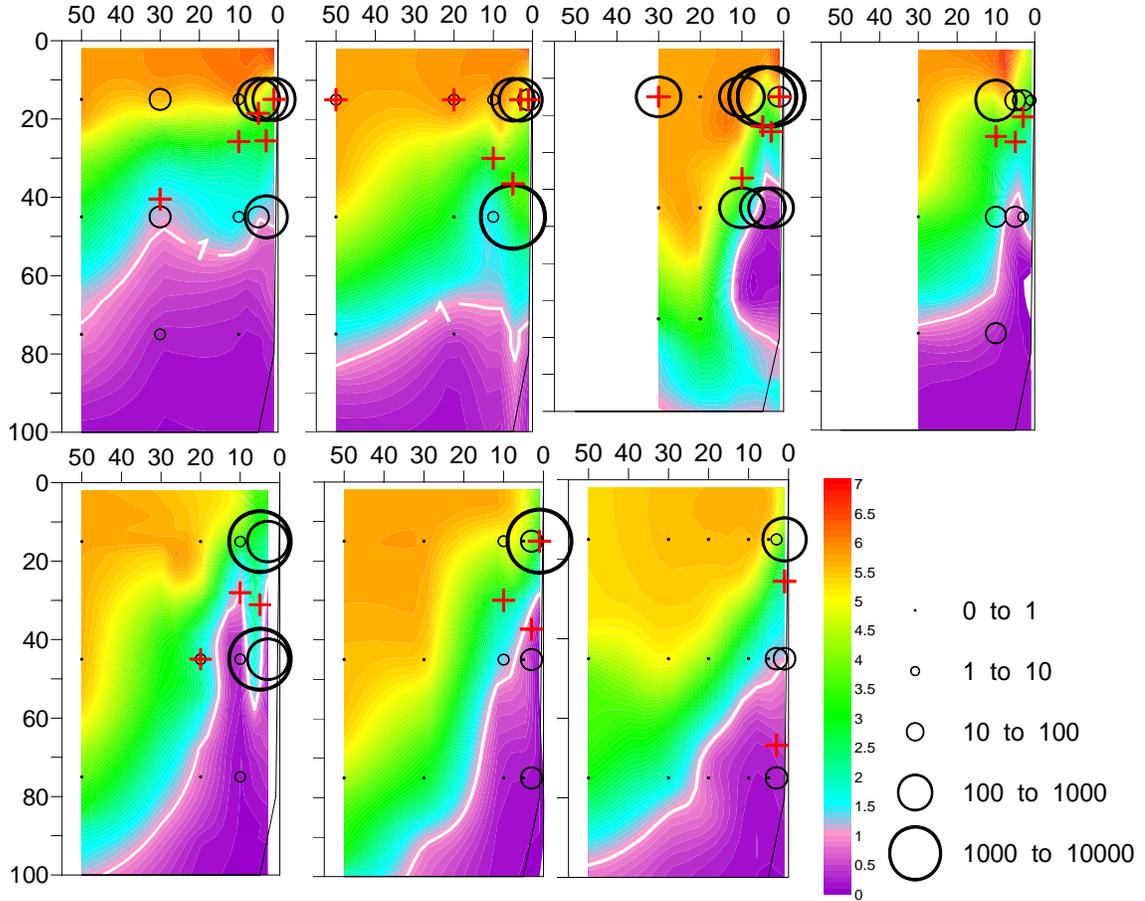


Figura 39. Secciones por transectas de distribución vertical de huevos de anchoveta en invierno de 2008. Colores representan la concentración de oxígeno. Línea blanca es la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos ($N^{\circ}/10m^3$) y cruces la Profundidad Media Ponderada de la abundancia huevos (m). Transectas desde el norte hacia el sur de izquierda a derecha.

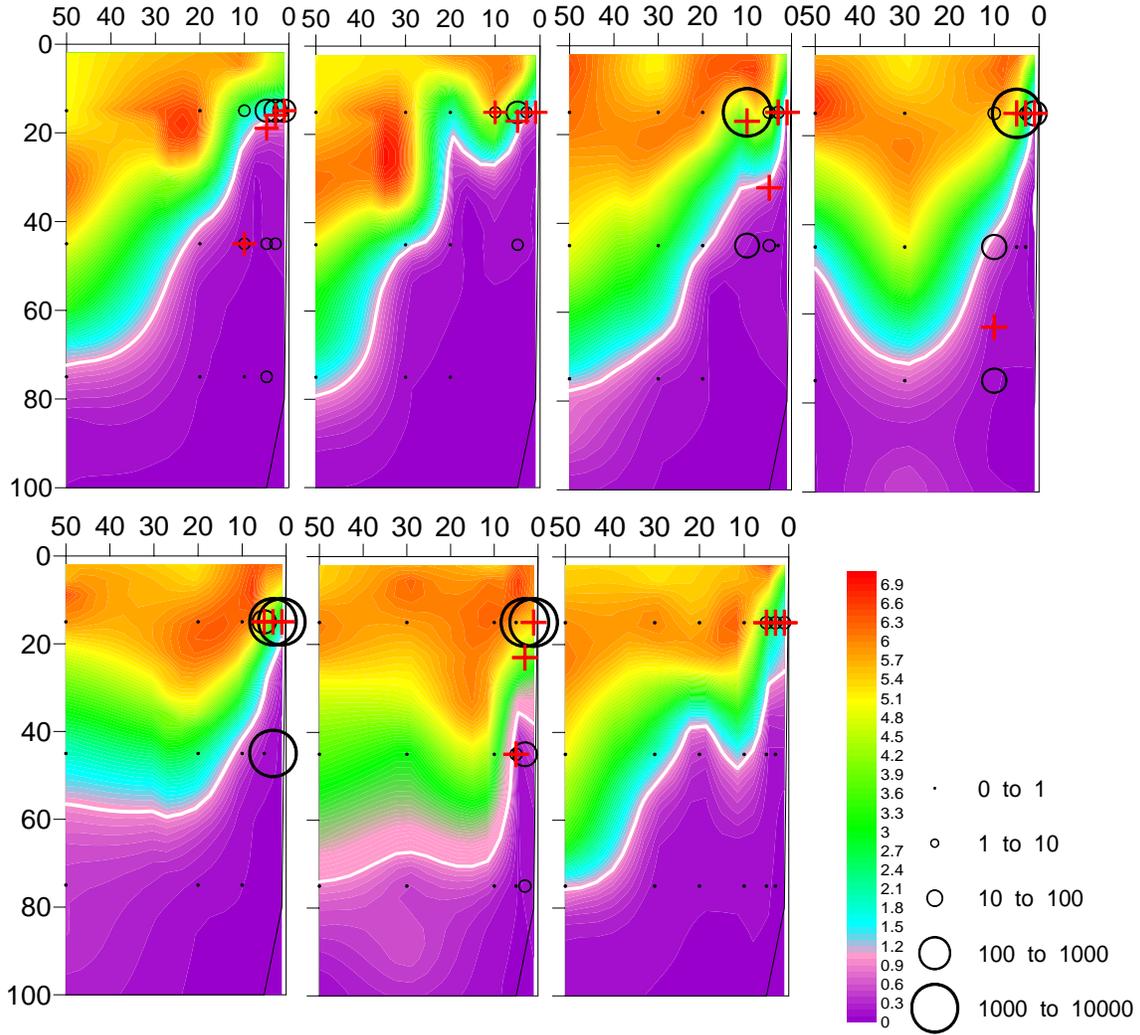


Figura 40. Secciones por transectas de distribución vertical de huevos de anchoveta en verano de 2009. Colores representan la concentración de oxígeno. Línea blanca es la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos ($N^{\circ}/10m^3$) y cruces la Profundidad Media Ponderada de la abundancia huevos (m). Transectas desde el norte hacia el sur de izquierda a derecha.

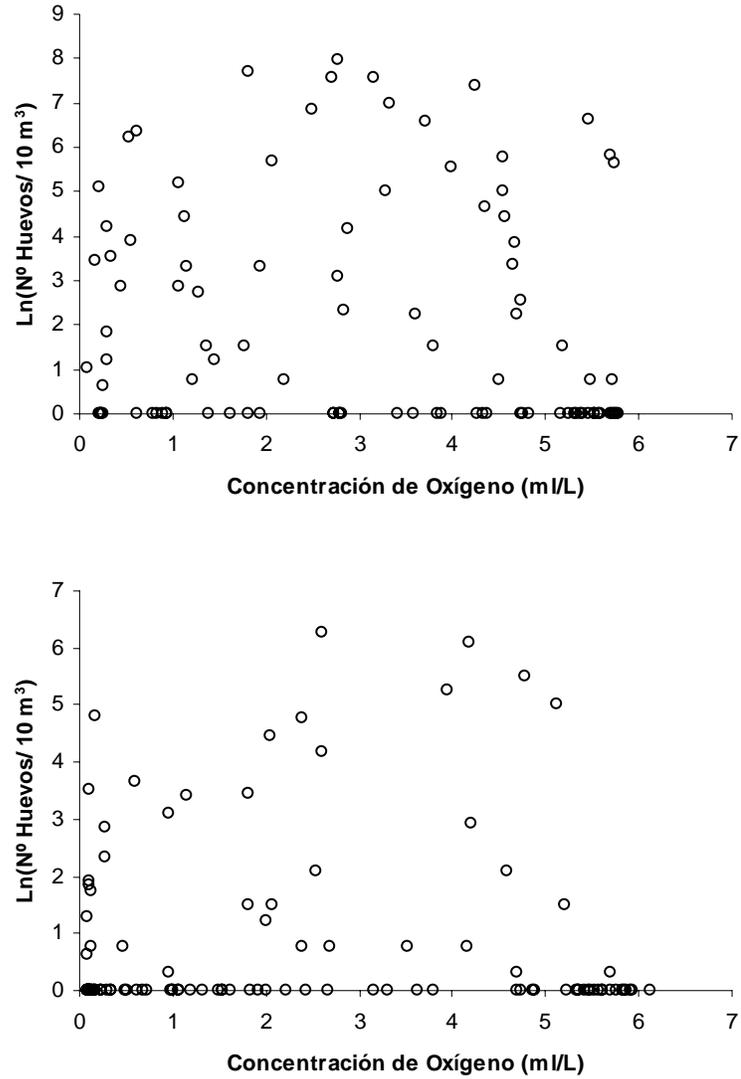


Figura 41. Relación entre la concentración de oxígeno (ml/L) y la abundancia de huevos de anchoveta ($\text{Ln}(\text{N}^\circ/10 \text{ m}^3)$), para el 2008 (Arriba) y 2009 (Abajo).

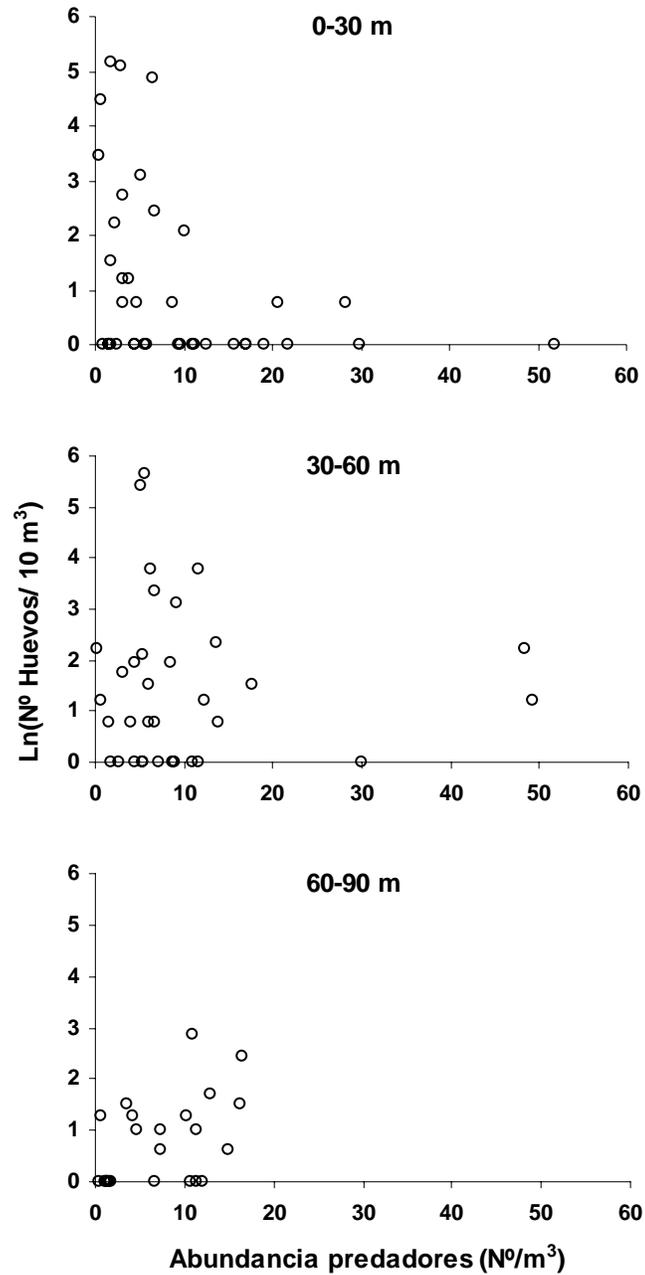


Figura 42. Relación entre la abundancia de predadores (Gelatinosos) y la abundancia (Ln) de huevos de anchoveta por estrato de profundidad en crucero 2008.

1.1.3 Información combinada y satelital

1.1.3.1 Condiciones oceanográficas superficiales medias para la zona norte de Chile.

Durante el invierno (Agosto) la TSM es aproximadamente homogénea presentando un ligero gradiente que va desde los 15°C hasta 17°C desde la costa hacia el noroeste (Figura 43b, panel superior). Estas condiciones contrastan con las observadas durante el verano (enero) en donde la TSM es heterogénea variando aproximadamente entre 20°C y 24°C. Las mayores temperaturas se presentaron alejadas de la costa de Chile centrada en 72°W-19°S, disminuyendo hacia el sur en forma de cuña alcanzando los 21°C. Esta cuña forma un gradiente zonal de TSM a lo largo de toda la costa (Figura 44b, panel superior).

Las corrientes geostróficas durante el invierno y verano muestran un patrón similar, éstas se dirigen hacia el nor-noroeste con velocidades débiles (0-20 cm/s) hacia el oeste de 73°W (Figura 43b Figura 44b, panel central). Por el contrario, hacia el este de 73°W se notan 3 núcleos bien definidos, uno centrado 20°S dirigido hacia el nor-noreste en donde la velocidades bordean alrededor de 30-40 cm/s y los otros 2 localizados hacia el norte y sur de Antofagasta (23.5°S) conectados en forma de un remolino anticiclónico y con velocidades superiores a los 50 cm/s. Al igual que las corrientes geostróficas, los vientos superficiales muestran un patrón similar en invierno y verano con el viento predominante hacia el nor-noroeste e incrementando su magnitud desde la costa hacia el océano (Figura 43b Figura 44b, panel inferior). Sin embargo, el gradiente zonal de la magnitud del viento costa-océano es mayor (menor) durante el invierno (verano) con velocidades entre 3-5 m/s (4-5 m/s) hacia el este de 71°W y mayores a 6.5 m/s (5.5) m/s hacia el oeste de 75°W.

1.1.3.2 Condiciones oceanográficas superficiales durante los cruceros para la zona norte de Chile.

La TSM durante la realización del crucero de invierno fue muy homogénea con valores que fluctuaron entre 16°C y 17°C. Una lengua de agua fría (menor a 17°C) se extendió a partir de 72°W-25°S hacia el oeste, fuera de esta lengua se observaron dos pequeños núcleos fríos (~16°C)

centrados en 24.5°S y en 77.5°W y 76°W (Figura 43a, panel superior). En general, los valores de TSM fueron superiores (inferiores) con respecto a la media cerca de la costa (mar afuera). Al igual que en el invierno la TSM fue muy homogénea en verano pero con valores más altos que variaron entre 20°C y 22°C. La cuña de TSM que normalmente procede del norte hacia el sur no fue tan evidente y por tanto el gradiente zonal costa-océano fue muy débil (Figura 44a, panel superior).

Hacia el oeste de 72.5°W, las corrientes geostroficas durante la realización del crucero de invierno, tuvieron en promedio una magnitud superior a la encontrada en las condiciones medias con una gran actividad de ciclones y anticlones (Figura 43a, panel central). Por su parte hacia el este de 72.5°W las condiciones fueron muy parecidas a las condiciones medias. Al igual que el invierno, las corrientes geostroficas durante el verano fueron de mayor intensidad hacia el oeste de 72.5°W, se destaca un remolino ciclónico centrado en 76°W-23°S que produjo velocidades de casi 40 cm/s (Figura 44a, panel central).

Los vientos durante la realización del crucero de invierno tuvieron un patrón similar al normal con dirección nor-noroeste. Sin embargo, hubo una gran magnitud del viento (mayor a 6.5 m/s en gran parte del área) a excepción de la parte norte cercana a la costa (frontera con Perú) en que los vientos disminuyeron, alcanzando valores menores a 4 m/s (Figura 43a, panel inferior). Al igual que en el invierno, los vientos en el verano mostraron un patrón similar a las condiciones normales. Sin embargo, éstos fueron más débiles (intensos) cercanos a la costa (mar afuera) alcanzando valores menores (mayores) a 3.5 m/s (6.5 m/s) (Figura 44a, panel inferior). Las diferencias en la magnitud del viento entre la costa y mar afuera produjeron un mayor gradiente zonal que las condiciones normales.

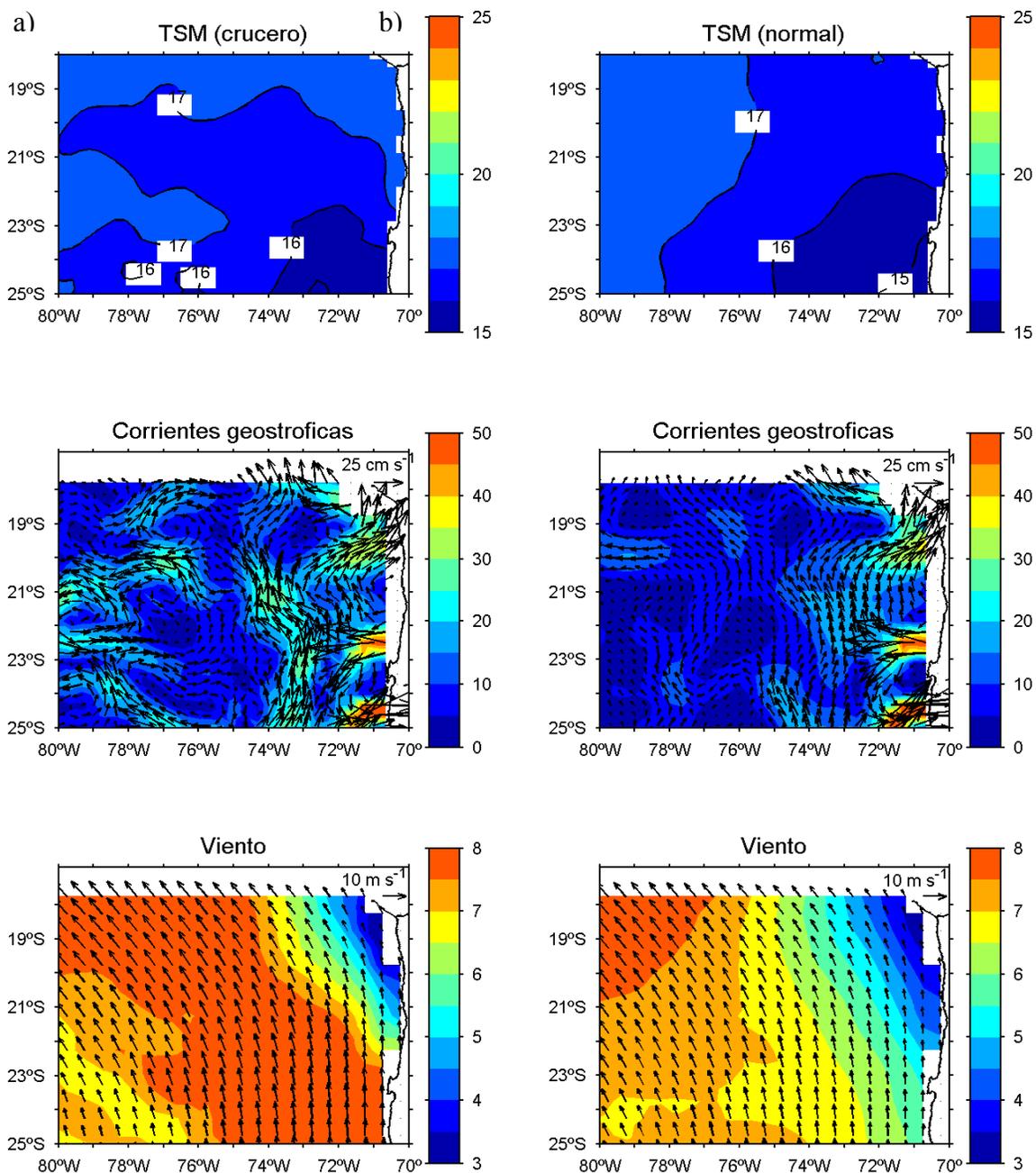


Figura 43. Condiciones oceanográficas superficiales de Agosto para la zona norte de Chile. a) 25-30 Agosto de 2008 y b) Promedio de Agosto. Panel superior, TSM (en $^{\circ}\text{C}$), panel central, corrientes geostroficas (en cm s^{-1} , vectores (dirección), color (magnitud)) y panel inferior, vientos superficiales (en m s^{-1} , vectores (dirección), color (magnitud)).

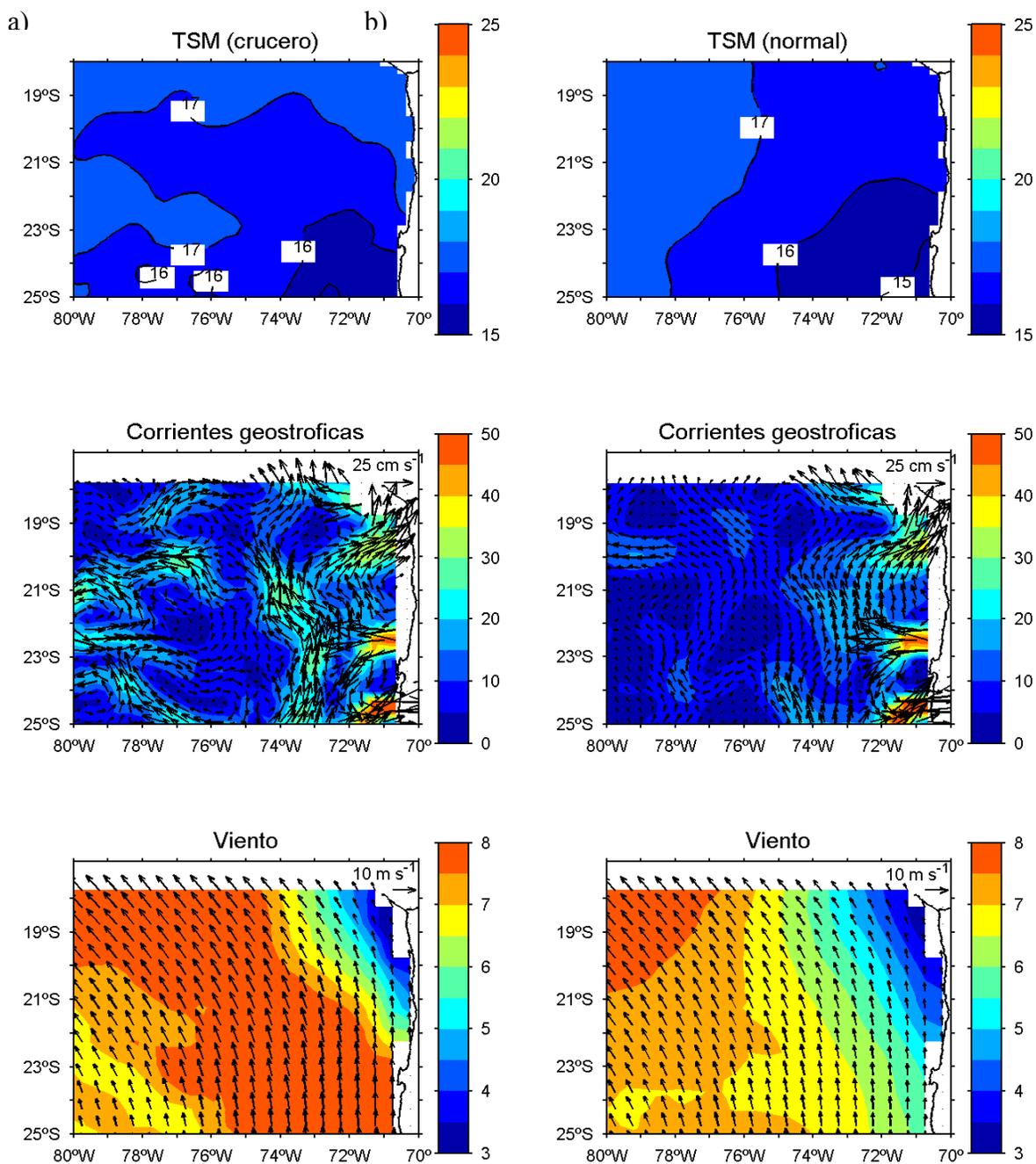


Figura 44. Condiciones oceanográficas superficiales de Enero para la zona norte de Chile. a) 12-17 de Enero de 2009 y b) Promedio de Enero. Panel superior, TSM (en $^{\circ}\text{C}$), panel central, corrientes geostroficadas (en cm s^{-1} , vectores (dirección), color (magnitud)) y panel inferior, vientos superficiales (en m s^{-1} , vectores (dirección), color (magnitud)).

1.2 Distribución temporal de la CMO y distribución vertical de huevos de anchoveta dentro de la zona de surgencia.

1.2.1 Variabilidad temporal de las condiciones oceanográficas

La evolución temporal de las distribuciones verticales de la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y densidad, en la latitud $20^{\circ}18'S$, en invierno de 2008, muestran una surgencia permanente propia del sector. Sin embargo, se destacan 3 eventos de surgencia costera de magnitud y un evento de relajación. El primero evento, comenzó a partir de la semana del 9 de julio de 2008 donde se observó un leve ascenso de las isotermas, isolíneas de oxígeno e isopícnas, acentuándose el 15 de julio y alcanzó su máximo magnitud el 23 de julio, con vientos meridionales de 6.49 m s^{-1} . En este evento, la isoterma de 15°C se ubicó a a 32 m (18 m) de profundidad en el sector oceánico (costero), asociados a gradientes verticales de temperatura $0.08^{\circ}\text{C m}^{-1}$, de salinidad 0.005 psu m^{-1} , de oxígeno disuelto 0.08 mL/L m^{-1} , de densidad $0.010 \text{ kg/m}^{-3} \text{ m}^{-1}$ y una estratificación vertical de 6 ciclos h^{-1} . Este evento estuvo asociado a un notorio ascenso del AIPSO y en menor grado el AEES. Además, este primer evento se observó claramente en la serie temporal a 3 y 5 mn de la costa y muy levemente a 1 y 7 mn de la costa. El 6 de agosto, los vientos meridionales disminuyeron produciendo una relajación de la surgencia, observándose un descenso de la termoclina a 1, 3, 5 y 7 mn de la costa (Figura 45 a la Figura 57).

El segundo evento de surgencia costera se inició el 12 de agosto, alcanzando su máximo desarrollo el 20 de agosto, acompañado de una velocidad del viento meridional de 5.26 m s^{-1} , ubicándose la isoterma de 15°C a una profundidad de 30 m (15 m) en el sector oceánico (costero). En este evento, los gradientes verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, densidad y estratificación vertical fueron de $0.04^{\circ}\text{C m}^{-1}$, 0.005 psu m^{-1} , 0.12 mL/L m^{-1} , $0.012 \text{ kg/m}^{-3} \text{ m}^{-1}$ y 6 ciclos h^{-1} , respectivamente asociados con una mayor contribución de AEES. Este segundo evento mostró un incremento de salinidad respecto al primero, observándose a 1, 3 y 5 mn de la costa (Figura 45 a la Figura 57).

El último evento de surgencia se presentó entre el 28 de agosto y 10 de septiembre, de forma permanente, con vientos meridionales entre 5.0 a 3.0 m s⁻¹. La isoterma de 15°C, se ubicó a una profundidad entre 25 y 18 m, asociados a gradientes verticales de temperatura entre 0.04 a 0.12 °C m⁻¹, de salinidad de 0.005 psu m⁻¹, de oxígeno disuelto 0.12 a 0.20 mL/L m⁻¹, de densidad y 0.012 a 0.30 kg/m⁻³ m⁻¹ y una estratificación vertical entre 6 y 8 ciclos h⁻¹. Este evento también se apreció en la serie de tiempo a 1, 3, 5 y 7 mn de la costa (Figura 45 a la Figura 57).

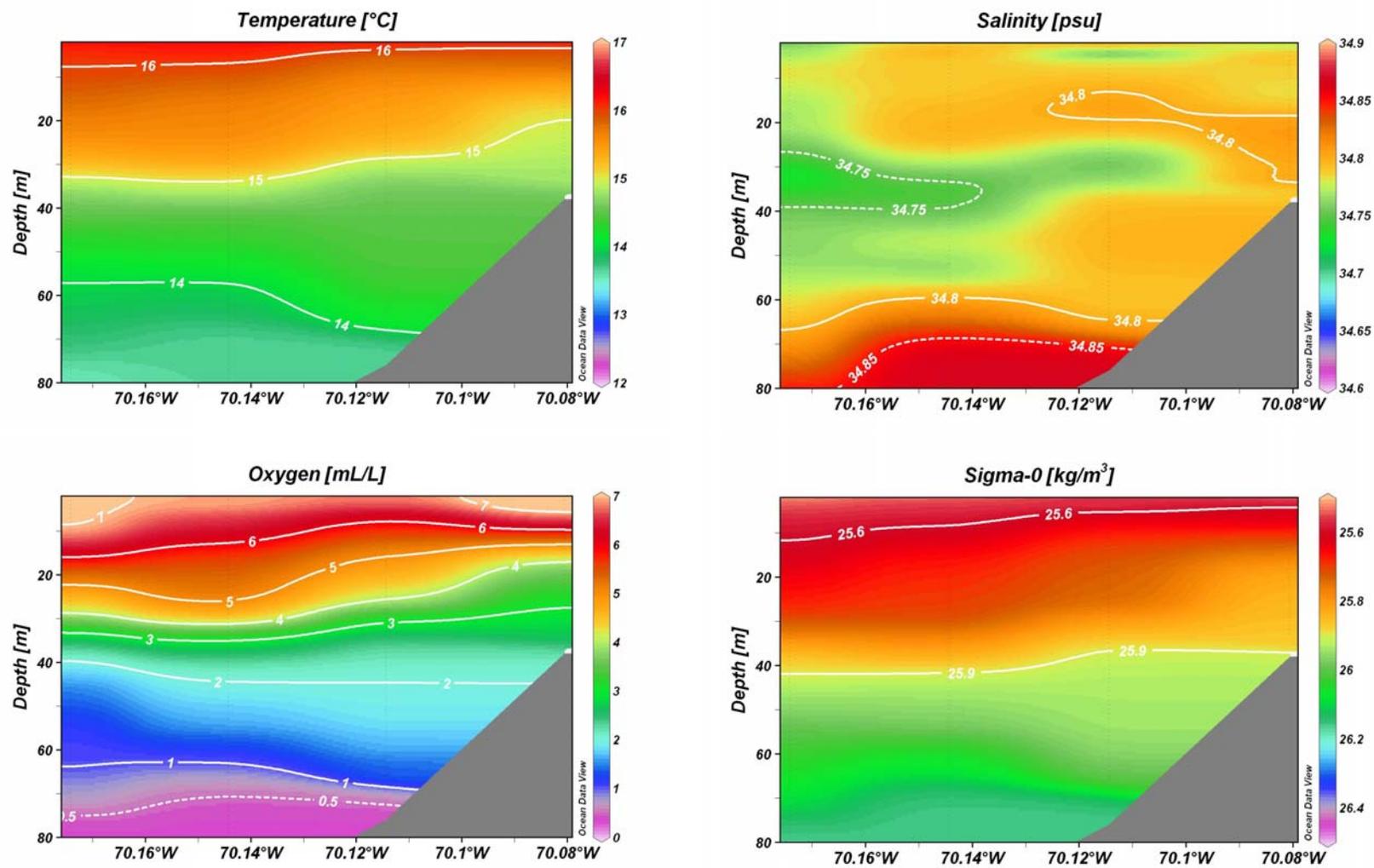


Figura 45. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 09 de julio del 2008.

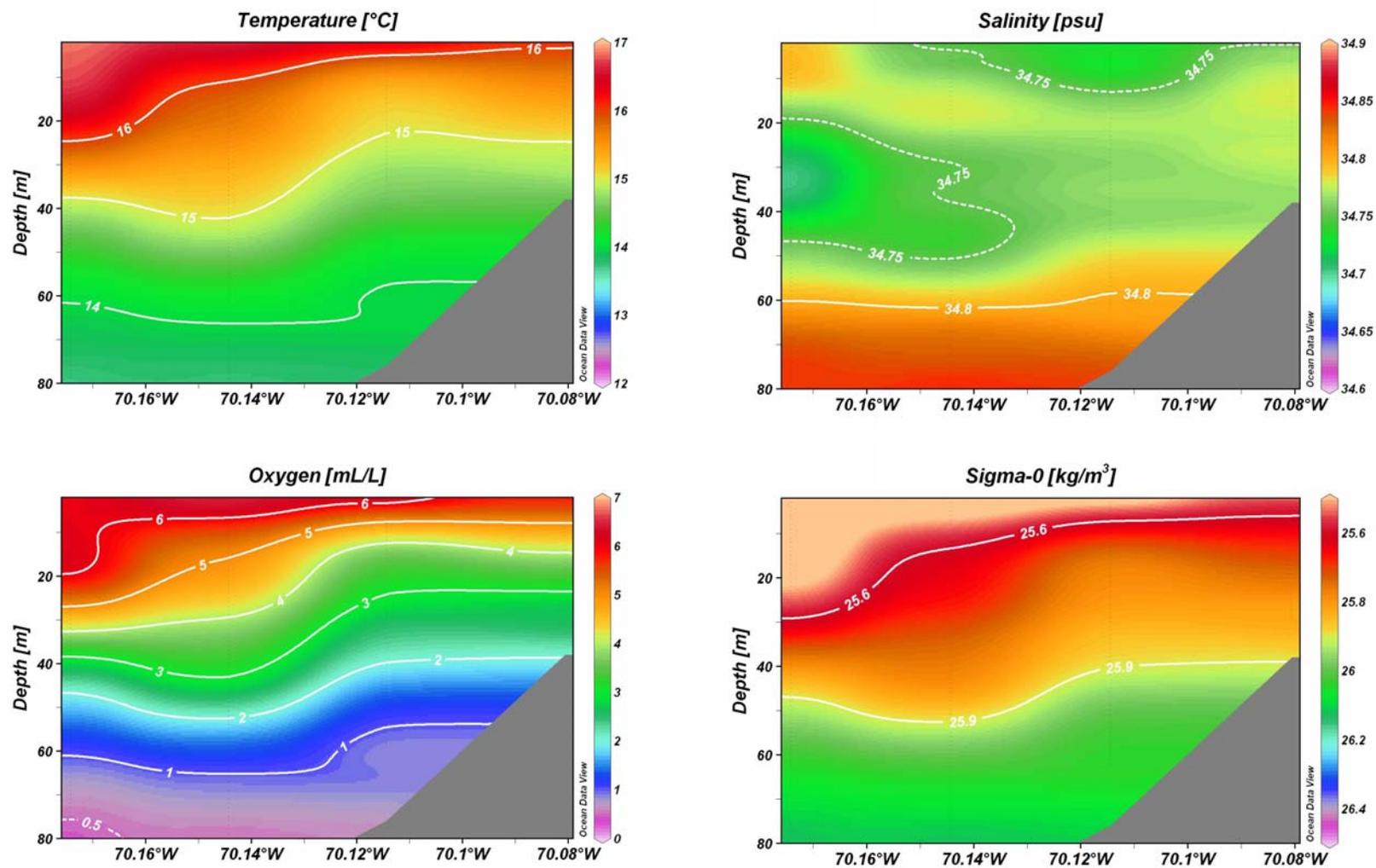


Figura 46. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 15 de julio del 2008.

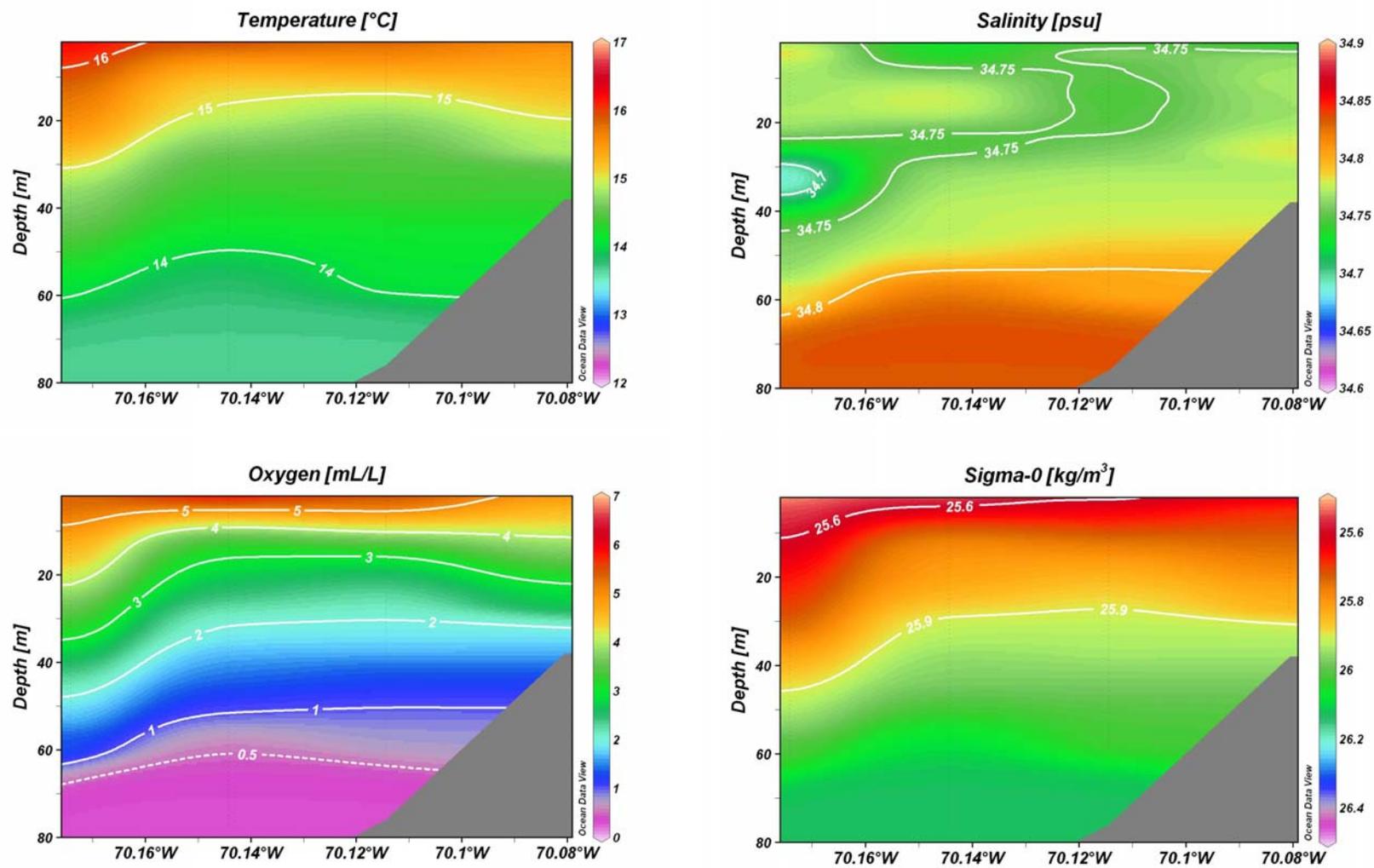


Figura 47. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18' S para el 23 de julio del 2008.

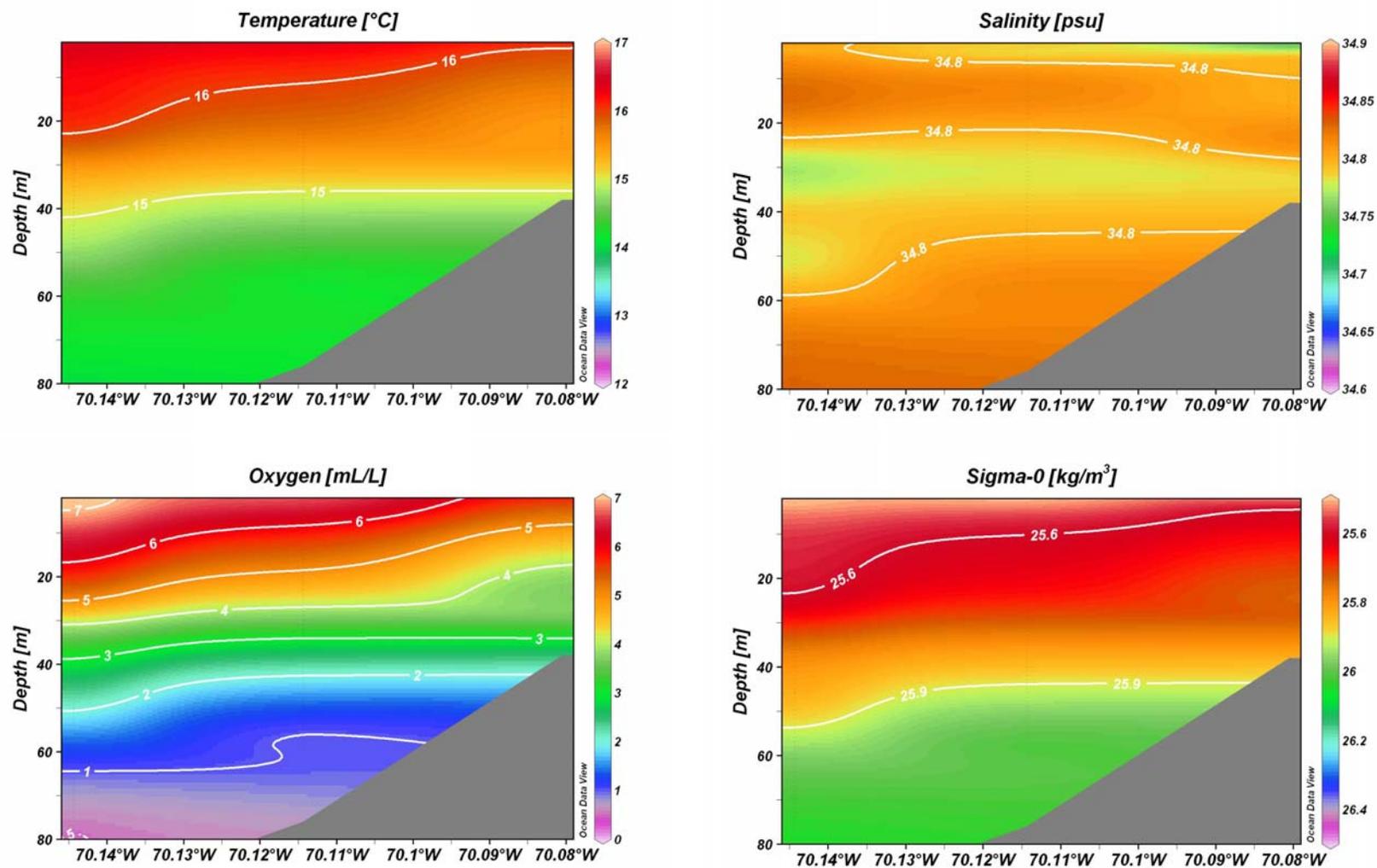


Figura 48. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 6 de agosto del 2008.

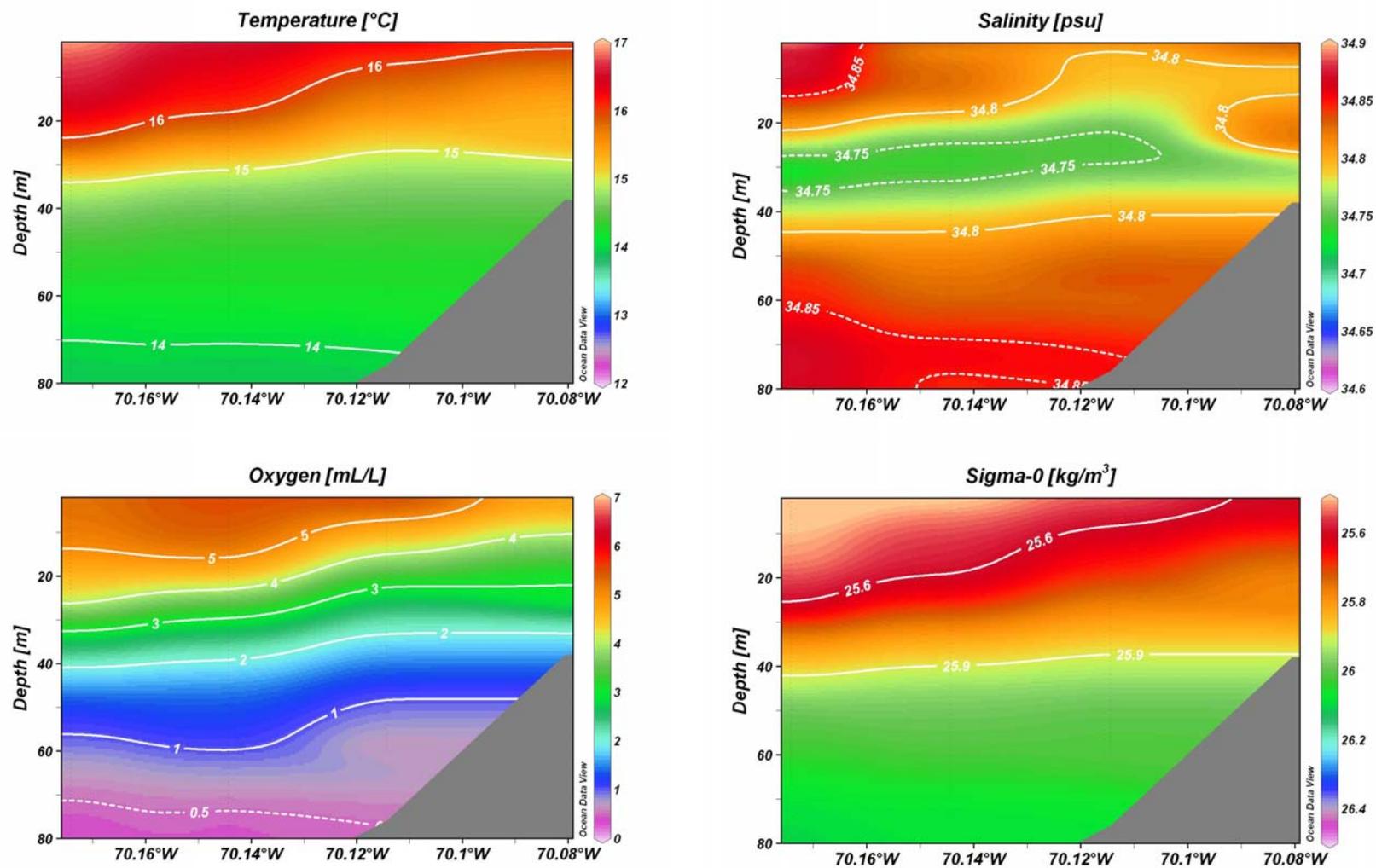


Figura 49. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 12 de agosto del 2008.

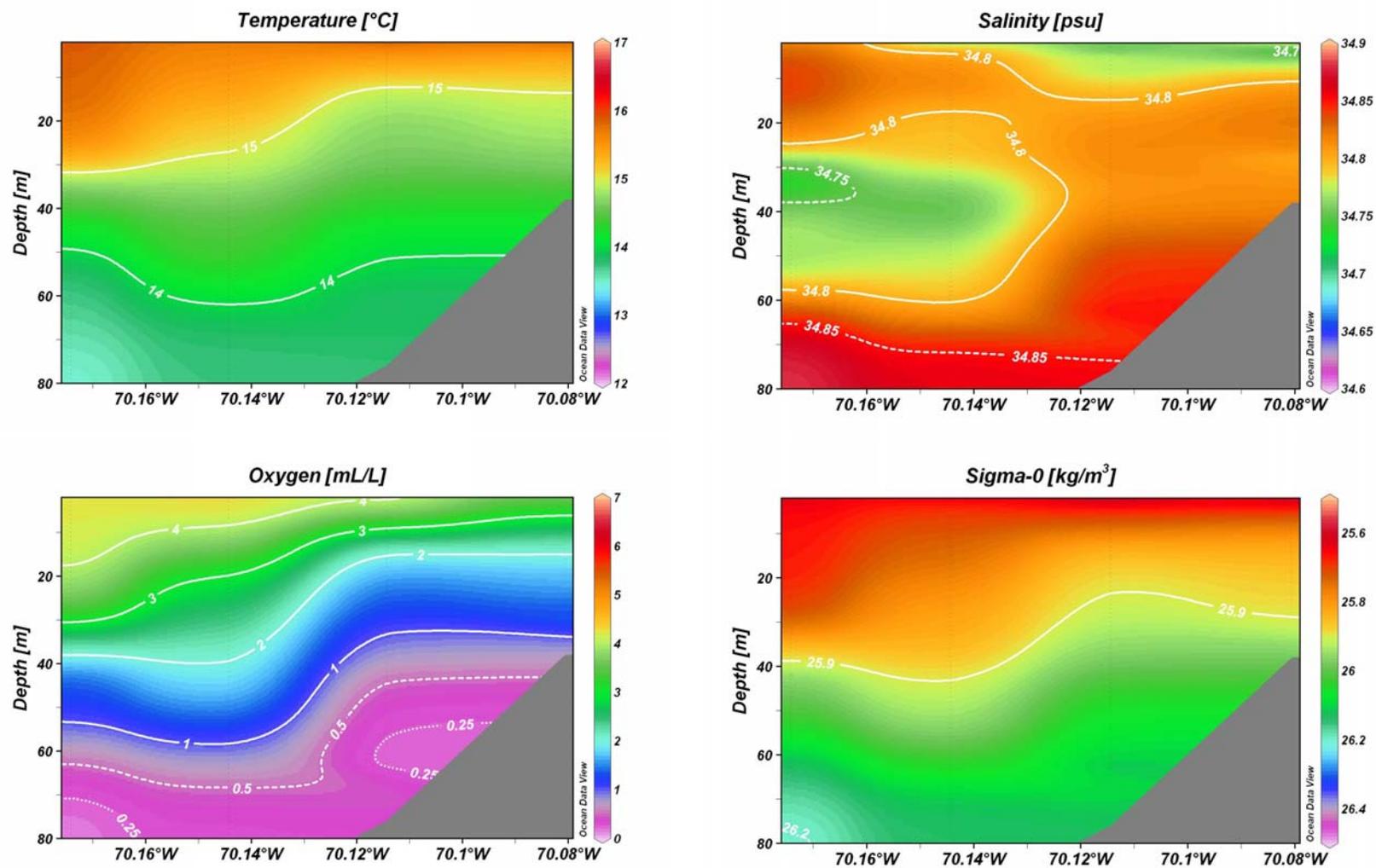


Figura 50. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 20 de agosto del 2008.

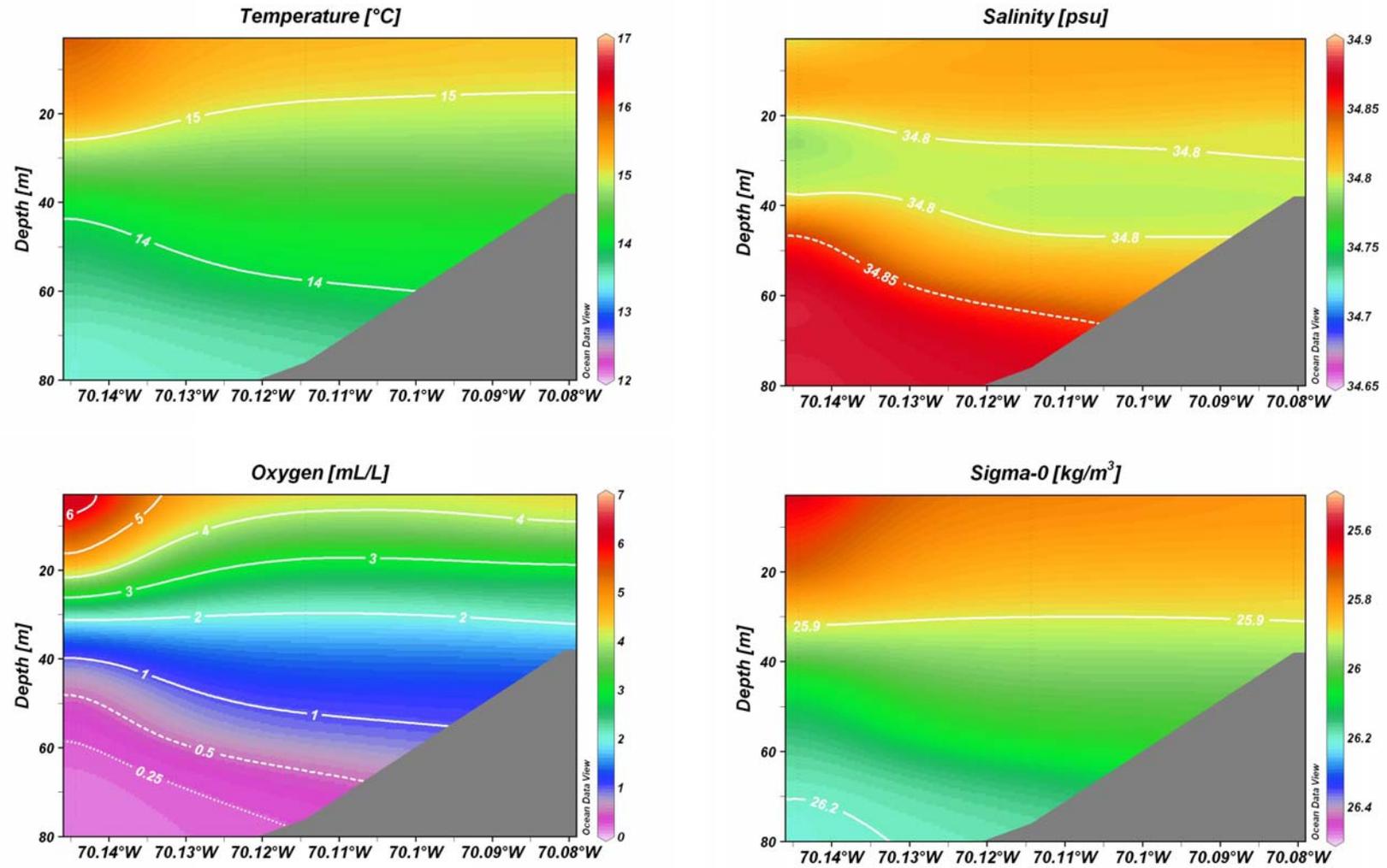


Figura 51. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 28 de agosto del 2008.

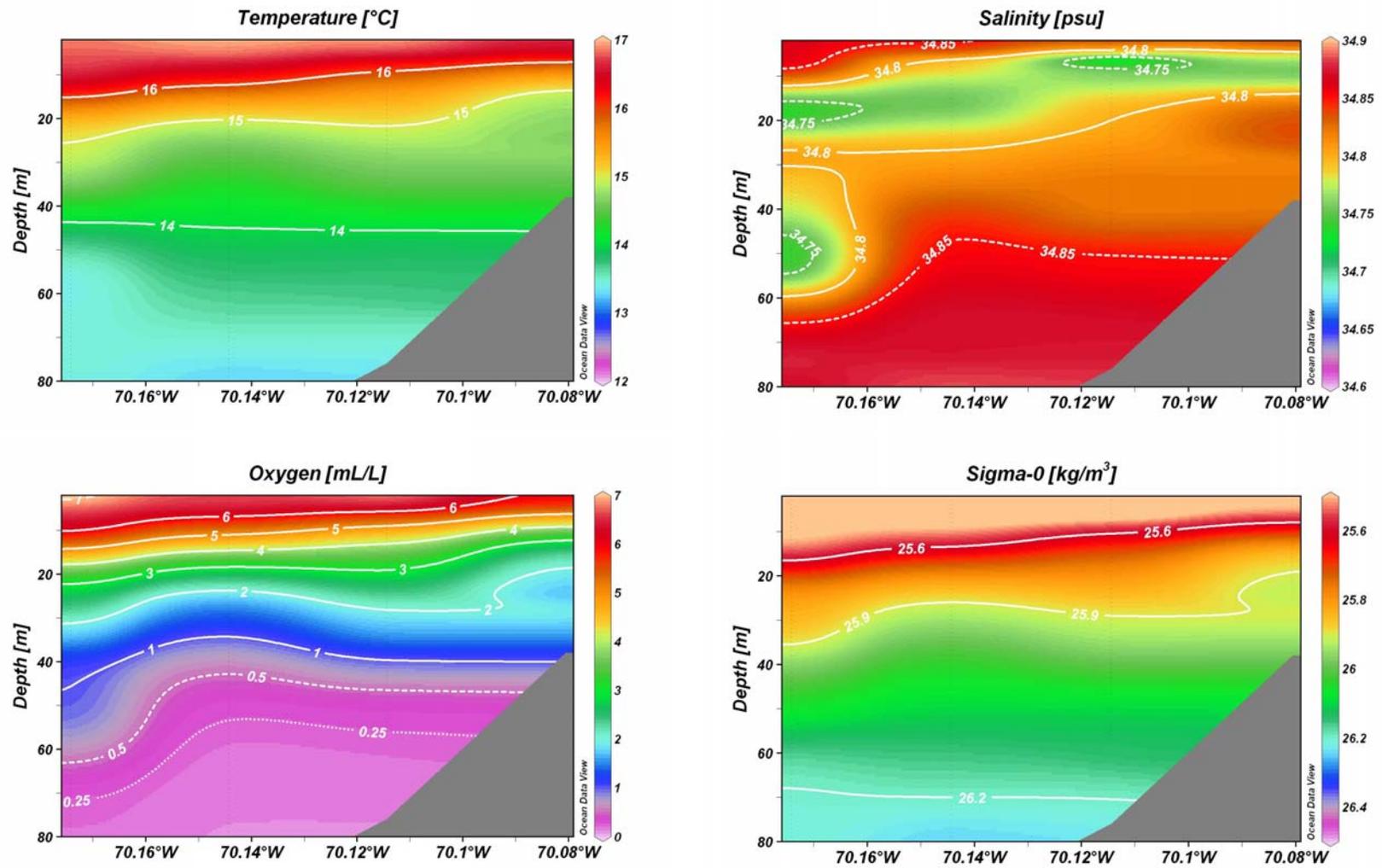


Figura 52. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 3 de septiembre del 2008.

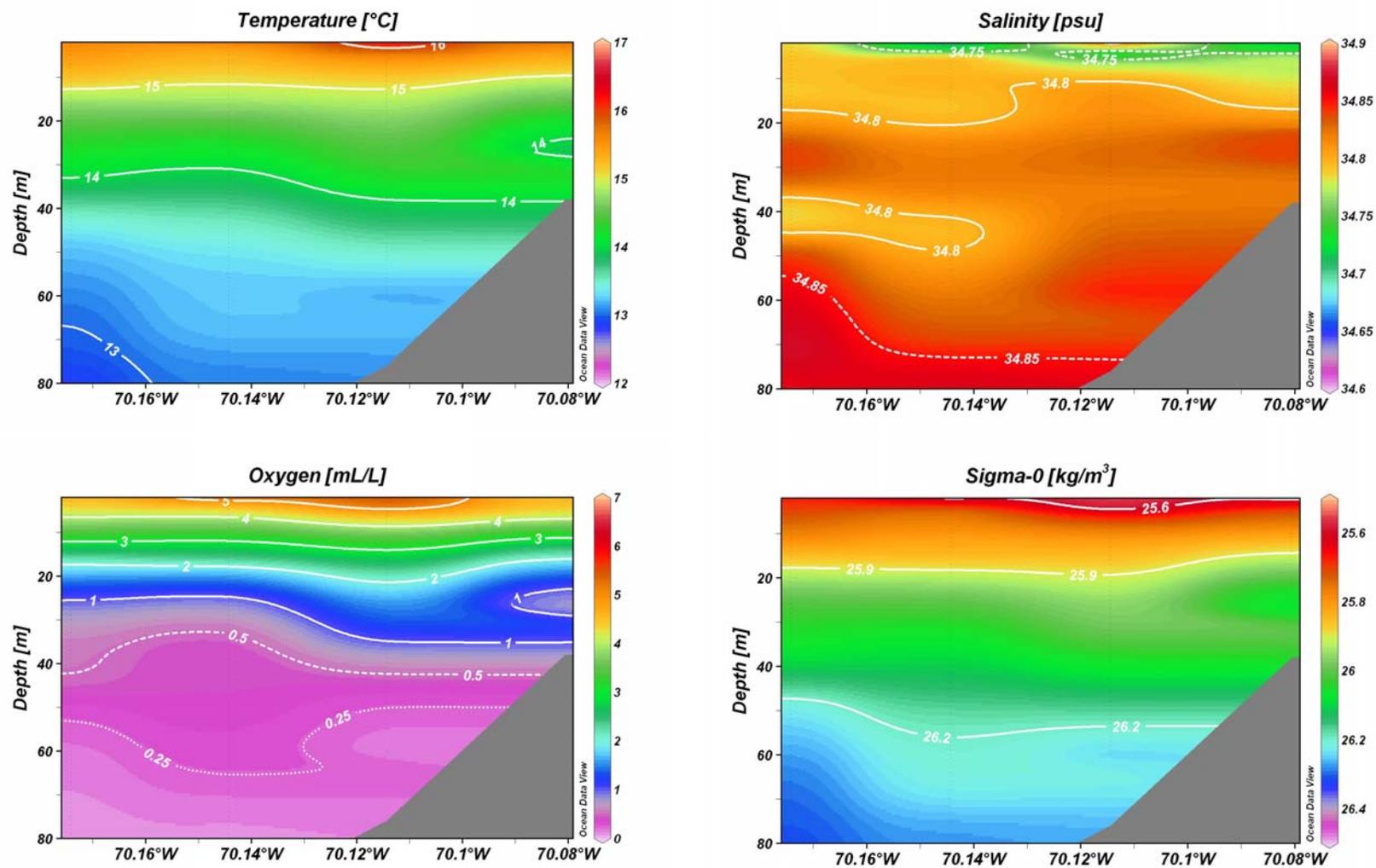


Figura 53. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 10 de septiembre del 2008.

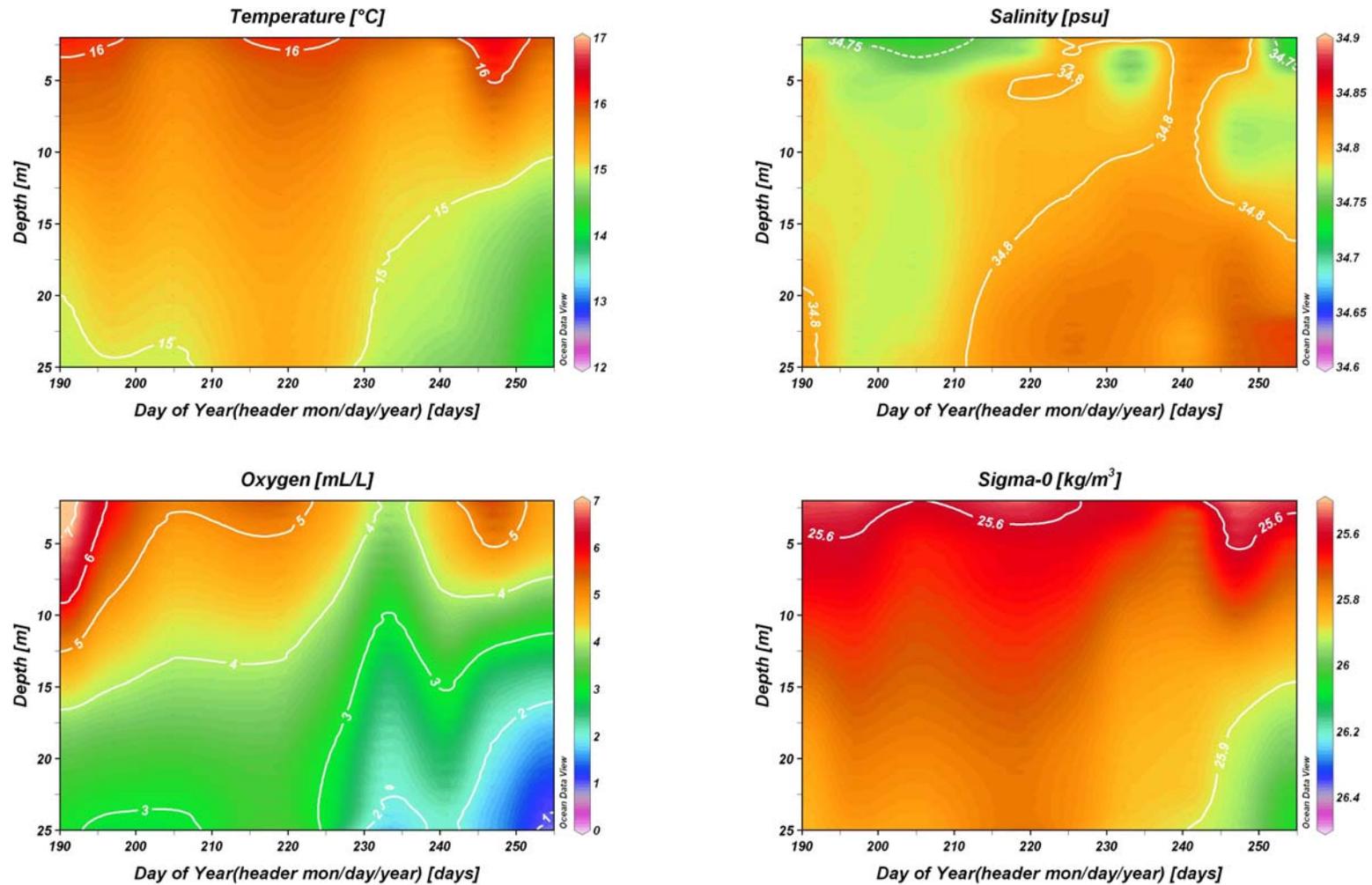


Figura 54. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 1 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 09 de julio al 10 de septiembre de 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.

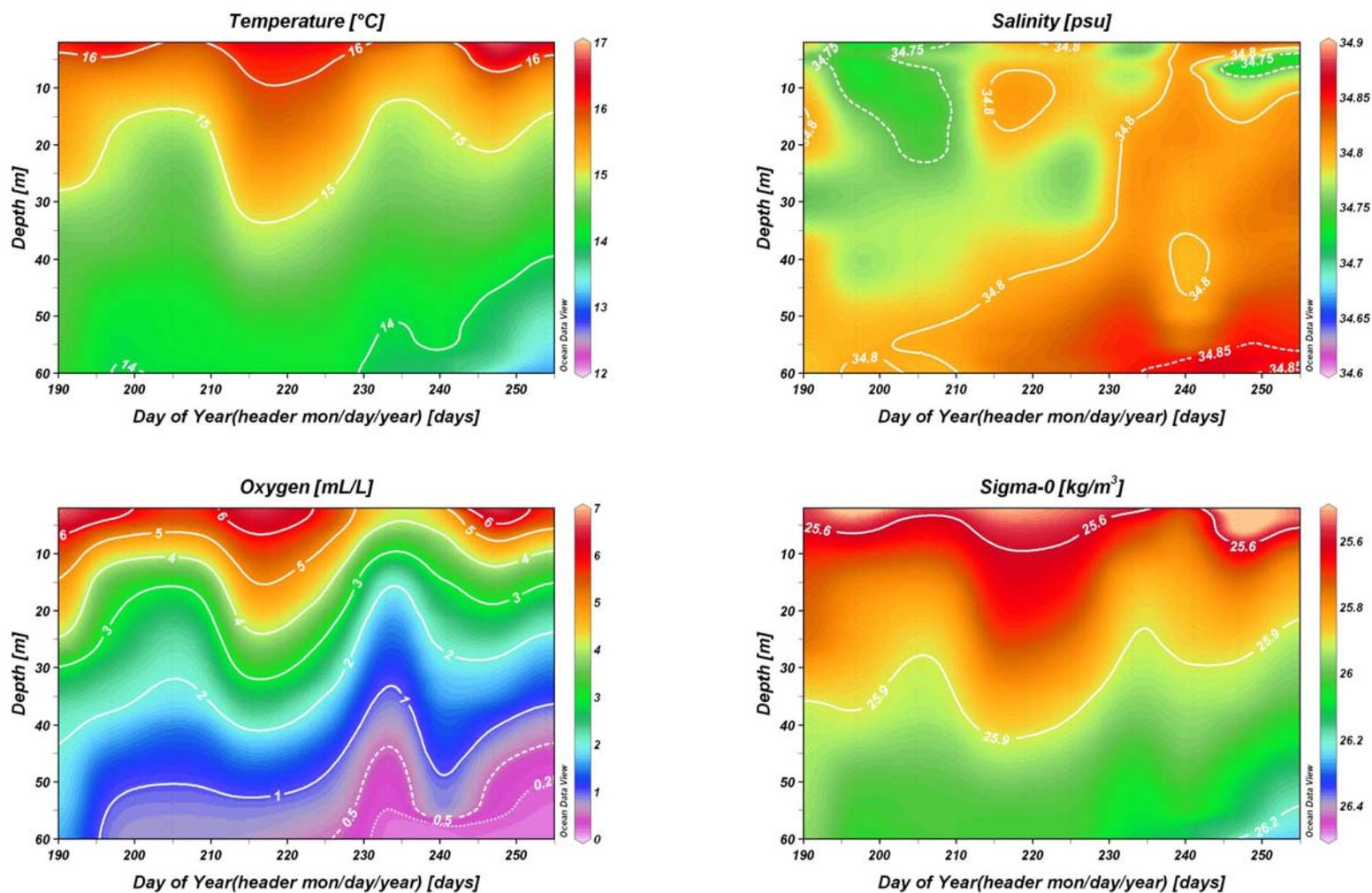


Figura 55. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 3 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 09 de julio al 10 de septiembre de 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.

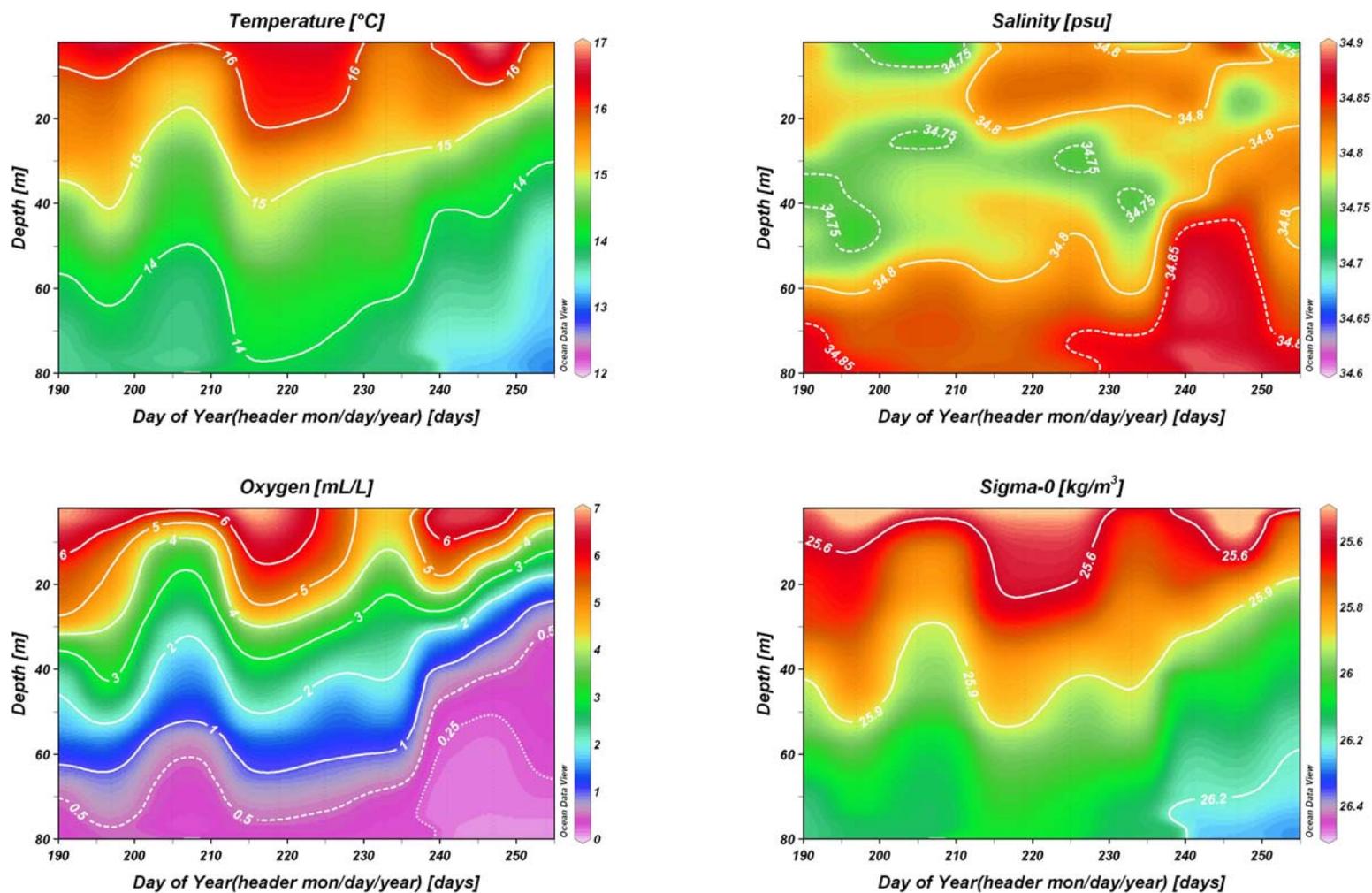


Figura 56. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 5 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 09 de julio al 10 de septiembre de 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.

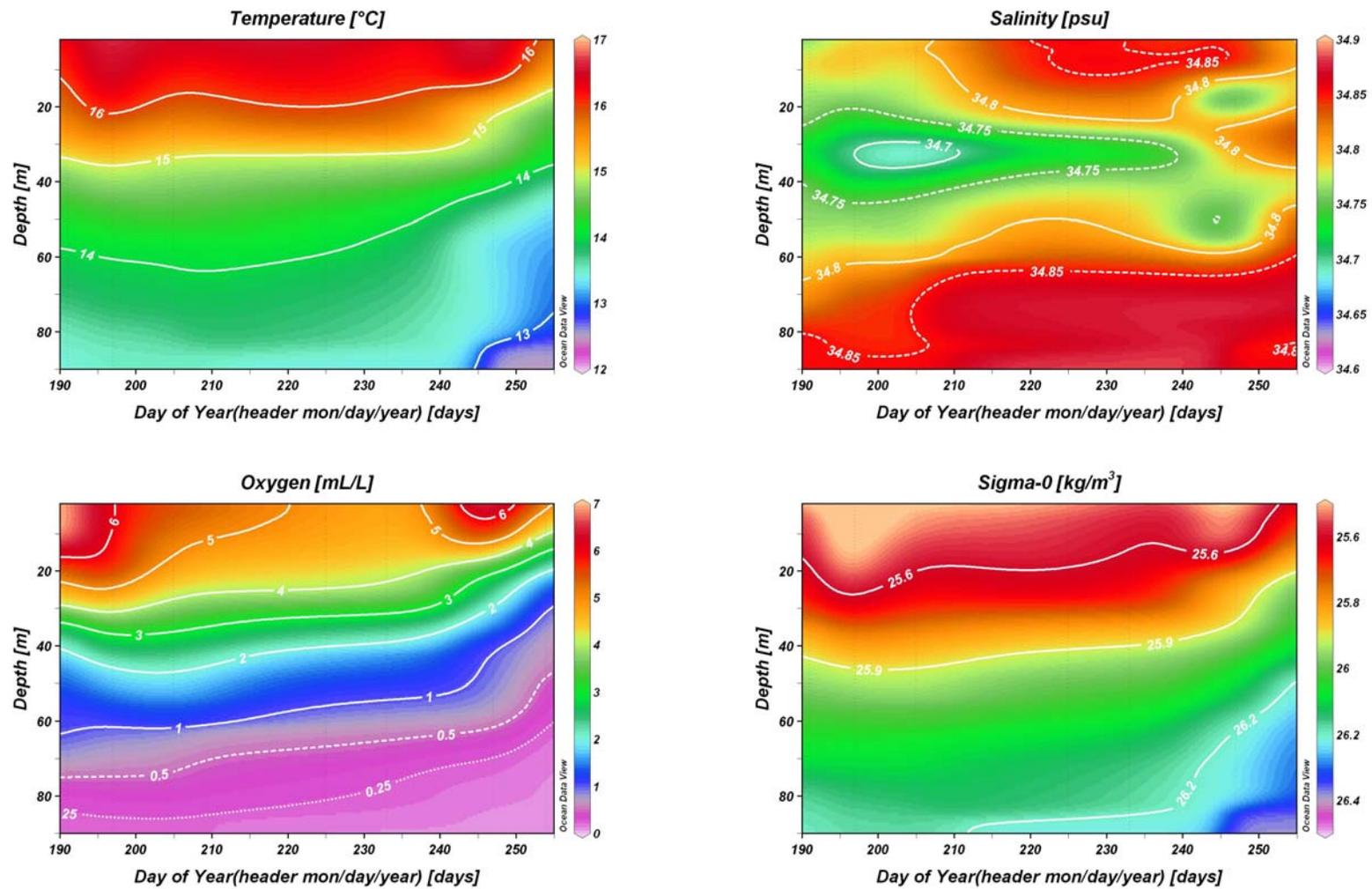


Figura 57. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 7 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 09 de julio al 10 de septiembre de 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.

La evolución temporal de las distribuciones verticales de la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y densidad, en la latitud $20^{\circ}18'S$, en verano de 2009, muestran una surgencia intensa y permanente propia de la época de verano. Empero, se destacan 4 eventos de surgencia costera de mayor magnitud y un evento de menor intensidad en la fase de relajación. El primero evento, se inició a partir de la semana del 15 de enero de 2009 donde se observa un brusco ascenso de las isotermas, isohalinas, isolíneas de oxígeno e isopicnas, incrementándose el 23 de enero y alcanzó su máxima magnitud el 28 de enero, acompañado de vientos meridionales de 4.96 m s^{-1} . En este evento, la isoterma de 15°C se ubicó a 10 m (5 m) de profundidad en el sector oceánico (costero), asociados a gradientes verticales de temperatura $0.20 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$, de salinidad 0.030 psu m^{-1} , de oxígeno disuelto 0.45 mL/L m^{-1} , de densidad $0.060 \text{ kg/m}^{-3} \text{ m}^{-1}$ y una estratificación vertical de 15 ciclos h^{-1} , asociado a un evidente ascenso del AIPSO y del AESS, este evento se observó también en la serie temporal a 1, 3, 5 y 7 mn de la costa (Figura 58 a la Figura 71).

Dentro del desarrollo del primer evento el 3 de febrero el sistema presentó una débil fase de relajación, con una velocidad meridional de 2.9 m s^{-1} , donde la isoterma de 15°C se ubicó a una profundidad entre el sector oceánico y la costa a 15 y 8 m respectivamente, asociados a gradientes verticales de temperatura $0.50 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$, de salinidad 0.030 psu m^{-1} , de oxígeno disuelto 0.45 mL/L m^{-1} , de densidad $0.100 \text{ kg/m}^{-3} \text{ m}^{-1}$ y una estratificación vertical de 20 ciclos h^{-1} , visualizándose claramente en las series temporales (Figura 58 a la Figura 71).

Un segundo evento de surgencia costera se inicia el 10 de febrero, acoplado al primer evento, sosteniendo su máximo desarrollo hasta el 3 de marzo, acompañado de una velocidad meridional que fluctuó entre 3.8 a 4.4 m s^{-1} , donde la isoterma de 15°C se ubicó a una profundidad entre el sector oceánico y la costa entre 8 a 15 y entre 5 a 10 m respectivamente, asociados a gradientes verticales de temperatura entre 0.20 a $0.50 \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$, de salinidad 0.030 psu m^{-1} , de oxígeno disuelto entre 0.025 a 0.35 mL/L m^{-1} , de densidad entre 0.060 a $0.070 \text{ kg/m}^{-3} \text{ m}^{-1}$ y una estratificación vertical entre 15 a 18 ciclos h^{-1} . El segundo evento estuvo asociado con una mayor participación del AIPSO y AESS, reflejándose en el nivel superficial por las relativamente bajas salinidades y en el nivel subsuperficial por un máximo relativo salino, éste evento también se observó en las series temporales (Figura 58 a la Figura 71).

Luego el 16 de marzo el sistema se encontró relajado, con una velocidad meridional de 2.3 m s^{-1} , observándose claramente en toda las series temporales. El último evento de surgencia se inició a partir del 20 de marzo, con una velocidad meridional de 4.7 m s^{-1} , sugiriendo una continuidad para la siguiente semana no observada (Figura 58 a la Figura 71).

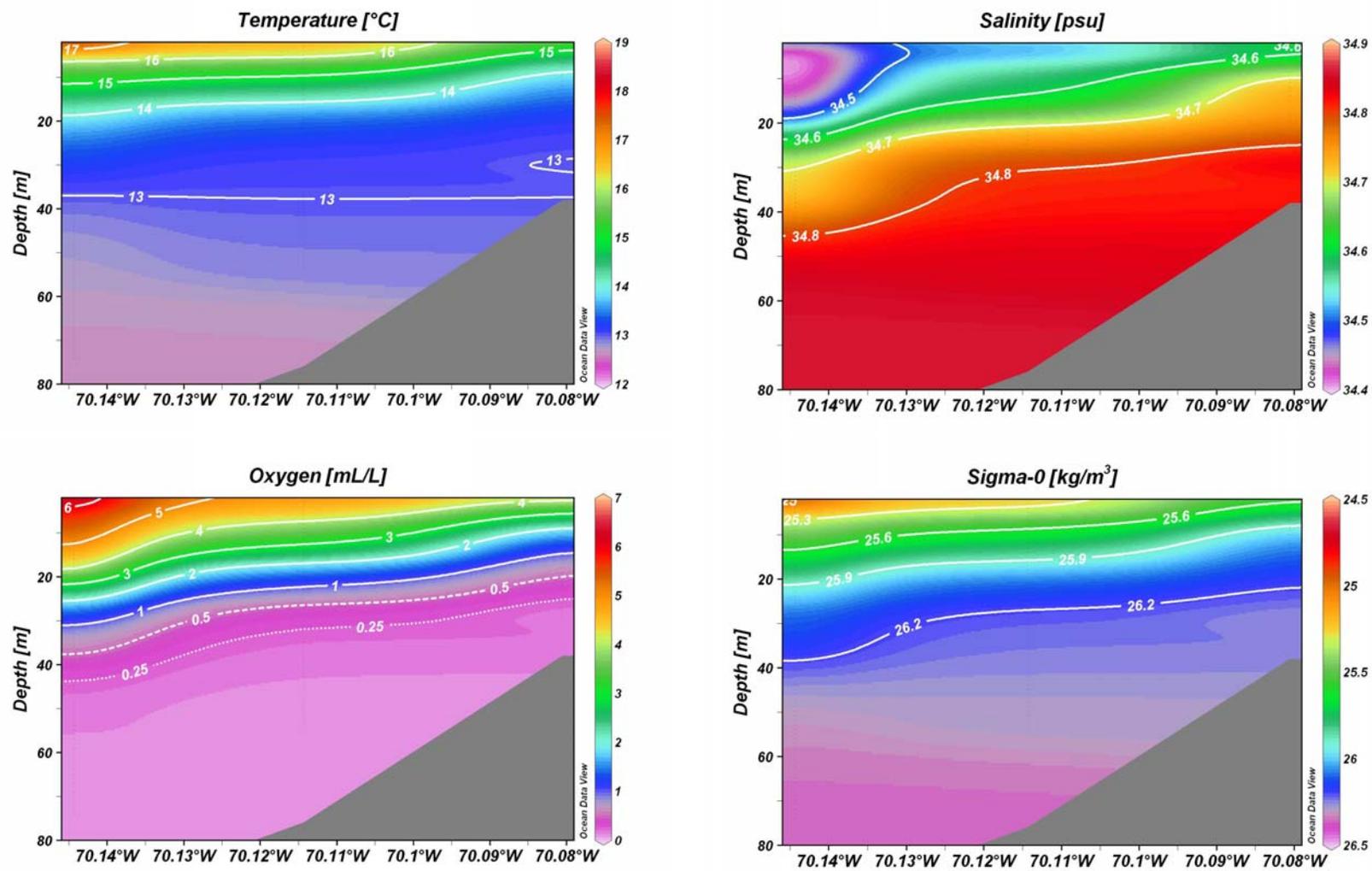


Figura 58. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 15 de enero del 2009.

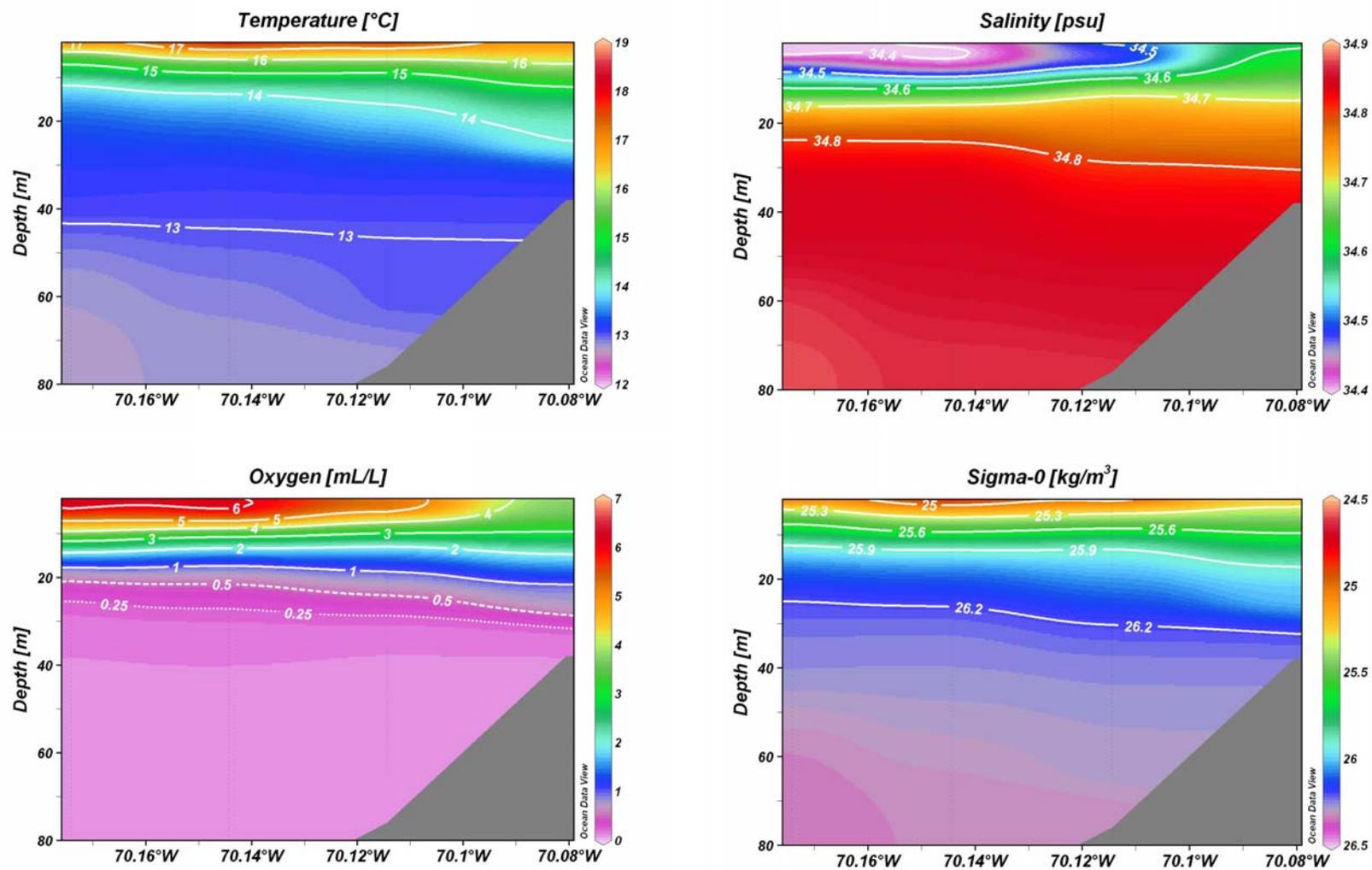


Figura 59. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 23 de enero del 2009.

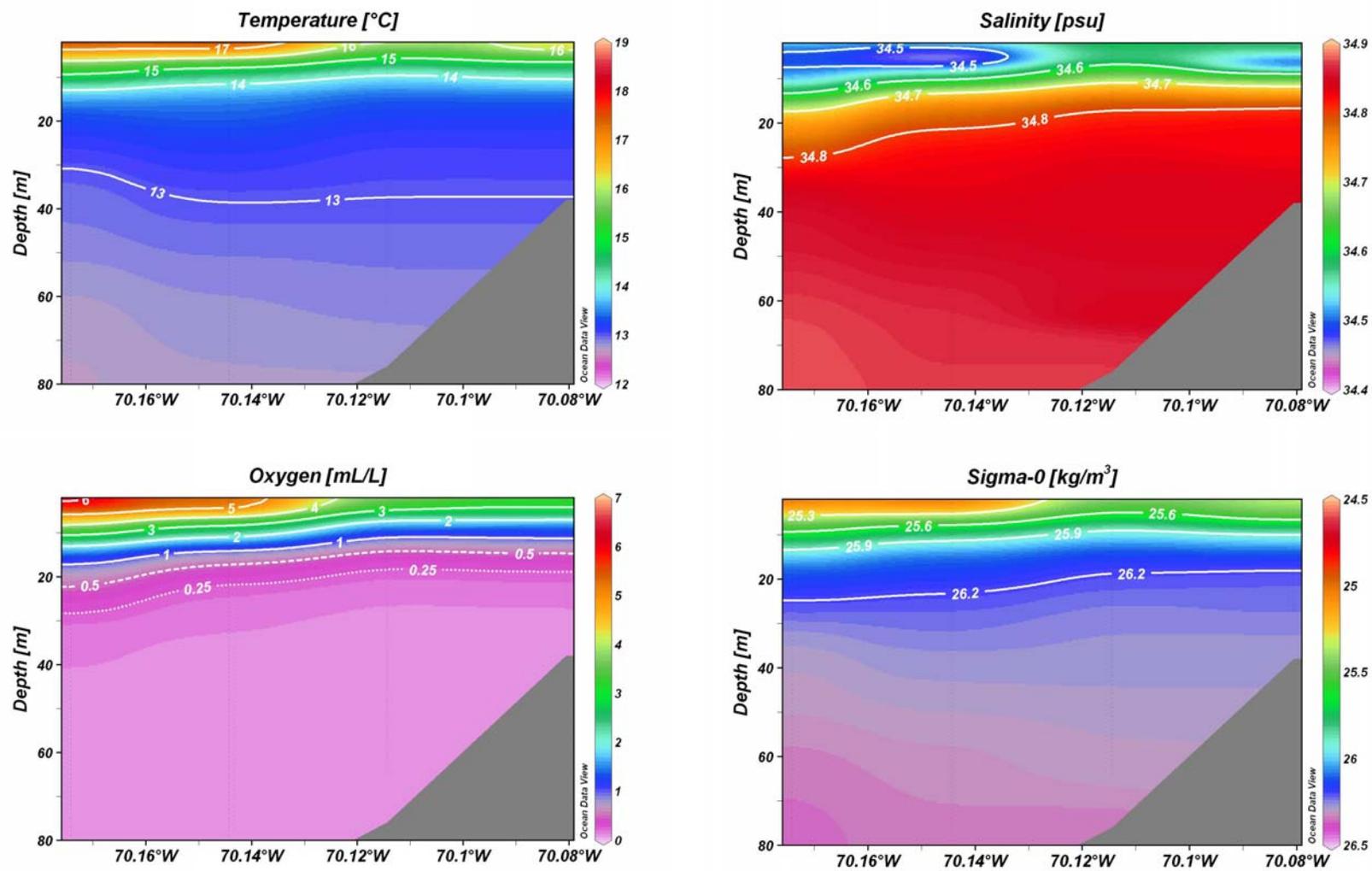


Figura 60. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 28 de enero del 2009.

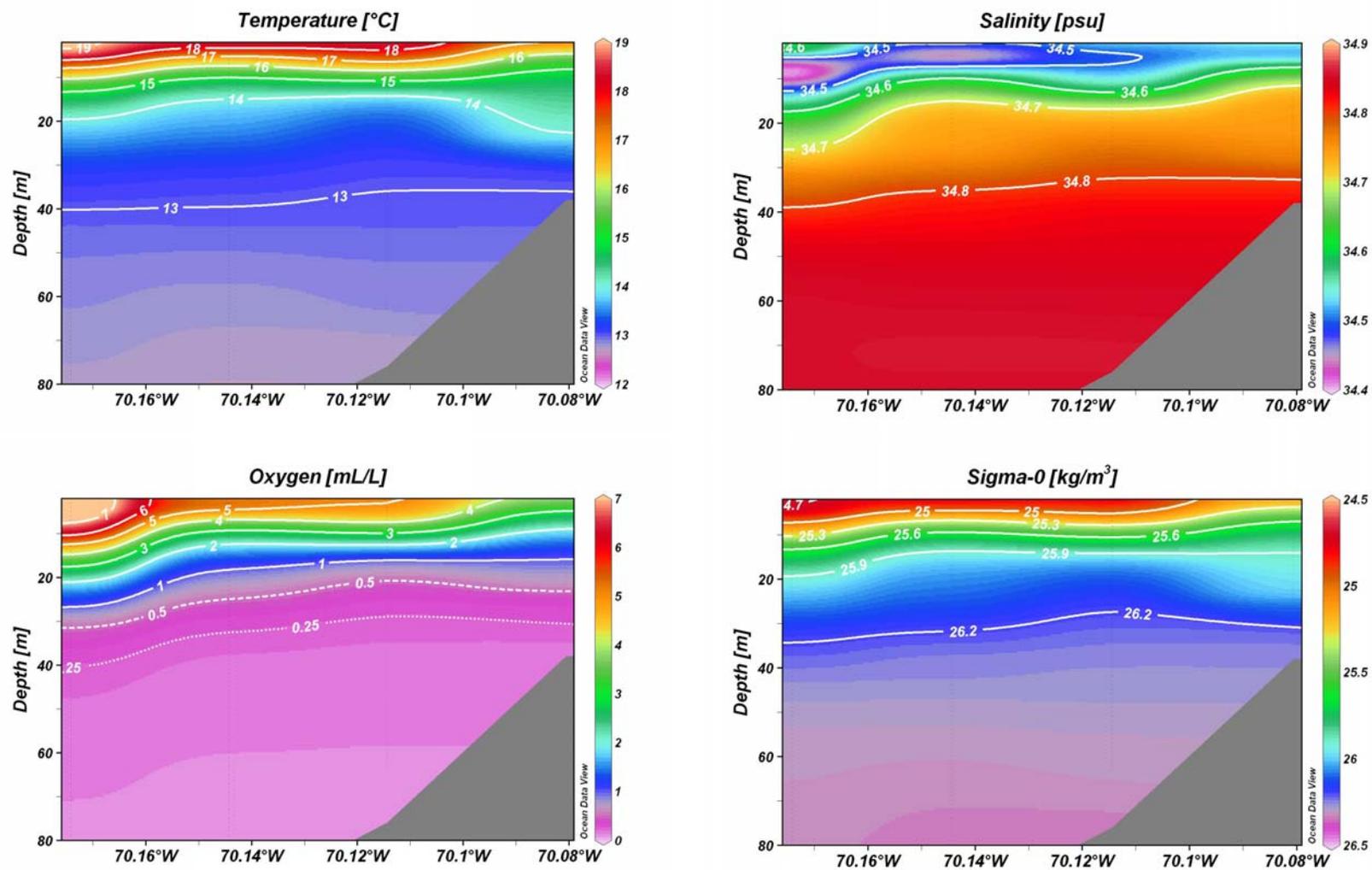


Figura 61. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 3 de febrero del 2009.

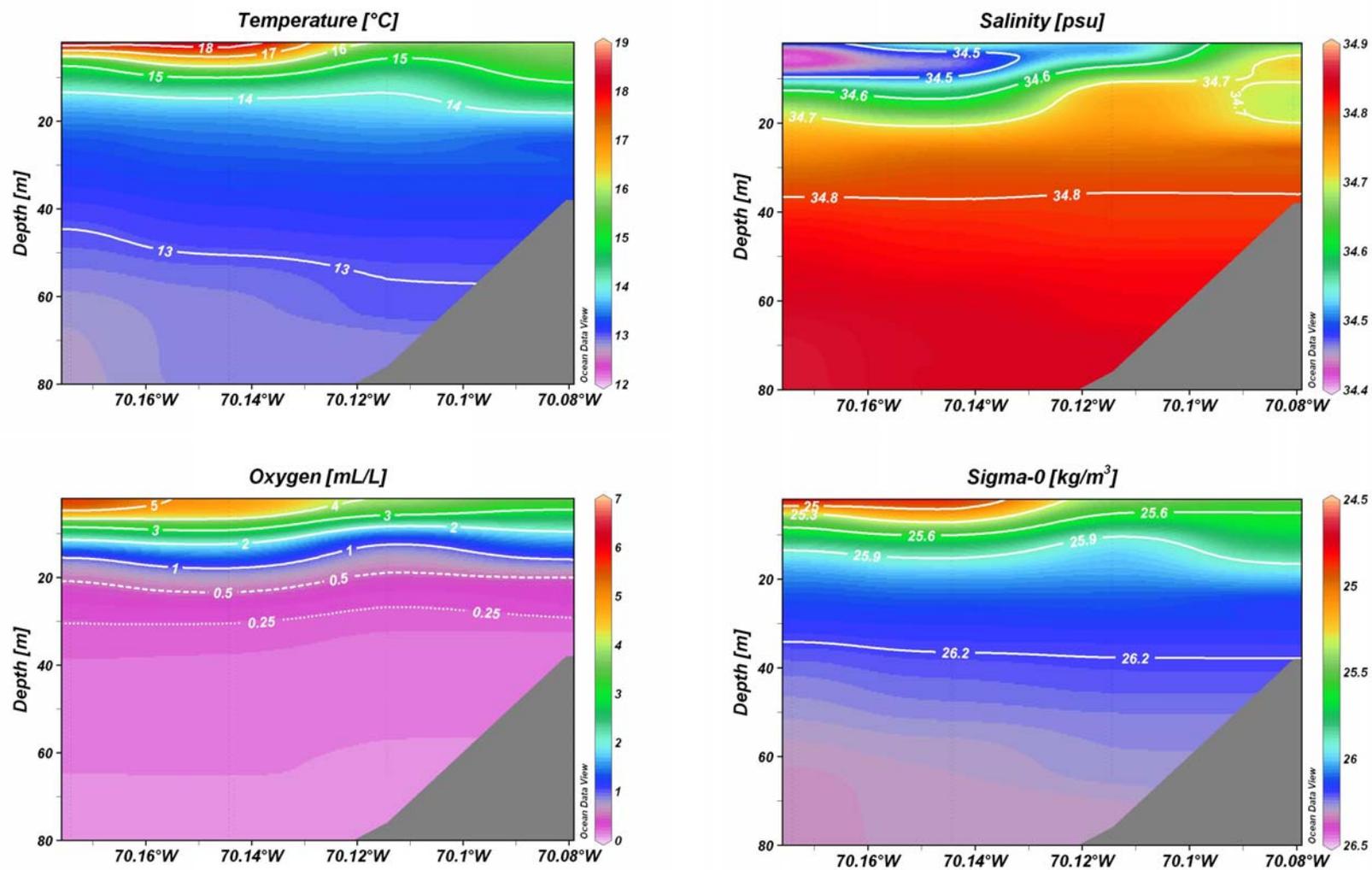


Figura 62. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 10 de febrero 2009.

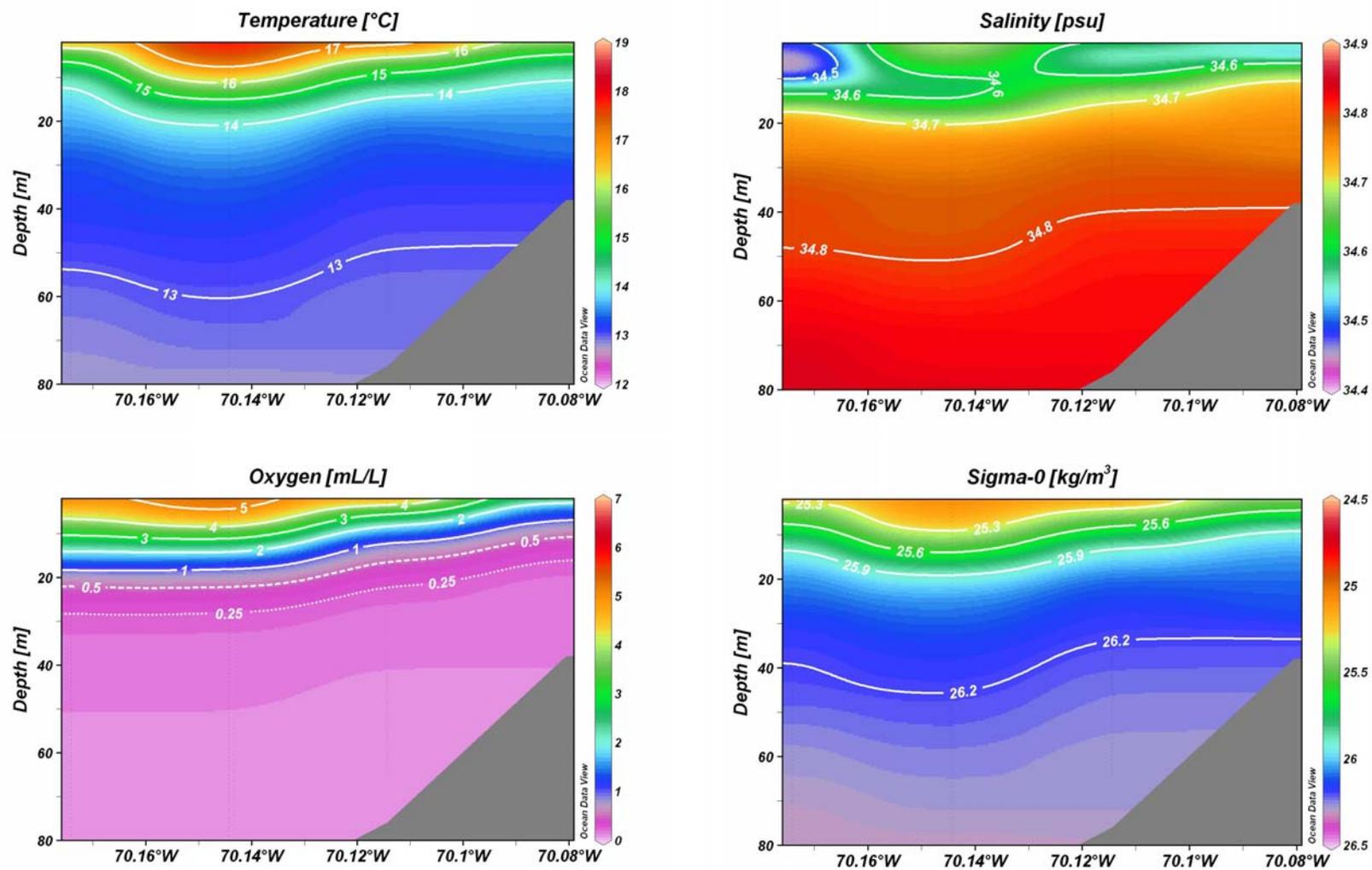


Figura 63. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 18 de febrero del 2009.

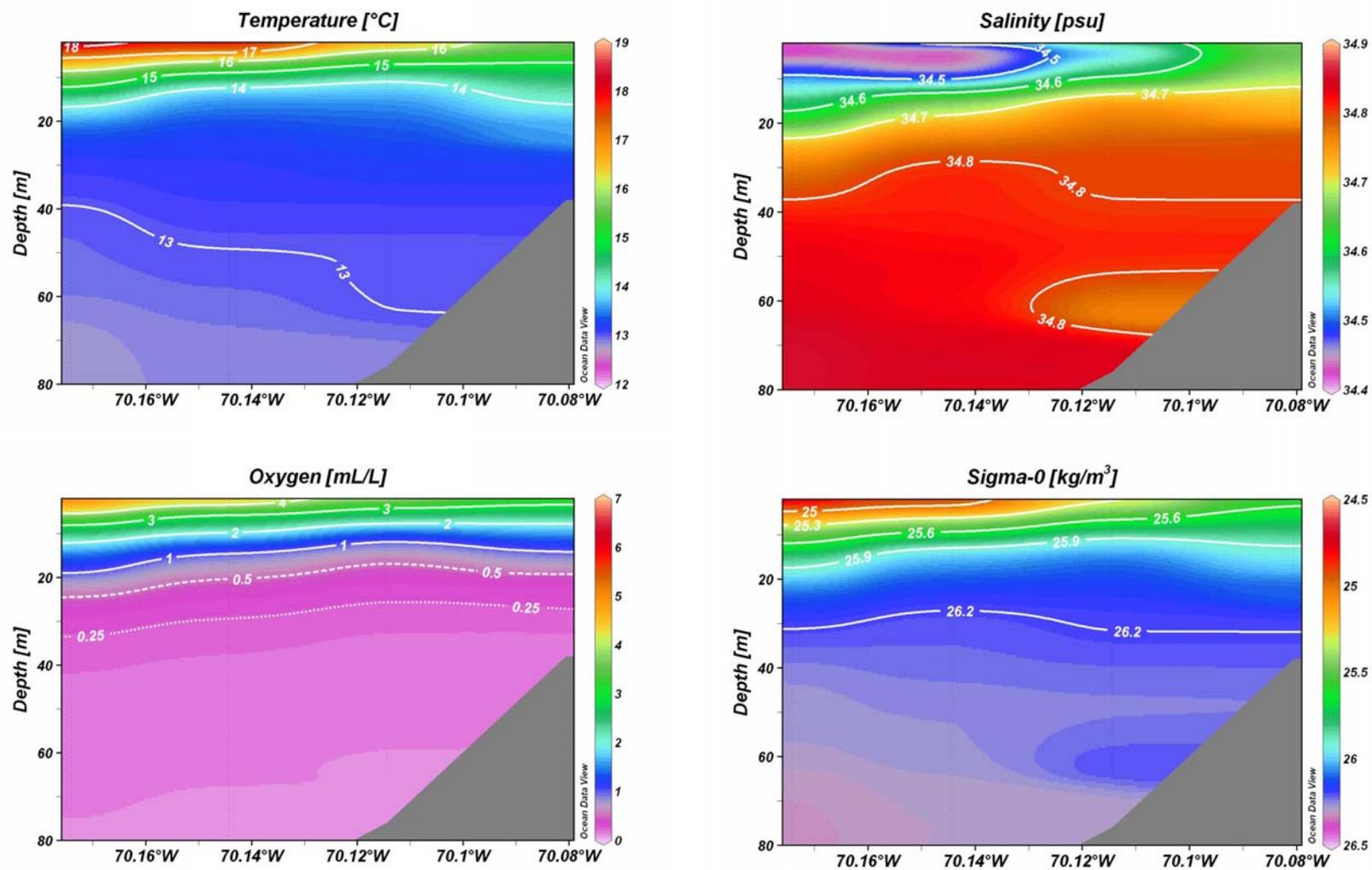


Figura 64. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 24 de febrero del 2009.

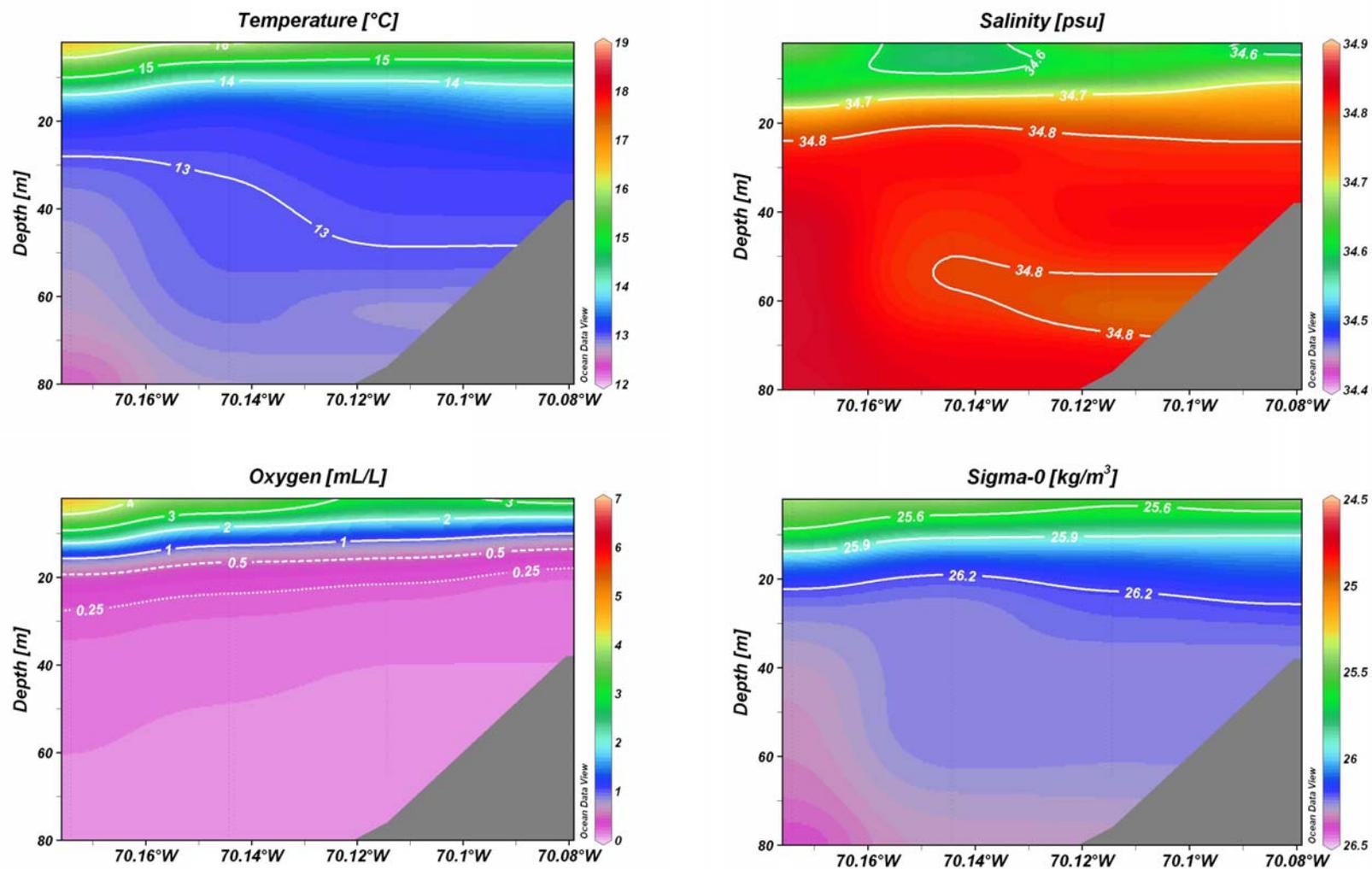


Figura 65. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 3 de marzo del 2009.

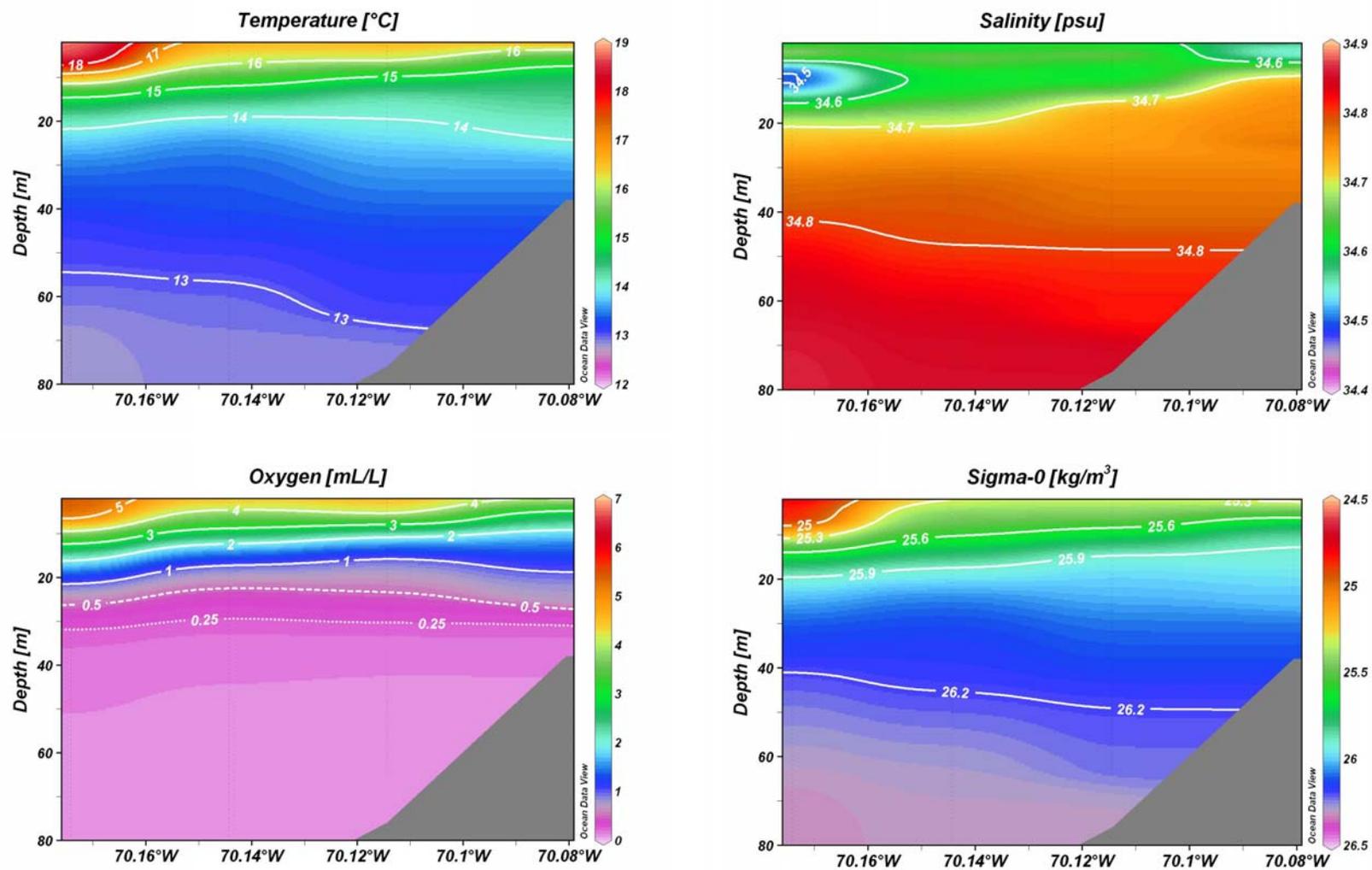


Figura 66. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 16 de marzo de 2009.

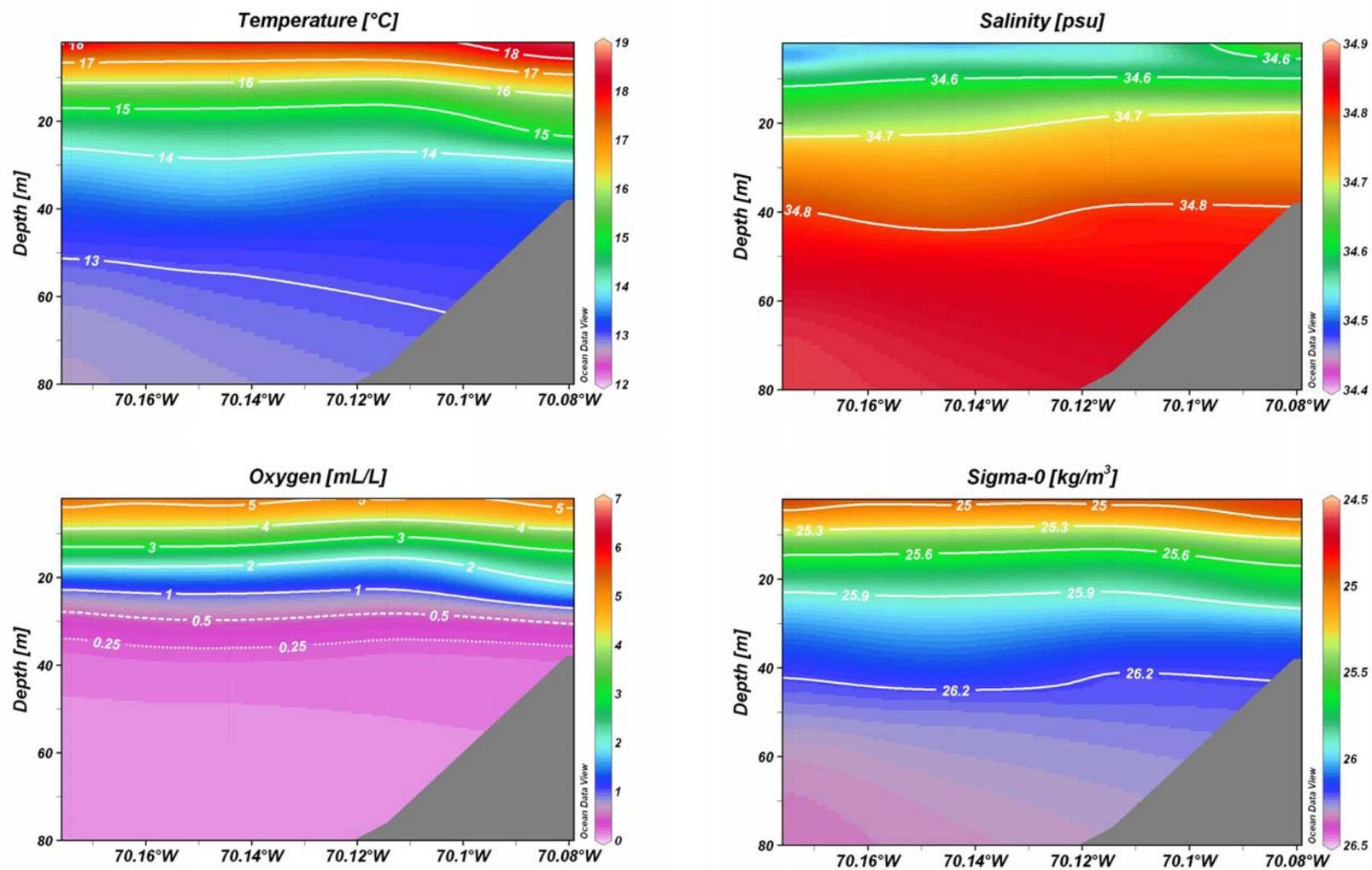


Figura 67. Distribución vertical de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) en la latitud 20° 18'S para el 20 de marzo de 2009.

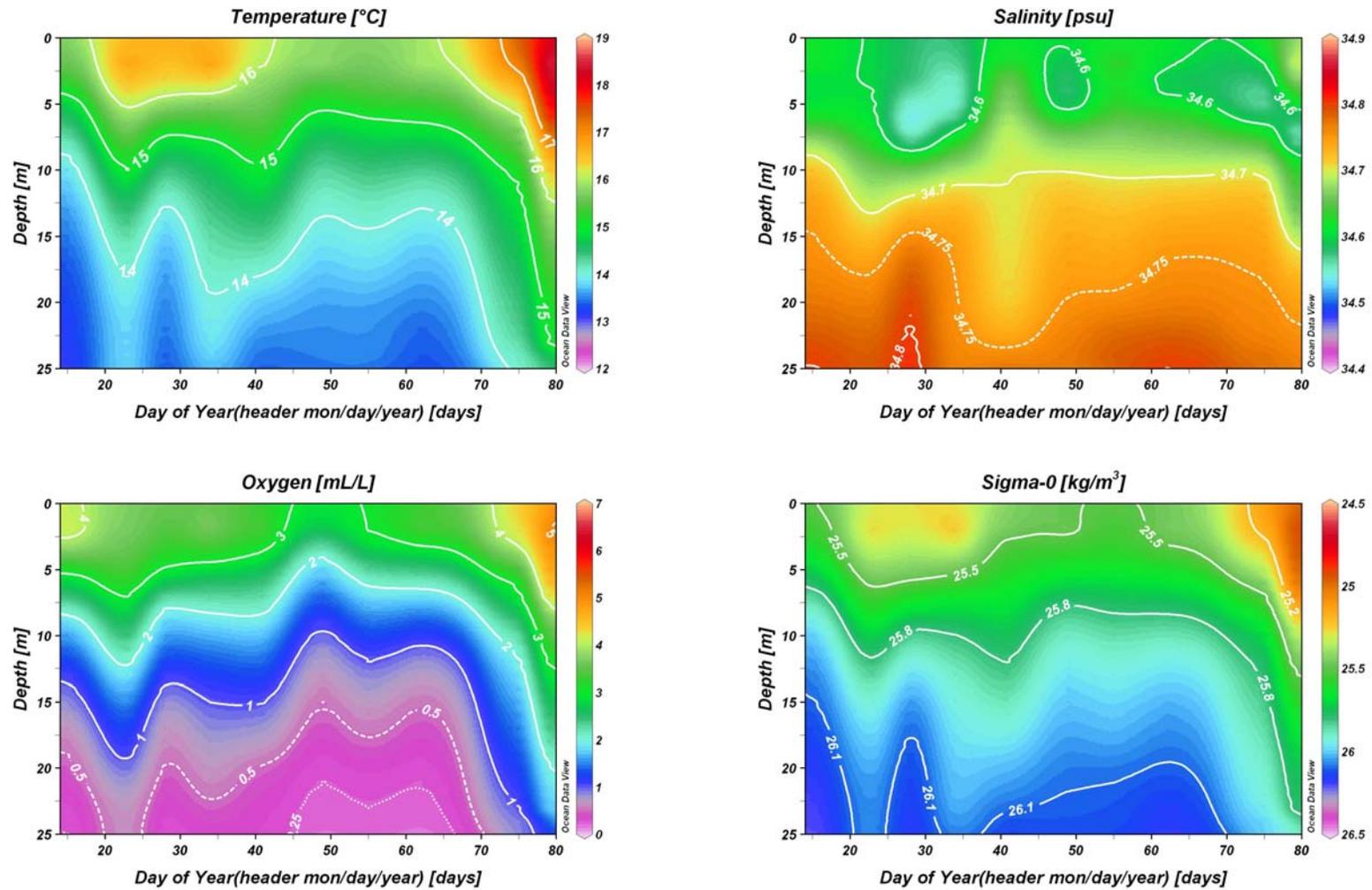


Figura 68. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 1 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.

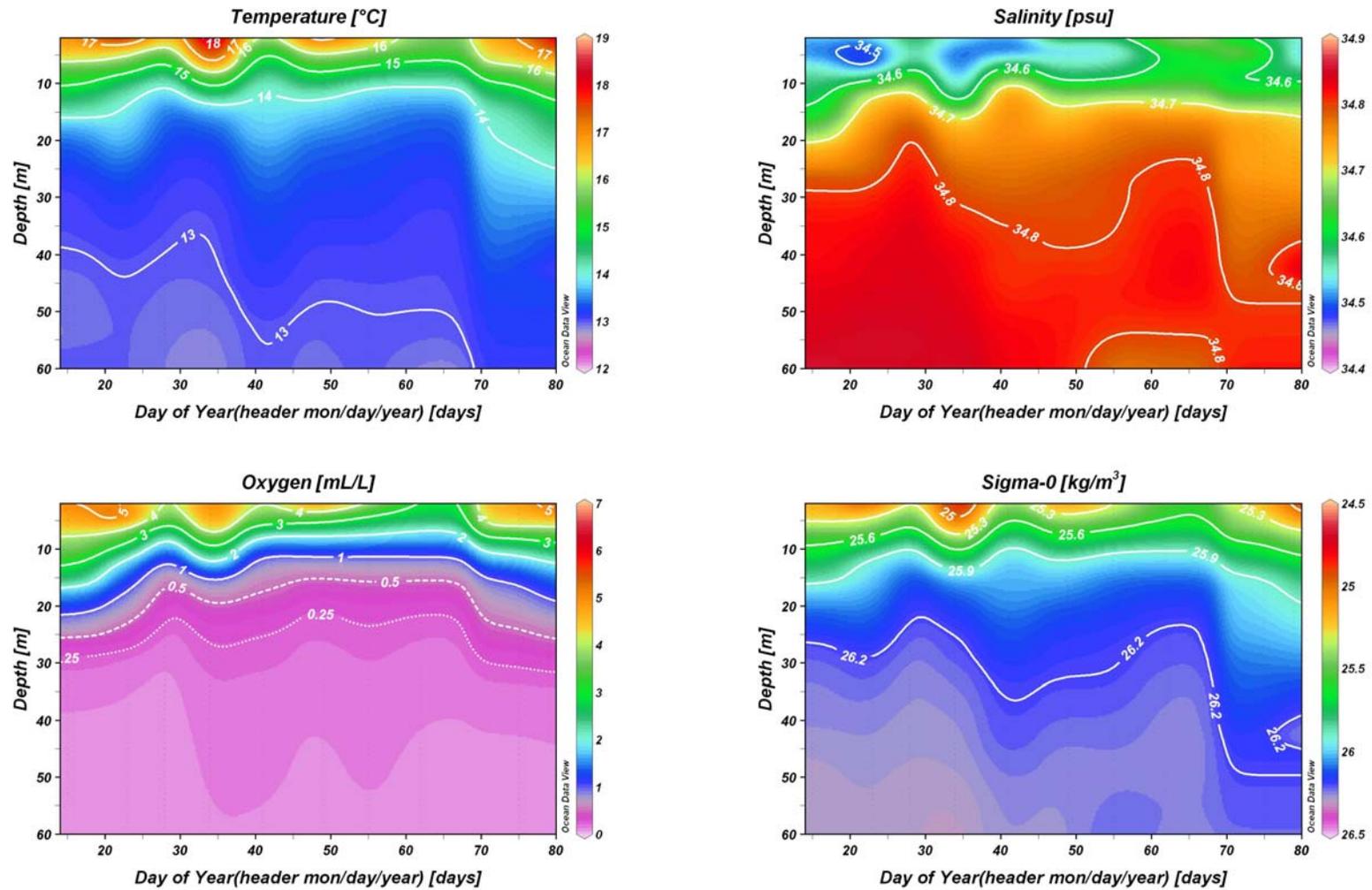


Figura 69. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 3 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.

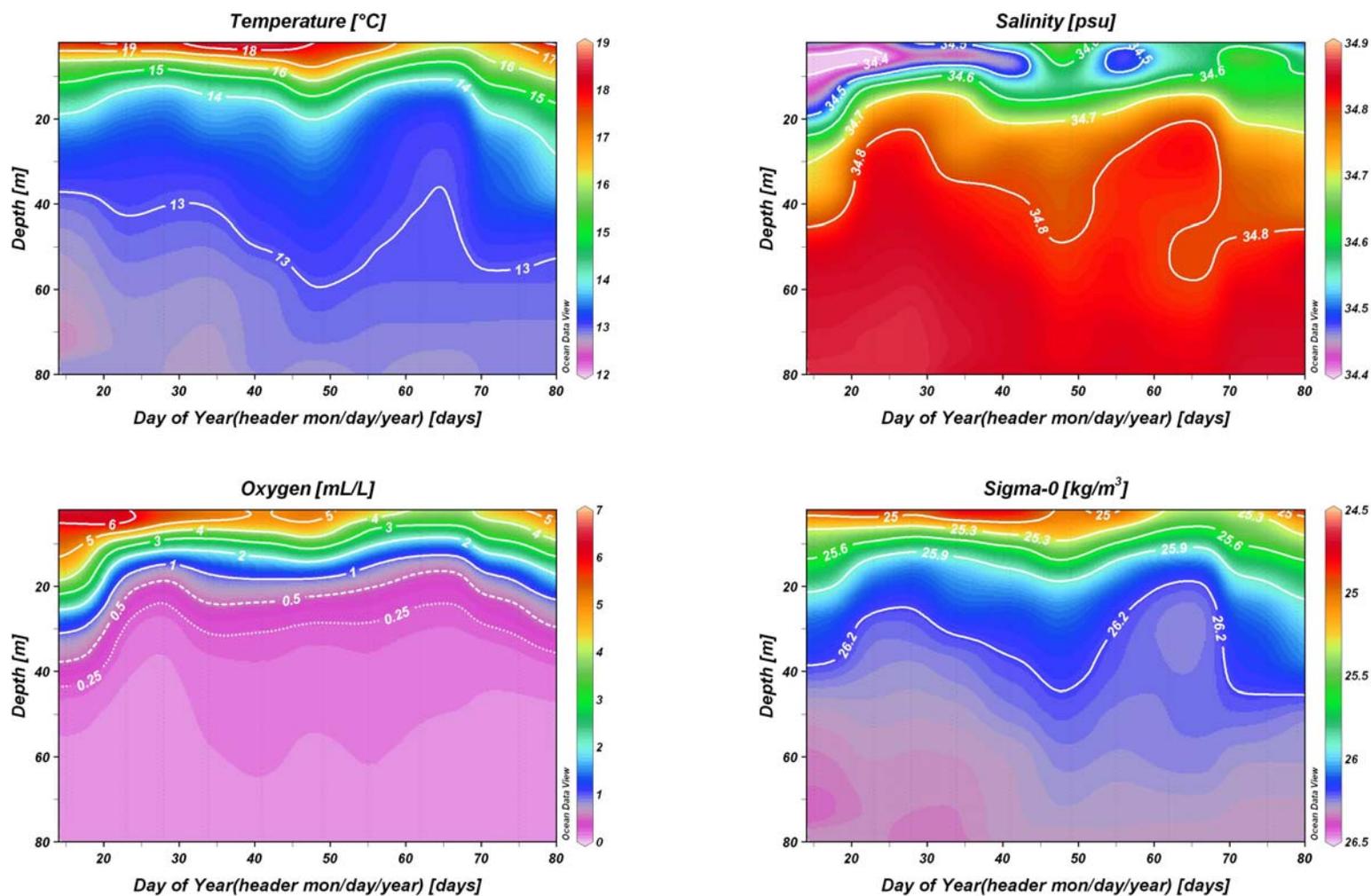


Figura 70. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 5 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.

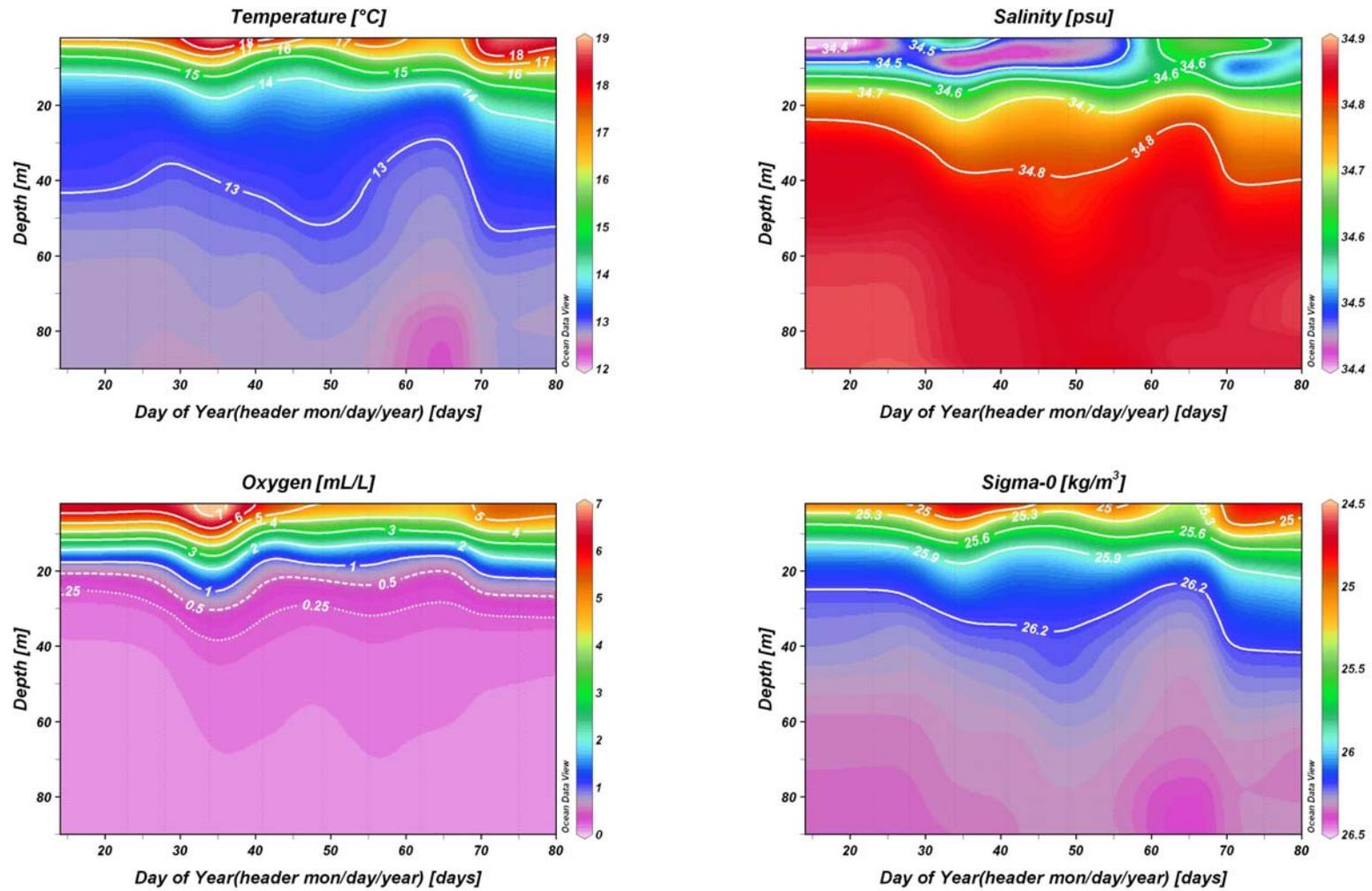


Figura 71. Serie de tiempo semanal de la distribución vertical a 7 mn de la costa en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.

1.2.2 Variabilidad temporal de Biomasa Fitoplanctónica.

Tomando en cuenta toda la serie en invierno de 2008, las estaciones ubicadas a 1 y 3 mn de la costa presentaron los mayores niveles de biomasa fitoplanctónica. En sentido vertical se mantuvo la presencia de máximos subsuperficiales entre 0 m y 25 m de profundidad.

El análisis de la variabilidad temporal reveló una alternancia de altas y bajas concentraciones, con máximos cercanos a 20 $\mu\text{g Cl a/L}$ durante las campañas del 9 de julio y 7 de agosto. No obstante, las magnitudes más bajas no fueron inferiores a 4 $\mu\text{g Cl a/L}$ (Tabla 3).

Tabla 3. Estadística descriptiva básica para los muestreos semanales.

Fecha	Máximos	Mínimos	Promedio	Desv. Est.
09/07/2008	19,02	0,25	7,22	5,94
14/07/2008	8,20	0,18	3,04	2,47
23/07/2008	15,26	0,29	5,29	4,99
06/08/2008	19,16	0,48	9,81	6,54
12/08/2008	4,64	0,06	1,74	1,60
20/08/2008	7,07	0,10	2,95	2,30
03/09/2008	10,19	0,14	4,79	3,63

En las secciones verticales se observa la evolución semanal que exhibió la biomasa, la cual, además de caracterizarse por la alternancia ya señalada, se distinguió porque ésta estuvo asociada a un desplazamiento horizontal y vertical de los núcleos de altos valores, encontrándose más restringidos al borde costero y a menor profundidad durante los periodos de baja biomasa, mientras que cuando ésta se incrementó lo hizo también su extensión costa afuera y en sentido vertical (Figura 72).

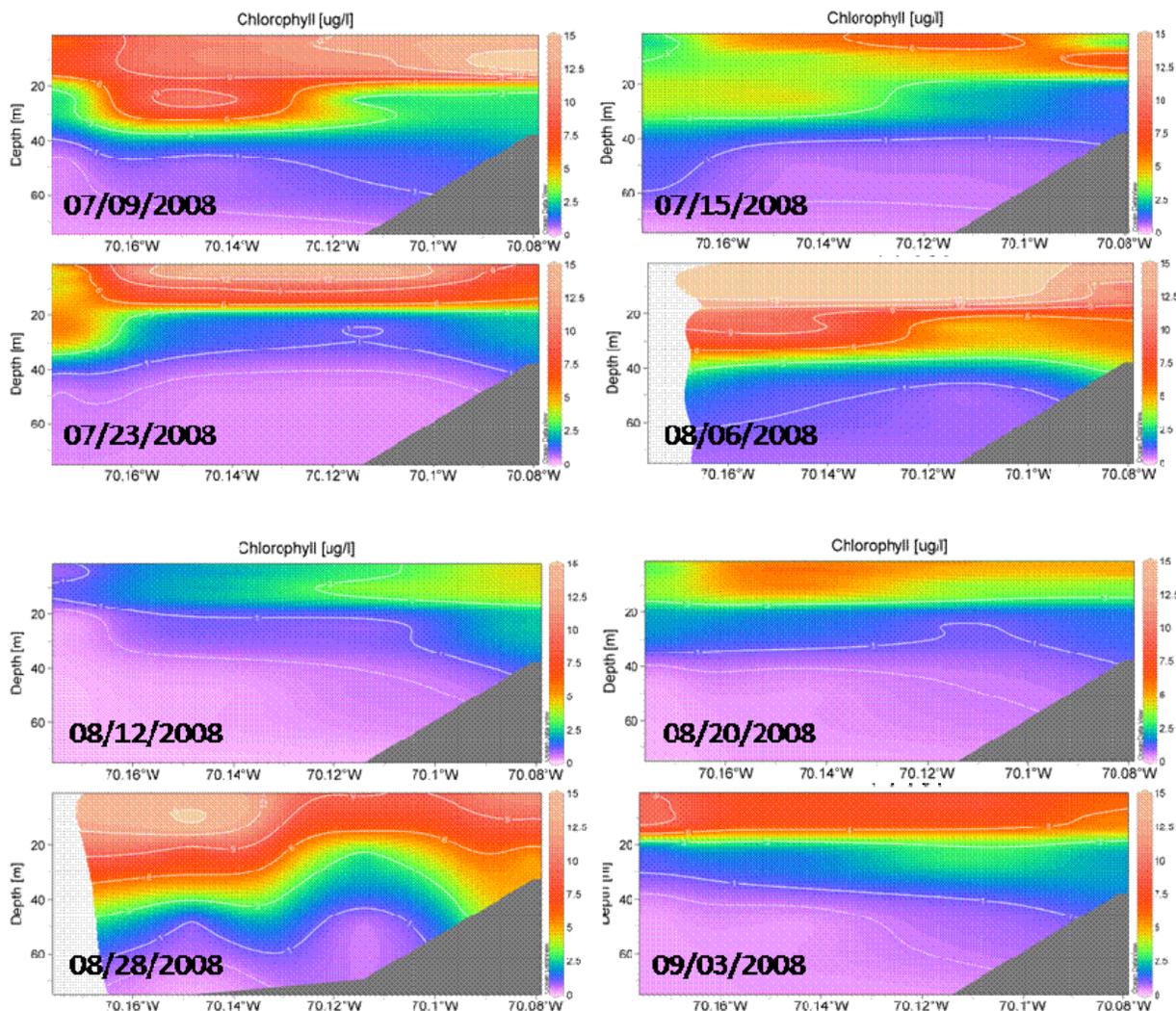


Figura 72. Distribución vertical de la sección frente a Chipana ($21^{\circ}20'S$), de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$), para los muestreos semanales.

El análisis temporal por estación en invierno de 2008, reveló que la variabilidad estuvo asociada a pulsos que coincidieron con la estructura termal, la cual reveló la ocurrencia de eventos de surgencia. Si bien esto se detectó en todas las estaciones, fue más evidente a 1, 3 y 5 mn de la costa (Figura 73A, Figura 73B y Figura 73C). En la estación de 7 mn se observaron sólo dos pulsos y los menores niveles de biomasa (Figura 73D).

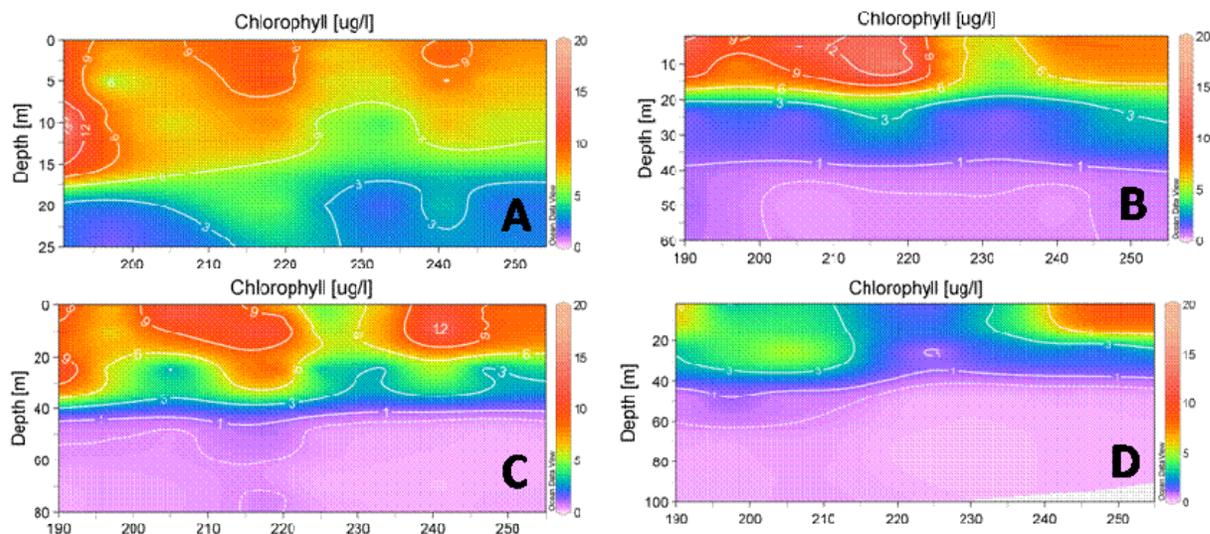


Figura 73. Distribución temporal de clorofila-a (µg/L) para las estaciones de la sección frente a Chipana (21°20'S). A: 1 mn, B: 3 mn, C: 5 mn, y D: 7 mn.

Las concentraciones de Cla en verano de 2009, fluctuaron entre un mínimo de 0,1 y un máximo de 123,6 µg Cl a/L, con un valor promedio de 4,62±9,77 µg Cl a/L. En general, con excepción de la campaña del 2 de febrero, las concentraciones se mantuvieron dentro del mismo rango, no observándose diferencias significativas entre semanas. Sin embargo, se evidenció un aumento en las magnitudes hasta alcanzar el máximo que correspondió a un evento de discoloración o marea roja ocasionado por dinoflagelados. En las semanas siguientes las concentraciones fueron similares a las detectadas al inicio de la serie (Tabla 4).

Tabla 4. Estadística descriptiva básica para los muestreos semanales.

Fecha	Máximos	Mínimos	Promedio	Desv. Est.
01/15/2009	9,09	0,18	3,06	3,16
01/23/2009	12,65	0,23	3,48	3,81
01/27/2009	12,80	0,10	2,94	3,62
02/10/2009	12,01	0,22	4,12	3,44
02/19/2009	15,80	0,36	4,49	4,40
02/24/2009	123,56	0,23	9,63	26,33
03/03/2009	29,91	0,25	5,06	6,94
03/16/2009	10,05	0,33	4,11	3,09
03/20/2009	19,27	0,25	4,25	4,35

En las secciones verticales se observa la presencia de los máximos a nivel subsuperficial, los cuales, en la medida que incrementaron en valor lo hicieron también en extensión costa afuera. Durante las dos campañas realizadas al comienzo de febrero, y que coincidieron con la presencia de la discoloración, se detectaron máximos subsuperficiales a 20 m y a 50 m de profundidad, lo cual se debió a la presencia de distintos grupos fitoplanctónicos (datos no incorporados en este informe). En las semanas siguientes la distribución vertical mostró nuevamente el patrón detectado al comienzo de la serie (Figura 74).

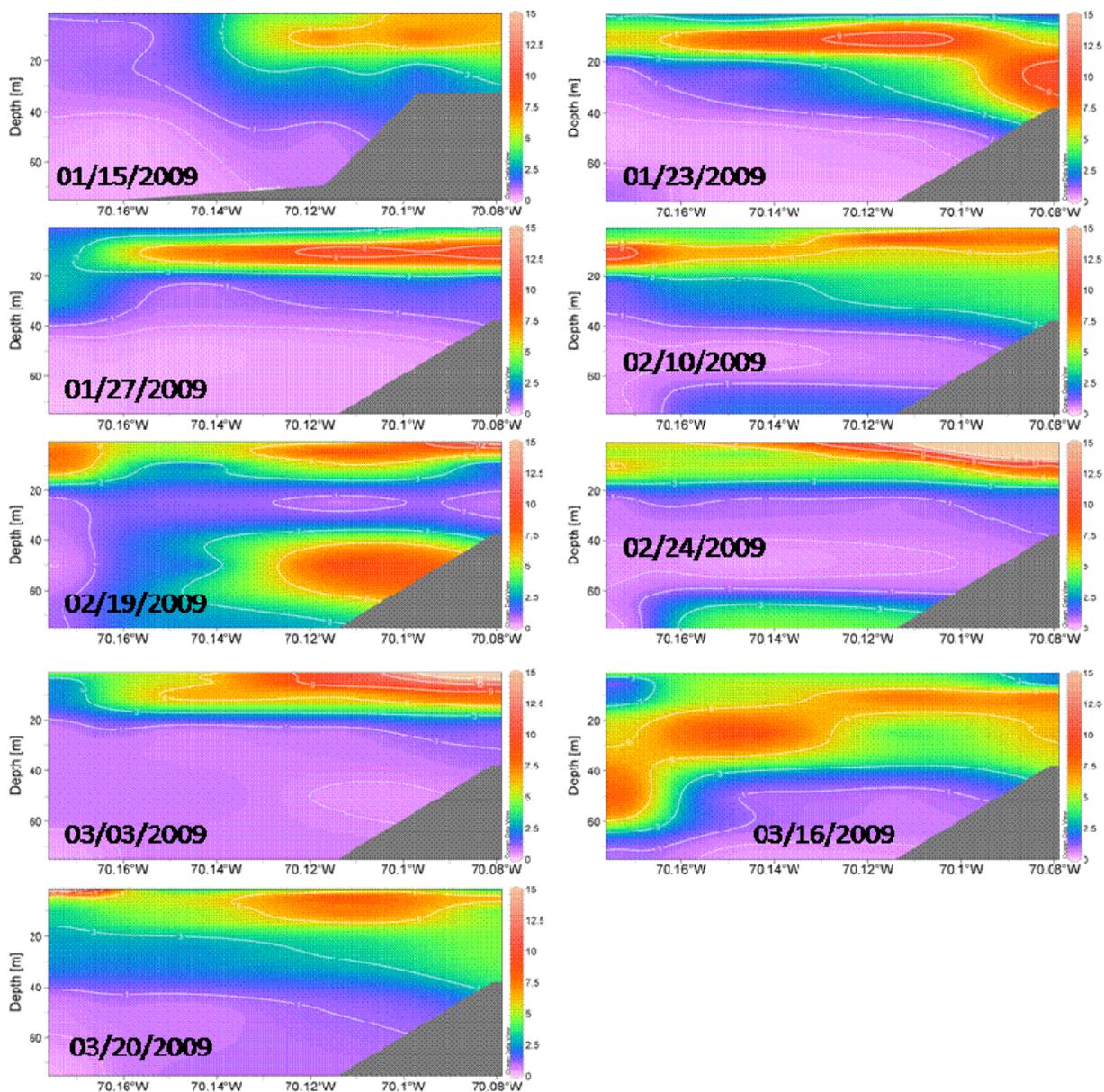


Figura 74. Distribución vertical de la sección frente a Chipana (21°20'S), de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$), para los muestreos semanales.

El análisis temporal por estación reveló que a 1 mn la biomasa fitoplanctónica mantuvo altas concentraciones durante todo el periodo ($>10 \mu\text{g Cl a/L}$), restringidos a los primeros 20 m de profundidad. A 3 y 5 mn de la costa la tendencia fue similar, observándose el desarrollo de un núcleo de altos valores bajo los 25 m que desapareció al finalizar la serie de tiempo. En la estación de 7 mn, al igual que en invierno, se observaron los menores niveles de clorofila-a y la presencia de un máximo subsuperficial hacia el final del periodo de estudio (Figura 75).

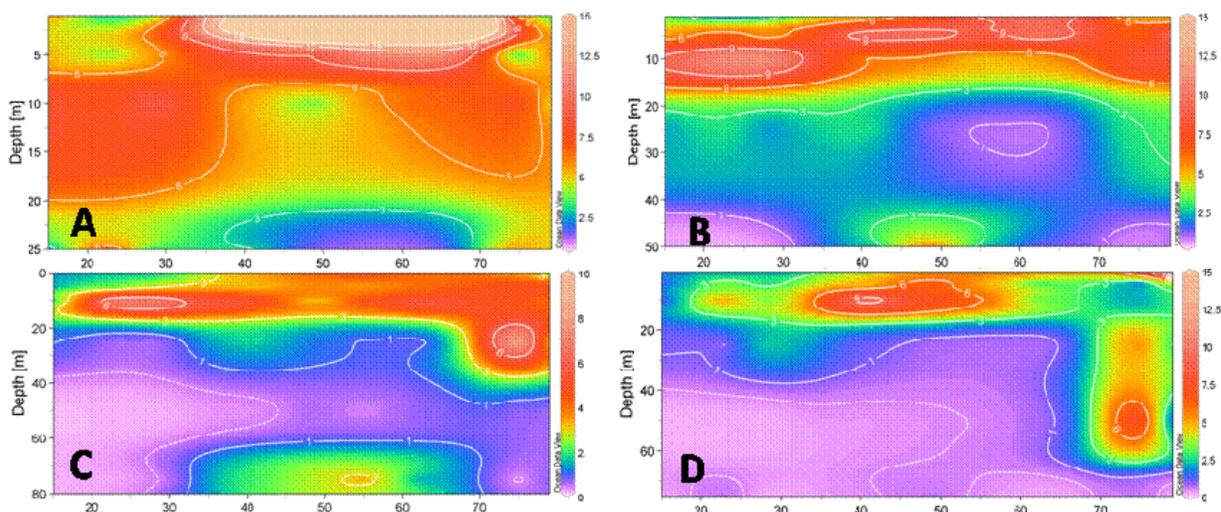


Figura 75. Distribución temporal de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) para las estaciones de la sección frente a Chipana ($21^{\circ}20'S$). A: 1 mn, B: 3 mn, C: 5 mn, y D: 7 mn.

1.2.3 Variabilidad temporal de huevos y larvas de anchoveta.

En los cruceros semanales en el invierno de 2008 y verano de 2009 (Figura 76 y Figura 77), la mayor cantidad de huevos se encuentran sobre la ZMO, aunque en el verano 2009 existe una mayor cantidad dentro de la ZMO, debido a una menor profundidad de esta.

Durante los muestreos semanales realizados en el 2008 las profundidades medias ponderadas se encuentran en la mayoría de los casos sobre la ZMO, a diferencia de lo que ocurre en el muestreo semanal realizado en el período verano 2009 en donde las profundidades medias ponderadas se

encuentran en su mayoría debajo de la ZMO, esto se debería principalmente a la menor profundidad de la ZMO.

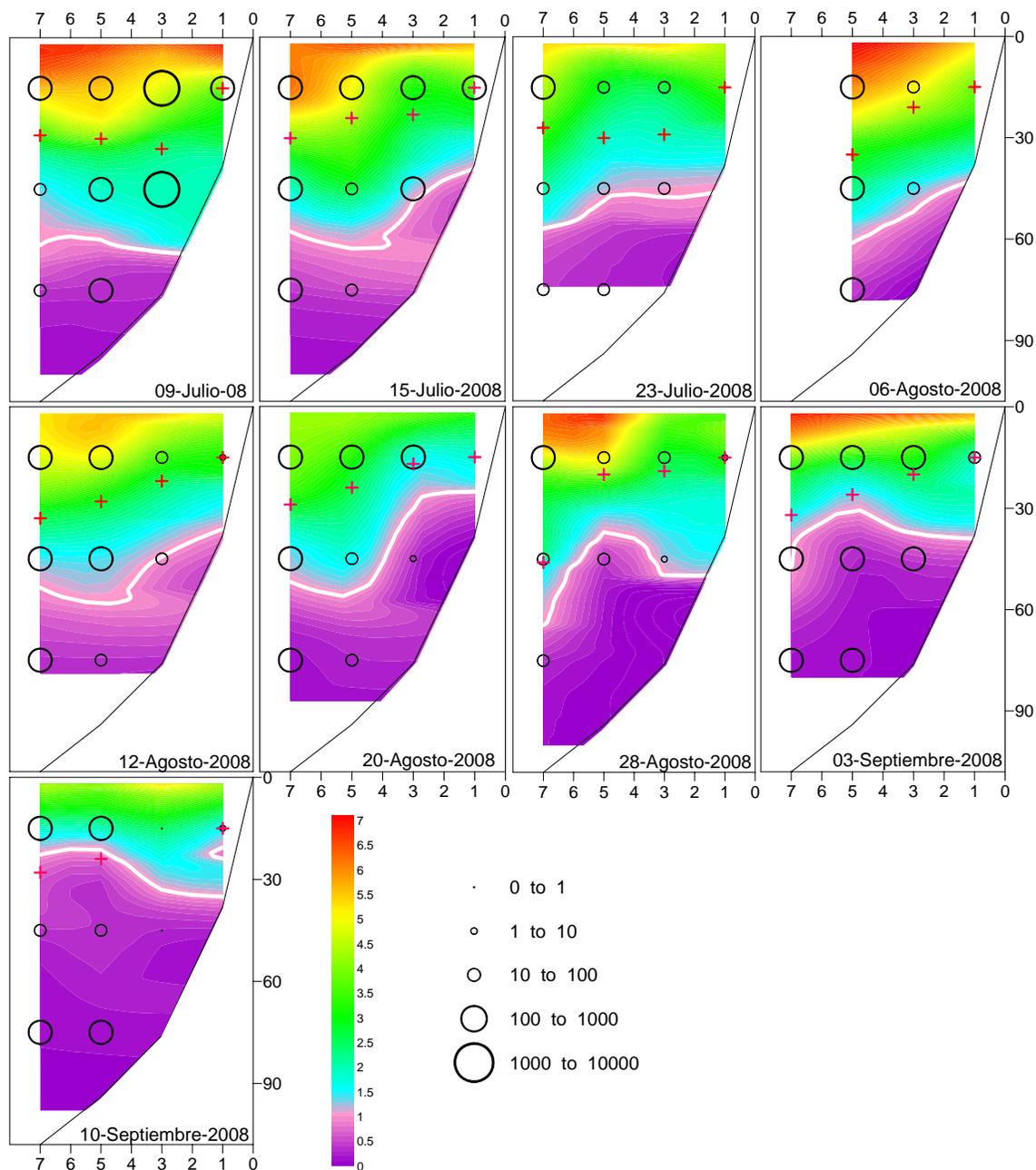


Figura 76. Distribución vertical de huevos de anchoveta en cruceros semanales 2008. Colores representan la concentración de oxígeno. Línea blanca es la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos ($N^{\circ}/10m^3$) y cruces la Profundidad Media Ponderada de la abundancia huevos (m).

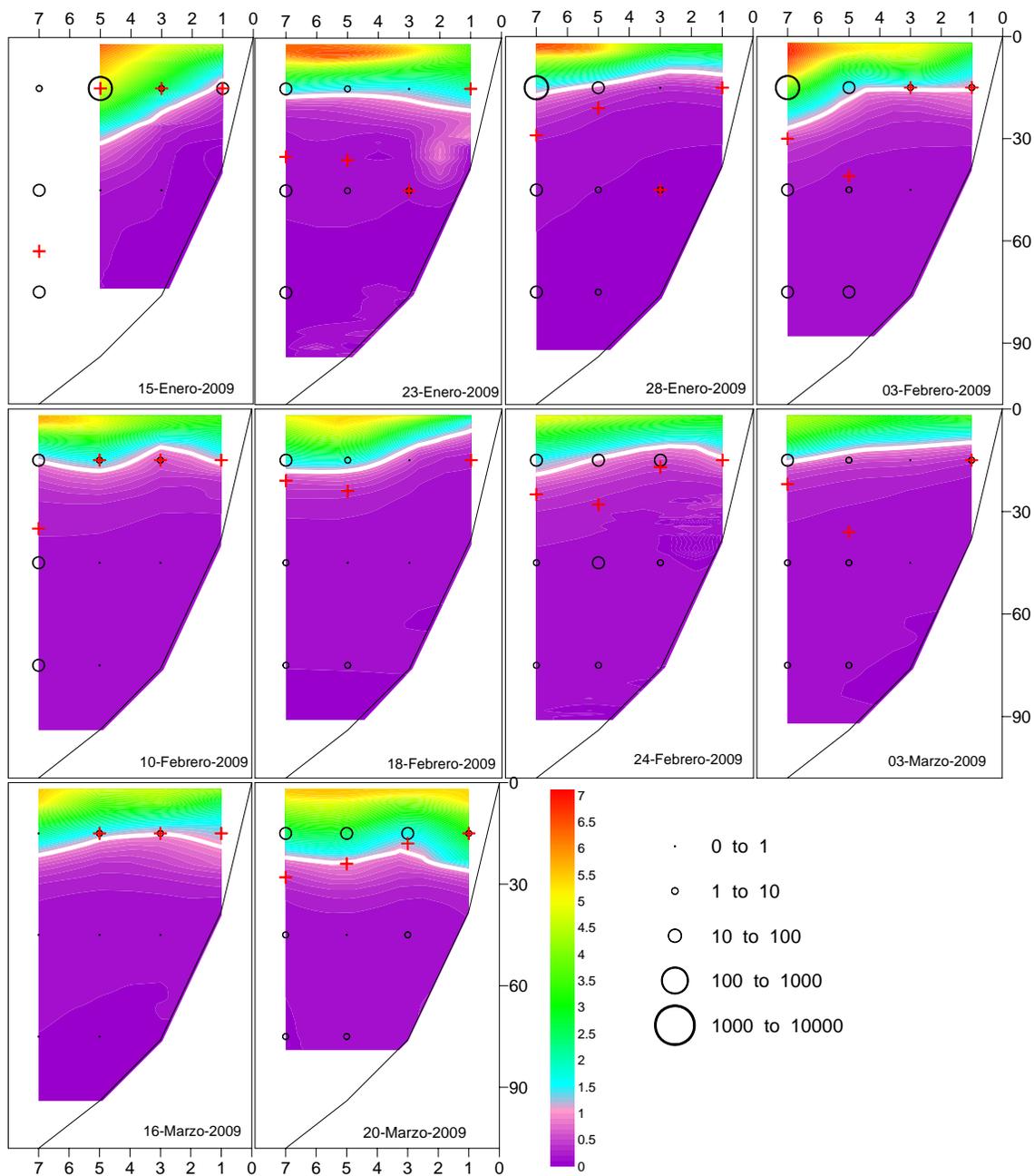


Figura 77. Distribución vertical de huevos de anchoveta en cruceros semanales 2009. Colores representan la concentración de oxígeno. Línea blanca es la isolínea de 1 ml/L de oxígeno. Círculos representan la abundancia de huevos ($N^{\circ}/10m^3$) y cruces la Profundidad Media Ponderada de la abundancia huevos (m).

La mayor abundancia de huevos en todas las semanas muestreada indica la mayor proporción de huevos en los primeros 30 m, con proporciones mayores al 60% (Figura 78) tanto en el 2008 como en el 2009. La proporción de huevos bajo los 60 m son inferiores al 20% y en muchos

casos menores al 10%. Concordante con lo anterior, las abundancias observadas durante los dos períodos de muestreo tienden a ser mayores en el primer estrato (0-30 m) tanto en las estaciones costeras como en las oceánicas y disminuyen con la profundidad (Figura 79), aunque para el caso del muestreo realizado durante el 2008 las abundancias de huevos son mayores que las presentes en el muestreo del 2009, por corresponder al pico reproductivo.

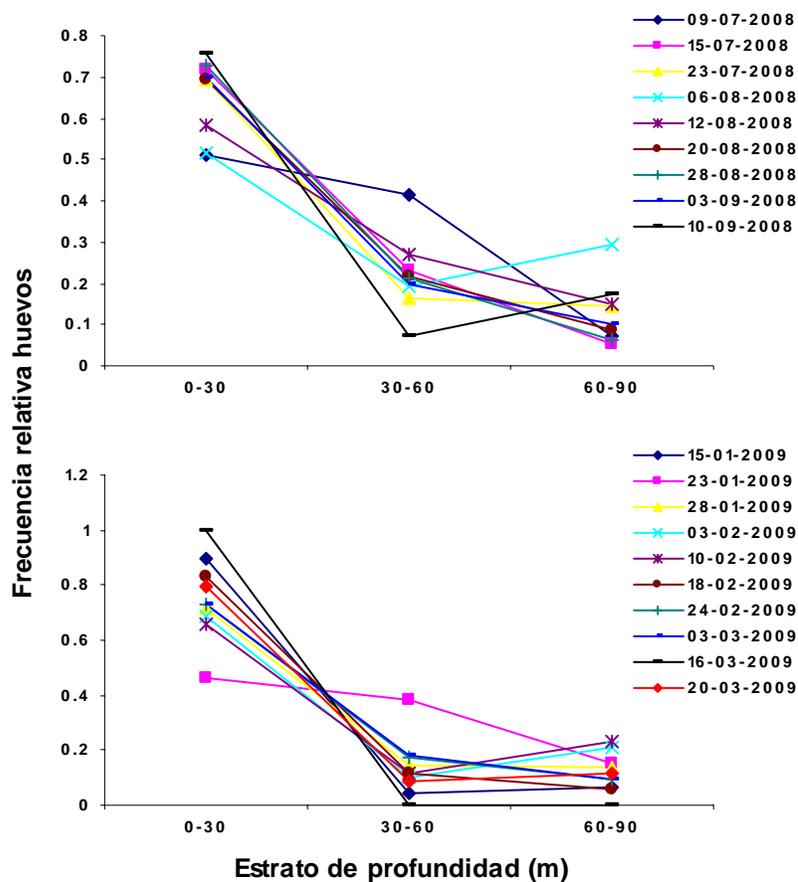


Figura 78. Frecuencia relativa de la abundancia de huevos por estrato de profundidad para cada semana muestreada en el 2008 (Arriba) y 2009 (Abajo).

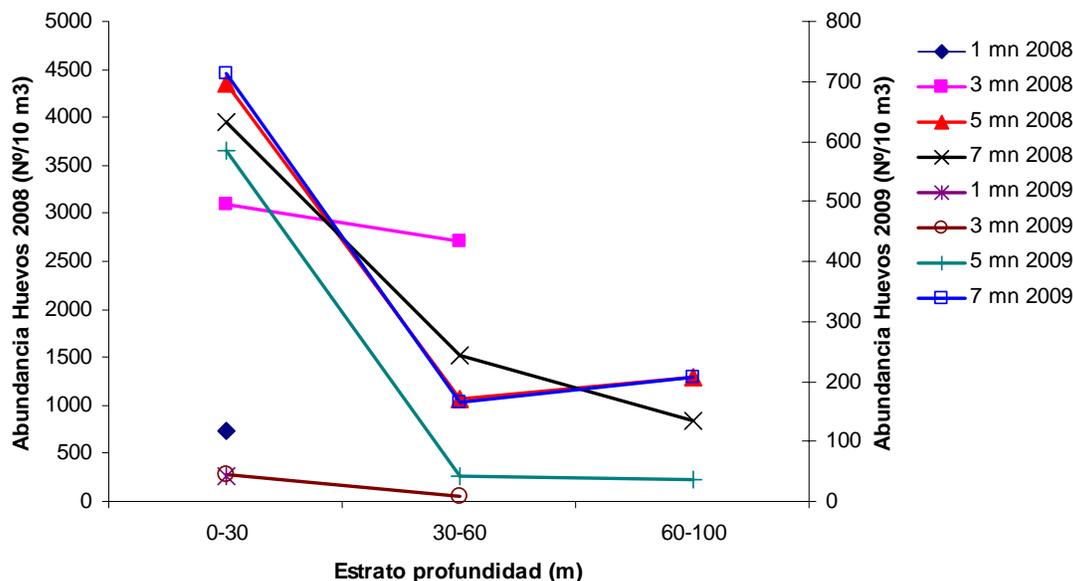


Figura 79. Abundancia de huevos para los muestreos semanales 2008 (Eje izquierdo) y 2009 (Eje derecho) en relación a la distancia de la costa (mn). Abundancias de los dos períodos de muestreo se muestran en distintos ejes debido a la menor abundancia en el 2009 (Verano).

La relación entre la concentración de oxígeno y la abundancia de huevos (Ln) durante los muestreos semanales realizados en los dos períodos no muestra ninguna relación (Figura 80). Sin embargo al igual que en los casos anteriores, existe una asociación negativa entre la abundancia de huevos y la de predadores (Figura 81), aún cuando aparece más débil debido a la escala temporal, en que pulsos de huevos correspondientes a desoves no tienen relación entre una semana y otra (i.e. no pertenecen a una misma cohorte o desove).

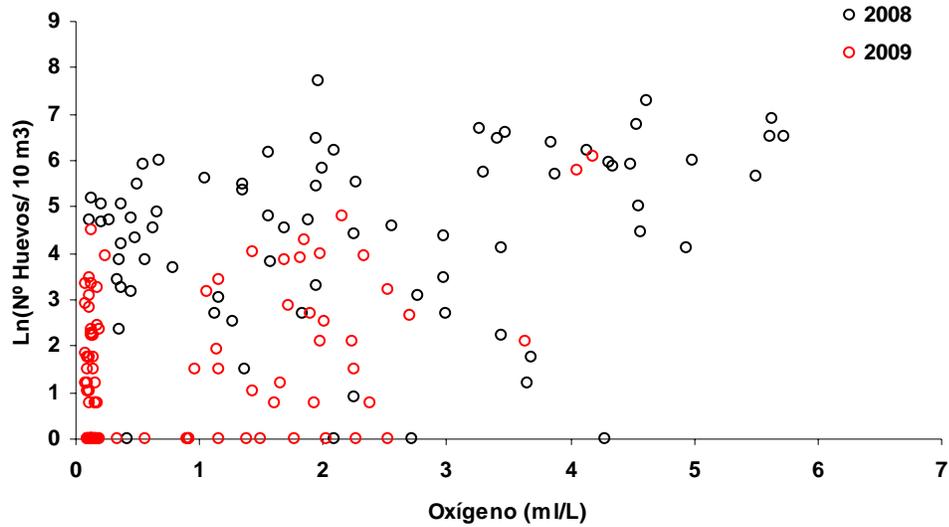


Figura 80. Relación entre la concentración de oxígeno (ml/L) y la abundancia de huevos de anchoveta ($\text{Ln}(\text{N}^\circ/10 \text{ m}^3)$), para los cruceros semanales en el 2008 (Negro) y 2009 (Rojo).

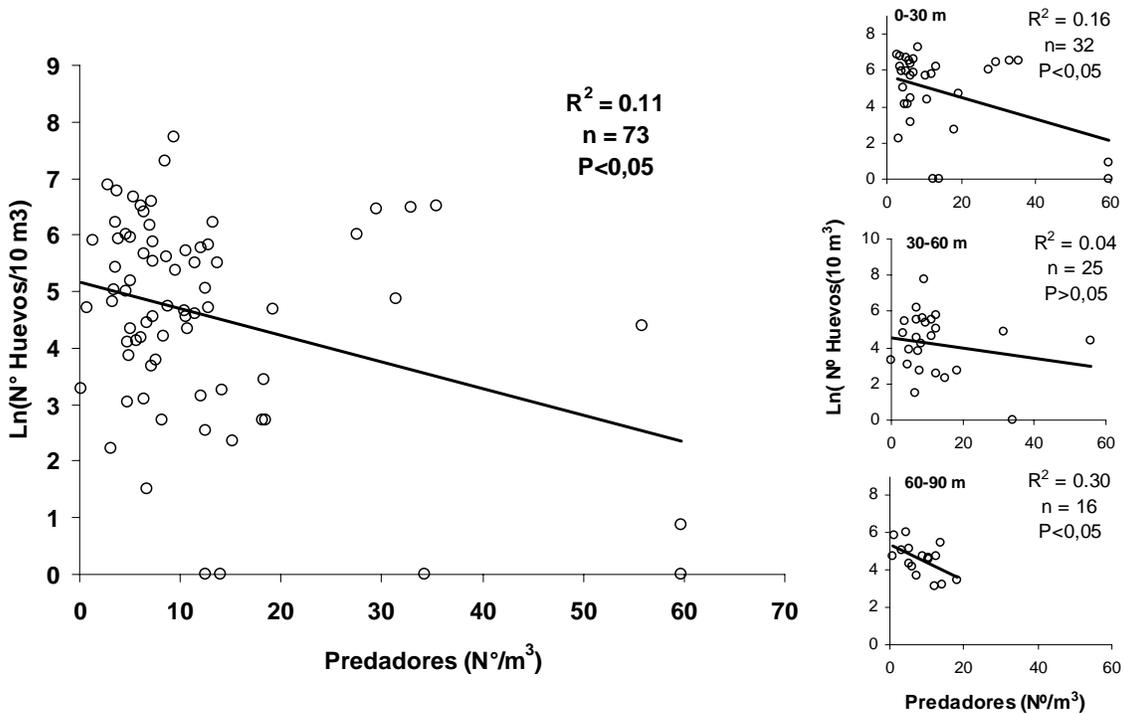


Figura 81. Relación entre la abundancia de predadores (Gelatinosos) y la abundancia de huevos de anchoveta para el muestreo semanal 2008. Izquierda todas las semanas y estratos agrupados. A la derecha en columna, las relaciones por estrato de profundidad. Todas las relaciones son significativas, excepto la del estrato 30-60 m.

1.3 Mortalidad *in situ* de huevos de anchoveta y potenciales depredadores asociada a cambios en la distribución espacial y temporal de la CMO.

1.3.1 Variabilidad diaria de las condiciones oceanograficas

Para la variabilidad temporal de las distribuciones verticales de la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y sigma-t, para el día y la noche se consideraron sólo los perfiles en donde se presentaron una mayor cantidad de huevos y larvas, para representar la variabilidad diurna y nocturna para el invierno de 2008. La ZMO en invierno de 2008 (verano 2009) se ubico a partir de 50 m (20m) de profundidad durante el día y a 60 m (25 m) de profundidad durante la noche, presentando una mayor variabilidad diurna (nocturna) que nocturna (diurna), asociada a los eventos de surgencia observados en el sector durante la evolución temporal de la distribución de los parámetros oceanográficos (Figura 84 a la Figura 85).

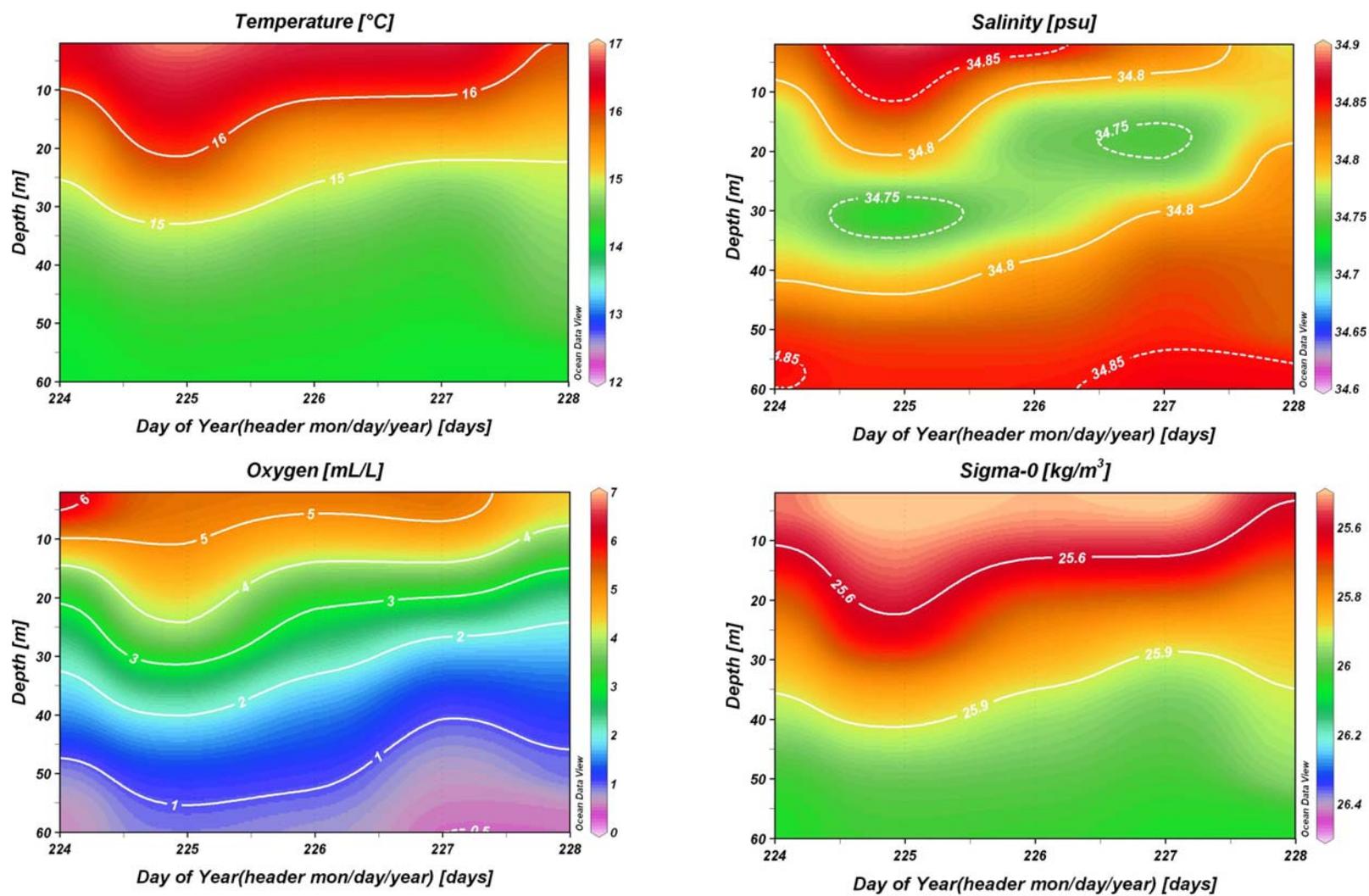


Figura 82: Serie de tiempo diurna de la distribución vertical en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 10 al 15 de agosto del 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.

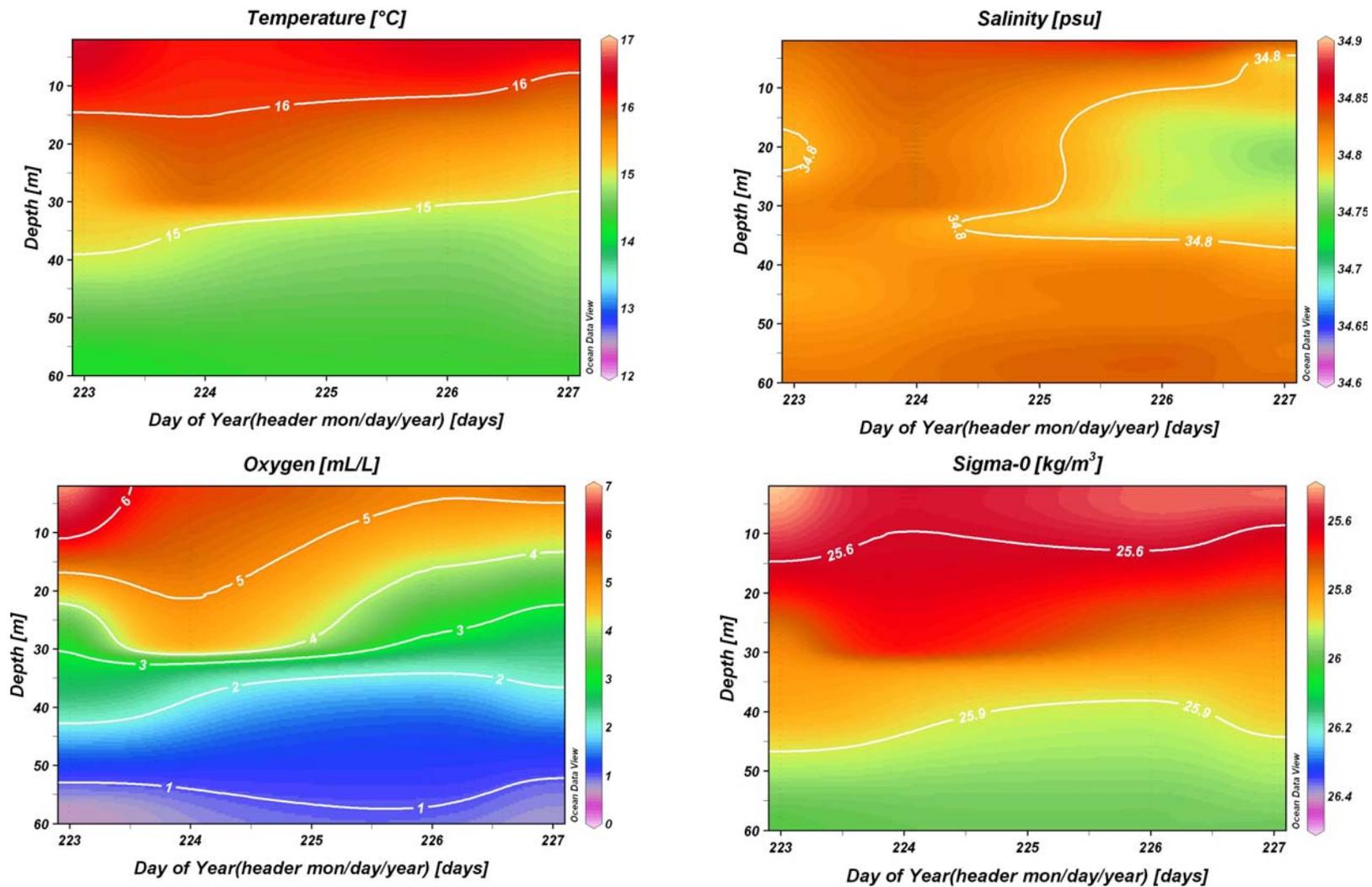


Figura 83: Serie de tiempo nocturna de la distribución vertical en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 10 al 15 de agosto del 2008. En la base de cada panel se indica el día del año.

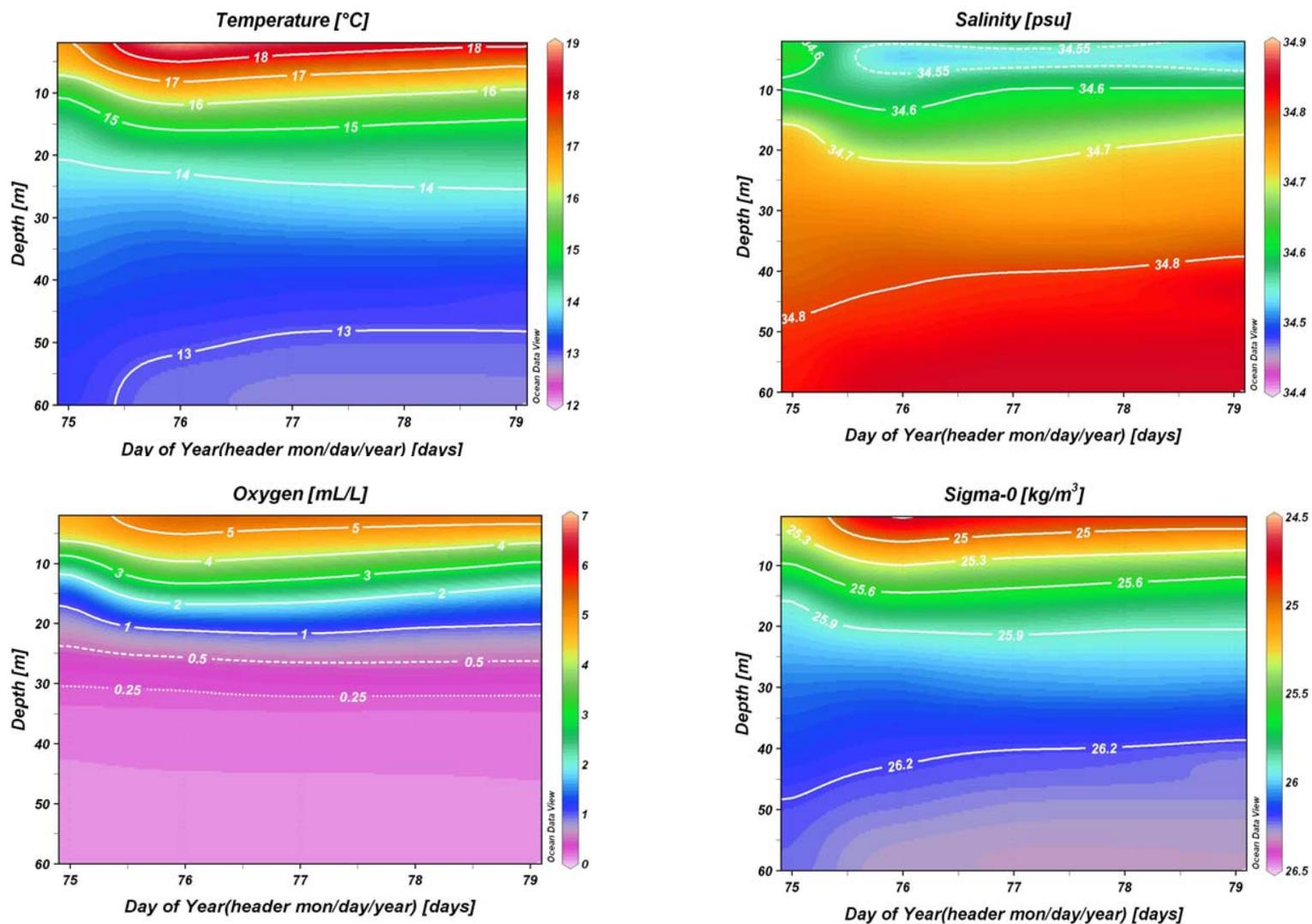


Figura 84: Serie de tiempo diurna de la distribución vertical en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 16 al 20 de enero del 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.

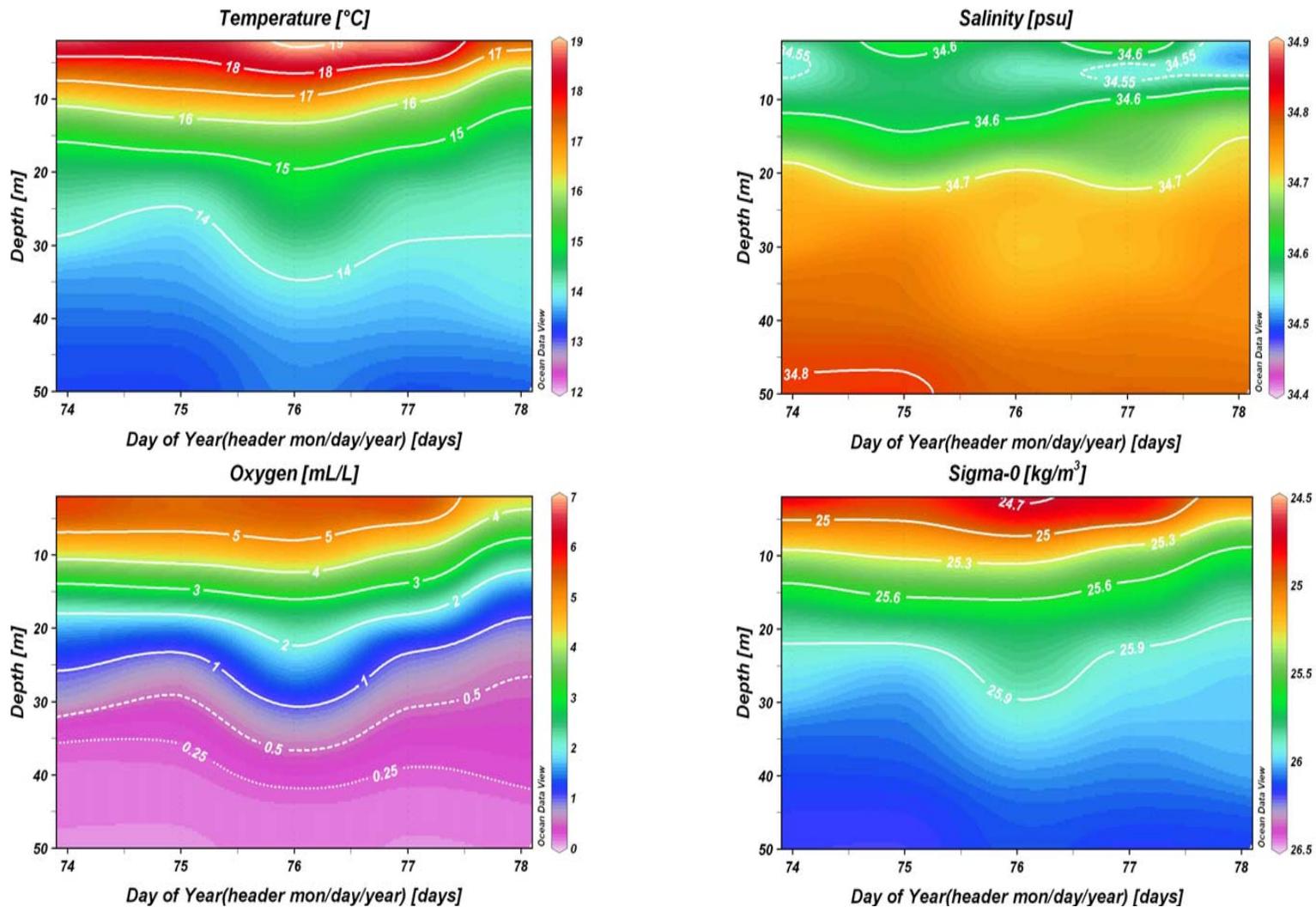


Figura 85: Serie de tiempo nocturna de la distribución vertical en la latitud 20° 18'S de: a) Temperatura (°C), Salinidad (psu), Oxígeno Disuelto (mL/L) y Densidad (kg/m³) entre el 15 de enero al 20 de marzo de 2009. En la base de cada panel se indica el día del año.

1.3.2 Variabilidad diaria de huevos y larvas de anchoveta.

Durante los muestreos diarios realizados en el 2008 y 2009 las abundancias de huevos obtenidas de día son similares a las de noche (Figura 86), mostrando pulsos correspondientes a desoves (ej: 13-08-08).

Al asignar edad a los huevos en función del estadio y la temperatura de colecta, se estiman tasas de mortalidad de 43 y 69% diaria en el 2008 y 2009 respectivamente (Figura 87). Lamentablemente no se puede establecer relaciones entre estas tasas de mortalidad y factores ambientales debido a tener solamente dos puntos.

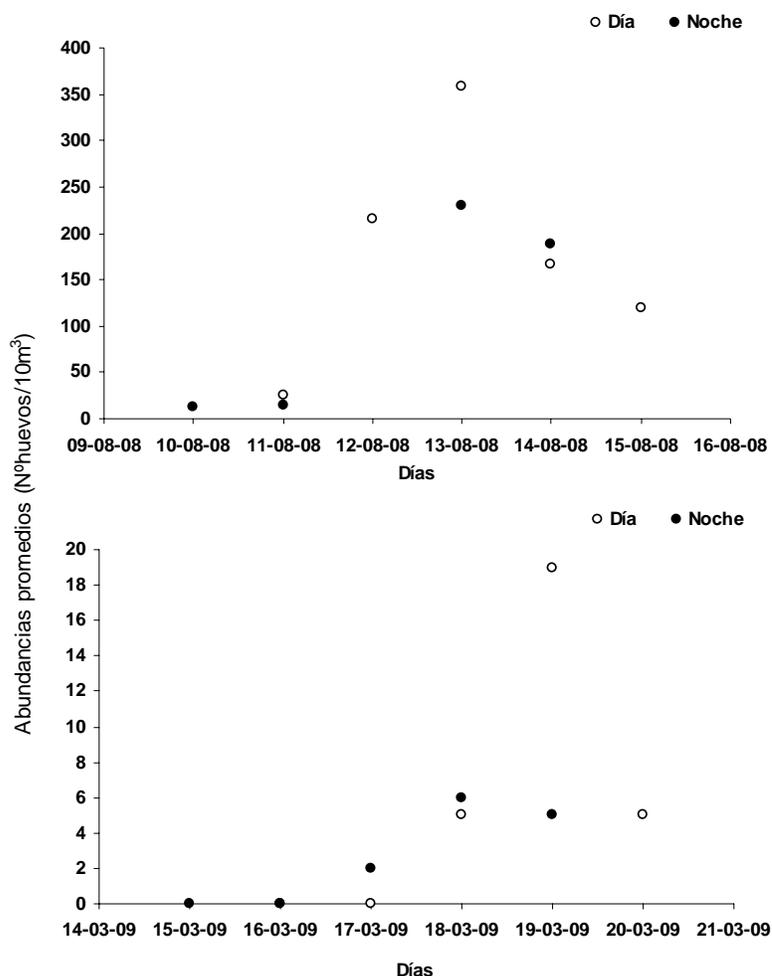


Figura 86. Abundancias promedio para los muestreos de día y de noche efectuados en los muestreos diarios del 2008 y 2009.

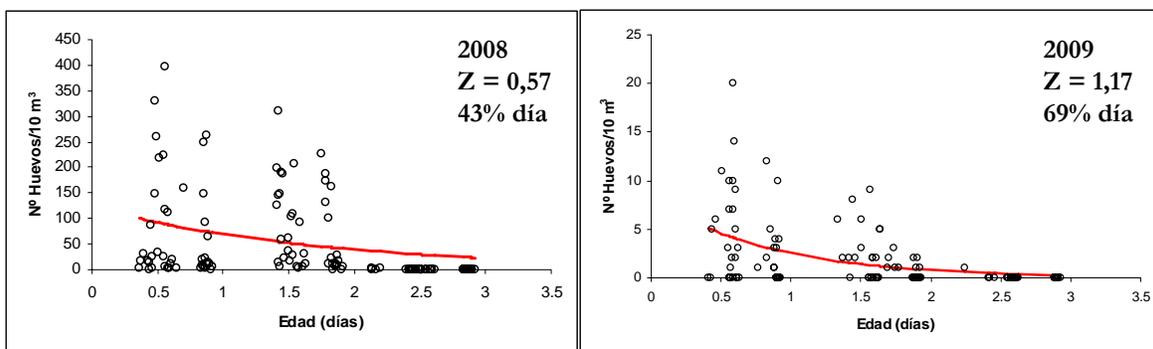


Figura 87. Abundancia de huevos en función de su edad (días). Z = tasa de mortalidad instantánea de huevos según ajuste no lineal del decaimiento exponencial en la abundancia de huevos.

Al igual que en los casos anteriores, no se encuentra ninguna relación entre la concentración de oxígeno y la abundancia de los huevos de anchoveta (Figura 88). Situación que cambia totalmente al establecer la asociación con la abundancia de predadores, la cual se da en términos del total de huevos (Figura 89), como con los huevos agrupados por edad (días), estableciéndose relaciones negativas con pendientes significativas ($P \leq 0,05$) tanto para los huevos menores a 1 día, como aquellos entre 1 y 2 días (Figura 89). Incluso para cada día de muestreo se observa el efecto de predación sobre los huevos (Figura 90). El análisis de preferencia-Rechazo indica un rechazo significativo ($P = 0,015$ en base a 2000 remuestreos) para abundancias de predadores mayores a 10 ind/m^3 (Figura 91).

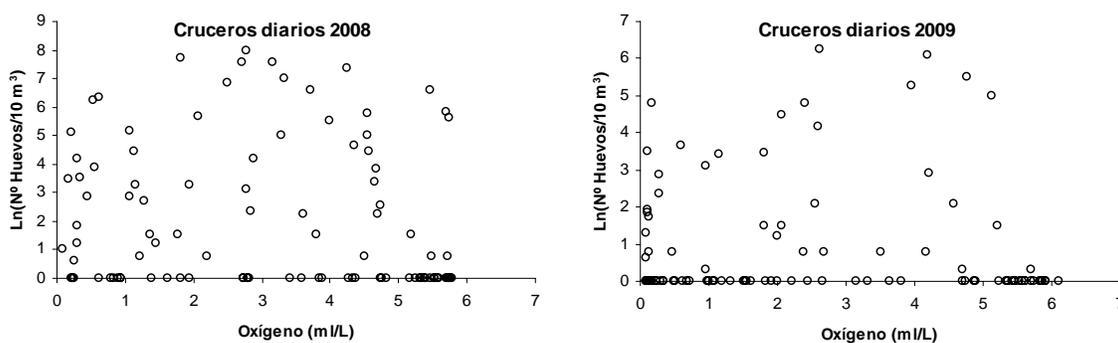


Figura 88. Relación entre la abundancia de huevos (Ln) y la concentración de oxígeno (ml/L) para los muestreos diarios del 2008 y 2009.

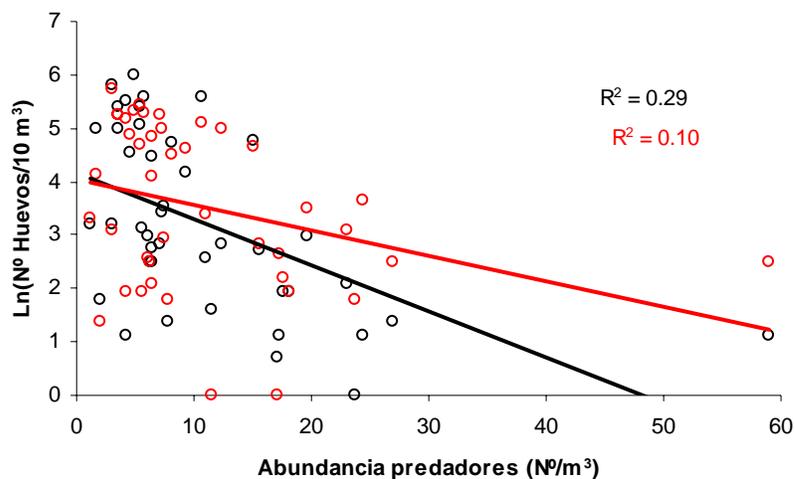


Figura 89. Relación entre la abundancia de huevos (Ln) y de predadores para huevos agrupados según edad. Menores a 1 día (Círculos negros) y entre 1 y 2 días (Círculos rojos).

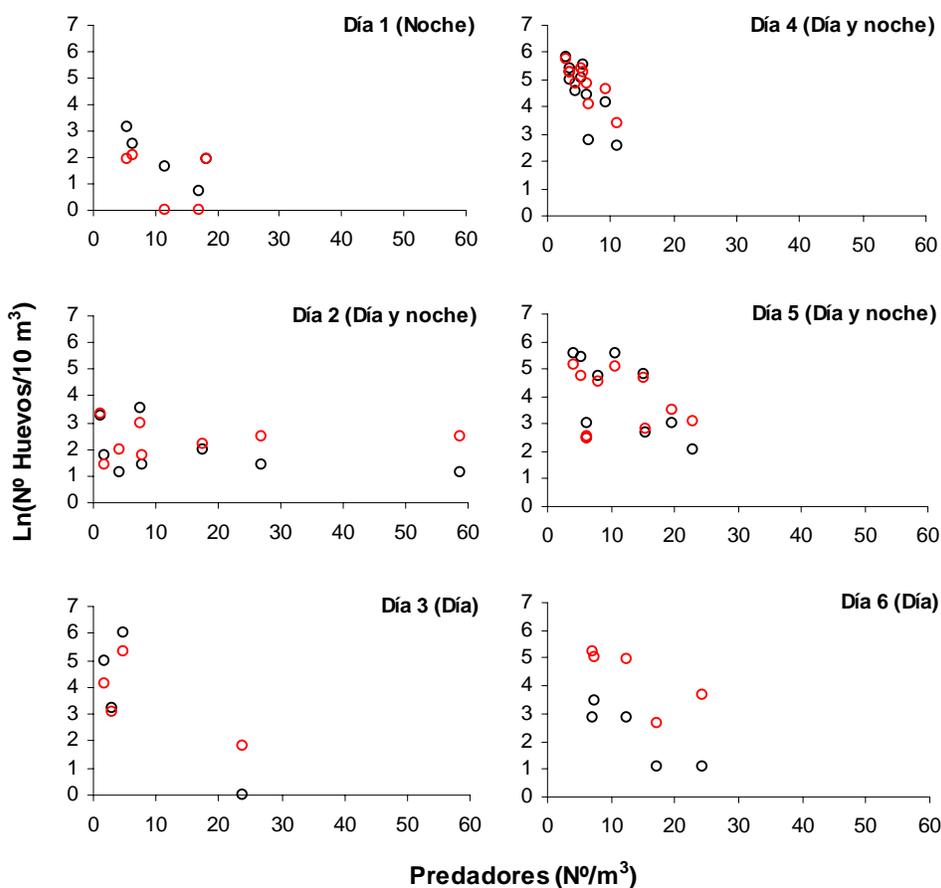


Figura 90. Relación entre la abundancia de huevos (Ln) y de predadores para huevos agrupados según edad, para cada día de muestreo. Menores a 1 día (Círculos negros) y entre 1 y 2 días (Círculos rojos).

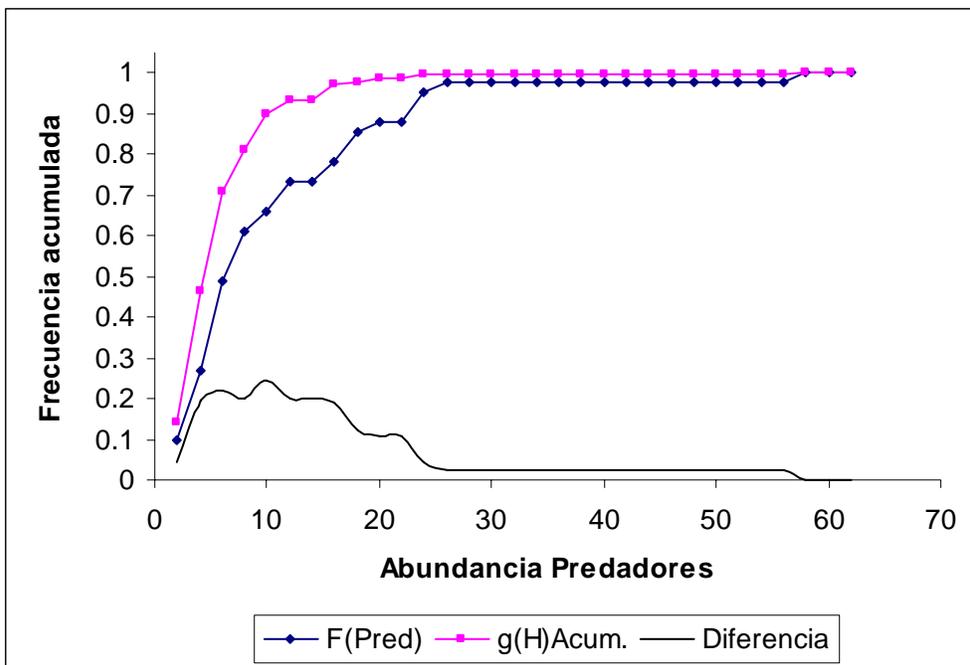


Figura 91. Análisis de preferencia-Rechazo para abundancia de huevos y predadores. Rechazo se produce a una abundancia de predadores mayor a 10 ind/m³ con una probabilidad de 0,015 en base a 2000 remuestreos (P<0,05).

Al igual que en el caso de los huevos, la distribución vertical y horizontal de las larvas con saco vitelino, pre y postflexión no presentan relación con la profundidad de la ZMO o la concentración de oxígeno. Las larvas con saco vitelino (yok sac) muestran una asociación negativa con la abundancia de predadores (Figura 92), que se pierde en las larvas en estadios más avanzadas (Figura 93), debido a que estas ya presentan cierta capacidad de movimiento y por tanto de escape.

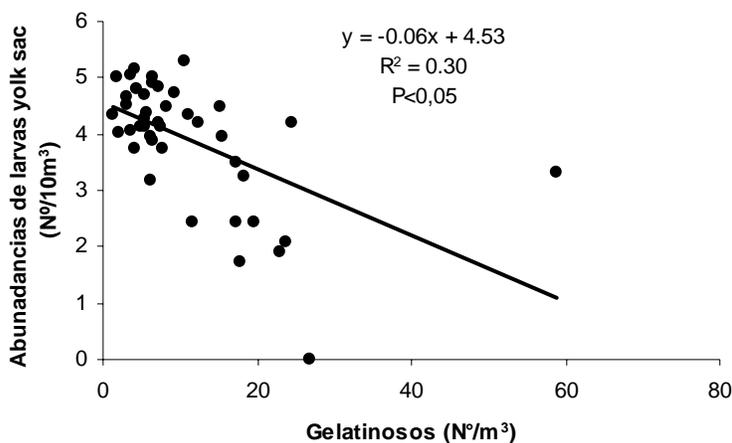


Figura 92. Relación entre la abundancia de larvas en estado de saco vitelino (yolk sac) y de predadores para los cruceros diarios del 2008.

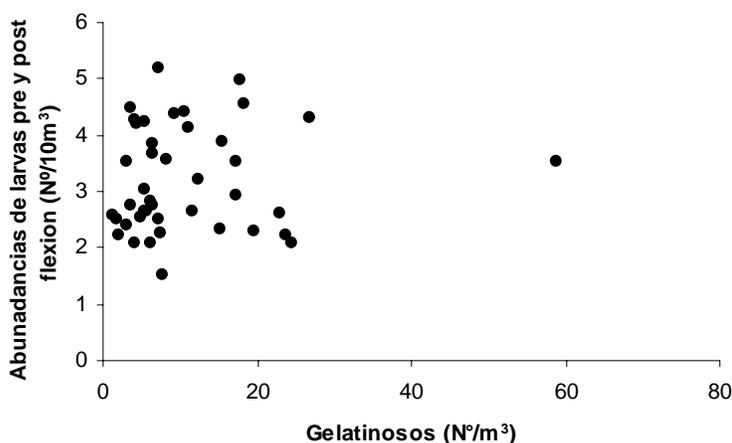


Figura 93. Relación entre la abundancia de larvas en estado de pre y postflexión y de predadores para los cruceros diarios del 2008.

1.3.3 Variabilidad temporal del zooplancton gelatinoso

El muestreo temporal incluyó la escala semanal y diaria para efectos de estimaciones de mortalidad natural de huevos de anchoveta. El muestreo semanal de invierno del 2008 mostró que en la 4 estaciones de monitoreo semanal el grupo dominante fue de sifonóforos con una abundancia promedio de 6.3 individuos por metro cúbico y representando el 56% del zooplancton

gelatinoso, seguido por los quetognatos con 3.4 individuos por metro cúbico y un 30% de abundancia relativa. Los cambios semanales de estos 2 componentes, para los 3 estratos de muestreo y asociados a la profundidad del CMO se muestran en la Figura 94. Interesante notar en esta figura que la relación entre las abundancia de estos componentes varía dependiendo del estrato de estudio. Por ejemplo los quetognatos en la capa de 30 m parecen variar acorde con la CMO, mientras que los sifonóforos en este mismo estrato muestran una relación negativa con la ZMO.

Los cnidarios y ctenóforos en el muestreo semanal fueron escasos con abundancia inferiores a 2 individuos por metro cúbico en promedio, con excepción de la última semana de muestreo en septiembre 2008, cuando los cnidarios aumentaron hasta cerca de 11 individuos por metro cúbico en el estrato más superficial (Figura 95).

La relación entre los cambios semanales en abundancia de los gelatinosos es mayormente negativa con la profundidad de la CMO, como se muestra en la Figura 96, sugiriendo que estas abundancias incrementan cuando la CMO se hace más somera.

En la escala inter-diaria observada a través del muestreo diario realizado entre el 10 y 15 de agosto del 2008, se encontró que tanto los sifonóforos como los cnidarios fueron dominantes con abundancias cercanas a 0.8 individuos por metro cúbico y representando entre ambos cerca del 85% de los gelatinosos. En general se observa una alta varianza en los cambios inter-diarios, tal que no se observan cambios significativos entre los días de muestreo, a juzgar por los límites de confianza de cada muestreo (Figura 97).

Para el muestreo de verano del 2009 se analizó el zooplancton gelatinoso para el seguimiento semanal (10 semanas) en 4 estaciones de monitoreo. El 89.9% de la abundancia estuvo representada por los sifonóforos con una abundancia promedio de 19.8 individuos por metro cúbico, llegando a alcanzar hasta un máximo de 350 individuos por metro cúbico hacia fines de marzo en el estrato superficial. Un 8% de la abundancia fue representada por quetognatos y cnidarios, mientras que ctenóforos sólo contribuyeron con <1% a la abundancia total de gelatinosos.

Cabe destacar que la CMO se encontró muy somera en el verano, con valores usuales menores a 20 m y en varias ocasiones cercana a los 10 m de profundidad. En esta condición los quetognatos y sifonóforos presentaron abundancia con pocas fluctuaciones la mayor parte del período (enero-marzo 2009), aunque hacia finales de marzo cuando la CMO tendió a profundizarse, ellos se incrementaron, principalmente en el estrato superficial (Figura 98). Los cnidarios y ctenóforos con bajas abundancias presentaron exactamente el mismo patrón semanal (Figura 99).

La constancia de una CMO muy somera la mayor parte del período de muestreo semanal de verano, con solo 3 eventos de profundización (Figura 98 y Figura 99) resultó en una baja correlación con las abundancias de los componentes gelatinosos, como se muestra en la Figura 100.

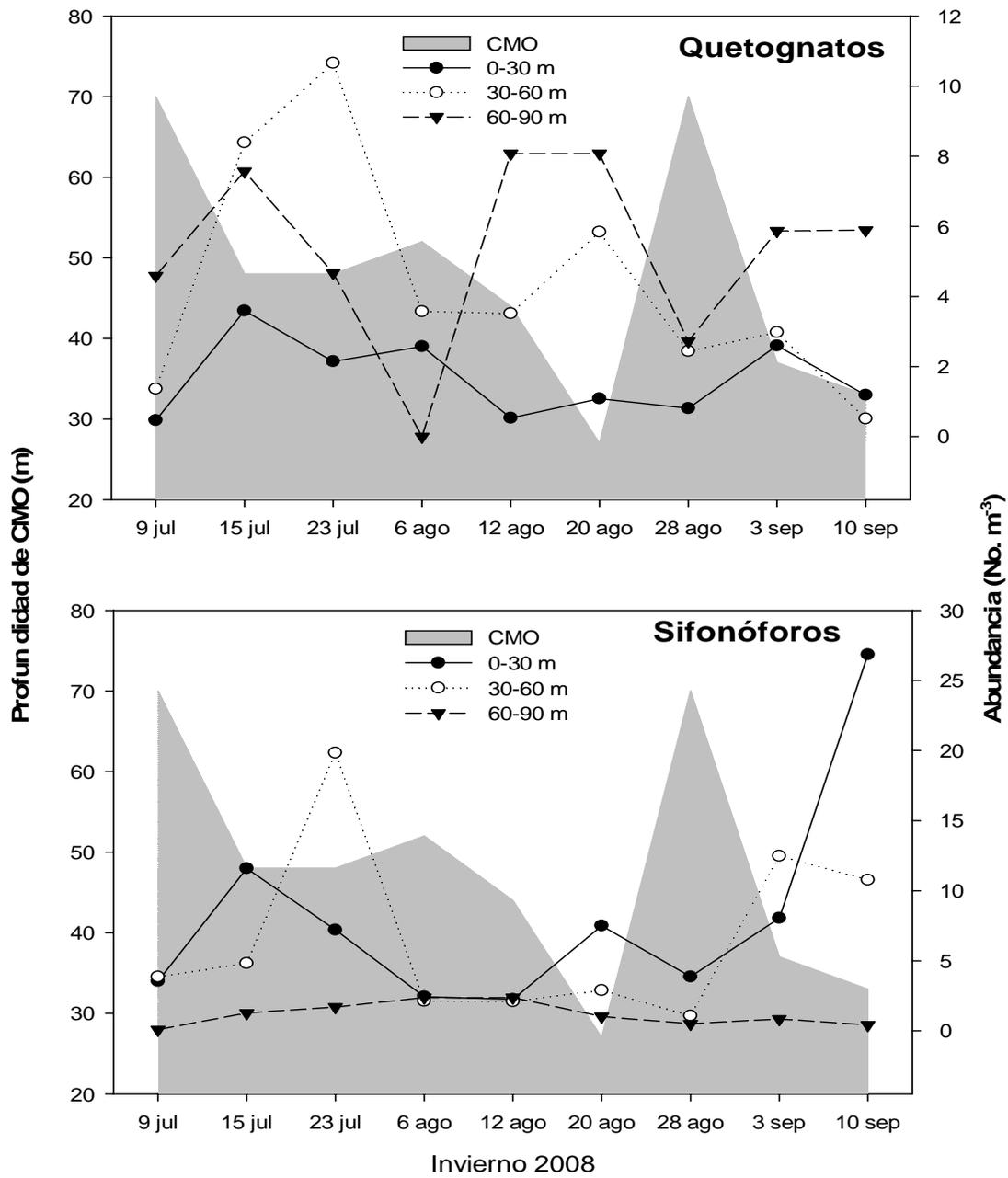


Figura 94. Variación semanal en componentes del zooplancton gelatinoso capturado en invierno del 2008 frente a la zona de El Loa (21°S) en 3 estratos de profundidad.

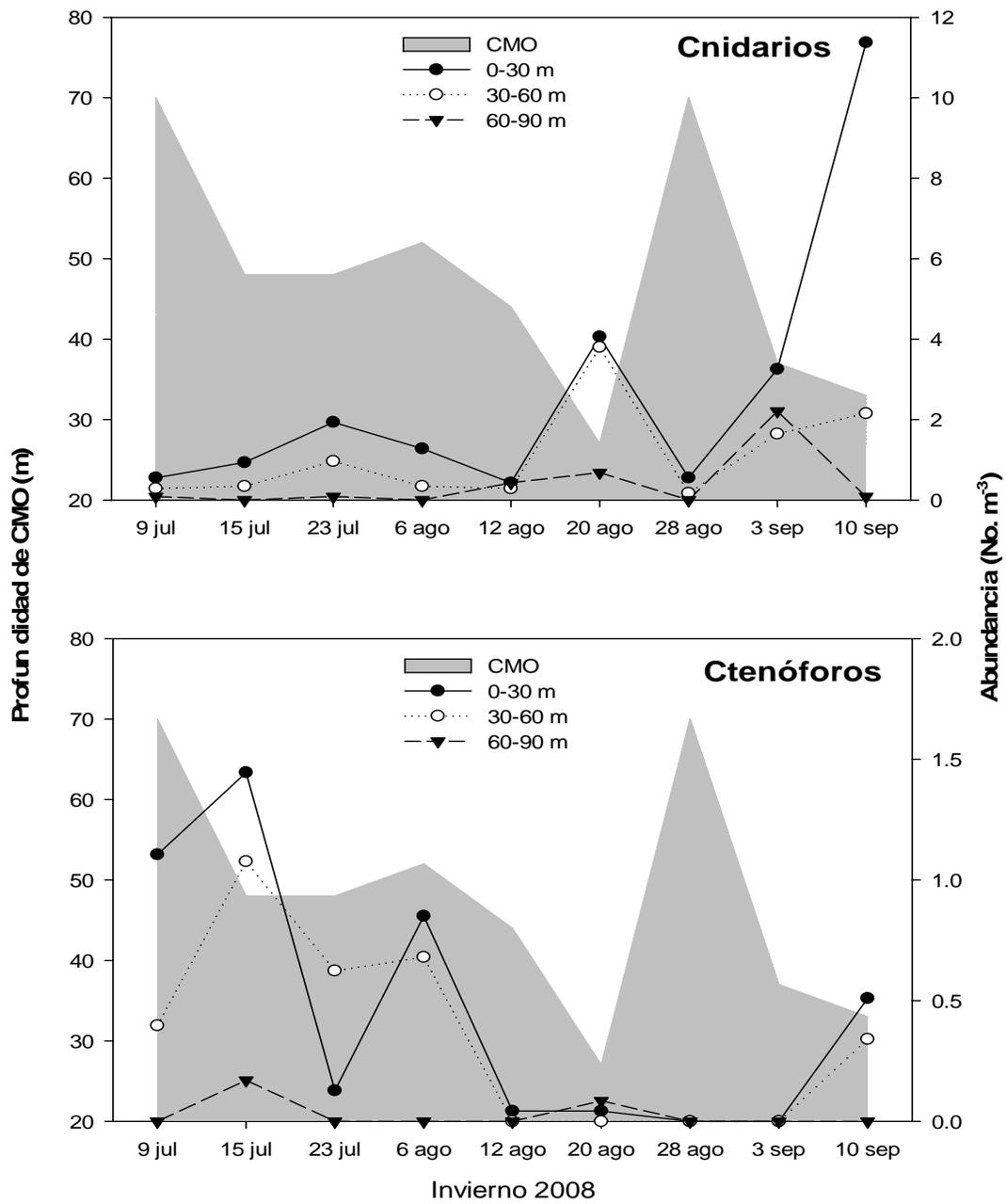


Figura 95. Variación semanal en componentes del zooplancton gelatinoso capturado en invierno del 2008 frente a la zona de El Loa (21°S) en 3 estratos de profundidad.

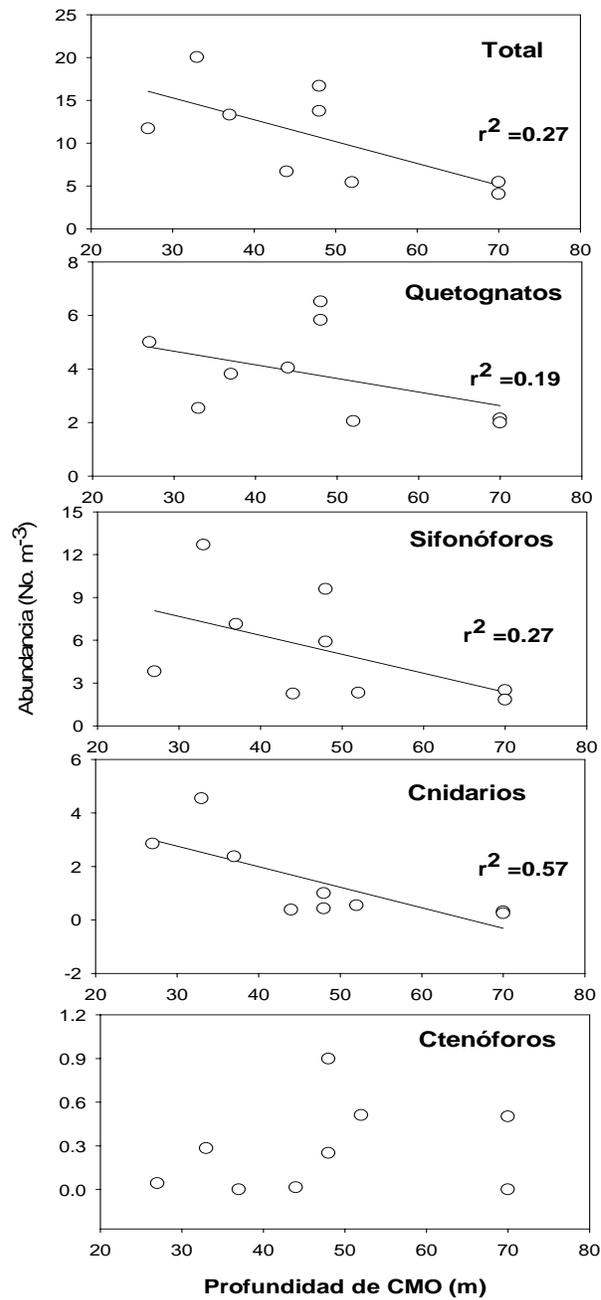


Figura 96. Relación entre el zooplancton gelatinoso y la profundidad de la CMO en la zona más somera (<50 m) frente a la zona de El Loa (21°S) a través de una serie semanal entre julio y septiembre del 2008.

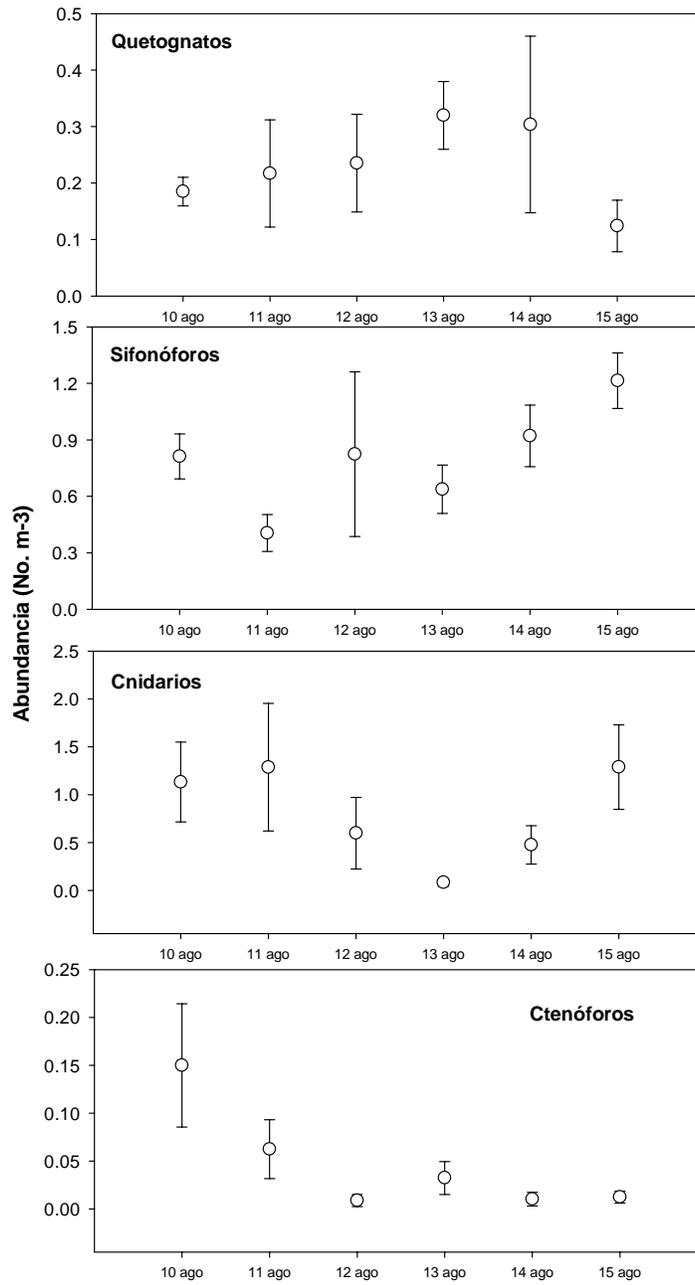


Figura 97. Variaciones diarias en la abundancia del zooplancton gelatinoso en la zona más somera (<50 m) frente a la zona de El Loa (21°S) a través de una serie diaria durante el invierno del 2008.

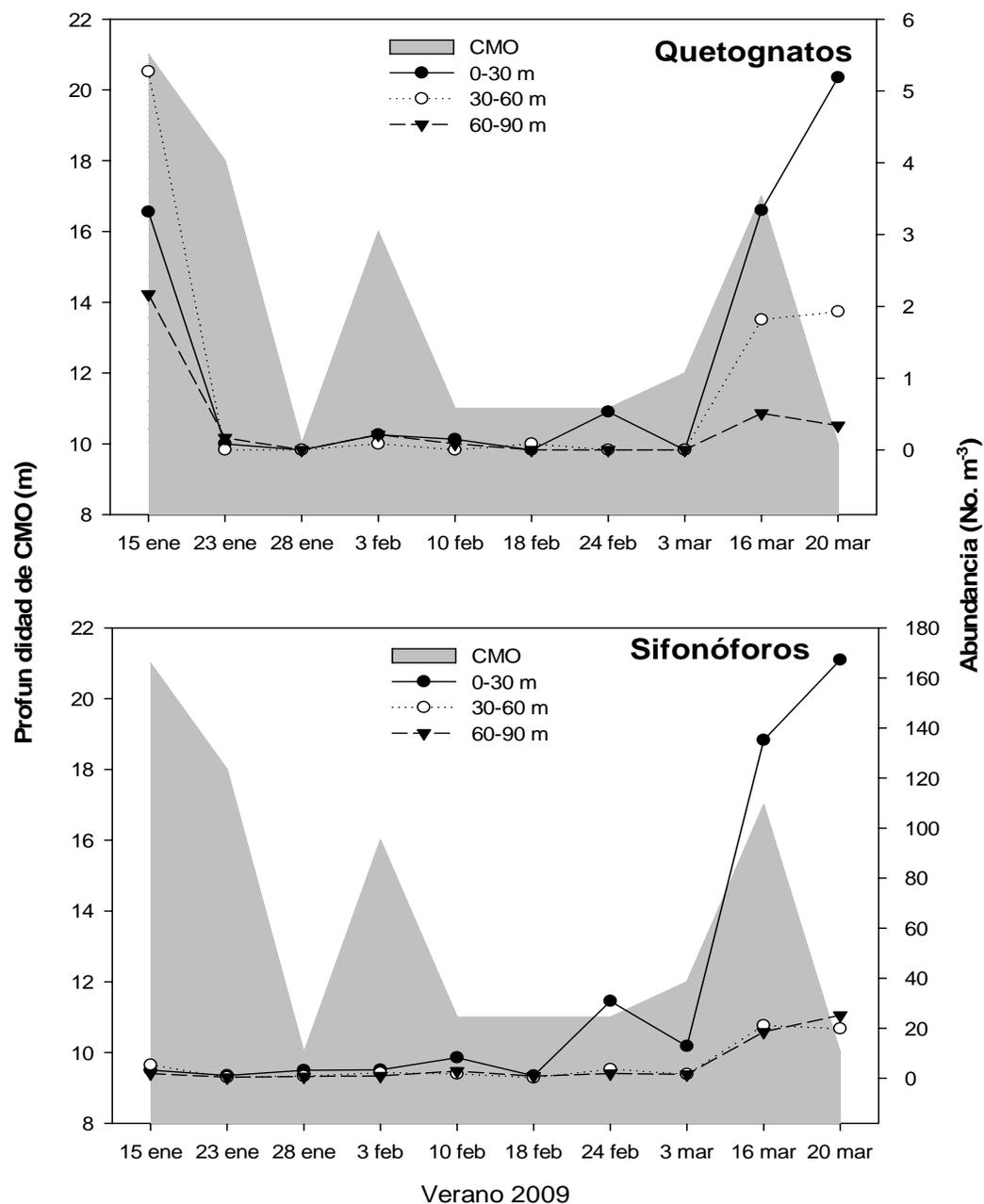


Figura 98. Variación semanal en componentes del zooplancton gelatinoso capturado en verano del 2009 frente a la zona de El Loa (21°S) en 3 estratos de profundidad.

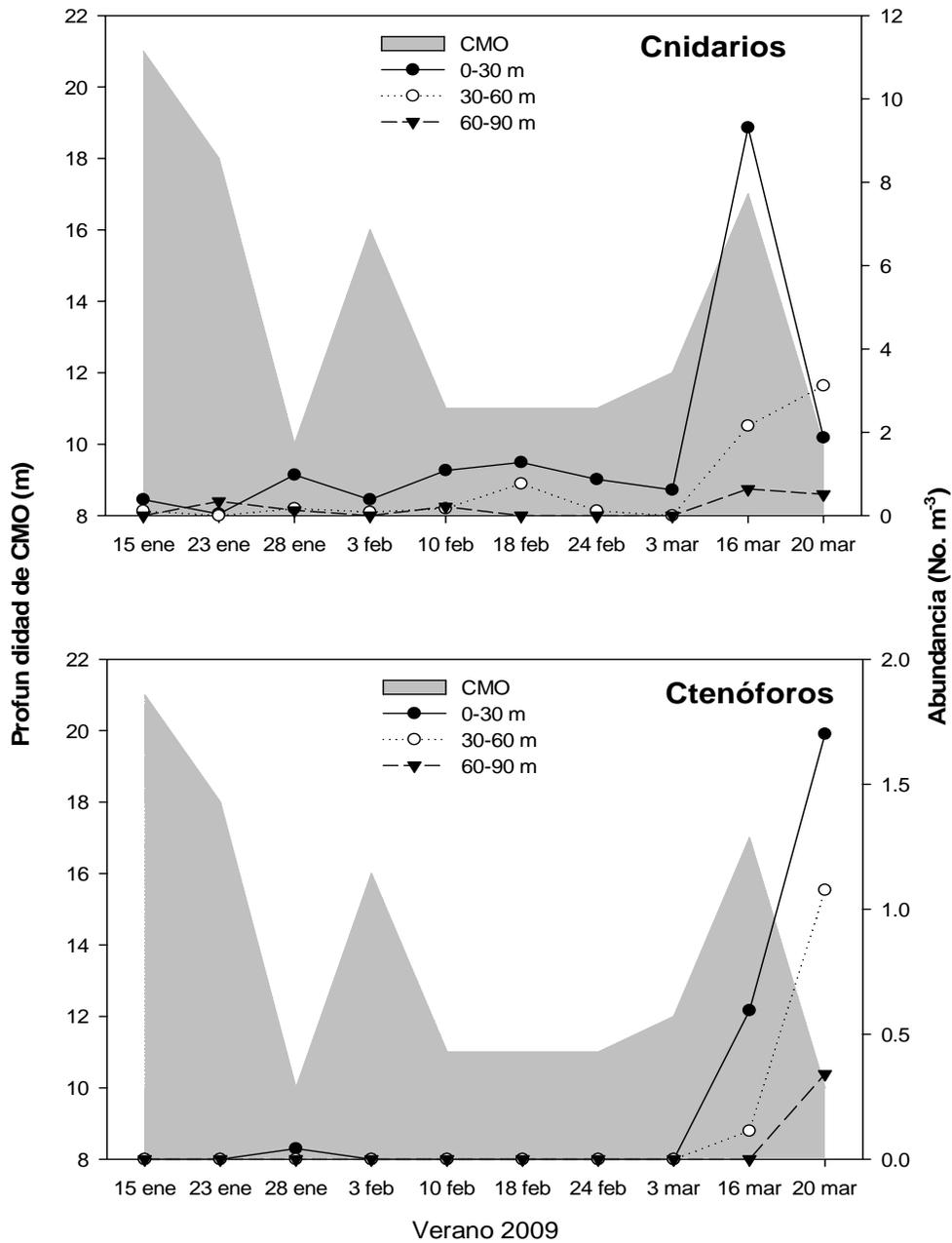


Figura 99. Variación semanal en componentes del zooplancton gelatinoso capturado en verano del 2009 frente a la zona de El Loa (21°S) en 3 estratos de profundidad.

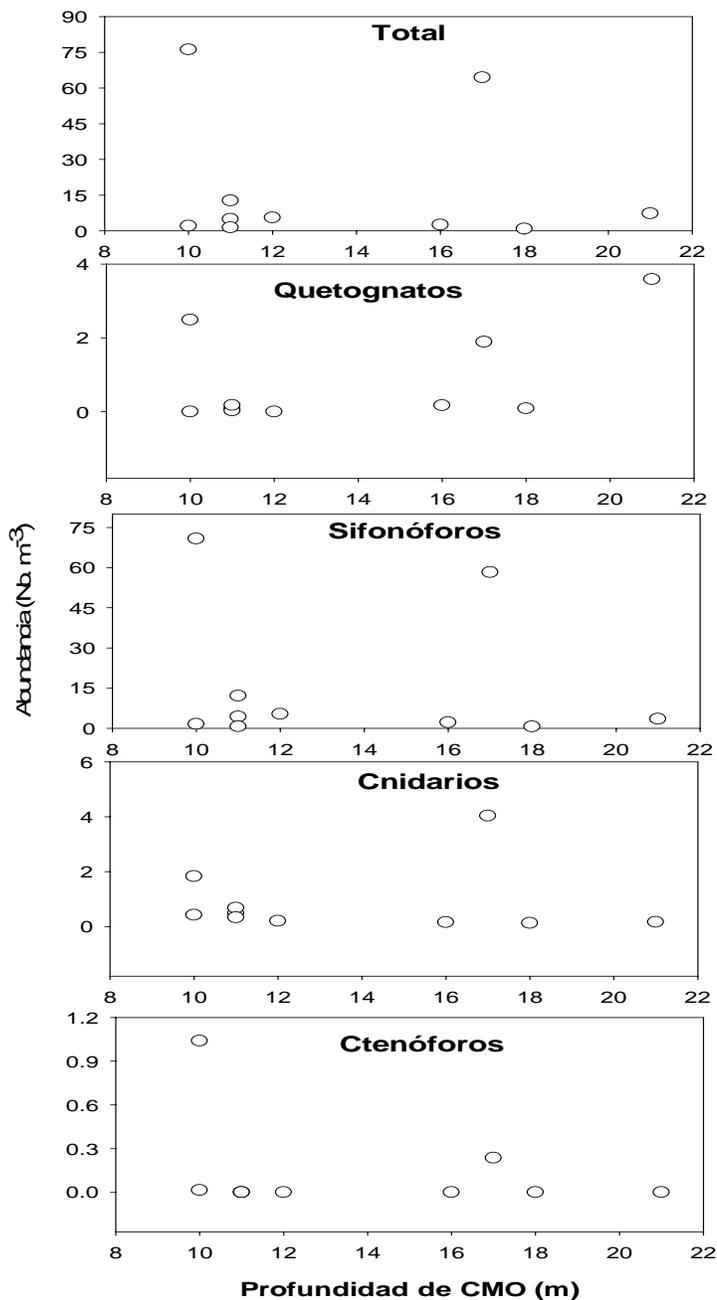


Figura 100. La relación entre la abundancia de componentes del zooplancton gelatinoso y la profundidad de la CMO desde muestras obtenidas en la zona más somera (<50 m) frente a la zona de El Loa (21°S) durante una serie semanal entre enero y marzo del 2009.

2. Objetivo específico N° 2.2

Determinar la relación entre los estadios tempranos de la Anchoveta y la capa de mínimo de oxígeno.

2.1 Experimento de hipoxia en huevos de anchoveta

Los huevos utilizados en el experimento corresponden a estadios de desarrollo III. El experimento se inicio el día 26 de septiembre de 2008. Debido a que a las 48 hrs. no se observó mortalidad. Se decidió repetir este experimento, el que se implementó a partir de las 14:00 hrs. del día 02 de octubre de 2008. En la Tabla 5 se indica la sobrevivencia de huevos para cada concentración de oxígeno. Es importante indicar que la primera eclosión ocurrió a las 48 hrs. de incubación y el 100% de los huevos sobrevivientes habían eclosionado ya a las 52 horas, razón por la que se consideró el término del experimento de sobrevivencia de huevos a las 48 hrs.

Tabla 5: Resumen de experimento de sobrevivencia de huevos de *Engraulis ringens* a 5 concentraciones de oxígeno.

	SISTEMA				
	0,1 mlO ₂ *lt	0,25 mlO ₂ *lt	0,50 mlO ₂ *lt	1 mlO ₂ *lt	Control
N	50	50	50	50	50
Sobrevivientes(*)	47	48	50	47	44
%sobrevivencia	94	96	100	94	88

La Figura 101 muestra las curvas de mortalidad de huevos generadas. No se presenta gráfico para el sistema 0.5 mL/L, ya que la mortalidad al cabo de las 48 horas de experimentación fue 0%. Al cabo de ese tiempo, todos los huevos eclosionaron.

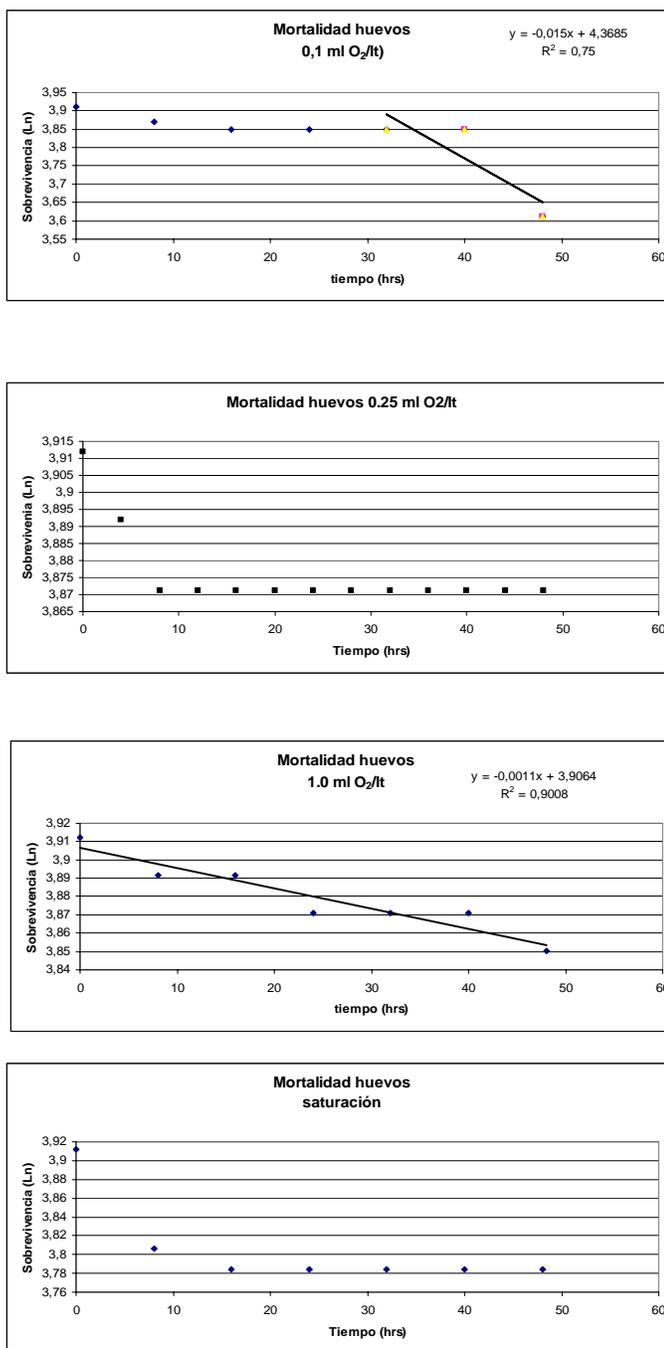


Figura 101: Curvas de mortalidad de huevos, durante el experimento de hipoxia.

Para evaluar la significancia en las diferencias observadas en la proporción de huevos sobrevivientes (Figura 102) en cada tratamiento, se realizó un ANOVA sobre los datos de sobrevivencia expresados como porcentaje, previa transformación angular (arcsen) dado el

comportamiento no normal de las proporciones (Zar 1999). El análisis de varianza indica que las diferencias observadas no son significativas ($F_{4,20}=2.034$, $P = 0.128$)

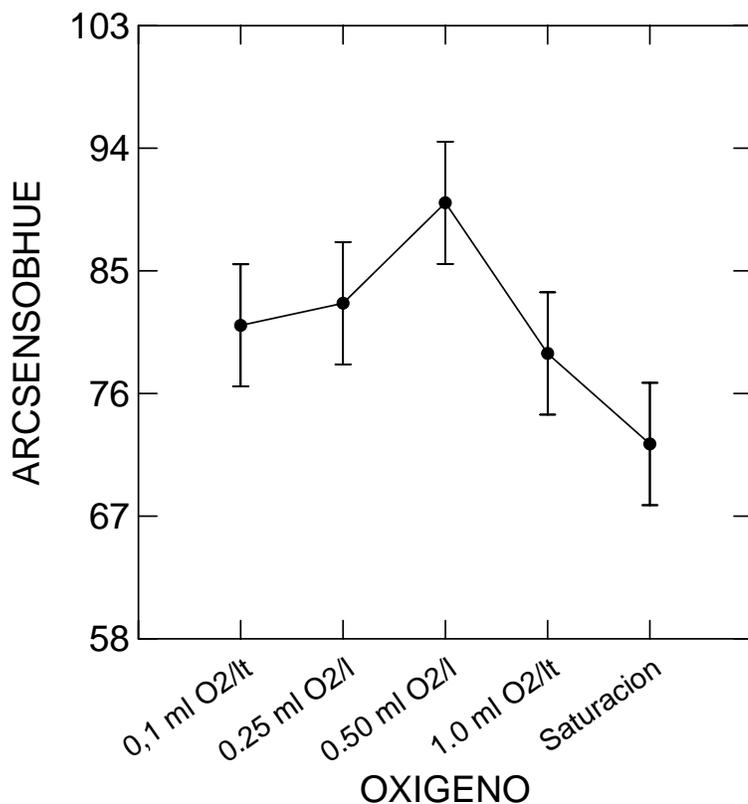


Figura 102. Sobrevivencia de huevos (previa transformación angular) para las cuatro concentraciones experimentales más saturación. Se indica la media y desviación estándar.

2.2 Experimento de hipoxia en larvas de anchoveta

Las larvas utilizadas en el experimento corresponden al producto de la eclosión de huevos mantenidos en las condiciones ambientales ya definidas (16°C). Estas larvas no corresponden a aquellas que eclosionaron durante el experimento de sobrevivencia de huevos, sino a larvas eclosionadas y mantenidas en nuestros laboratorios. El experimento se inicio a las 15:00 hrs. del día 29 de septiembre de 2008. En la Tabla 6 se indica la sobrevivencia de larvas para cada concentración de oxígeno. Es importante indicar que la absorción del saco vitelínico e inicio de la

pigmentación ocular se observó a partir de las 108 horas. Periodo de tiempo que duró el experimento.

Tabla 6 : Resumen de experimento de sobre vivencia de larvas de *Engraulis ringens* a 5 concentraciones de oxígeno.

	SISTEMA				
	0,1 mL/L	0,25 mL/L	0,50 mL/L	1 mL/L	Control
N	49	46	45	50	40
Sobrevivientes(*)	38	33	40	29	26
%sobre vivencia	77,6	71,7	88,9	58	65

La Figura 103 muestra las curvas de sobre vivencia, construidas siguiendo la misma metodología descrita para mortalidad de huevos.

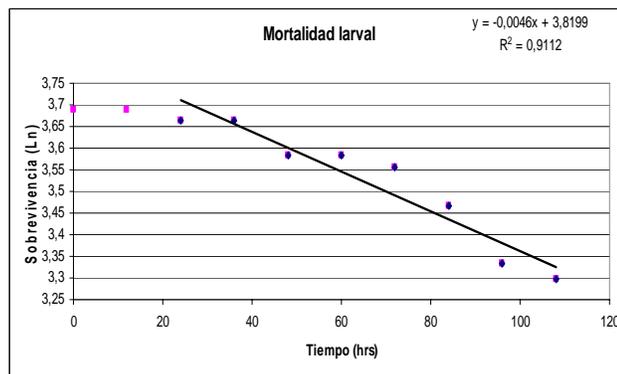
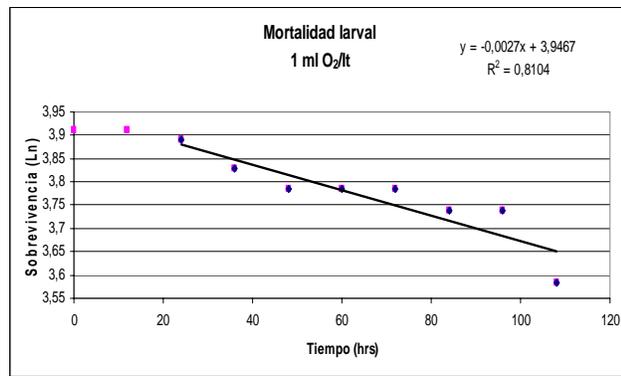
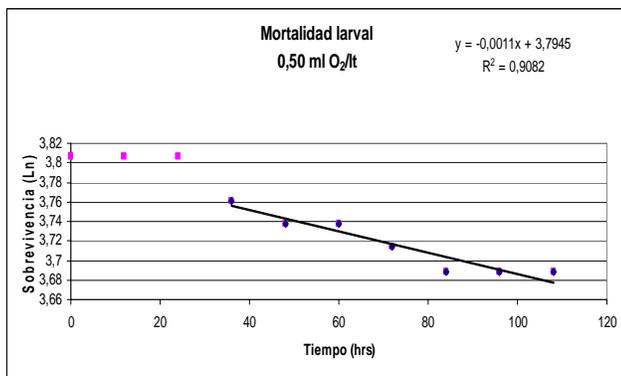
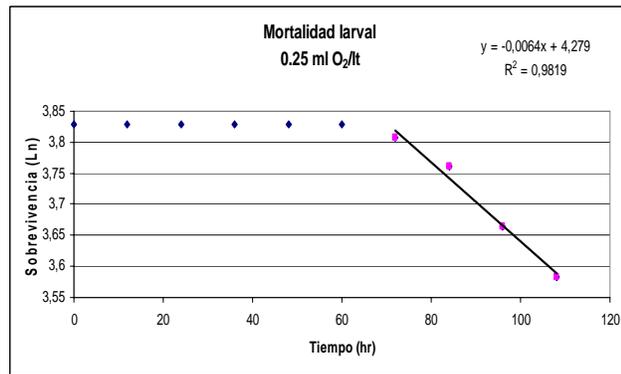
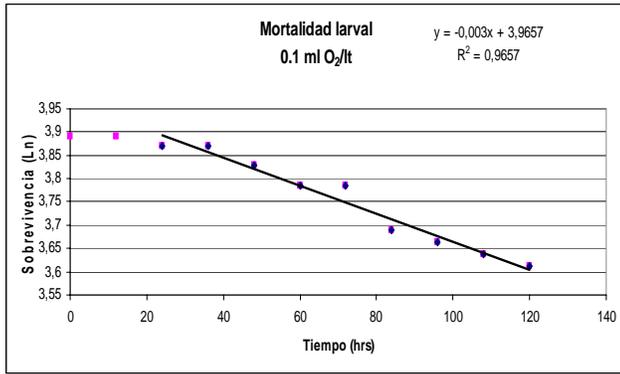


Figura 103: Curvas de mortalidad de larvas, durante el experimento de hipoxia.

Cabe destacar, que tanto para huevos como para larvas, la mortalidad no sobrepasó el 50%, análisis tipo probit no son aplicables.

Para evaluar la significancia en las diferencias observadas en la proporción de larvas sobrevivientes en cada tratamiento (Figura 104), se realizó un ANOVA sobre los datos de sobrevivencia expresados como porcentaje, previa transformación angular (arsen) dado el comportamiento no normal de las proporciones (Zar 1999). El análisis de varianza indica que las diferencias observadas no son significativas ($F_{4,20}=1.398$, $P = 0.271$).

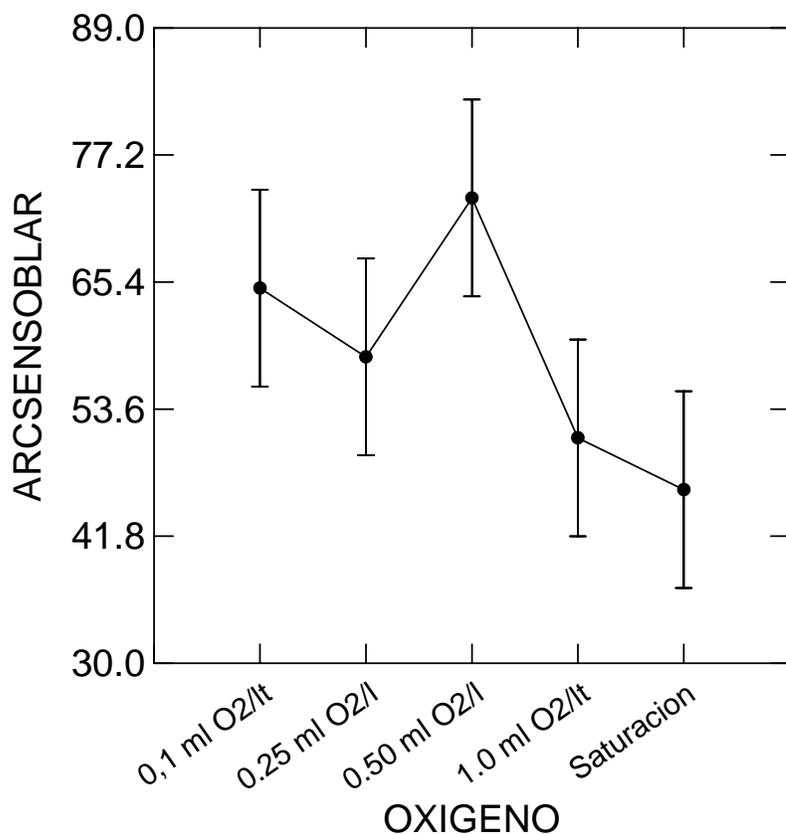


Figura 104. Sobrevivencia de larvas (previa transformación angular) para las cuatro concentraciones experimentales más saturación. Se indica la media y desviación estándar

3. Objetivo específico N° 2.3

Implementar un modelo numérico que permita reproducir el comportamiento de la distribución de la capa de mínimo de oxígeno en la zona y su asociación a la población de Anchoveta.

3.1 Malla no estructurada

Después de los ajustes preliminares y de los resultados obtenidos durante la realización de los experimentos base (verano e invierno) se obtuvo una malla no estructurada con 3495 nodos y 6522 elementos (Figura 105). La malla obtenida representa bien las principales características de la costa y la topografía del fondo marino, entre ellos la Península de Mejillones, la fosa, el talud continental, la plataforma oceánica y las cordilleras submarinas.

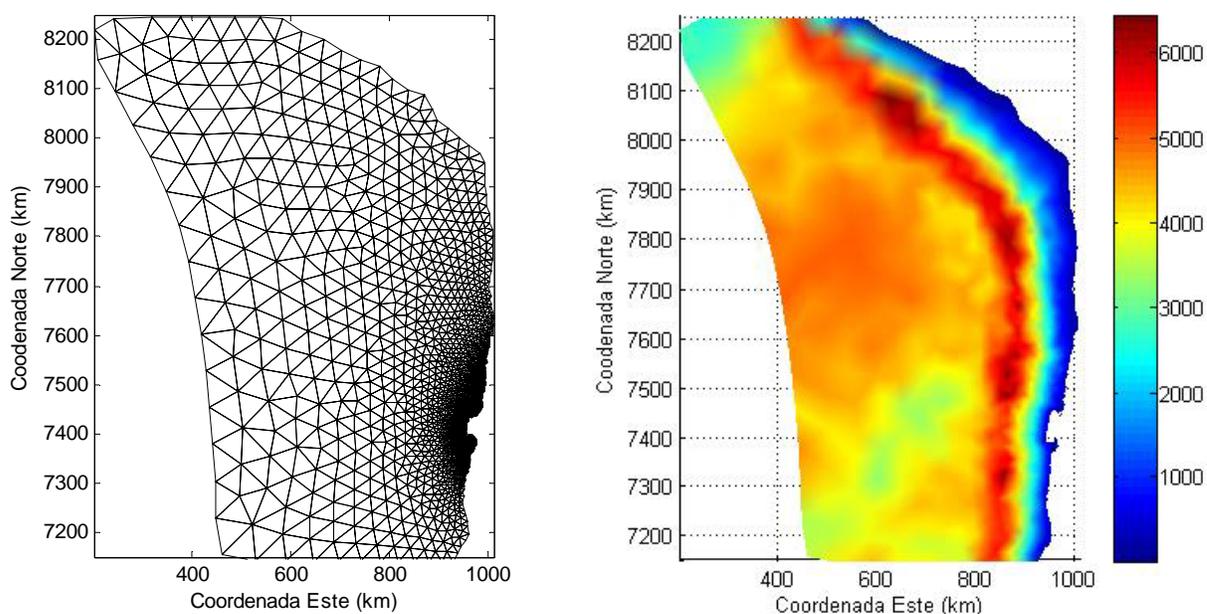


Figura 105. Malla no estructuras (panel izquierdo) y batimetría en el dominio de modelación (panel derecho).

El análisis de los resultados de los campos de temperatura, salinidad y corriente, obtenidos al término de la simulación de treinta días de estabilización, se hizo mediante la información obtenida entre la superficie y los 500 m de profundidad, para lo cual se crearon la distribución de

las variables a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m de profundidad, y además, siete secciones verticales desde la costa hasta las 150 millas náuticas (Figura 106).

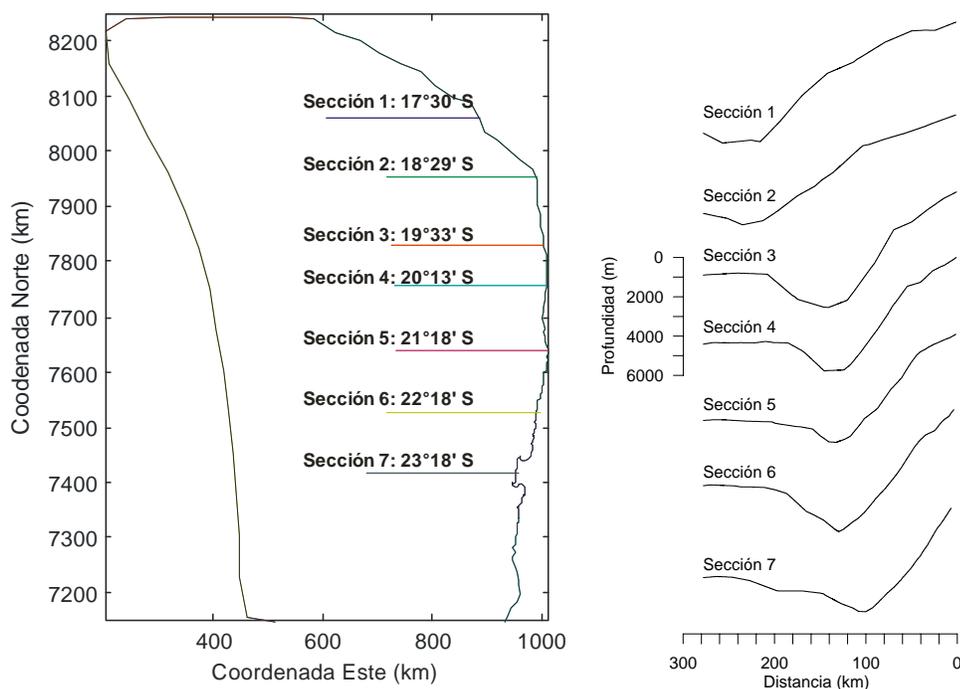


Figura 106. Posición de las secciones numeradas de norte a sur, se indica su latitud (panel izquierdo), y sus respectivos perfiles batimétricos (panel derecho).

3.2 Condiciones Iniciales de invierno y verano Austral

La simulación se inicio con los campos de temperatura y salinidad, obtenidos por interpolación de las salidas del modelo OCCAM, permitiéndose la salida de los flujos por geostrofia en las fronteras, y en la frontera se aplico la variación del nivel del mar por medio de coeficiente de marea. Después de 30 días de simulación se obtuvieron los campos tridimensionales de temperatura, salinidad, velocidad (componentes u y v) oxígeno disuelto, que serán utilizados para inicializar el modelo y estudiar cómo evolucionan producto de las variaciones diarias de viento.

3.3 Campos de temperatura y salinidad después de 30 días de estabilización

Tanto en invierno como en verano se obtuvo temperaturas más bajas en la zona costera, siendo mayor el área cubierta en verano, observándose en esta época aguas de menor temperatura en la costa hasta los 50 m. Lo que se producto tanto por la surgencia costera que hace que aguas de

mayor profundidad ascienda hacia la superficie, como por el mayor calentamiento que hay en la época estival que incrementa los gradientes térmicos entre la costa y el océano (Figura 107). La surgencia costera claramente se observa sobre la plataforma continental peruana, mientras que frente a la costa chilena alcanza una menor distancia a la costa, con un menor gradiente térmico. También se aprecia que las aguas más cálidas se aproximan a la costa desde la zona oceánica frente a Perú, dirigiéndose al sureste hasta llegar a la costa en Chile entre Arica y el norte del río Loa, y desde el sector sur del dominio se observa que aguas más frías se dirigen hacia el norte, concentrando las aguas cálidas en la costa en el sector entre Arica y el Río Loa (Figura 107). Este patrón de distribución se repite desde superficie hasta los 50 m de profundidad, en tanto que a 100 m de profundidad aun se aprecia la surgencia frente la costa peruana, y en el área oceánica frente a la zona de la Península de Mejillones se observa el núcleo de agua más fría que se desplaza al norte, empujando a la costa el núcleo de agua cálida hacia la costa frente a Perú. A 250 m la temperatura es más o menos homogénea con un núcleo más cálido desde la costa peruana hasta la el sur del río Loa, y finalmente a 500 m la temperatura es homogénea en todo el dominio.

En las secciones se observa el incremento en superficie de la temperatura en verano respecto al invierno, con la isoterma de 15°C más o menos a la misma profundidad, la que se profundiza en la costa durante el invierno (Figura 108). En la sección 1 en la costa peruana (17°30'S) se ve la inclinación típica de un sistema de surgencia en la cual las isotermas corta la superficie libre mostrando el ascenso de las aguas más frías en la costa, si se considera la isoterma de 17°C se aprecia que esta alcanza la superficie a unos 50 km de la costa. En la sección que se encuentra a los 18°20'S (Arica) también se observa esta inclinación, pero la isoterma de 17°C intercepta la superficie a unos 20 km de la costa, y en las siguientes secciones la isoterma alcanza en la superficie en la cercanía de la costa (Figura 108). De la sección a los 21°18'S hay una tendencia a hundirse de las isotermas menores a 16°C.

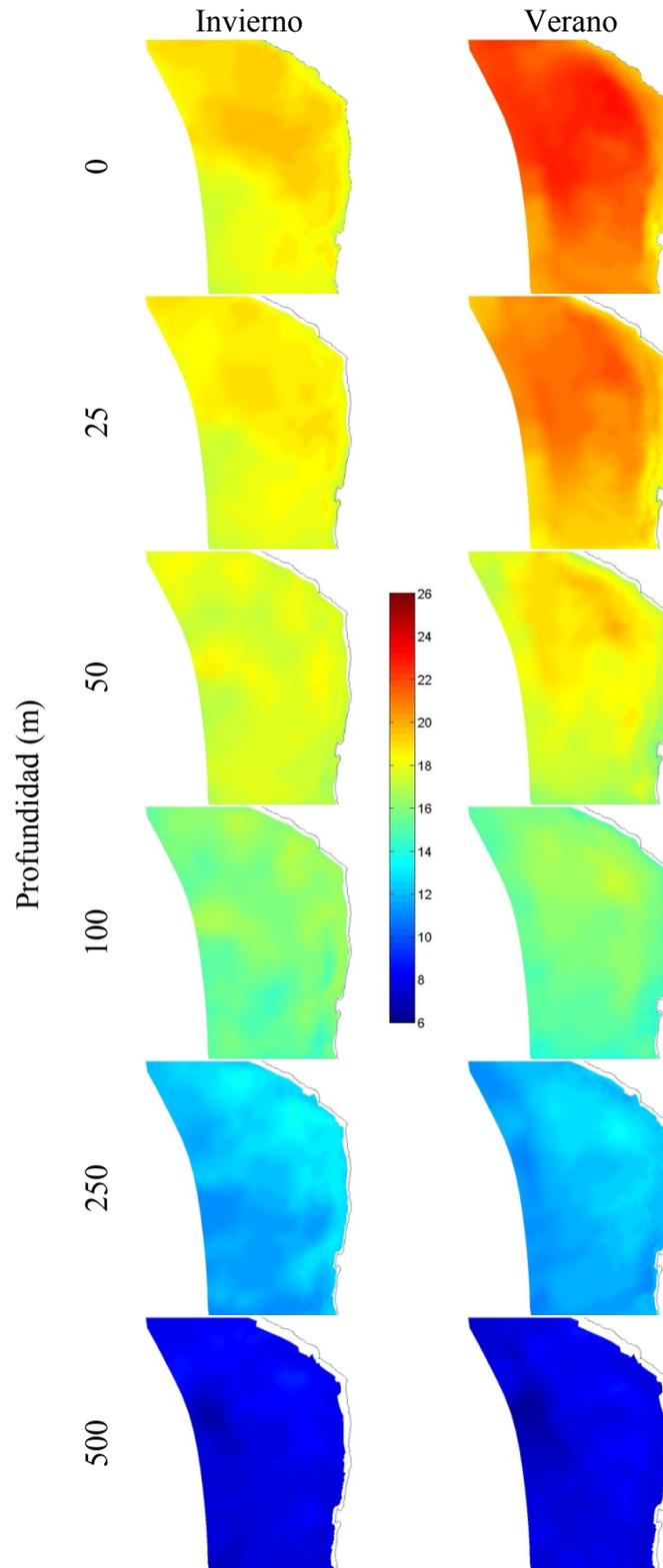


Figura 107. Variación de temperatura a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m de profundidad al término del período de estabilización en invierno y verano.

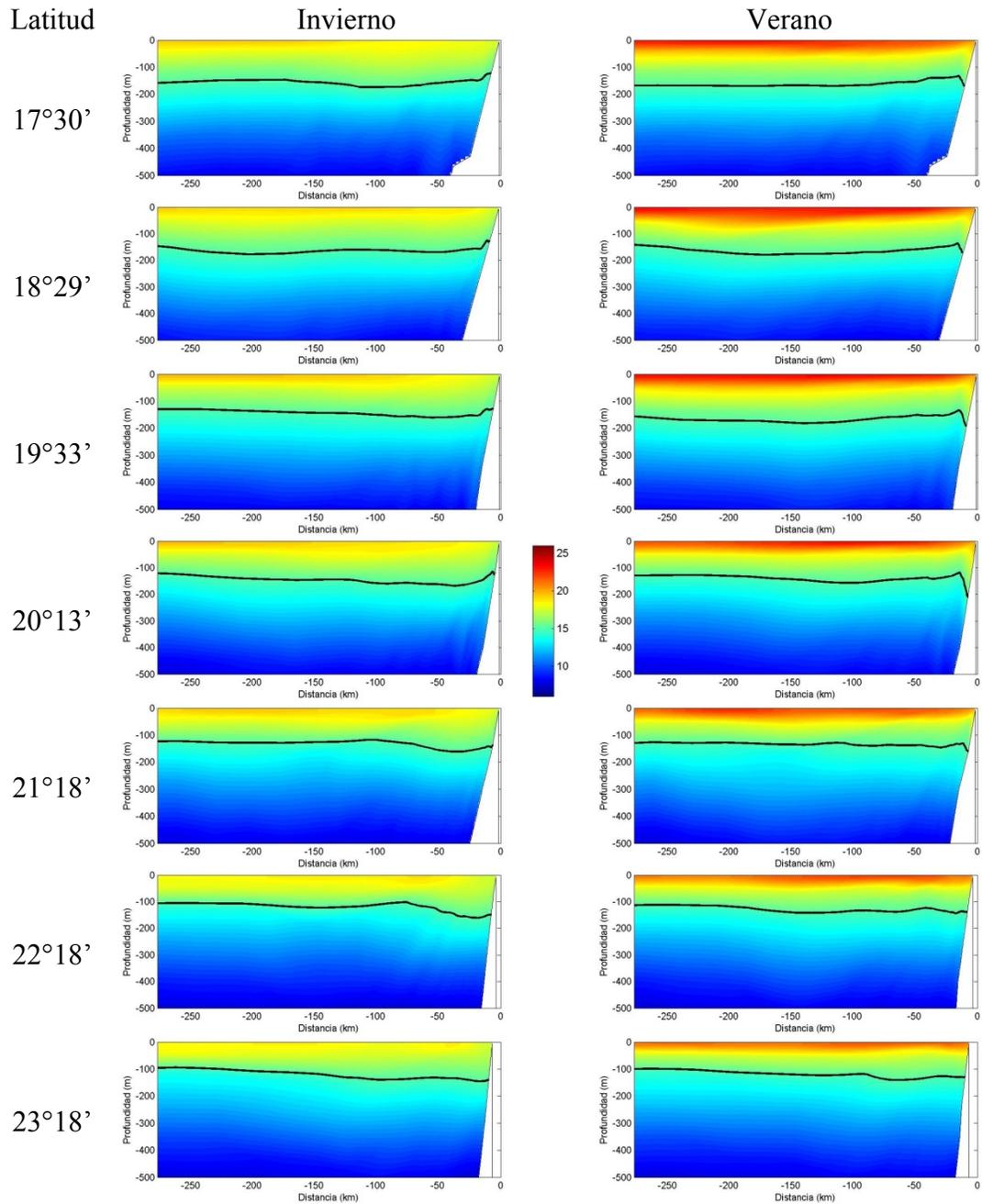


Figura 108. Variación de temperatura en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.

La salinidad superficial, al igual que la temperatura, muestra la surgencia costera claramente en la costa peruana, la que cubre una mayor extensión hacia el área oceánica a diferencia de la surgencia frente a la costa chilena. También muestra el desplazamiento de aguas menos salinas desde el sur del dominio de modelación que ayuda a aproximarse a la costa el agua más salina que se desplaza hacia el sur desde el área oceánica frente a la costa peruana, lo que se observa desde la superficie hasta los 100 m de profundidad (Figura 109). A 250 m aun se observa un núcleo más salino frente a la costa peruana que se desplaza hacia el sur cerca de la costa, y casi no se observa un gradiente salino a los 500 m de profundidad. Entre superficie y los 100 m de profundidad se observan las mayores variaciones estacionales, presentándose aguas más salinas durante el verano.

De la sección a las 17° 30'S hasta la sección a los 19°33S se observa que las isohalinas presentan un ascenso hacia la costa, ascenso que en la sección de los 20°13'S se concentra cerca de la costa, y hacia la zona oceánica las isohalinas se mantienen más o menos paralelas a la superficie. De la sección 21°18'S al sur se observa un núcleo de aguas más salinas en la cercanía de la costa, mientras que en el resto de la sección la salinidad es menor a 34.8 psu (Figura 110). Las mayores diferencias estacionales se observan de la sección 4 (20°13'S) al sur.

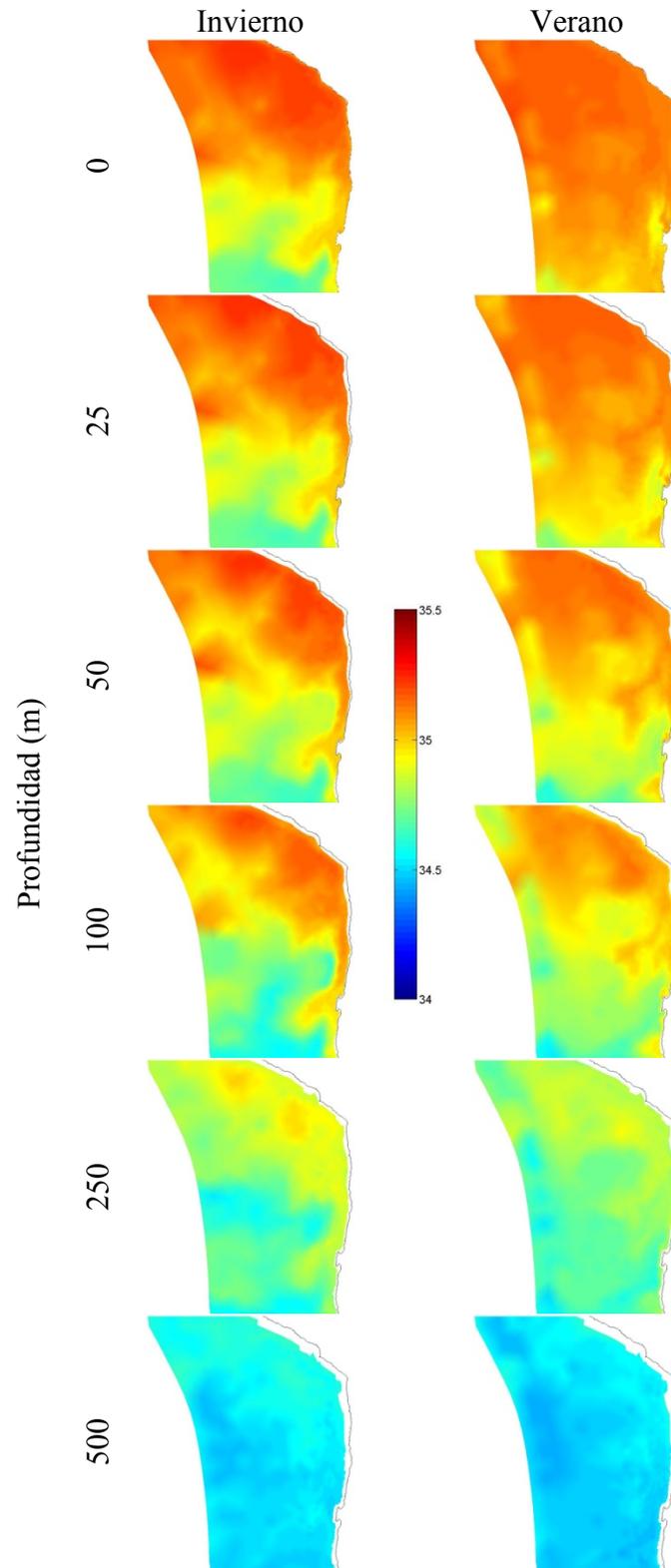


Figura 109. Variación de salinidad a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m de profundidad al término del período de estabilización en invierno y verano.

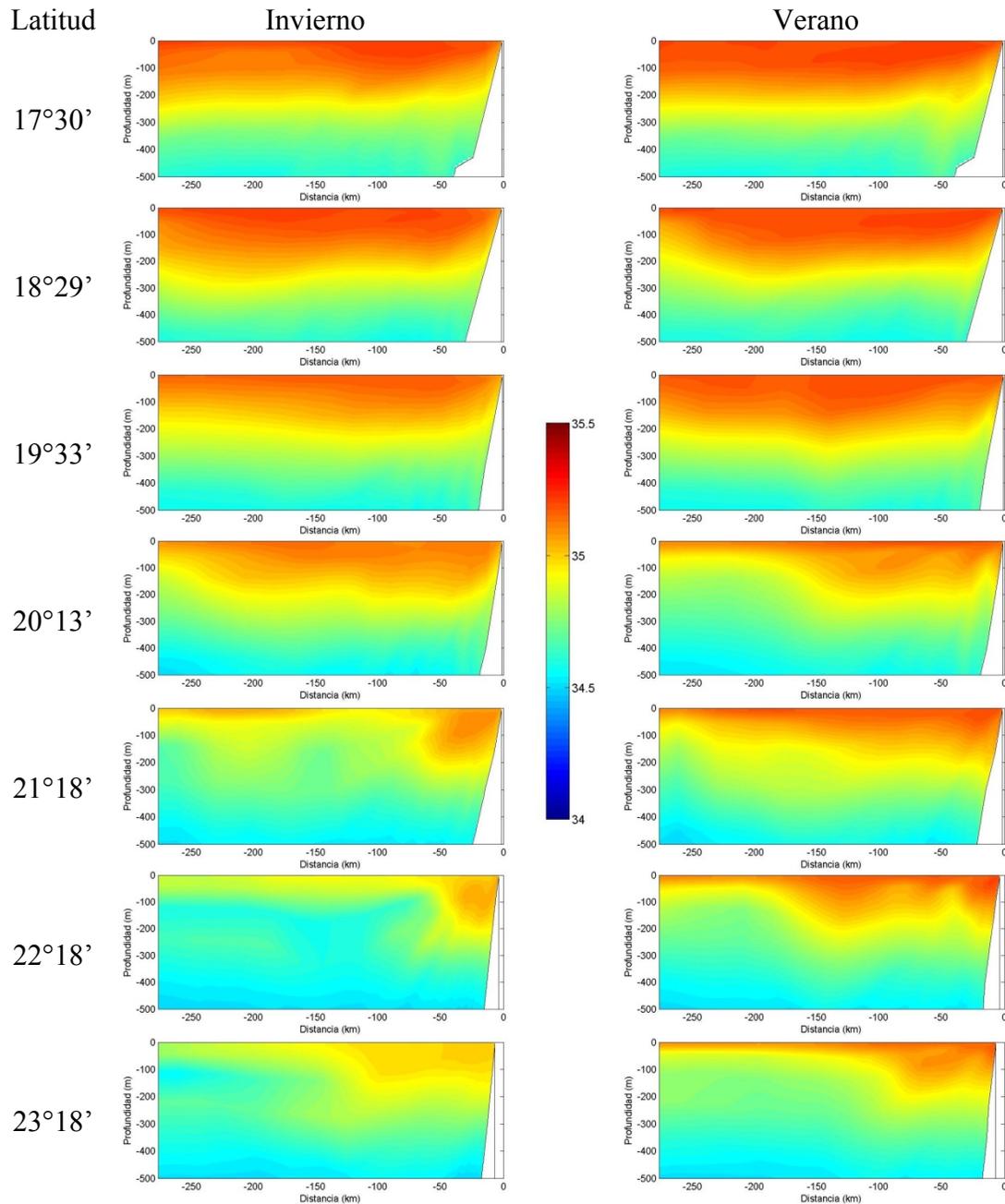


Figura 110. Variación de salinidad en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.

3.3 Campo de velocidad después de 30 días de estabilización

Tanto en invierno como en verano el patrón de corrientes obtenido muestra meandros, giros ciclónicos y anticiclónicos; una corriente hacia el norte en la zona costera que al norte de la primera sección se aleja hacia el área oceánica que corresponde a la corriente Perú/Chile, y en el área oceánica, más allá de las 150 millas náuticas (más de 270 km) se observa la rama oceánica de esta corriente. Patrón que se observa desde la superficie hasta los 100 m con algunas variantes menores, mientras que desde los 250 m se observa desde la costa peruana al sur una corriente paralela a la costa, la cual es muy intensa a 500 m de profundidad la que corresponde a la contracorriente Perú/Chile (Figura 111 y Figura 112). Lo anterior se aprecia claramente en las secciones en especial se ve en la sección de $17^{\circ} 30'S$ en la que la componente u de la corriente presenta un núcleo con velocidades sobre 10 cm/s en dirección al este (Figura 113) , y mayores de 10 cm/s hacia el sur (Figura 114), es decir paralela a la costa, la que en la sección frente a Arica ($18^{\circ} 29'S$) sigue siendo intensa pero no alcanza los 10 cm/s al este en la componente u y los 10 cm/s al sur en la componente v. En las secciones de más al sur esta corriente se apega al talud continental cubriendo entre los 50 y 500 m de profundidad y un ancho máximo de 25 km. Por su parte la corriente al norte (Perú/Chile) a medida que se dirige al norte se aleja de la costa por la cuña de agua que desplaza la contracorriente, siendo el ancho máximo de la corriente de unos 100 km. En la sección frente a la Península de Mejillones el brazo más oceánico de la corriente Perú/Chile se aprecia claramente y en ese sector tiene un ancho de unos 150 km, al seguir su rumbo al norte esta corriente se aleja de la33 costa, casi desapareciendo en la sección de los $21^{\circ} 18'$.

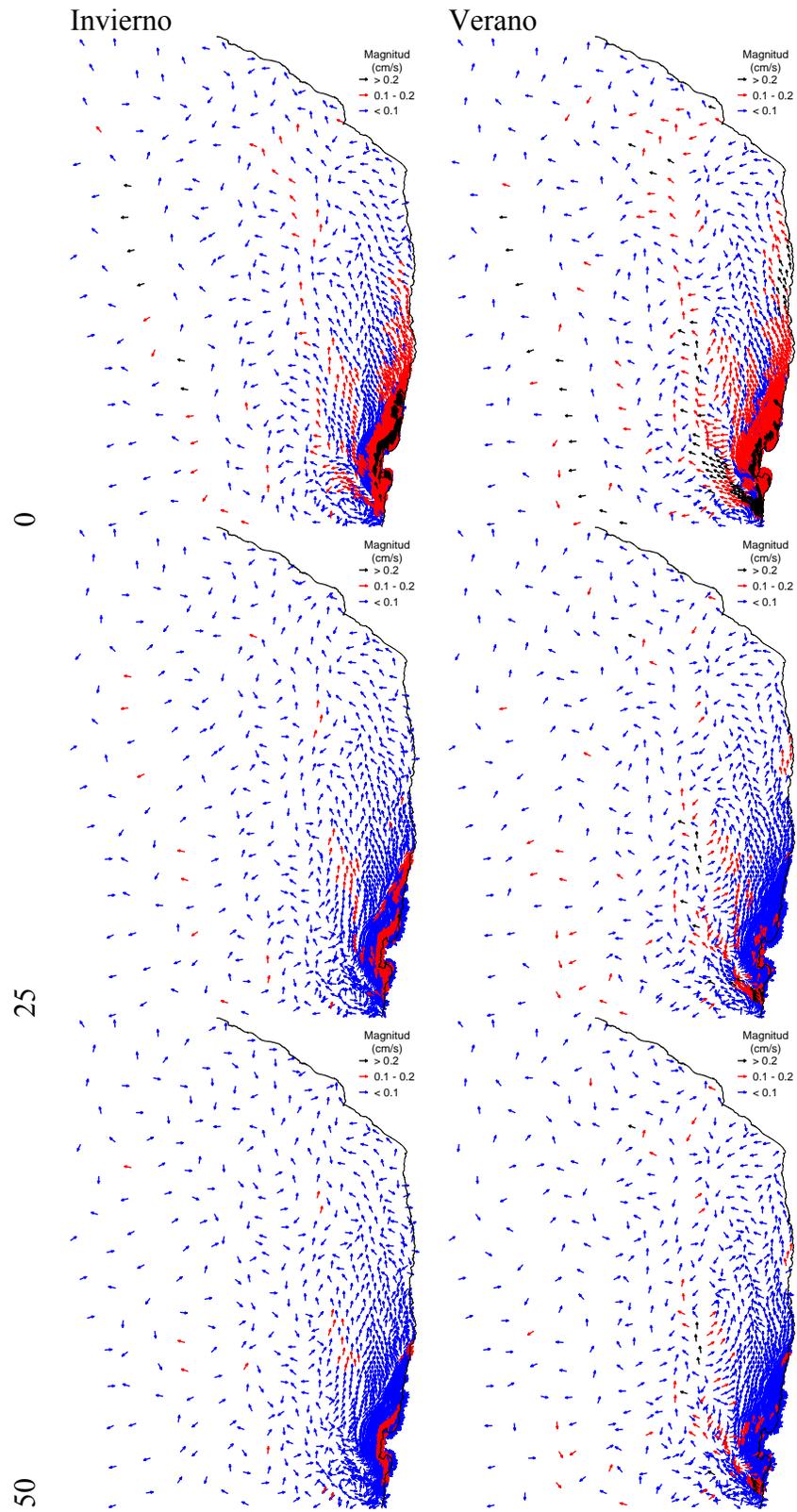


Figura 111. Variación de la velocidad a 0, 25 y 50 m de profundidad en invierno y verano.

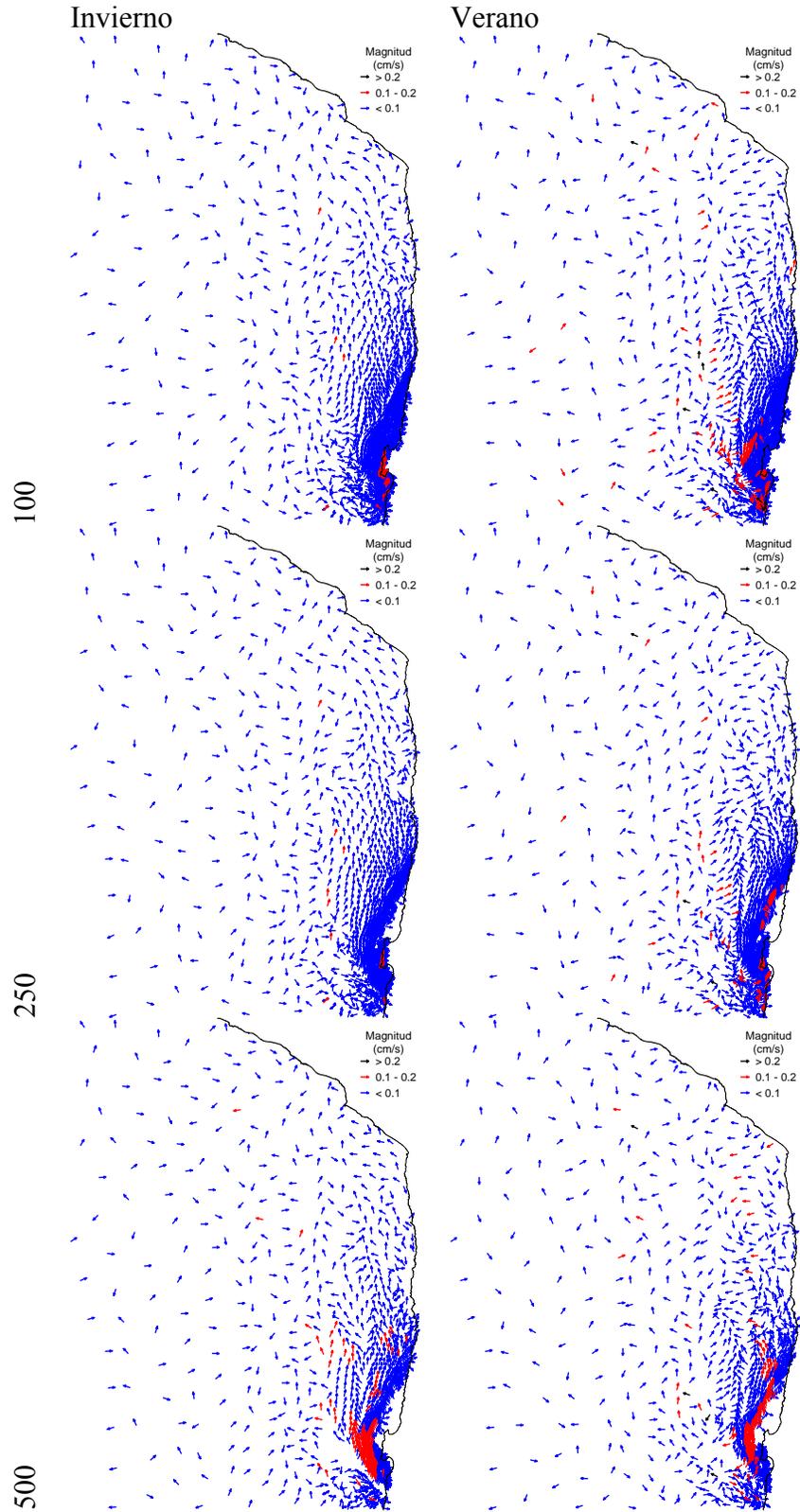


Figura 112. Variación de la velocidad a 100, 250 y 500 m de profundidad en invierno y verano.

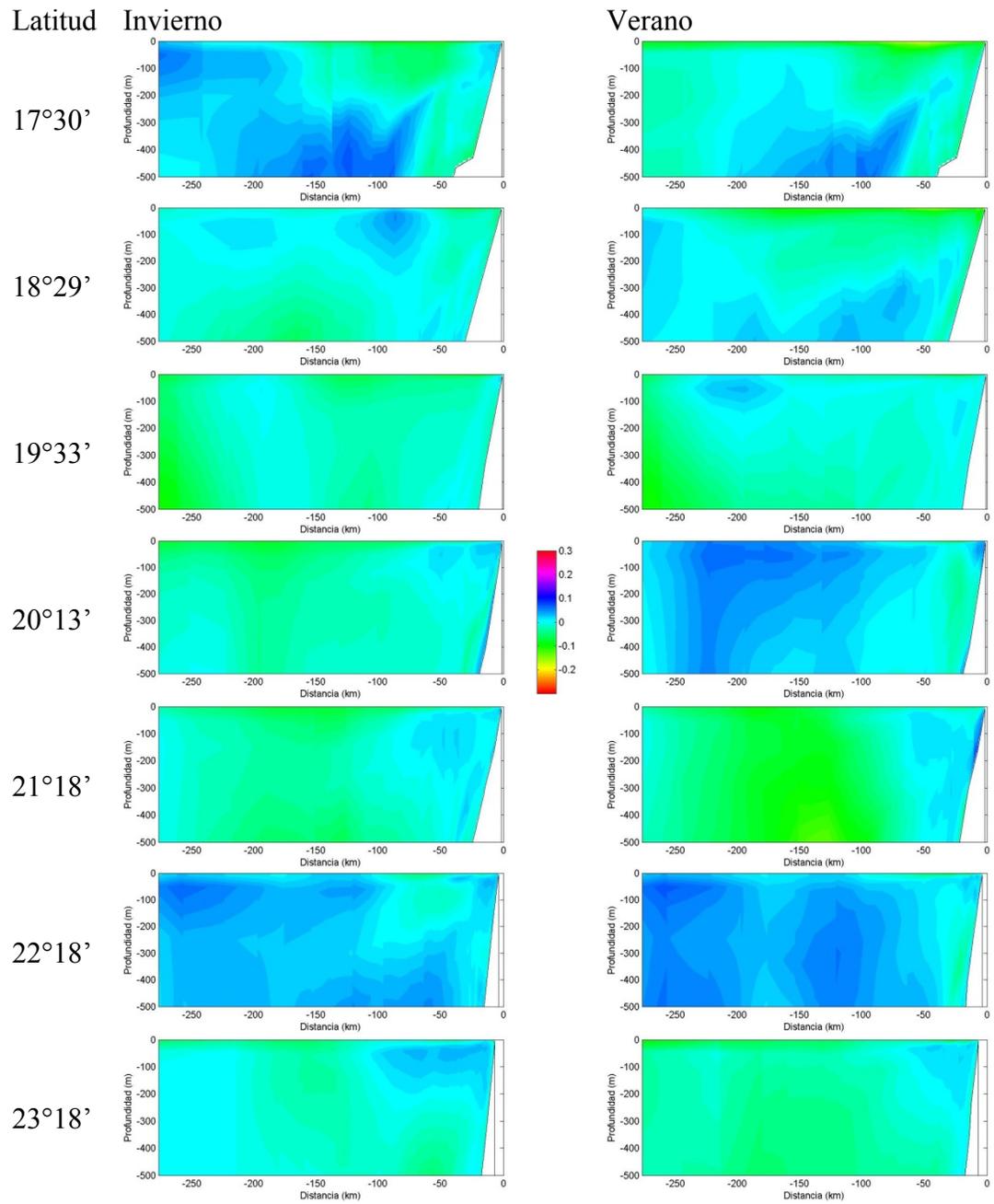


Figura 113. Variación de la componente u de la corriente en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.

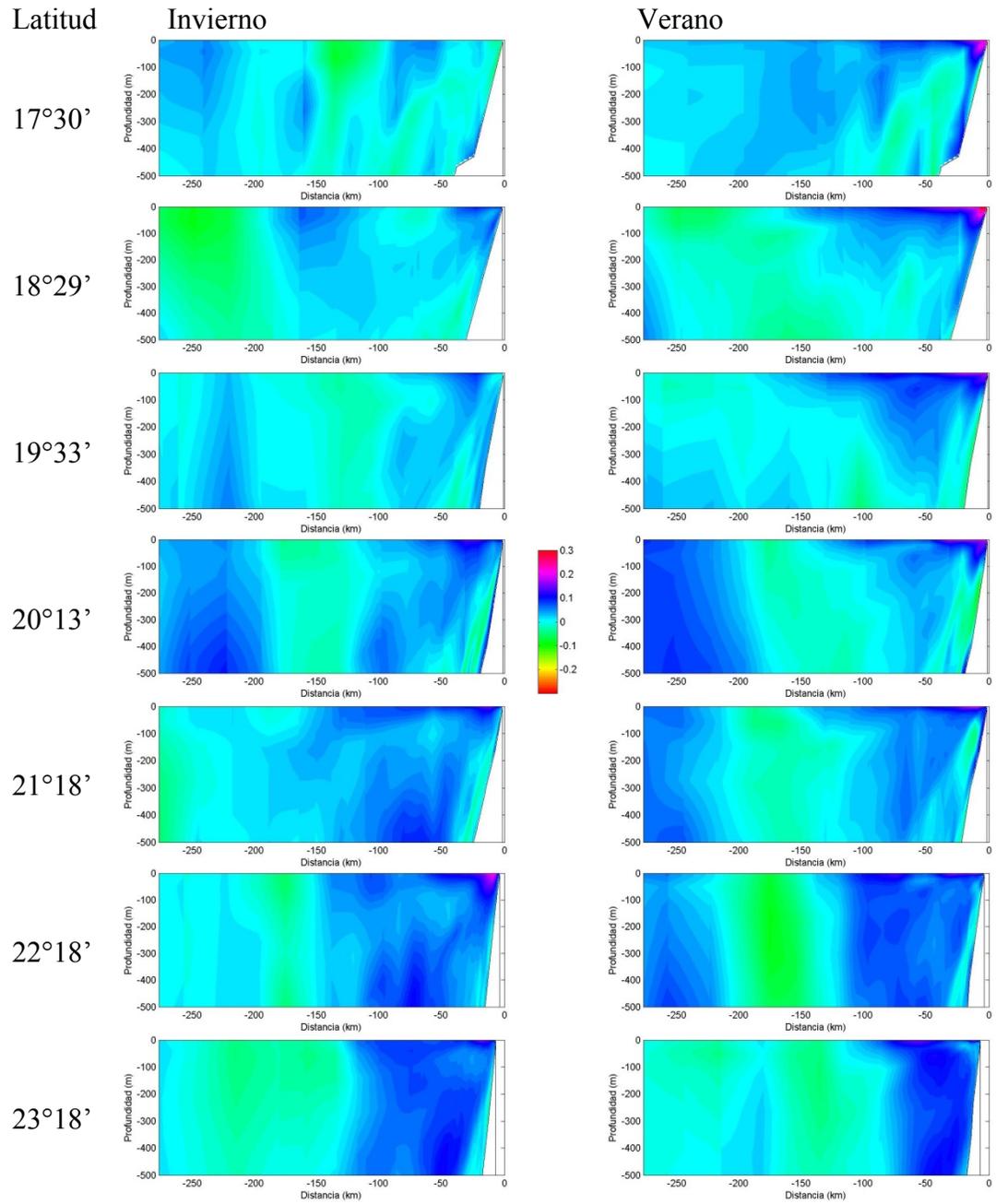


Figura 114. Variación de la componente v de la corriente en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.

3.4 Oxígeno Disuelto después de 30 días de estabilización

En invierno como en verano se obtuvo una franja costera con niveles de oxígeno disuelto menor producto del ascenso de aguas por la surgencia, siendo mayor su área de influencia en la costa peruana. De acuerdo con la simulaciones y los datos promedio para el mes de invierno utilizados es en este periodo del año cuando la mínima de oxígeno está más superficial y cubre una mayor extensión fuera de la costa (Figura 115).

Las secciones muestran que en verano la columna de agua está más oxigenada, y que en la costa el agua con menos concentración de oxígeno asciende. En verano valores de 2 mg/l de oxígeno disuelto se encuentran hasta los 200 m de profundidad mientras que en invierno esta concentración se encuentra sobre los 100 m de profundidad (Figura 116).

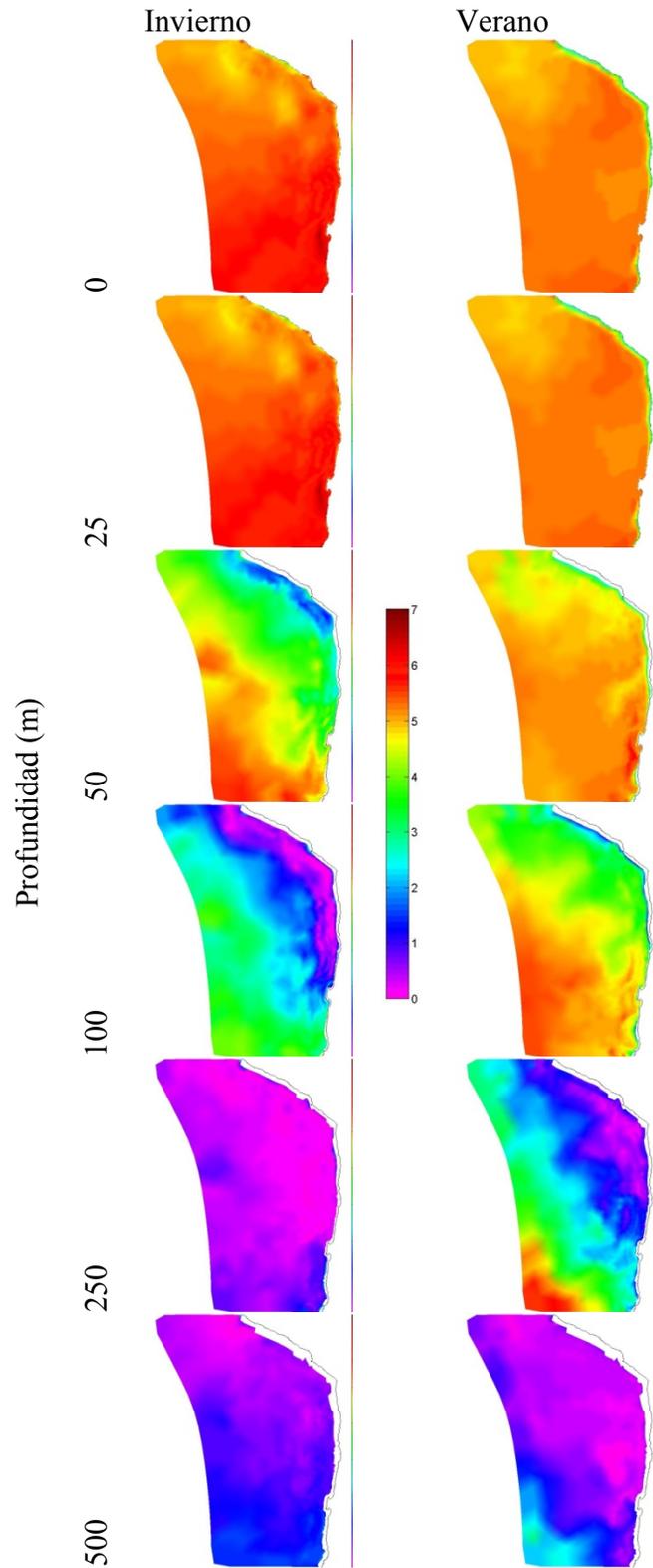


Figura 115. Variación del oxígeno disuelto a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m de profundidad al término del período de estabilización en invierno y verano.

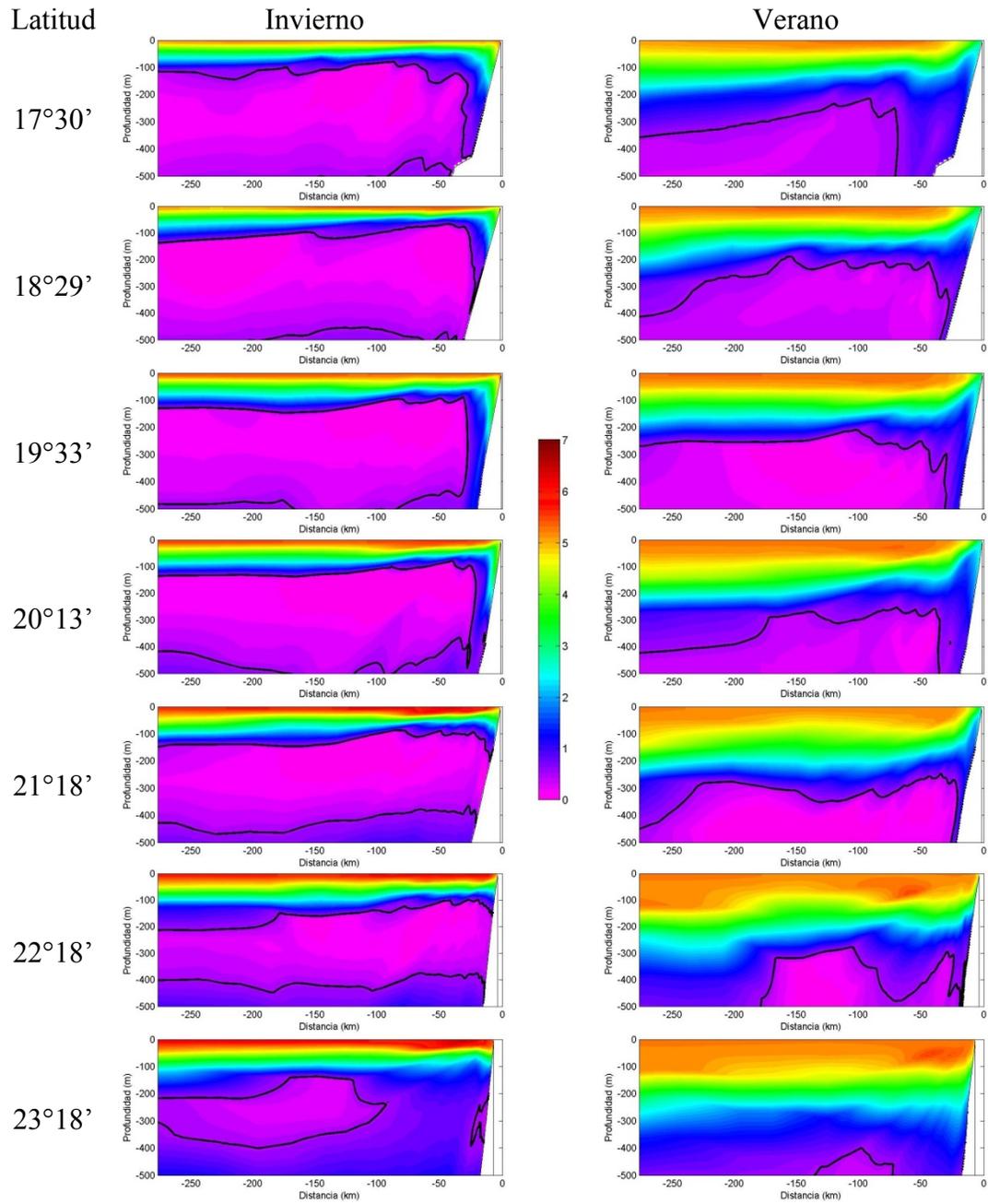


Figura 116. Variación del oxígeno disuelto en las secciones verticales al término del período de estabilización en invierno y verano.

3.5 Viento

Para forzar el modelo como se indico se utilizo el viento satelital de QuickScan promedio diario cada un grado, el cual fue llevado por interpolación a cada elemento del dominio. La serie de tiempo del viento promedio diario del dominio muestra que la zona tanto en invierno como en verano tiene predominio de vientos del S, variando sus intensidades (Figura 117), presentando periodos de calmas, vientos favorables a la surgencia de intensidades bajas a altas. De acuerdo con estas series de tiempo se seleccionaron cuatro períodos en los cuales se liberaron derivadores, de forma de ver el comportamiento de estos bajo las distintas condiciones, tanto en invierno como en verano.

Como se puede observar en la Figura 118 el viento varia tanto temporal como espacialmente, con una tendencia a seguir el sentido de la costa. En invierno el primer grupo corresponde a un periodo de relajación, y en los otros a vientos favorables a la surgencia, incrementando la intensidad desde el segundo al cuarto grupo, en tanto que en verano el segundo grupo corresponde a un periodo de relajación, el primero y el terceros a una situación de vientos favorables a la surgencia de moderada intensidad y el cuarto al de mayor intensidad. En la Figura 106 el período de máxima intensidad correspondía al tercer grupo, y no al cuarto, lo que es producto del cambio de dirección del viento de acuerdo con el sentido de la costa.

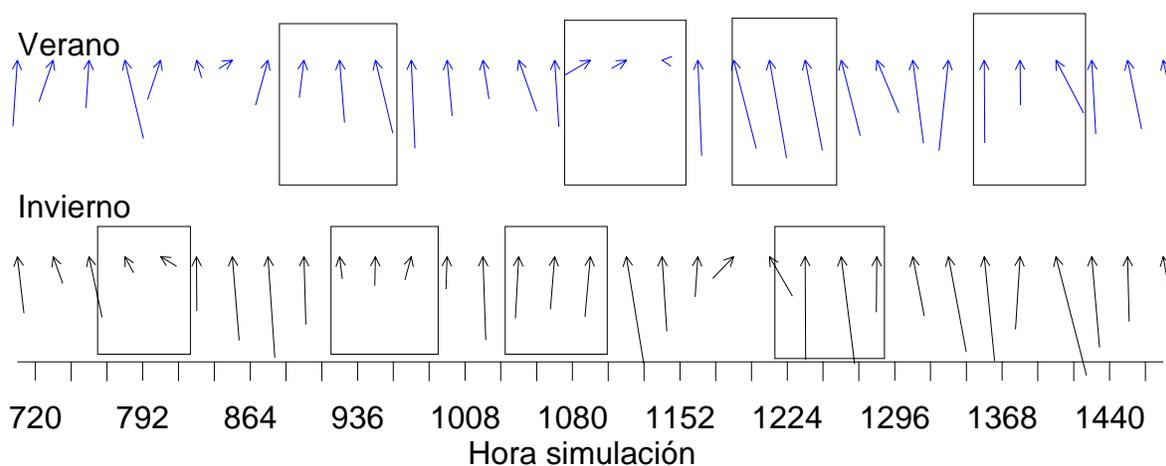


Figura 117. Viento promedio diario del dominio para invierno y verano, rectángulos indican grupos de liberación de derivadores en cada período.

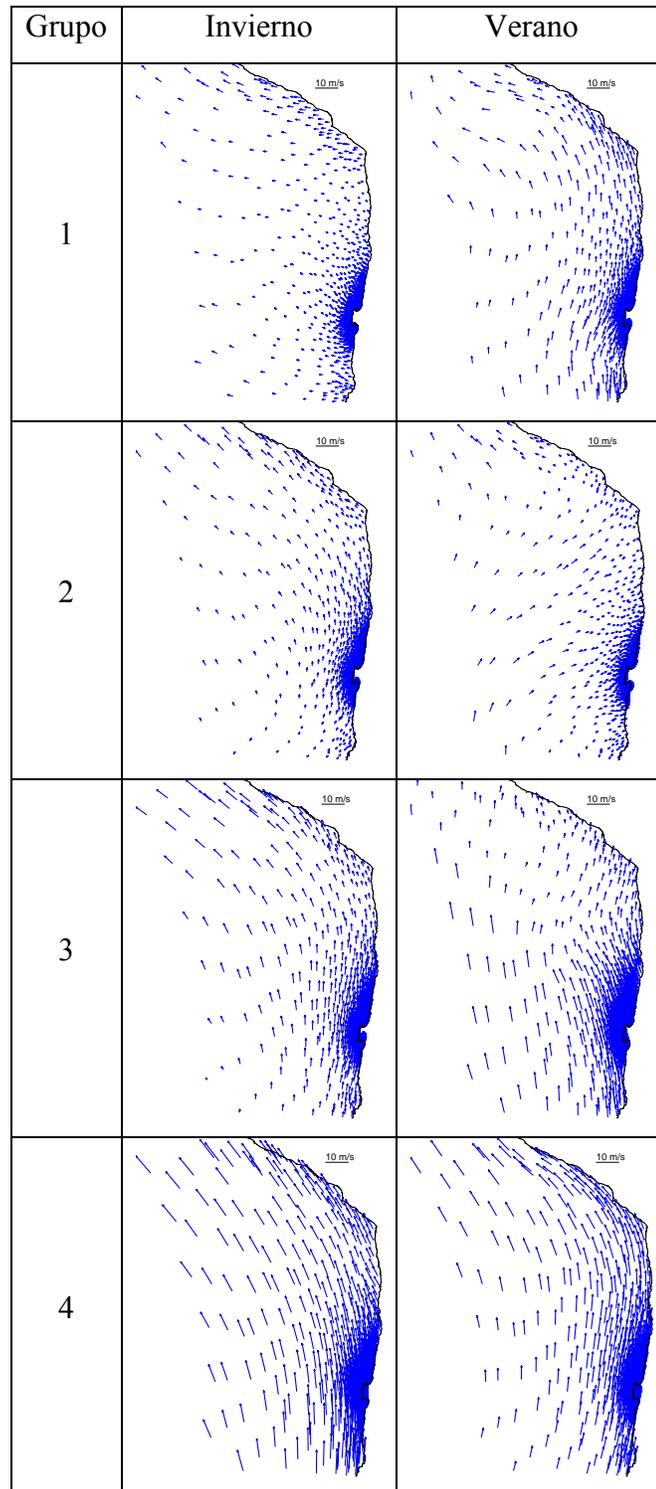


Figura 118. Viento durante el segundo día de seguimiento de los derivadores en invierno y verano.

3.6 Variación del Oxígeno

Las simulaciones muestran que entre la superficie y los 25 m la concentración de oxígeno disuelto en la zona costera es dependiente de la intensidad de la surgencia, especialmente durante el invierno (Figura 119 y Figura 120), mientras en verano el área de influencia es menor lo que puede estar relacionado con la mezcla turbulenta, así como por el mayor gradiente horizontal de temperatura que disminuye el desplazamiento del agua que asciende fuera de la costa.

A diferencia de lo que ocurre frente a la costa chilena, frente a la costa de Perú a 25 y 50 m se aprecia cambios en la distribución de las aguas con menos oxígeno, incrementándose la extensión fuera de la costa con la surgencia más intensa (Figura 119 y Figura 120).

Bajo los 100 m de profundidad no se observan mayores cambios producto del ascenso de aguas hacia la superficie.

3.7 Derivadores

Los derivadores liberados frente a Chipana a 1, 3, 5, 7, 10, 15 y 20 millas náuticas de la costa a las profundidades de 5, 10, 15 y 20 m durante el verano muestran que en cinco días la mayoría van al norte, con la excepción de un derivador a 20 m que se dirigió al sur (Figura 121). Los derivadores que recorrieron una mayor distancia son los costeros durante el período de relajación, y los que recorren menor distancia hacia el norte y a su vez los que más se alejan de la costa son aquellos liberados durante el período de mayor surgencia según la serie de tiempo promedio del viento. La mayor parte de los derivadores vario su profundidad en menos de 30 m, seis de los ciento doce derivadores liberados variaron su profundidad en más de 30 m (Figura 122).

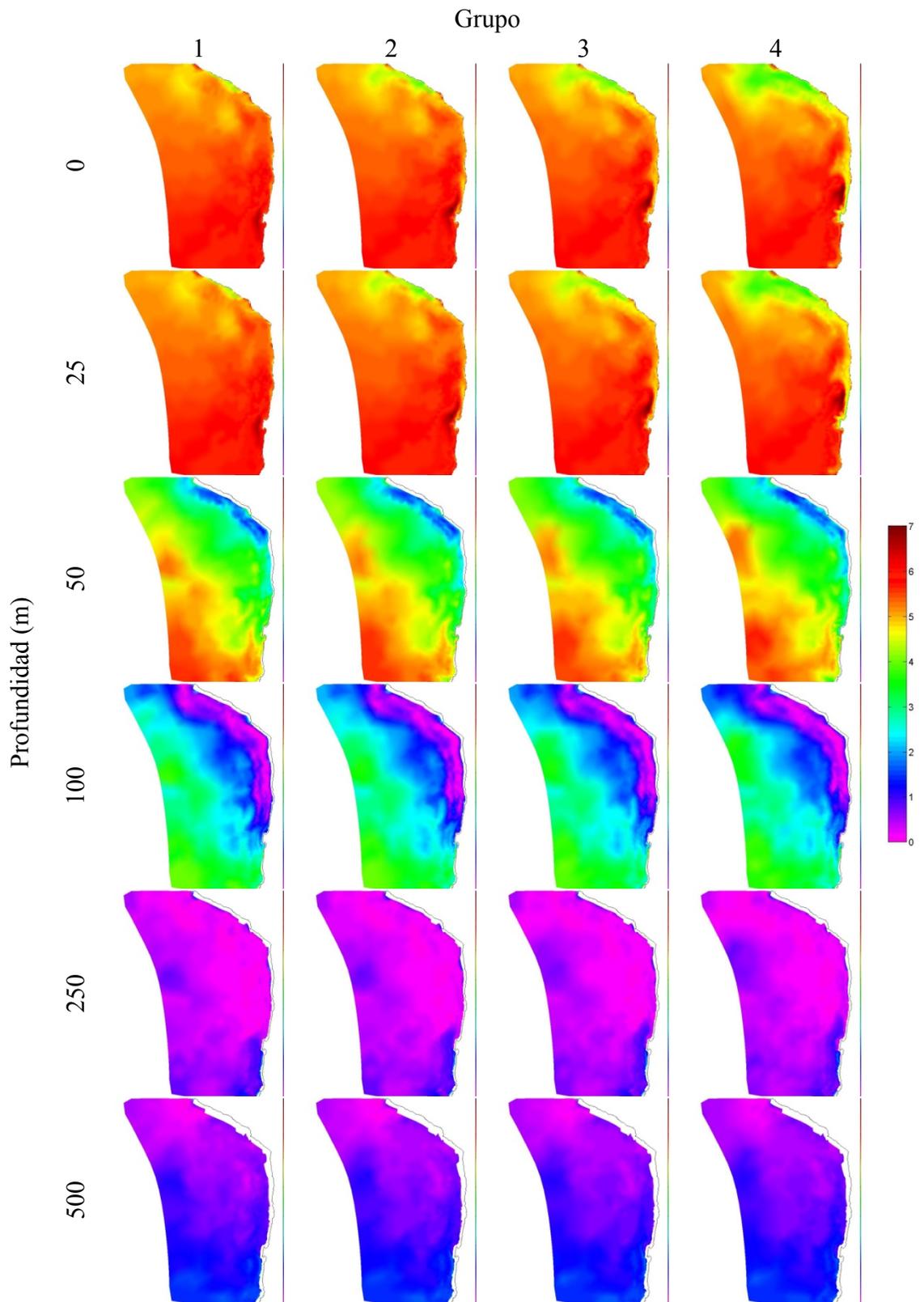


Figura 119. Variación espacio temporal del oxígeno disuelto a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m en invierno.

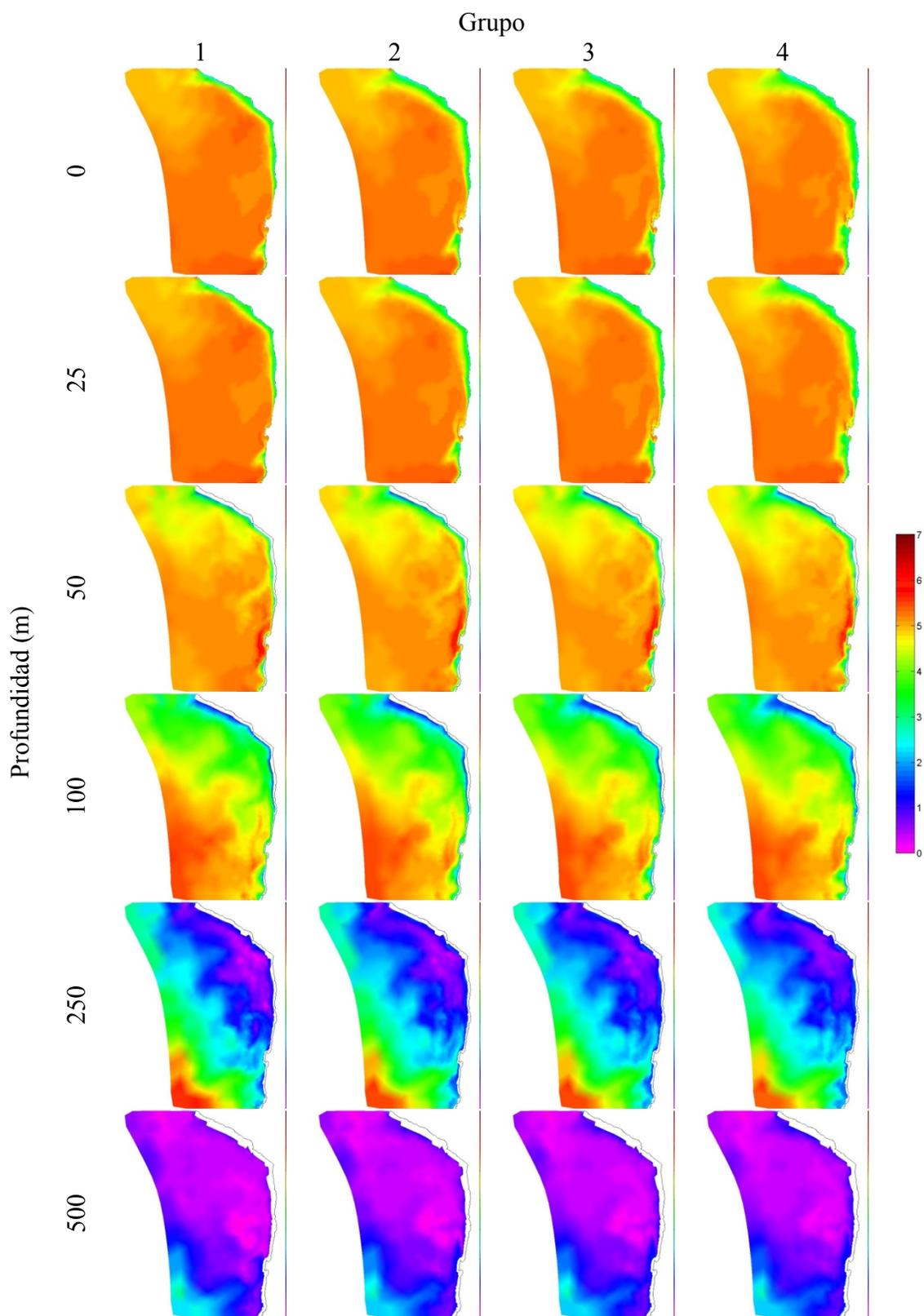


Figura 120. Variación espacio temporal del oxígeno disuelto a 0, 25, 50, 100, 250 y 500 m en verano.

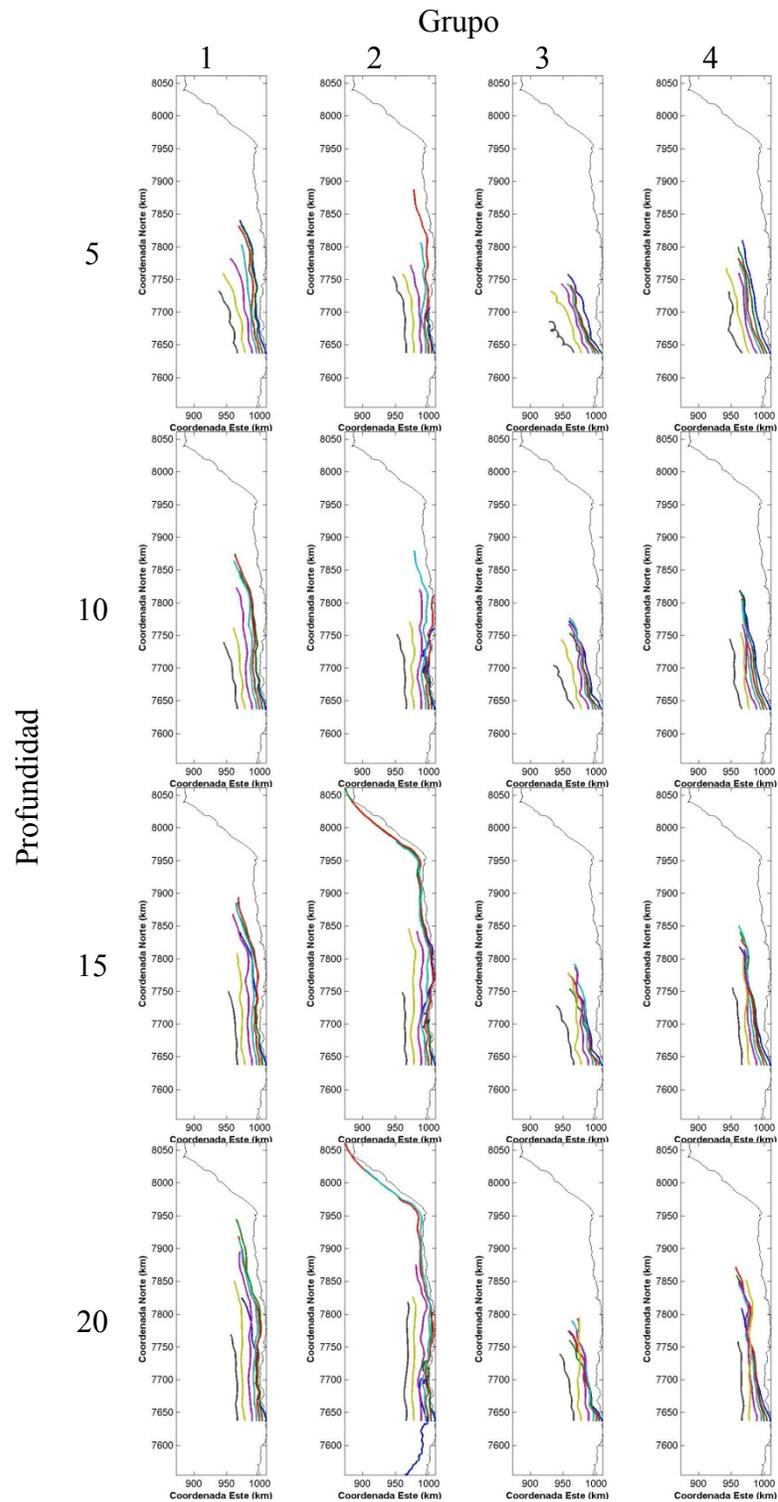


Figura 121: Derivadores liberados frente a Chipana a 1, 3, 5, 7, 10, 15 y 20 millas náuticas de la costa a las profundidades de 5, 10, 15 y 20 m durante el verano.

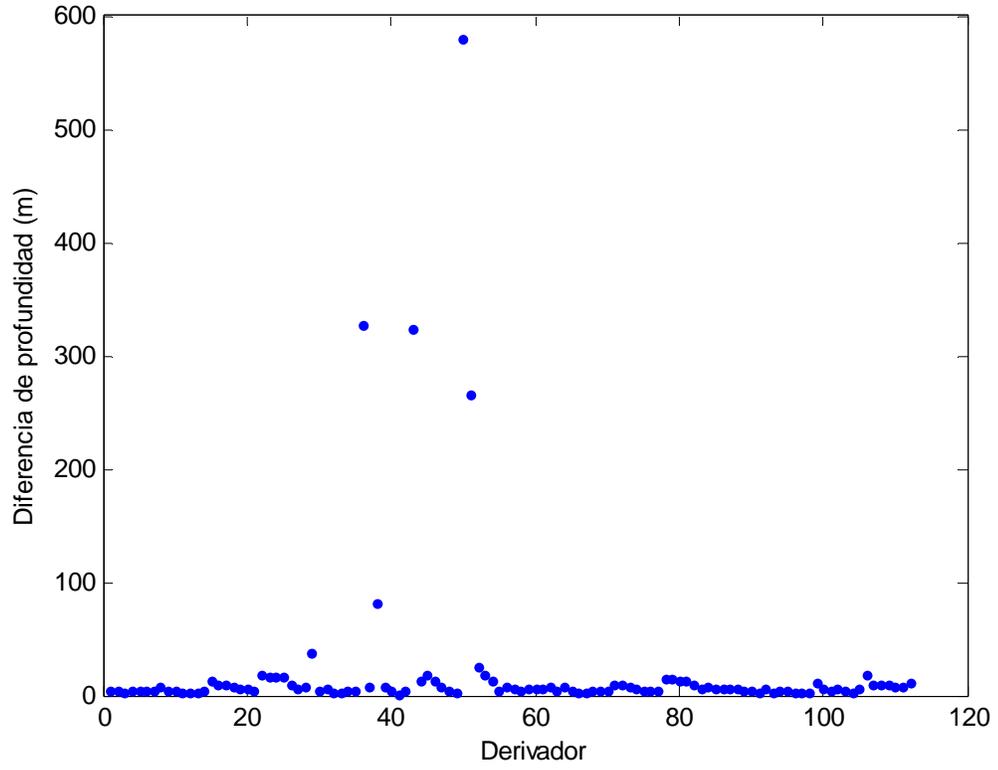


Figura 122. Diferencia entre la mínima y la máxima profundidad de cada derivador

4. Objetivo específico N° 2.4

4.1 Determinar el efecto de la capa de mínimo de oxígeno en las poblaciones bentónicas de interés comercial.

4.1.1 Efecto de la hipoxia sobre organismos bentónicos

Erizos (*Loxechinus albus*)

Esta especie mostró el menor tiempo de sobrevivencia a una exposición de hipoxia en laboratorio, entre todas las estudiadas. En las condiciones de hipoxia 0,1, 0,25 y 0,5 mL O₂ L⁻¹ sobrevivieron individuos hasta las 6 horas, mientras que en la condición de 1,0 mL O₂ L⁻¹ la sobrevivencia fue hasta 8 horas máxima (Figura 123). En la condición de 0,1 mL O₂ L⁻¹ tuvo mortalidad a partir de las 2 horas, lo que sumado a la sobrevivencia máxima observada de 8 horas, muestra a esta especie como de escasa tolerancia a valores bajo la CMO.

Pulpo (*Octopus mimus*)

Es otra especie que expresó una baja sobrevivencia en los experimentos de hipoxia. La máxima sobrevivencia fue de 8 horas en la condición de 1,0 mL O₂ L⁻¹ (Figura 124). Esta situación de baja tolerancia se explicaría principalmente por la alta tasa metabólica que presenta esta especie y por no tener mecanismos fisiológicos o morfológicos de protección a la hipoxia.

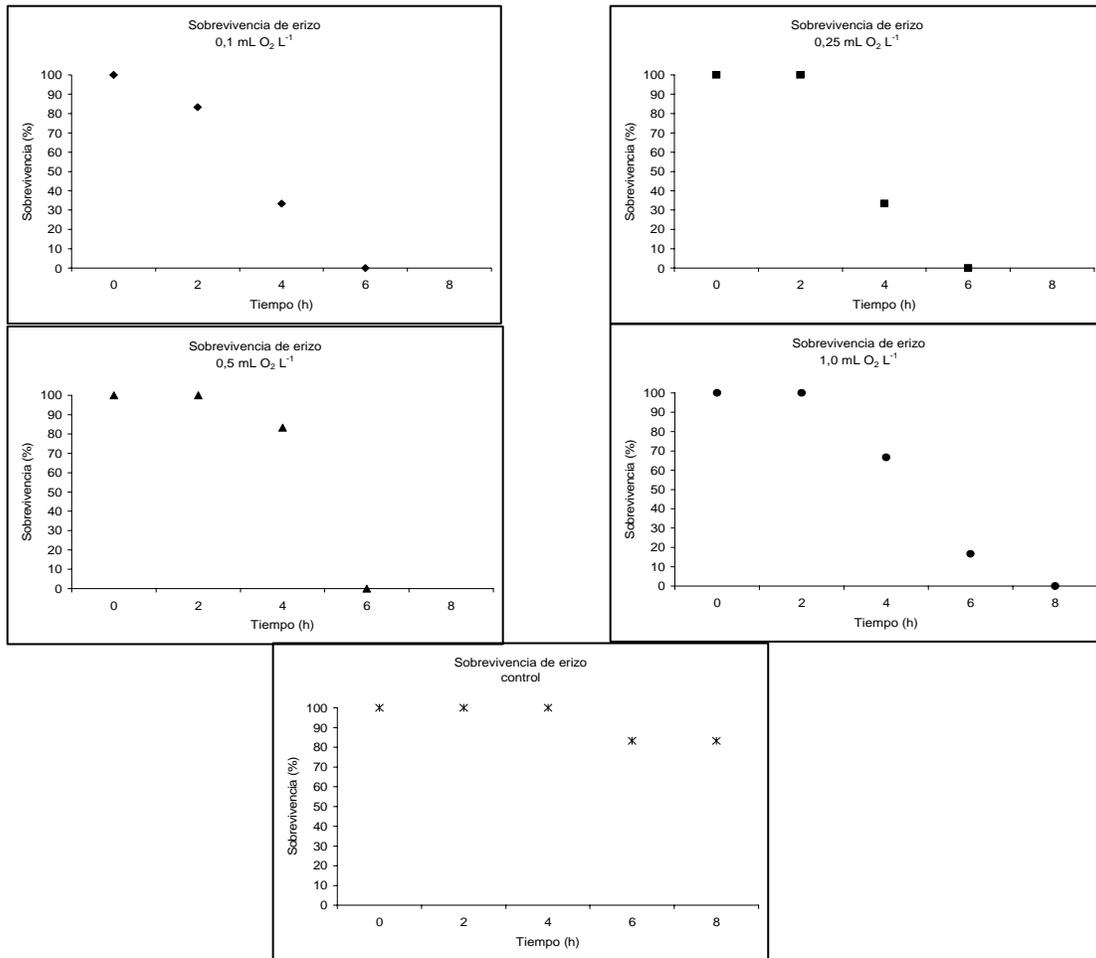


Figura 123: Sobrevivencia de erizos (*Loxechinus albus*) en experimentos de hipoxia.

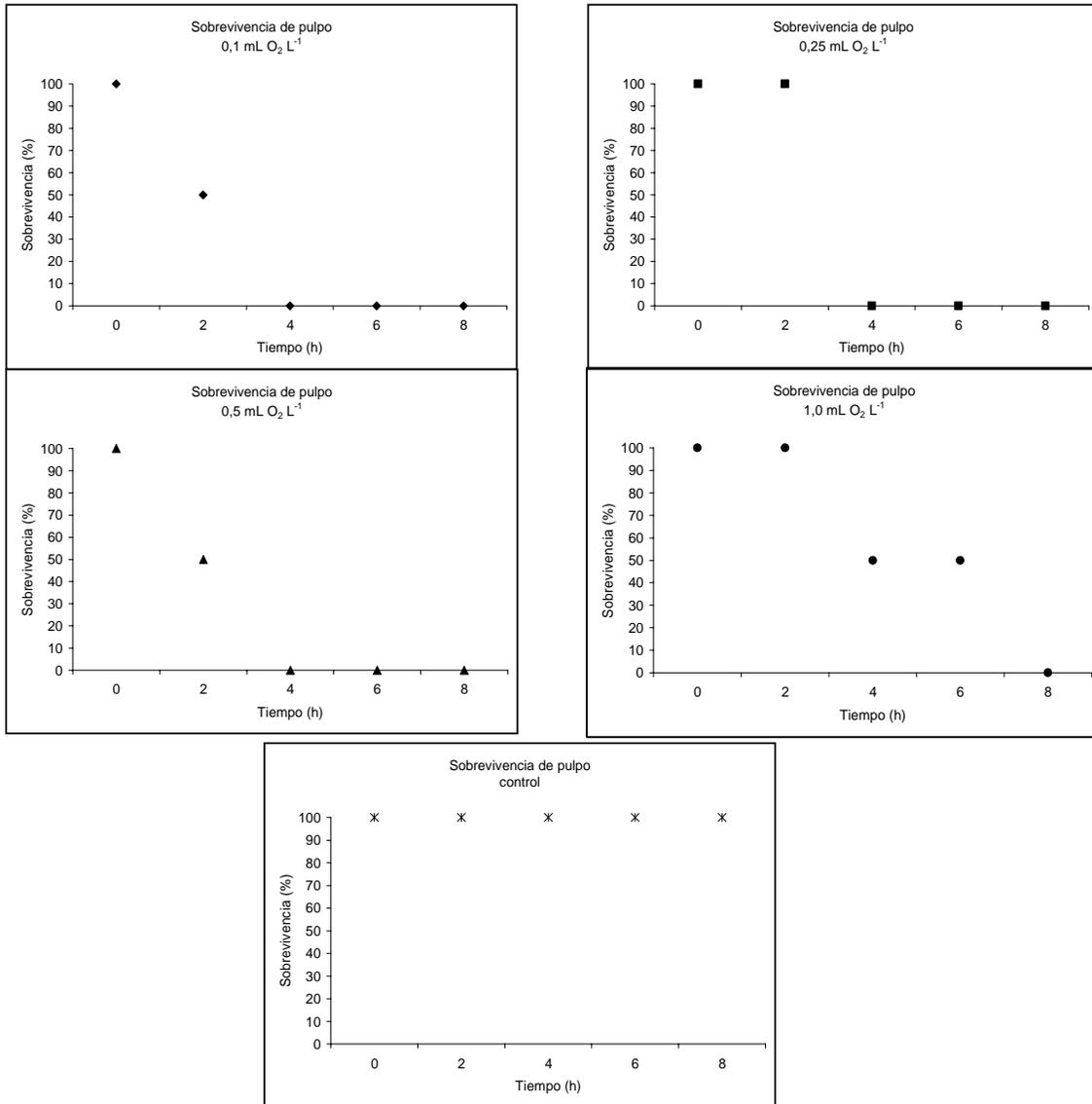


Figura 124: Sobrevivencia de pulpo (*Octopus mimus*) en experimentos de hipoxia.

Loco (*Concholepas concholepas*)

Esta especie presentó una sobrevivencia de hasta 42 horas en la condición experimental de 0,5 mL $O_2 L^{-1}$ (Figura 125), con una mortalidad inicial a partir de las 34 horas. En las otras condiciones experimentales se mostraron similares tendencias, presentándose la primera mortalidad a las 28 horas en la condición 0,25 mL $O_2 L^{-1}$. Luego, tanto en las condiciones 0,1,

0,25 y 1,0 mL O₂ L⁻¹, presentaron una sobrevivencia máxima de 38 horas. En los experimentos, no se observó movimientos ni desadhesión en ningún individuo antes de las 24 horas.

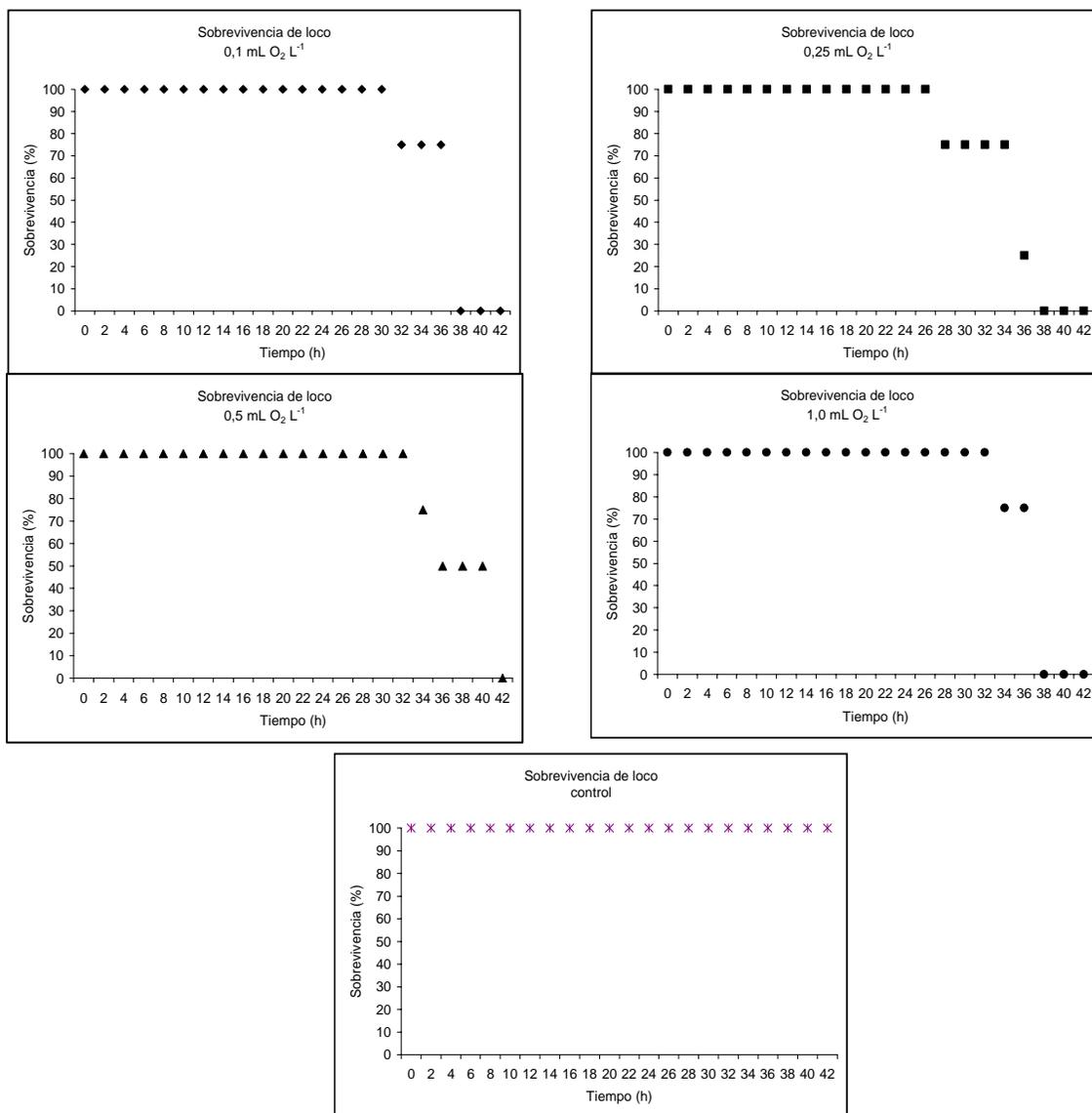


Figura 125: Sobrevivencia de loco (*Concholepas concholepas*) en experimentos de hipoxia.

Locate (*Thais chocolata*)

Esta especie es la que mostró la mayor sobrevivencia en los experimentos de hipoxia (Figura 126), entre todas las especies estudiadas, presentándose individuos que sobrevivieron hasta 102

horas en la condición experimental de 1,0 mL O₂ L⁻¹. Las primeras mortalidades se observaron a las 56 horas en la condición de 0,1 mL O₂ L⁻¹, mientras que en la condición 1,0 mL O₂ L⁻¹ las mortalidades se iniciaron a las 80 horas de iniciado el experimento.

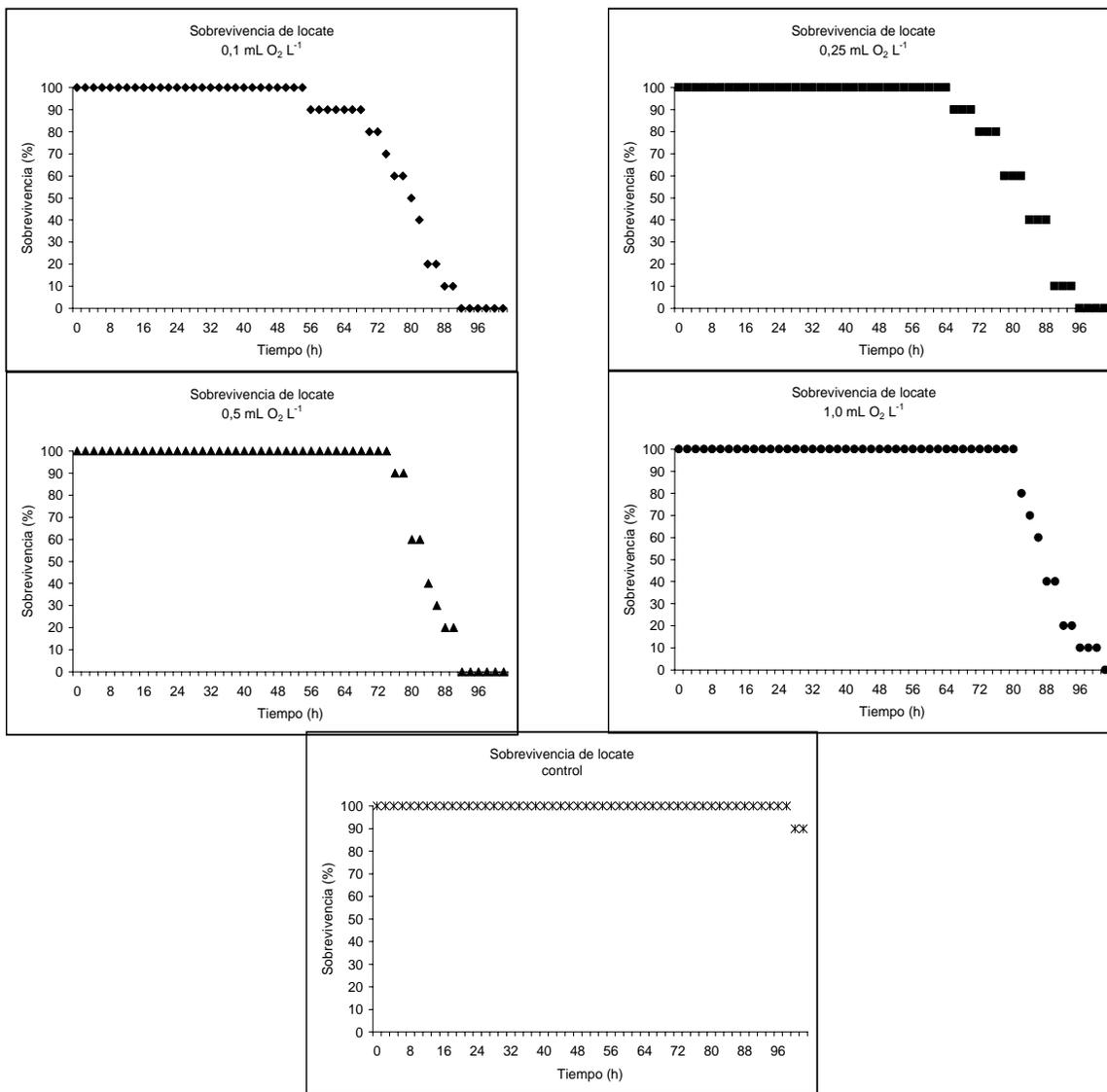


Figura 126: Sobrevivencia de locate (*Thais chocolata*) en experimentos de hipoxia.

Almeja (*Protothaca thaca*)

Se observó una sobrevivencia hasta las 84 horas (Figura 127) en individuos que estuvieron en la condición de 0,5 mL O₂ L⁻¹. Mientras que las primeras mortalidades ocurrieron a las 32 horas en la condición de 1,0 mL O₂ L⁻¹. En la condición de 0,1 mL O₂ L⁻¹ la sobrevivencia fue hasta las 64 horas, diferenciándose de las otras condiciones experimentales en que hubo individuos que permanecieron vivos hasta las 80 horas.

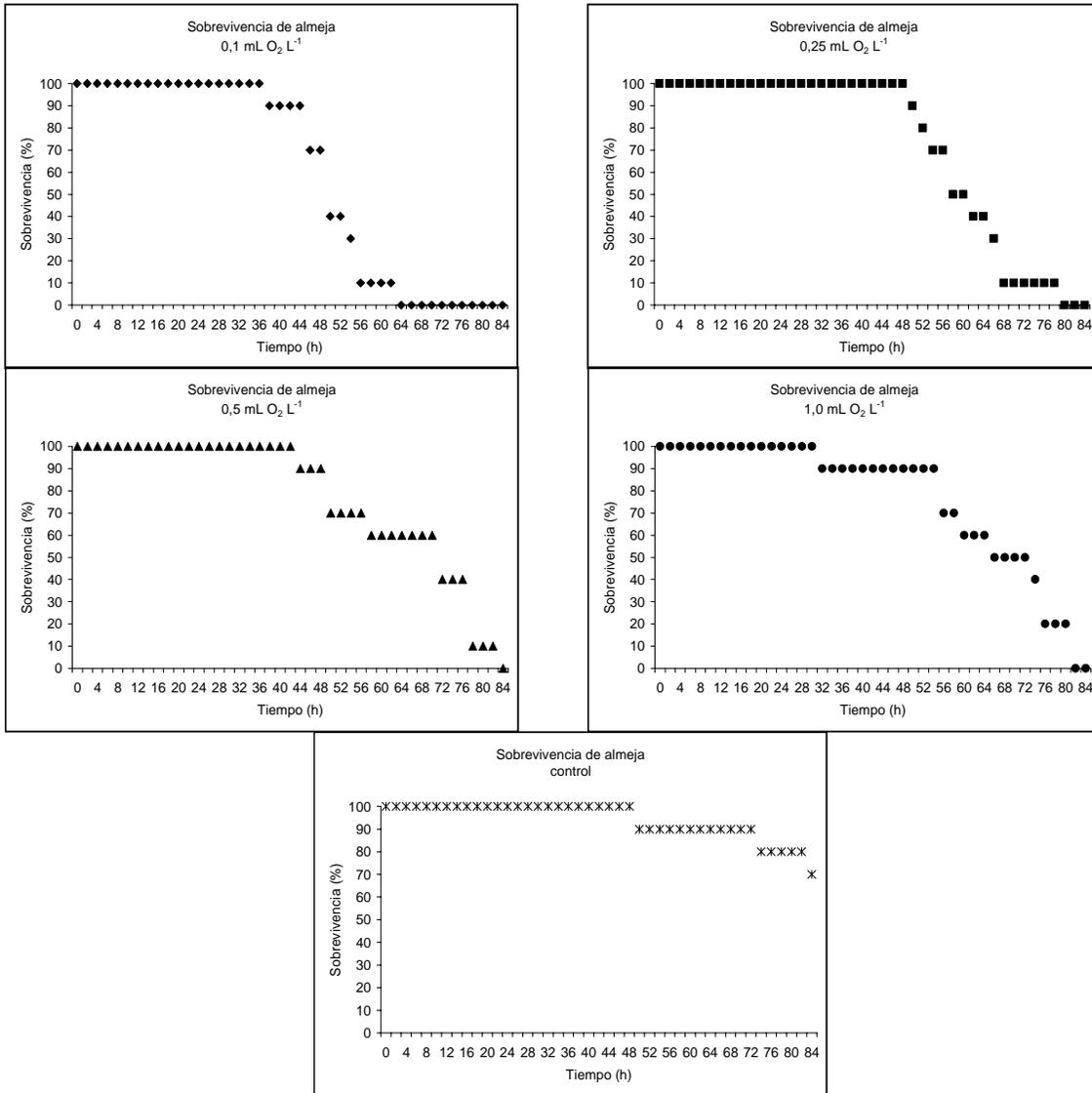


Figura 127: Sobrevivencia de almeja (*Protothaca thaca*) en experimentos de hipoxia.

Lapa (*Fissurella* sp.)

La sobrevivencia máxima observada fue de 56 horas en las condiciones de 0,1 y 1,0 mL O₂ L⁻¹, mientras que la primera mortalidad se constató a las 16 horas del experimento en la condición de 0,1 mL O₂ L⁻¹ (Figura 128).

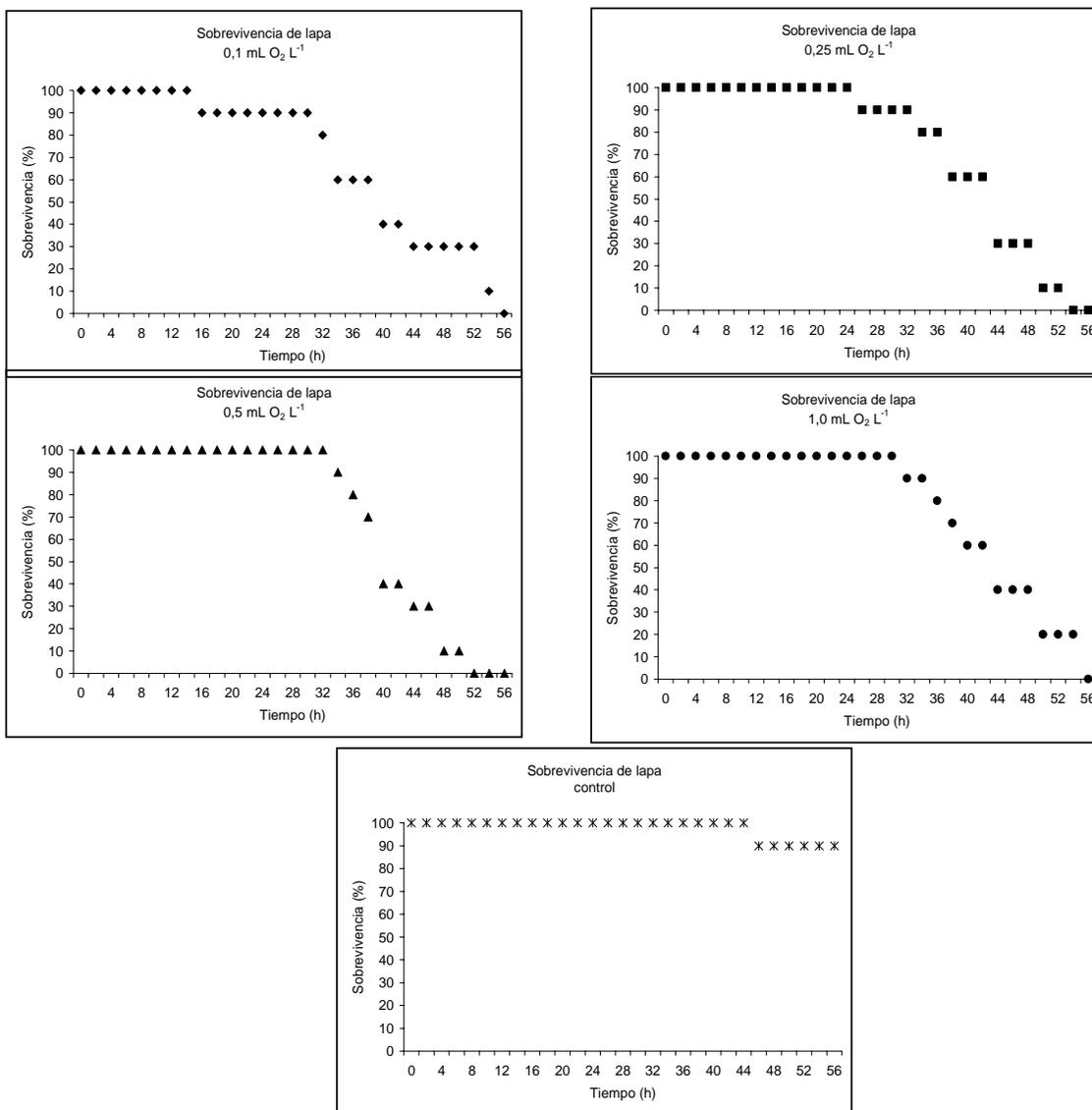


Figura 128: Sobrevivencia de lapa (*Fissurella* sp.) en experimentos de hipoxia.

4.1.2 Áreas de manejojos

La ubicación geográfica y nombre de las 7 áreas de manejo de los lugares muestreados en las dos campañas y las embarcaciones utilizadas dentro de la I y II región se detallan en la Tabla 7 y se muestran en la Figura 129.

Tabla 7: Lugares y ubicación geográfica de sitios muestreados. Agosto 2008 y enero 2009.

Caleta	Ubicación		Embarcación	Matricula
	Latitud	Longitud		
CALETA CARAMUCHO	20°39'26,0"	70°11' 32,0''	Tobby	1131
CALETA CHANAVAYITA	20°42'36,5"	70°12' 05,5''	Yo Claudio	1158
CALETA CHANAVAYA	20°54'13,6"	70°08' 39,6''	Tiburón	119
CALETA RIO SECO	20°58'19,6"	70°09' 12,4''	Los Peyeyo	2
CALETA CHIPANA	21°20'27,0"	70°06' 12,2''	Patricio	37
CALETA PUNTA ARENAS	21°38'43,0"	70°09' 15,0''	Juan Carlos	627
CALETA URCO	21°44'49,2"	70°09' 27,2''	Tiburón	700

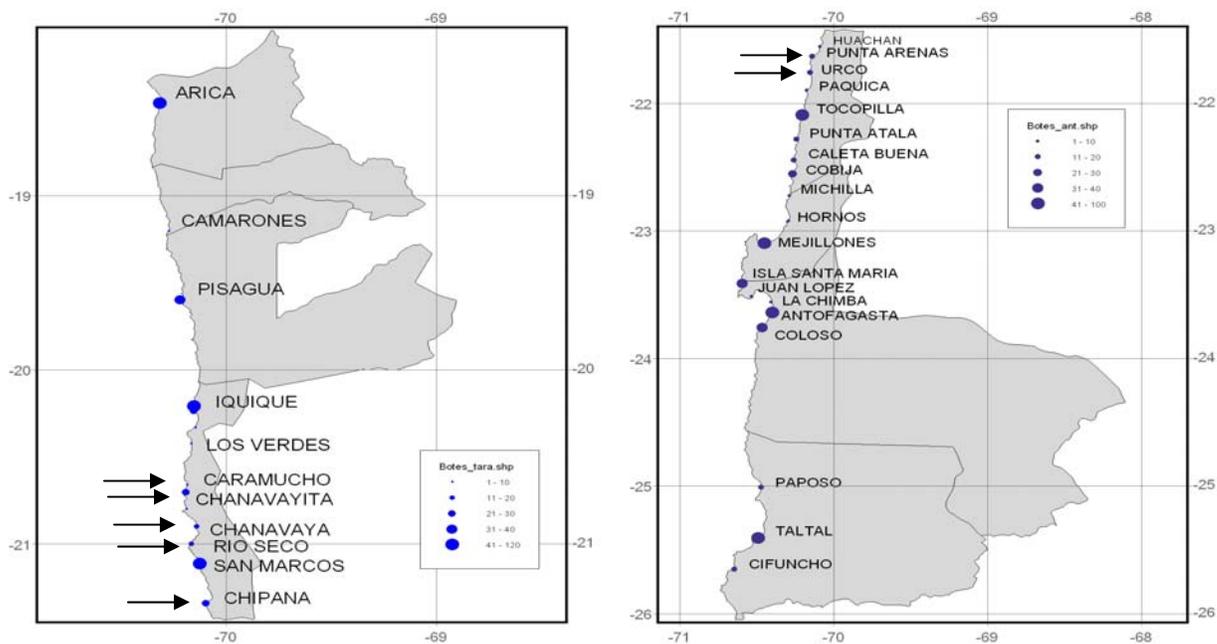


Figura 129: Áreas de Manejo muestreadas en la I y II Región.

En relación a la cantidad de oxígeno disuelto expresado en ml/L, en todos los lugares y a las profundidades muestreadas, se pudo constatar que todos los valores determinados estuvieron sobre la capa mínima de oxígeno, siendo los valores más bajo las Caletas Chanavaya y Río Seco en verano a la profundidad de 15 metros (Tabla 8 y Tabla 9). Se observa una disminución de los valores promedio por profundidad en ambas campañas, acentuando esta situación en verano, a excepción de los 0 metros (Figura 130). Este patrón es más claro en las áreas de manejo del sur, tanto en invierno (4 caletas) como en verano (3 caletas) (Figura 131).

Tabla 8: Valores promedio de oxígeno disuelto (ml/L) por lugar de muestreo y profundidad. Agosto 2008.

Caleta	Ubicación		Oxígeno disuelto (ml/L)			
			Profundidad (m)			
	Latitud	Longitud	0	5	10	15
CALETA CARAMUCHO	20°39'26,0"	70°11'32,0"	3.37	3.87	3.58	3.80
CALETA CHANAVAYITA	20°42'36,5"	70°12'05,5"	3.70	3.68	3.60	3.65
CALETA CHANAVAYA	20°54'13,6"	70°08'39,6"	5.77	5.12	4.09	4.15
CALETA RIO SECO	20°58'19,6"	70°09'12,4"	5.00	4.73	4.62	4.40
CALETA CHIPANA	21°20'27,0"	70°06'12,2"	4.85	4.03	3.07	2.65
CALETA PUNTA ARENAS	21°38'43,0"	70°09'15,0"	4.51	3.70	3.55	3.18
CALETA URCO	21°44'49,2"	70°09'27,2"	5.45	5.14	3.75	3.37
Promedio			4.66	4.32	3.75	3.60

Tabla 9: Valores promedio de oxígeno disuelto (ml/L) por lugar de muestreo y profundidad. Enero 2009.

Caleta	Ubicación		Oxígeno disuelto (ml/L)			
			Profundidad (m)			
	Latitud	Longitud	0	5	10	15
CALETA CARAMUCHO	20°39'26,0"	70°11'32,0"	7.06	3.18	3.71	4.32
CALETA CHANAVAYITA	20°42'36,5"	70°12'05,5"	6.45	3.97	3.48	4.73
CALETA CHANAVAYA	20°54'13,6"	70°08'39,6"	6.69	5.22	3.65	1.35
CALETA RIO SECO	20°58'19,6"	70°09'12,4"	3.65	4.24	3.54	1.80
CALETA CHIPANA	21°20'27,0"	70°06'12,2"	4.88	3.05	2.93	2.50
CALETA PUNTA ARENAS	21°38'43,0"	70°09'15,0"	7.33	6.48	4.35	2.87
CALETA URCO	21°44'49,2"	70°09'27,2"	5.33	4.08	2.53	2.21
Promedio			5.91	4.32	3.45	2.82

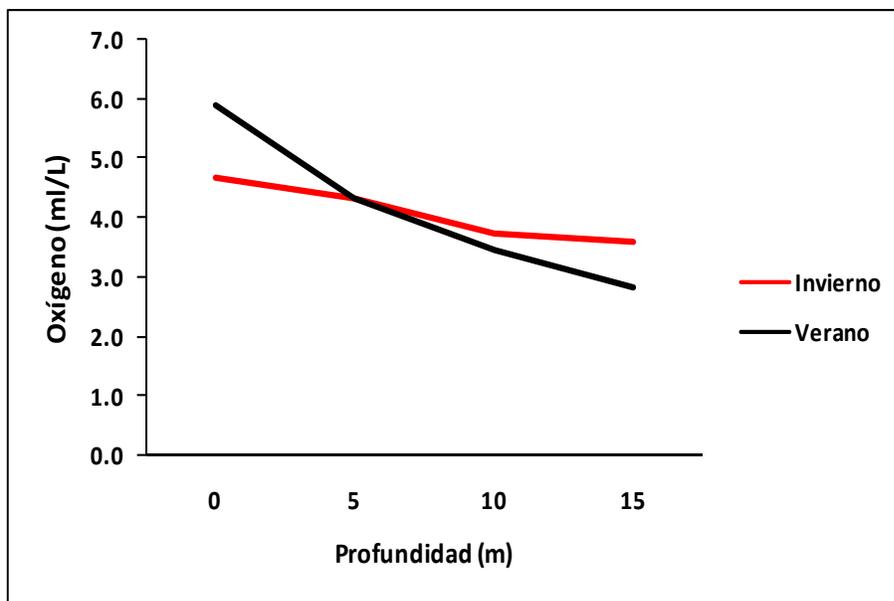


Figura 130: Valores promedio de oxígeno disuelto expresado en ml/L

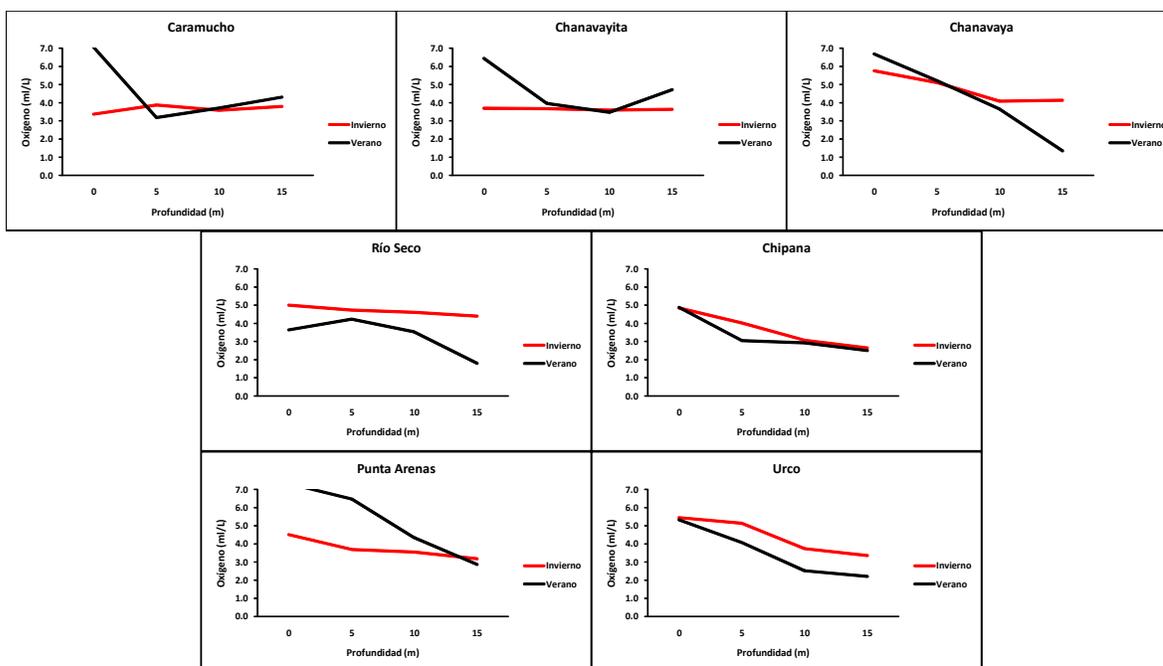


Figura 131: Valores promedio de oxígeno disuelto expresado en ml/L por profundidad en cada unas de las áreas de manejo.

De las observaciones realizadas de la biota presente (Figura 132), se registraron 12 especies de importancia comercial presentes en las áreas de manejo para la campaña de invierno del 2008 (Tabla 10) y 11 en verano del 2009, no detectándose el recurso pulpo (Tabla 11). Se pudo verificar que el grupo moluscos fue el de mayor importancia con 6 y 5 recursos, en cambio, la especie con mayor incidencia fue el recurso huiro negro o chascón respectivamente, seguido de loco, erizo rojo, pyure, lapas, cholga, locate, huiro canutillo, huiro palo, choro zapato y pulpo. Se detecto una disminución en el número de especies recursos en función de la profundidad para ambas campañas.

Tabla 10: Presencia de recursos de importancia comercial por grupo en función de la profundidad (m) en las áreas de manejo de la I y II región. Agosto 2008 (C.CAR: Caleta Caramucho; C.CHTA: Caleta Chanavayita; C.CHYA: Caleta Chanavaya; C.R.SECO: Caleta Río Seco; C.CHI: Caleta Chipana; C.PTA.A: Caleta Punta Arenas y C.URCO: Caleta Urco).

Grupo/nombre vulgar	Nombre científico	Caleta																							
		C.CAR			C.CHTA			C.CHYA			C.R.SECO			C.CHI			C.PTA.A			C.URCO					
		5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15			
MOLUSCOS																									
Caracol locate	<i>Thais chocolata</i>			x	x	x							x										x		
Cholga	<i>Aulacomya atra</i>				x	x	x						x										x		
Choro	<i>Choromytilus chorus</i>																								
Lapas	<i>Fissurella spp.</i>																								
Loco	<i>Concholepas concholepas</i>	x											x	x	x	x									
Pulpo	<i>Octopus mimus</i>	x																					x		
ALGAS																									
Chascón o huiro negro	<i>Lessonia nigrescens</i>	x	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Huiro, Canutillo	<i>Macrocystis spp.</i>																								
Huiro palo, Palo colorado	<i>Lessonia trabeculata</i>												x										x		
CRUSTACEOS																									
Picoroco	<i>Megabalanus psitticus</i>				x	x																			
EQUINODERMOS																									
Erizo	<i>Loxechinus albus</i>	x											x										x		
TUNICADO																									
Pyure	<i>Pyura chilensis</i>			x										x									x		
Frecuencia		4	1	3	5	5	1	5	3	3	5	5	3	5	4	4	6	1	4	4	3	1			

Tabla 11: Presencia de recursos de importancia comercial por grupo en función de la profundidad (m) en las áreas de manejo de la I y II región. Enero 2009 (C.CAR: Caleta Caramucho; C.CHTA: Caleta Chanavayita; C.CHYA: Caleta Chanavaya; C.R.SECO: Caleta Río Seco; C.CHI: Caleta Chipana; C.PTA.A: Caleta Punta Arenas y C.URCO: Caleta Urco).

Grupo/nombre vulgar	Nombre científico	Caleta																							
		C.CAR			C.CHTA			C.CHYA			C.R.SECO			C.CHI			C.PTA.A			C.URCO					
		5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15			
MOLUSCOS																									
Caracol locate	<i>Thais chocolata</i>												x												
Cholga	<i>Aulacomya atra</i>																						x		
Choro	<i>Choromytilus chorus</i>																								
Lapas	<i>Fissurella spp.</i>				x	x								x	x	x	x	x							
Loco	<i>Concholepas concholepas</i>				x	x								x	x										
ALGAS																									
Chascón o huiro negro	<i>Lessonia nigrescens</i>	x	x		x	x							x	x	x	x	x	x					x		
Huiro, Canutillo	<i>Macrocystis spp.</i>																								
Huiro palo, Palo colorado	<i>Lessonia trabeculata</i>																						x		
CRUSTACEOS																									
Picoroco	<i>Megabalanus psitticus</i>				x																		x		
EQUINODERMOS																									
Erizo	<i>Loxechinus albus</i>	x	x	x										x	x								x		
TUNICADO																									
Pyure	<i>Pyura chilensis</i>	x	x	x	x	x																	x		
Frecuencia		4	3	2	5	4	0	3	4	2	5	4	1	4	4	5	6	5	2	5	2	1			

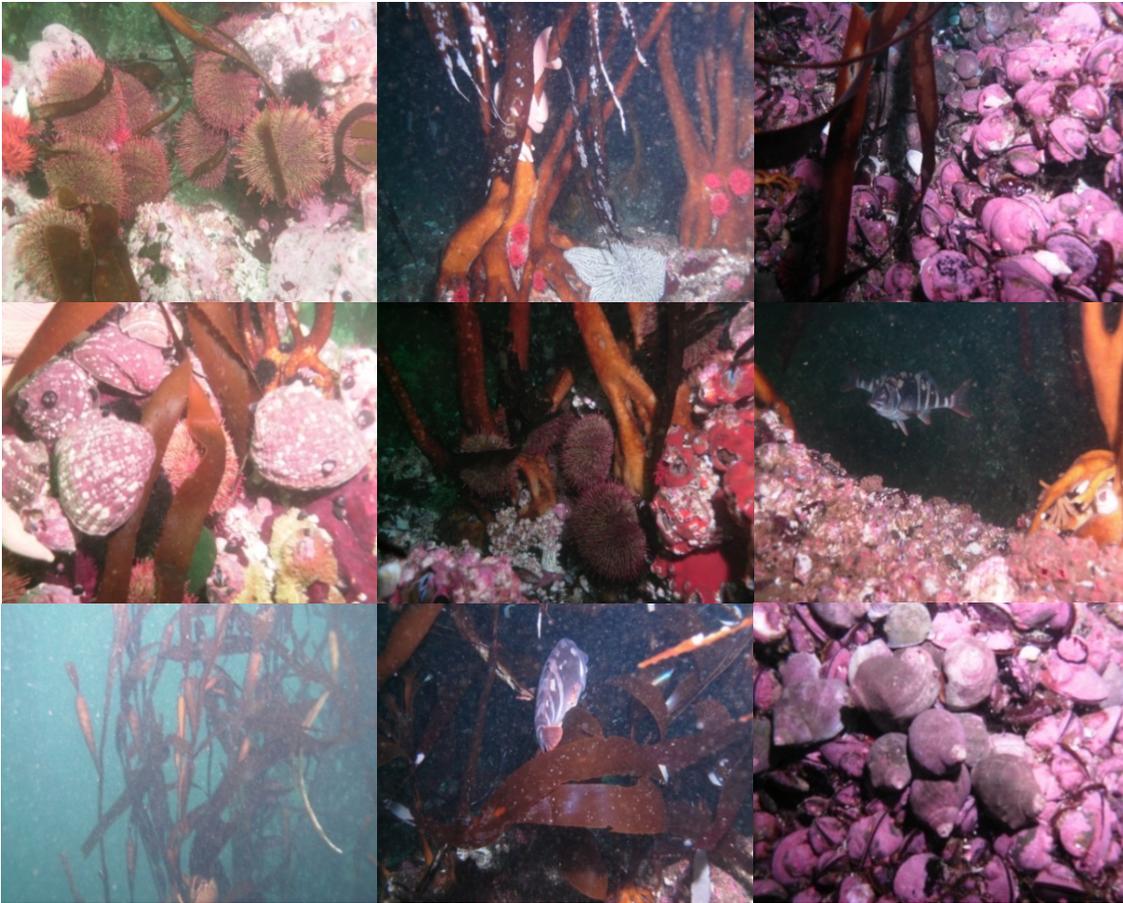


Figura 132: Principales recursos observados en las áreas de manejo de la I y II región.

Las mayores densidades medias, expresada en número de individuos por m^2 , para los recursos loco, lapas, erizo y pulpo, tanto en invierno (Figura 133 y Tabla 12) como en verano (Figura 134 y Tabla 13), se detectan en los primeros 10 metros de profundidad, no así en el recurso locate en donde las mayores densidades se presentan a mayores profundidades, al igual que cholga y choro zapato.

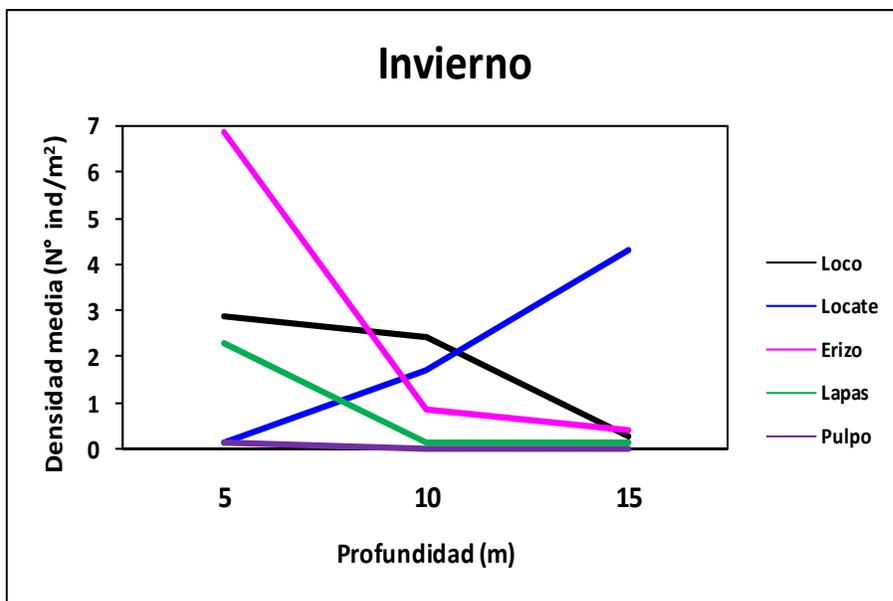


Figura 133: Valores promedio de densidad por profundidad en los recursos bentónicos de importancia comercial, invierno 2008.

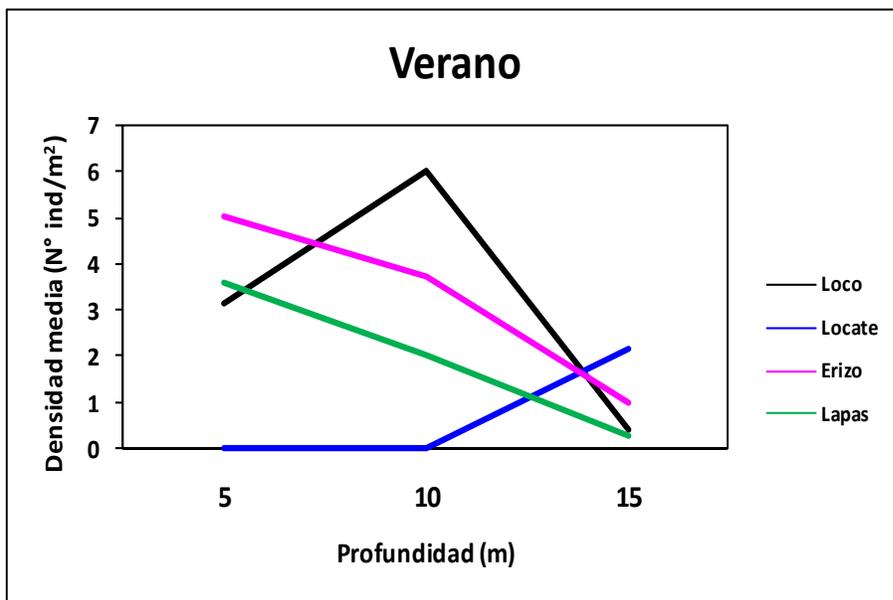


Figura 134: Valores promedio de densidad por profundidad en los recursos bentónicos de importancia comercial, verano 2009.

Tabla 12: Número de ejemplares de los recursos de importancia comercial en función de la profundidad (m) en las áreas de manejo de la I y II región. Agosto 2008 (C.CAR: Caleta Caramucho; C.CHTA: Caleta Chanavayita; C.CHYA: Caleta Chanavaya; C.R.SEC: Caleta Río Seco; C.CHI: Caleta Chipana; C.PTA.A: Caleta Punta Arenas y C.URCO: Caleta Urco).

		Caleta																				
		C.CAR			C.CHTA			C.CHYA			C.R.SECO			C.CHI			C.PTA.A			C.URCO		
Grupo/nombre vulgar	Nombre científico	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
MOLUSCOS																						
Caracol locate	<i>Thais chocolata</i>				8						12											10
Lapas	<i>Fissurella spp.</i>	2					3				4	1	1	4						3		
Loco	<i>Concholepas concholepas</i>	3			2	3		4	6		2	4		4						5	2	
Pulpo	<i>Octopus mimus</i>																					1
EQUINODERMOS																						
Erizo	<i>Loxechinus albus</i>	7					6				8			10	6	3	9				8	

Tabla 13: Número de ejemplares de los recursos de importancia comercial en función de la profundidad (m) en las áreas de manejo de la I y II región. Enero 2009 (C.CAR: Caleta Caramucho; C.CHTA: Caleta Chanavayita; C.CHYA: Caleta Chanavaya; C.R.SEC: Caleta Río Seco; C.CHI: Caleta Chipana; C.PTA.A: Caleta Punta Arenas y C.URCO: Caleta Urco).

		Caleta																				
		C.CAR			C.CHTA			C.CHYA			C.R.SECO			C.CHI			C.PTA.A			C.URCO		
Grupo/nombre vulgar	Nombre científico	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
MOLUSCOS																						
Caracol locate	<i>Thais chocolata</i>									6			8							1		
Lapas	<i>Fissurella spp.</i>				4	3		4			13	4		6	2	2	2	1				
Loco	<i>Concholepas concholepas</i>				7	13		17			1	3		9	7	3	5	2				
Pulpo	<i>Octopus mimus</i>																					
EQUINODERMOS																						
Erizo	<i>Loxechinus albus</i>	7	5	6				6			14	8		1	13	1	6				1	

Al analizar la información disponible de densidad en función de la profundidad, para las especies de interés comercial en las áreas de manejo entre 1998 y 2008, se pudo detectar en un rango de 3 y 24 metros (Figura 135).

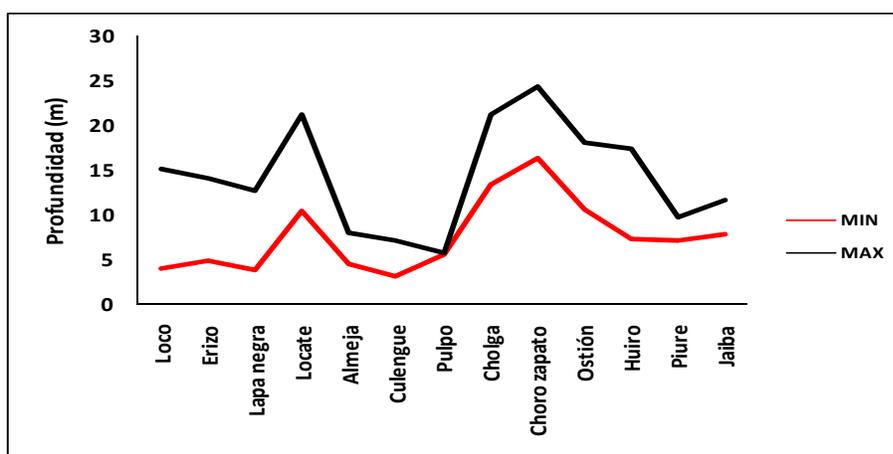


Figura 135: Profundidad mínima y máxima en las áreas de manejo para diferentes recursos. 1998-2008.

Al examinar la situación por caletas y años se observan situaciones particulares en cada una de ellas, así en la caleta Pisagua (Figura 136) se observa que el recurso locate se distribuye a profundidades superiores a los 10 metros en comparación a los otros recursos de importancia comercial. Este mismo patrón se observa en la caleta de Caramucho (Figura 137), con una distribución batimétrica más superficial, en donde los recursos no se detectan más allá de los 6 metros de profundidad, no se observa la presencia de locate. En caleta Chanavayita (Figura 138) los recursos se distribuyen a profundidad superiores a los 8 metros, existiendo una relación entre los recursos locate, cholga y choro zapato y la profundidad, escenarios muy similares se repiten en las caletas Chanavaya (Figura 139), Río Seco (Figura 140), Chipana (Figura 141) y Urco (Figura 142).

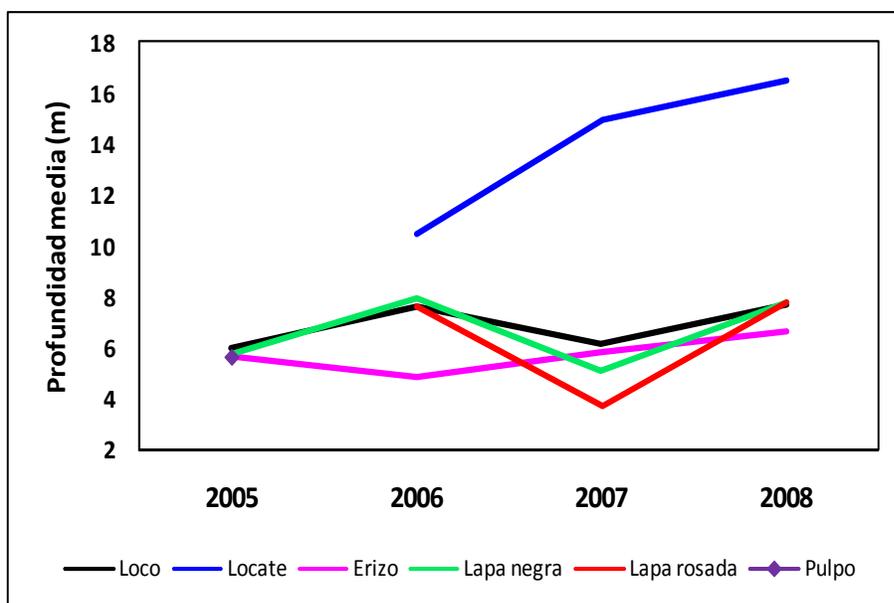


Figura 136: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Pisagua. 2005-2008.

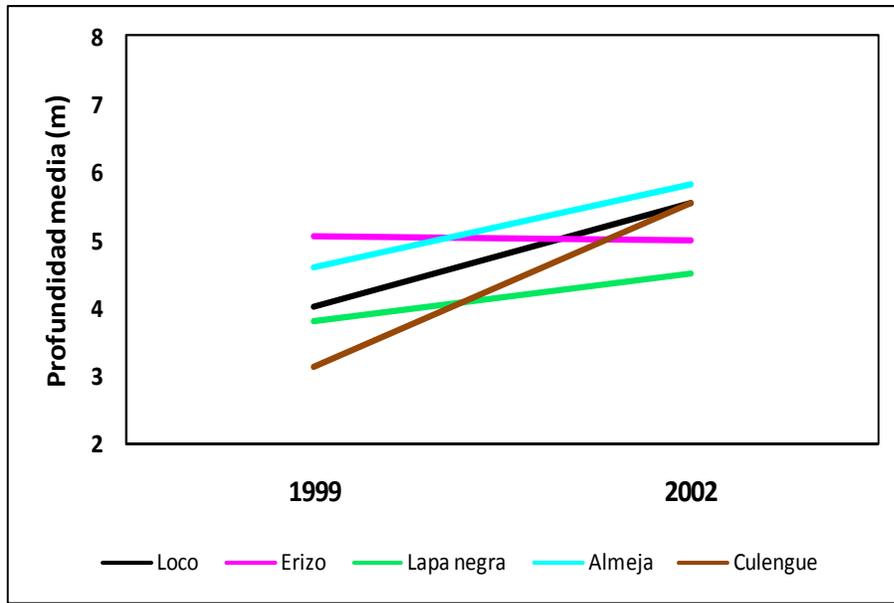


Figura 137: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Caramucho. 1999 y 2002.

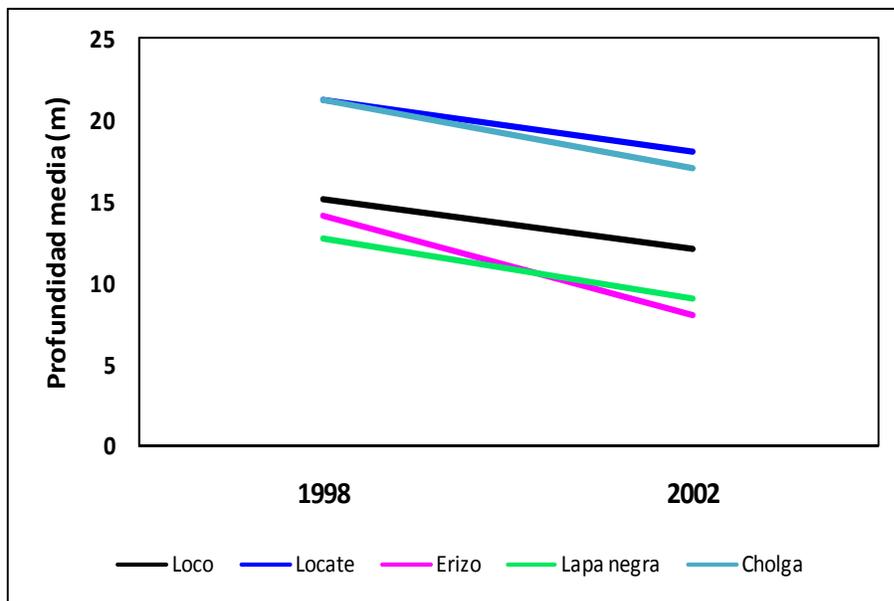


Figura 138: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Chanavayita. 1998 y 2002.

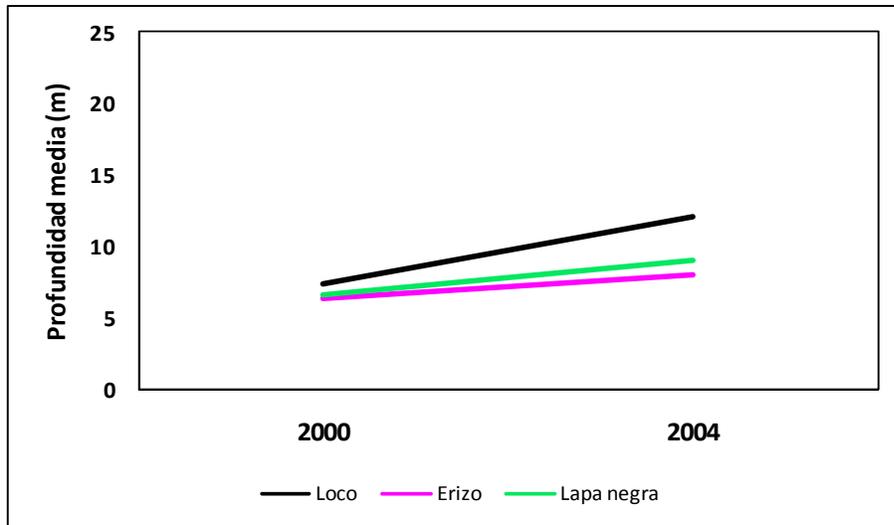


Figura 139: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Chanavaya. 2000 y 2004.

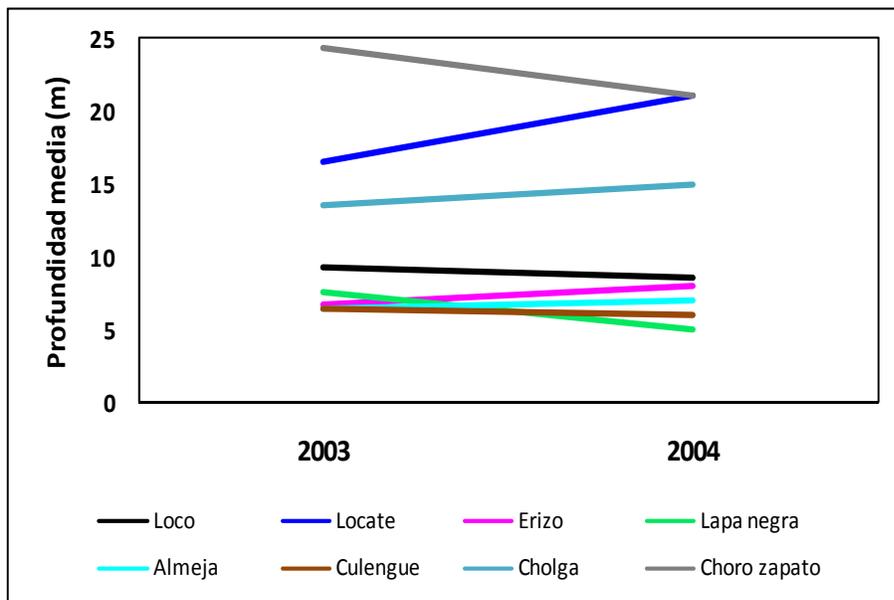


Figura 140: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Río Seco. 2003 y 2004.

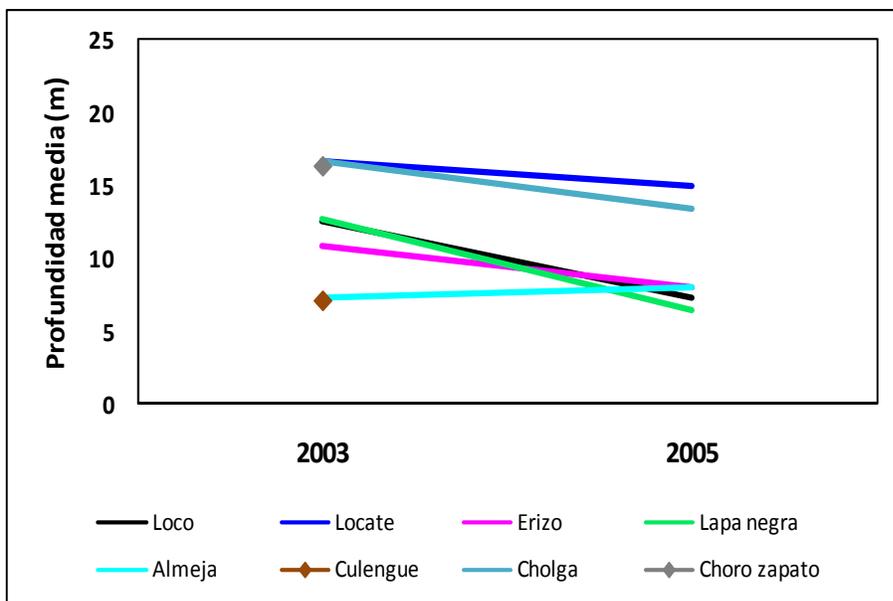


Figura 141: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Chipana. 2003 y 2005.

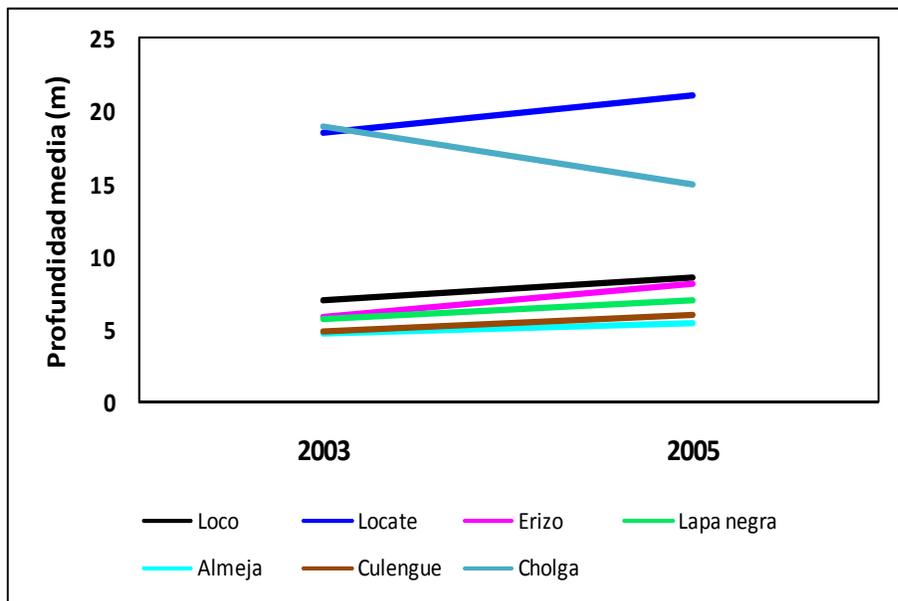


Figura 142: Profundidad media para diferentes recursos en caleta Urco. 2003 y 2005.

IX. DISCUSION

Durante el Crucero ZMO de invierno de 2008, se destacó un marcado evento de surgencia costera centrado en 21.3°S asociada a bajas temperaturas, salinidades y contenido de oxígeno, además de una alta densidad. En cambio en el verano de 2009, se presentaron eventos de surgencia en toda la región de estudio, asociado a un persistente e intenso viento meridional, generando un transporte hacia el oeste el que mantuvo las isotermas paralela a la costa. Más hacia el oeste a través de las isotermas, isohalinas, oxilíneas de oxígeno y densidad, se puede observar que tanto para el invierno de 2008 y verano de 2009 una penetración de aguas hacia el sur.

Mediante la utilización de diagramas T-S se diferenciaron en el área de estudio el AST, AIPSO y el AESS, donde estas dos últimas participan activamente de los eventos de surgencia tanto en el invierno de 2008 como en verano de 2009.

Mediante la información combinada y satelital, se observó que durante los días en que se realizaron ambos cruceros (verano e invierno), los vientos cercanos a la costa siempre fueron favorables a la surgencia. En general, con respecto a sus medias éstos fueron superiores (inferiores) durante el invierno (verano). Si los vientos se intensifican a lo largo de la costa, se espera que en esta región la TSM disminuya y que se forme un gradiente zonal costa-océano negativo y lo contrario cuando los vientos se debilitan. Sin embargo, se presentaron anomalías positivas (negativas) de TSM durante el invierno (verano), lo que sugiere la presencia de procesos advectivos horizontales suponiendo que los flujos de calor aire-mar no varíen drásticamente. Aparentemente en invierno en la región en donde se realizó el crucero el afloramiento se mostró intenso debido al gradiente zonal costa-océano negativo, lo cual no es evidente para las condiciones normales de invierno, quizás porque en esta época se restringe a los primeros kilómetros de la costa o debido a que la TSM en toda el área es homogénea debido a la poca radiación del sol recibida. Por otro lado, en verano no se aprecia un gradiente costa-océano en el área donde se realizó el crucero, el cual es evidente durante condiciones normales, no descartando la posibilidad de que la surgencia se estuviera dando muy cerca de la costa.

Por otra parte, la distribución vertical de temperatura, presentó una capa isotermal muy similar tanto en invierno de 2008 y verano de 2009 en el área de estudio. Y la isoterma de 15°C representó la termoclina ubicándose a mayor profundidad en invierno que en verano. Además, en toda la región se presentó próximo a la termoclina una desarrollada estabilidad en la columna de agua, la cual se ve reforzada por el AIPSO, debido al bajo contenido de salino, lo que no permite que la ZMO se ventile (Fuenzalida *et al.* 2009).

Cabe señalar que la evolución temporal de las distribuciones verticales de la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y densidad, en la latitud 20°18'S, en invierno de 2008, muestran una surgencia permanente, pero de menor magnitud que en verano de 2009.

La presencia de altas concentraciones de clorofila-a detectadas dentro de las primeras 10 m de la costa, responde al patrón de distribución característico descrito para la zona, en particular la ocurrencia permanente de altos valores localizados en el área adyacente a los 21°S. En esta región concentraciones >1 µg Cla/L se encuentran confinadas a los primeros 50 km de la costa y al estrato entre la superficie y los 25 m de profundidad (González *et al.*, 1998; Iriarte *et al.*, 2000; Montecino *et al.*, 1998; Montecino *et al.*, 2006; Morales *et al.*, 1996b; 2001; Strub *et al.*, 1998).

Por otra parte, ha sido evidenciado para sistemas de surgencia que las altas concentraciones de clorofila-a responden a la presencia de fitoplancton >20 µm en tamaño (Montecino y Quiroz, 2000; Montecino *et al.*, 2006; Morales *et al.*, 1996a; Morales *et al.*, 2001). Si bien en este estudio no se informa acerca de la composición específica del fitoplancton, el análisis de ésta reveló la predominancia de este tipo de fitoplancteres (diatomeas).

Respecto de la variabilidad temporal de la concentración de clorofila-a, no hubo diferencias estadísticas entre los valores detectados durante los cruceros estacionales ni durante los muestreos semanales. Esta baja variabilidad temporal en las magnitudes de la biomasa fitoplanctónica se debería al patrón de intensificación y relajación de los eventos de surgencia, que se repite continuamente en lugares donde estos eventos son una condición normal, lo cual corrobora la baja influencia estacional que existe en la zona (Morales *et al.*, 1996a, 2001; Escribano *et al.*, 2004; Montecino *et al.*, 2006; Herrera y Escribano, 2006). Esta intensificación y relajación de los

procesos de afloramiento quedó claramente evidenciada en el análisis de los parámetros físico-químicos registrados durante el estudio.

En relación al máximo observado en la época estival ($>100 \mu\text{g Cl a/L}$), éste fue generado por la proliferación masiva de dos especies de dinoflagelados (*Prorocentrum micans* y *Ceratium furca* v. *berghii*) que son normalmente encontradas en esta zona y que tienden a producir intensas discoloraciones durante condiciones de verano favorables al crecimiento de los flagelados (Herrera y Escribano, 2006; Alvial y García, 1986).

Un aspecto interesante de destacar en cuanto a la biomasa fitoplanctónica y el oxígeno disuelto, es que las altas concentraciones de ambos parámetros fueron coincidentes tanto en la zona costera como a nivel superficial. Esta condición respondería a que la producción de oxígeno por fotosíntesis constituye uno de los principales procesos de aporte de este gas a las capas superficiales, superando la capacidad de intercambio entre el océano y la atmósfera, lo que genera la sobresaturación del gas a este nivel (Libes, 1992).

En cuanto a la biomasa fitoplanctónica como potencial alimento para las larvas de anchoveta, los altos niveles ($>1 \mu\text{g Cl a/L}$) sugieren condiciones favorables para las larvas de clupeidos en términos de la disponibilidad de alimento, (Morales *et al.*, 1996b).

De acuerdo a los resultados de este estudio, tanto en los experimentos de incubación como los de terreno las bajas concentraciones de oxígeno no tienen un efecto apreciable en la sobrevivencia de los huevos de anchoveta, por lo que expansiones o ascenso-descenso de la ZMO no tendría un efecto directo en la sobrevivencia de estadios tempranos de anchoveta. Lo cual se explicaría por el bajo consumo de oxígeno a nivel de embrión y a mecanismos bioquímicos que sería interesante de estudiar (ej. Características de la hemoglobina embrionaria).

Todos los análisis efectuados a distintas escalas espaciales y temporales indican un efecto directo e importante de los predadores (Gelatinosos) sobre la abundancia de huevos de anchoveta. Indudablemente que la interacción entre presa y depredador, en este caso huevos y larvas de anchoveta vs zooplancton gelatinoso, está influenciada por el comportamiento de la CMO. El zooplancton gelatinoso, con excepción de quetognatos, si parece estar restringido al estrato

superior (<50 m), producto del ascenso de la CMO y en zonas donde la CMO es muy somera se encuentra disminuido, de acuerdo al muestreo espacial. El zooplancton en el estrato superior está sujeto a advección en la capa de Ekman cuando la surgencia es activa, y esto puede explicar su alejamiento desde la costa. Sin embargo, frente a una relajación de la surgencia puede ocurrir convergencia de los gelatinosos hacia la zona más somera, ejerciendo una mayor depredación. La correlación positiva entre la profundidad de la CMO y la abundancia de gelatinosos confirma esta relación. En la zona somera misma, no obstante, y a través del tiempo la relación entre la CMO y los gelatinosos es negativa. Esto ocurre porque al incrementarse la surgencia y ascender la CMO en este sector los gelatinosos se concentran aún más en el estrato superior, restringidos por la CMO. Esta interacción espacial-temporal entre estadios tempranos de peces y gelatinosos, se rompe en una condición de verano, cuando la CMO permanece somera por todo el período. En esta condición se espera que la advección hacia fuera de la costa sea favorable para transportar depredadores y evitar su agregación extrema en la franja más somera. De tal manera, que la surgencia activa al provocar el ascenso de la CMO genera condiciones propicias para aumentar la probabilidad de sobrevivencia de huevos y larvas en la medida en que el zooplancton gelatinoso es transportado lejos de la zona de desove principal. Esta relación explica la correlación negativa entre la abundancia de gelatinosos y la densidad de huevos y larvas de anchoveta. Estas relaciones entre la alternancia de condiciones de surgencia activa y relajada, el ascenso/descenso de la CMO y sus impactos sobre las relaciones presa-depredador de gelatinoso vs estadios tempranos de peces, se ilustra a través de un modelo conceptual esquematizado en la Figura 143.

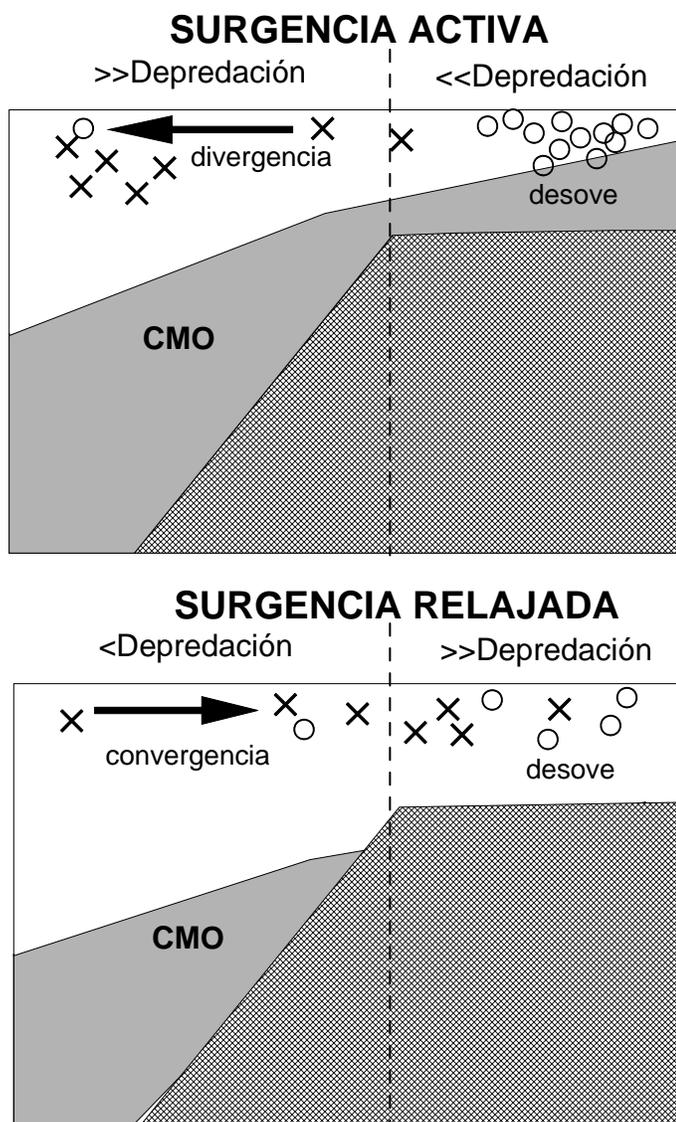


Figura 143: Modelo conceptual que describe la relación entre la variabilidad de la surgencia, el ascenso/descenso de la CMO y sus efectos sobre las interacciones entre el zooplancton gelatinoso y huevos y larvas de anchoveta. Los círculos representan los huevos de anchoveta (o larvas) y las cruces los depredadores. Durante surgencia activa se espera ascenso de la CMO y divergencia entre presas y depredadores, mientras que en condiciones de relajación se espera convergencia en la zona más somera de desove incrementando el riesgo de depredación.

Este modelo podría acoplarse con lo propuesto por Rykaczewski and Checkley (2008), quienes señalan que la tasa de surgencia es un determinante fundamental de la estructura biológica y producción en el ecosistema pelágico costeros y que cambios en la magnitud y gradiente espacial del stress del viento pueden tener importantes efectos en estos ecosistemas.

No deja de llamar la atención la sorprendente tolerancia de huevos de anchoveta a concentraciones de oxígeno definitivamente hipóxicas y que se acercan a la anoxia. El efecto negativo de bajas concentraciones de oxígeno sobre organismos marinos es un fenómeno bien conocido. Así por ejemplo, la tasa de producción de huevos en el copépodo *Acartia tonsa*, es fuertemente afectada por condiciones de hipoxia, aunque no se ha informado sobre el efecto de la hipoxia sobre la sobrevivencia de sus huevos (Sedlacek y Marcus, 2005). Por otro lado, McNatt y Rice (2004) demuestran que en juveniles de *Brevoortia tyrannus* y *Leiostomus xanthurus*, condiciones de hipoxia generan reducción en las tasas de crecimiento de hasta 89%. Hassell *et al.* (2008) demuestran que condiciones de hipoxia, unidas a bajas salinidades y temperatura reducen la sobrevivencia de embriones de *Acanthopagrus butcheri*. Sin embargo, una situación opuesta ocurre en organismos bentónicos expuestos a bajos niveles de oxígeno, los que pueden tolerar bien concentraciones tan bajas como 0.5 – 1.0 mL/L de oxígeno disuelto (Rosenberg *et al.* 1991; Laudien *et al.* 2002). Sin embargo, Hidalgo y Escribano (2008) al comparar muestras obtenidas en aguas superficiales oxigenadas y aguas hipoxicas (< 1 mL/L) bajo la ZMO en la zona norte de Chile, demuestran para el copépodo *Eucalanus inermis* que tanto la tasa de producción de huevos, tasa de crecimiento, tasa de pastoreo y producción de pellets fecales no es afectada por condiciones de hipoxia. Más aún, la producción de huevos ocurre sólo bajo la ZMO, la que a su vez se constituye en una barrera que restringe la migración vertical del zooplancton, proponiendo entonces, que la tolerancia a la hipoxia en esta especie sería una ventaja ecológica que le provee protección contra la predación por predadores visuales y zooplancton gelatinoso. La alta sobrevivencia, tanto de huevos (Z variando entre 0.015 y 0.0011) como de larvas (Z variando entre 0.0011 y 0.006) podría constituirse en un mecanismo similar al de huevos de *E. inermis* para evitar o minimizar la predación.

En relación al modelo, los resultados obtenidos son coherentes con el conocimiento que se tiene del sector (Fuenzalida *et al.* 2008, Fuenzalida *et al.* 2009), aun así hay dudas respecto a las concentraciones del oxígeno disuelto en verano en comparación con las de invierno, por lo que es necesario una revisión en detalle de los datos cada un grado del WOCE 2005 en la zona de estudio.

Las variaciones de las concentraciones de oxígeno disuelto en función de la intensidad de la surgencia, tanto para el invierno de 2008 como para el verano de 2009 no son lo suficientemente realistas, por lo que es necesario la incorporación de las fuentes y pérdidas de oxígeno disuelto que ocurren en la columna de agua por los procesos biológicos y químicos. Además de la incorporación de otros elementos forzantes como la radiación solar, la evaporación, las variaciones día y noche tanto de estas dos variables, como del viento costero la radiación solar.

Los derivadores indican que normalmente por procesos de advección los huevos puestos por los adultos por sobre la capa de mínimo oxígeno no van a ser transportados a aguas más profundas, la mayoría no alcanza los 30 m de profundidad.

En la Figura 144 se presenta la comparación en la sobrevivencia observada en las seis especies utilizadas en los experimentos de hipoxia, en la condición de $1,0 \text{ mL O}_2 \text{ L}^{-1}$. La especie que muestra la mayor sobrevivencia es el locote y las que presentan la sobrevivencia más baja son pulpo y erizo.

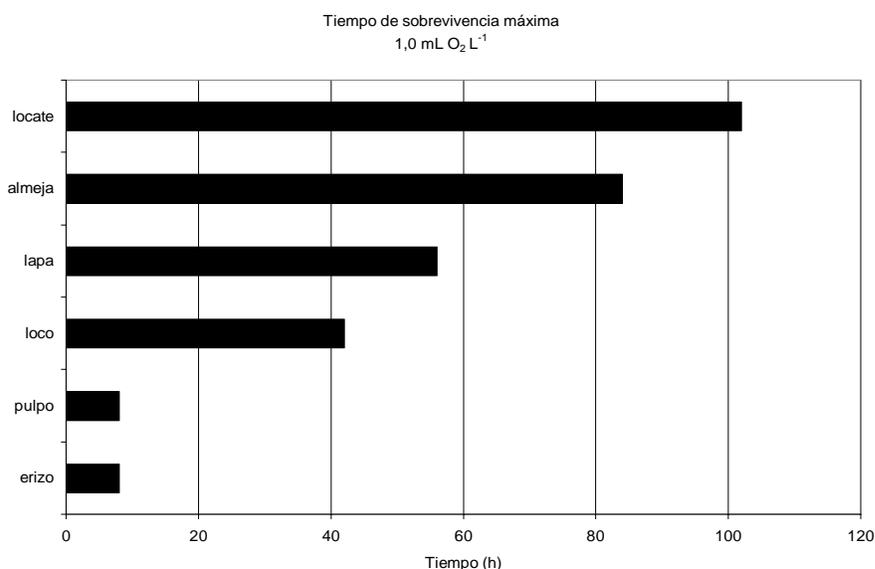


Figura 144: Comparación de la sobrevivencia de las seis especies estudiadas, considerando la condición experimental de $1,0 \text{ mL O}_2 \text{ L}^{-1}$.

Los animales bentónicos que presentan variaciones frecuentes u ocasionales de hipoxia, pueden responder a través de adaptaciones conductuales o tolerar la condición con cambios fisiológicos.

Tratándose de animales que pueden migrar con facilidad y rapidez, se moverán hacia zonas de mayor contenido de oxígeno, tal como el pulpo y eso explicaría la baja respuesta a la hipoxia observada en los experimentos, ya que no requiere tolerar bajas concentraciones de oxígeno ambiental (Hamburger *et al.*, 2000). En cambio, otros organismos presentan condiciones fisiológicas que les permiten tolerar las bajas concentraciones de oxígeno, siendo la más habitual la disminución de la actividad, tal como los moluscos que cierran sus valvas u opérculos y llegan, cuando la hipoxia es prolongada, a reducir la tasa metabólica hasta un 1%. En el extremo de la tolerancia a la hipoxia, encontramos aquellos que activan mecanismo de anaerobiosis facultativa, con lo cual pueden soportar cientos de horas en condiciones de hipoxia e incluso anoxia. En el último caso, además de los estudiados poliquetos, encontramos a bivalvos como almejas y machas, así como a gasterópodos dentro de los organismos bentónicos que pueden tolerar condiciones de hipoxia bajo la CMO (Hagerman, 1998; Rabalais *et al.*, 2002).

Las mayores densidades para los recursos locos, erizos, lapas, pulpos, culengues y almejas se presentan en la parte bentónica más superficial, disminuyendo en profundidad en la medida que la cantidad de oxígeno también lo hace. En cambio en el recurso locate las más altas concentraciones se ubican a batimetrías sobre los 10 metros al igual que los recursos cholga y choro zapato, lo que tendría directa relación con los mecanismos para soportar una baja en la cantidad de oxígeno a dichas profundidades, es así que los recursos pulpo y erizo que presentaron los menores tiempos de sobrevivencia y serán muy sensibles a la capa mínima de oxígeno (Figura 145 y Figura 146).

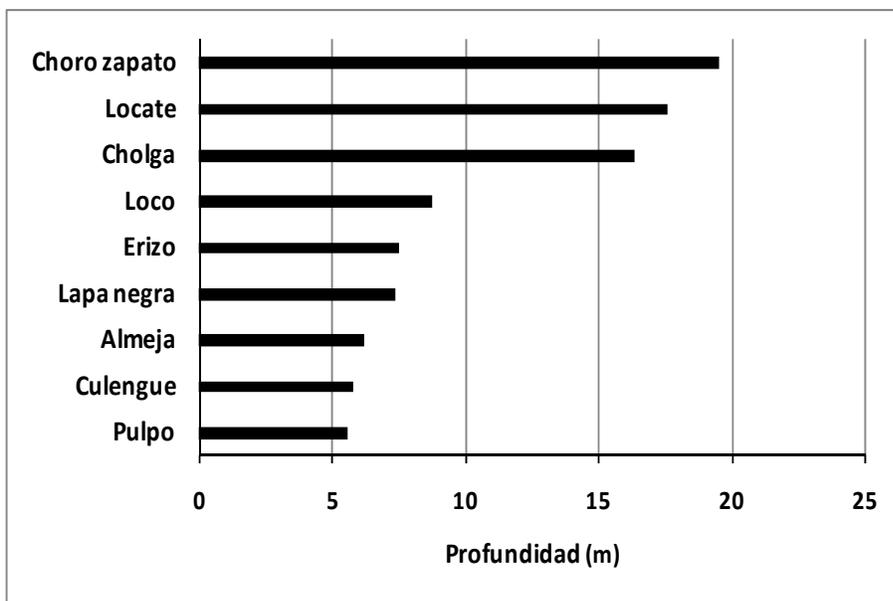


Figura 145: Profundidad media de las especies comerciales presente en las áreas de manejo de la I y II región.1998-2008.

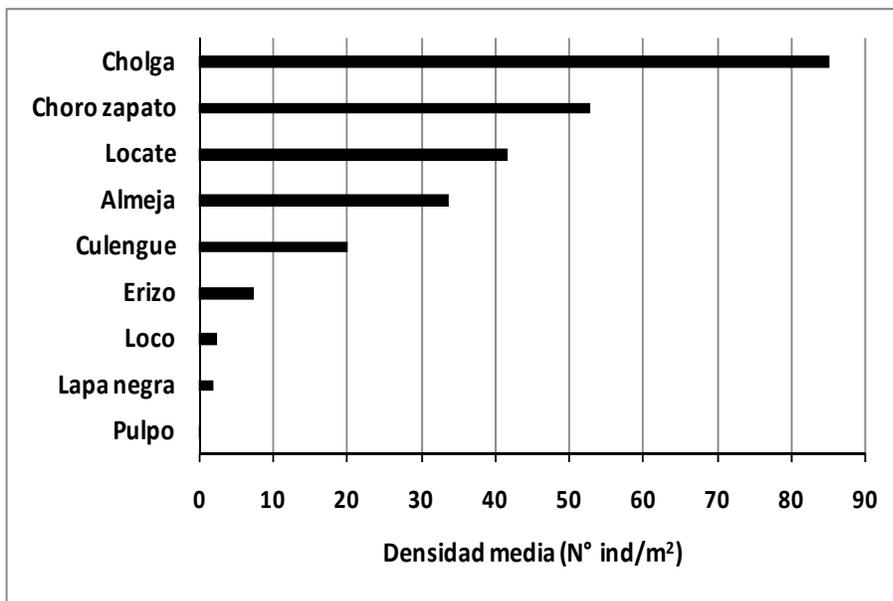


Figura 146: Densidad media de las especies comerciales presente en las áreas de manejo de la I y II región.1998-2008.

X. CONCLUSIONES

La región de estudio se caracteriza por una surgencia permanente, siendo de menor magnitud en invierno que en verano.

La zona mínima de oxígeno en la región no se ventila por la termoclina, debido a la gran estratificación de la columna de agua, sin embargo, cerca de la costa donde se producen eventos fuertes de surgencia, es posible que ocurra la ventilación.

La biomasa fitoplanctónica presentó altos valores y un patrón de distribución similar al de la estructura termal, la cual evidenció la ocurrencia permanente de eventos de surgencia que favorecen la ocurrencia de una alta biomasa pigmentaria sin existir diferencias estadísticamente significativas entre los periodos de invierno y verano.

La zona comprendida entre los 21°S y 21°30'S resultó ser las más productiva, en cuanto a la presencia permanente de altas concentraciones asociadas a una mayor extensión costa afuera, situación que coincide con la ampliación de la plataforma continental entre esas latitudes, particularmente sobre los 21°S.

Los altos niveles de clorofila-a sugieren una importante actividad fotosintética que aseguraría la oxigenación de los estratos superficiales de la columna de agua, y eventualmente una buena disponibilidad de alimento para los estadios tempranos de anchoveta.

No existe una relación entre la concentración de oxígeno o la profundidad de la ZMO sobre la sobrevivencia y distribución de estadios tempranos de anchoveta. Sin embargo, existiría un efecto indirecto de la ZMO sobre la sobrevivencia a través de los predadores (Gelatinosos). El zooplancton gelatinoso, con excepción de quetognatos, si parece estar restringido al estrato superior (<50 m), producto del ascenso de la CMO y en zonas donde la CMO es muy somera se encuentra disminuido, de acuerdo al muestreo espacial. El zooplancton en el estrato superior está sujeto a advección en la capa de Ekman cuando la surgencia es activa, y esto puede explicar su

alejamiento desde la costa. Sin embargo, frente a una relajación de la surgencia puede ocurrir convergencia de los gelatinosos hacia la zona más somera, ejerciendo una mayor depredación.

Si bien las mayores densidades para los recursos locos, erizos, lapas, pulpos, culengues y almejas se presentan en la parte bentónica más superficial, en donde es mayor la cantidad de oxígeno y dada que la probabilidad que se interne agua con mínimo de oxígeno es siempre posible, los recursos pulpo y erizo serían los más afectada en su sobrevivencia, lo que provocaría una alta mortalidad en las primeras 10 horas de invasión de la condición de mínimo de oxígeno, que para el caso del pulpo se debería a que presentan una alta tasa metabólica y por no tener mecanismos fisiológicos o morfológicos de protección a la hipoxia.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvial A y B García 1986. Dinámica de un fenómeno de marea roja producido por *Prorocentrum gracile* Schutt, Iquique, Chile. Rev. Biol. Mar., Valparaíso, 22(2):97-123.
- Atkinson, L.P., Valle-Levison, A., Figueroa, D., De Pol-Holz, R., Gallardo, V.A., Schneider, W., Schmidt, M., 2002. Oceanographic observations in Chilean coastal waters between Valdivia and Concepción. Journal of Geophysical Research 107, doi: 10.1029/2001JC000991.
- Bernal, M. 1999. Preliminary results on a two stage modeling of Sardine (*Sardina pilchardus*, walb) egg presence and abundance of the Spanish coast and its implication for stocks assessment. W.D. Report of the Working Group on the Assessment of Mackerel, Horse Mackerel, Sardine and anchovy. ICES CM 200/ACFM:5.
- Borchers, D.L., Buckland, S.T. Pride, I. G., and Ahmadi, S. 1997. Improving the precisions of the daily egg production method using generalized additive model Can. J. Fish. Aquat. Sci. 54: 2227-2742.
- Carpenter, J. 1996. The Cheasepeake bay institute technique for the Winkler dissolves oxygen method. Limnol. Oceanogr., 10:141-143. Chester, R.. Marine Geochemistry. Chapman y Hall, London. 698 pp.
- Chen, C, R. C. Beardsley and G. Cowles, 2006. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. Special Issue entitled "Advance in Computational Oceanography", Oceanography, in press.
- Chen, C., H. Liu, R.C. Beardsley, 2003. An unstructured, finite-volume, three dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries. J. Atmo. y Oceanic Tech., 20, 159-186.
- Claramunt *et al* Informe Prefinal Proyecto: "Mejoramiento del método de Producción de huevos aplicado a pelágicos pequeños" FIP 2006-38 (En revisión)
- Egbert, G.D., S.Y. Erofeeva, 2002: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, J. Atmos. Oceanic Technol., 19(2), 183-204
- Emery, W.J., Meincke, J., 1986. Global water masses: summary and review. Oceanologica. Acta, 9(4), 383-391.
- Escribano, R., 1998. Population dynamics of *Calanus chilensis*, the Chilean Eastern Boundary Humboldt Current. Fish. Oceanogr. 7:245–251.
- Escribano, R., Daneri, G., Farias, L., Gallardo, V., González, H., Gutiérrez, D., Lange, C., Morales, C., Pizarro, O., Ulloa, O., Braun, M., 2004. Biological and chemical consequences of the 1997-1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system: a

- synthesis. Deep-Sea Research Part II, special volume Oceanography in the Eastern South Pacific, Part I, 51, 2389-2411.
- Fuenzalida, R., Schneider W., Garcés-Vargas J., and Bravo L 2008. Satellite altimetry data reveal jet-like dynamics of the Humboldt Current, *Journal of Geophysical Research*, 113, C07043, doi:10.1029/2007JC004684.
- Fuenzalida R, Schneider W, Garcés-Vargas J, Bravo L & Lange C 2009. Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep Sea Research II* – 56(2009) 1027-1038. doi:10.1016/j.dsr2.2008.11.001.
- Giraldo A, Escribano R, Marín V (2002) Spatial distribution of *Calanus chilensis* of Mejillones Peninsula (northern Chile): ecological consequences upon coastal upwelling. *Mar Ecol Prog Ser* 230:225–234
- González HE, G Daneri, D Figueroa, JL Iriarte, N Le Févre, G Pizarro, R Quiñones, M Sobarzo y A Troncoso 1998. Producción primaria y su destino en la trama trófica pelágica y océano profundo e intercambio océano-atmósfera de CO₂ en la zona norte de la Corriente de Humboldt (23°S): Posibles efectos del evento El Niño, 1997-98 en Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 429-458.
- Grantham, B., Chan, F., Nielsen, K., Fox, D., Barth, J., Huyer, A., Lubchenco, J., Menge, B., 2004. Upwelling-driven nearshore hypoxia signals ecosystem and oceanographic changes in the northeast Pacific. *Nature* 429, 749-754. doi:10.1038/nature02605.
- Gwilliam, C.S, A. C. Coward, B. A. de Cuevas, D. J. Webb, E. Rourke, S. R. Thompson, K. Döös. 1995. The OCCAM Global Ocean Model. 2nd UNAM-Cray Supercomputing Conference on Numerical Simulations in the Environmental and Earth Sciences.
- Hagerman, L. 1998. Physiological flexibility; a necessity for life in anoxic and sulphidic habitats. *Hydrobiologia*, 375/376: 241–254
- Hamburger, K., P. C. Dall, C. Lindegaard y I. B. Nilson. 2000. Survival and energy metabolism in an oxygen deficient environment. Field and laboratory studies on the bottom fauna from the profundal zone of Lake Esrom, Denmark. *Hydrobiologia* 432: 173–188
- Hassell, K.L, Coutin, P.C. and Nugegoda, D. 2008. Hypoxia, low salinity and lowered temperature reduce embryo survival and hatch rates in black bream *Acanthopagrus butcheri* (Munro, 1949) *Journal of Fish Biology* 72, 1623–1636
- Helly, J.J., Levin, L.A., 2004. Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Res. I* 51, 1159– 1168.
- Herrera L y R Escribano 2006. Factors structuring the phytoplankton community in the upwelling site off El Loa River in northern Chile. *Journal of Marine Systems* 61:13–38.

- Hidalgo P. and Escribano R. 2008. Zooplankton interaction with the Oxygen Minimum Zone (OMZ) in the Humboldt Current System: the case of *Eucalanus inermis* (Copepoda: Calanoida). CENSOR Endterm Symposium, Lima. Pp 19-20.
- Hidalgo, P., Escribano, R. And C.E. Morales (2005). Ontogenetic vertical distribution and diel migration of the copepod *Eucalanus inermis* in the oxygen minimum zone off northern Chile. *Journal of Plankton Research* 27: 519-529.
- Iriarte JL, Pizarro G, Troncoso VA y Sobarzo M 2000. Primary production and biomass size-fractioned phytoplankton off Antofagasta, Chile (23-24°S) during pre-El Niño and El Niño 1997. *J. Mar. Sys.*, 26:37-51.
- King M 1995. *Fisheries Biology, assesment and management*. Fishing News Book Ltd. Farnham England 341 pp.
- Laudien, L., Rojo, M. E.; Oliva, M. E.; Arntz, W.E. and Thatje, S. 2007. Sublittoral soft bottom communities and diversity of Mejillones Bay in northern Chile (Humboldt Current upwelling system). *Helgol Mar Res* (2007) 61:103–116.
- Laudien J., Schiedek D., Brey, T., Portne, H-O and W.E: Arntz. 2002. Survivorship of juvenile surf clams *Donax serra* (Bivalvia, Donacidae) exposed to severe hypoxia and hydrogen sulphide. *Journal Experimental Marine Biology and Ecology* 271:9-23
- Levin, L.A. 2002. Deep-ocean life where oxygen is scarce. *American Scientist* 90, 436-444. doi:10.1511/2002.5.436.
- Levin, L.A., Huggett, C.L., Wishner, K.F., 1991. Control of deep-sea benthic community structure by oxygen and organic-matter gradients in the eastern Pacific Ocean. *Journal of Marine Research* 49, 763-800.
- Libes SM 1992. *An Introduction to Marine Biogeochemistry*. Wiley y Sons Inc. 733 pp.
- Lo, N. 1985. A model for temperature – dependent Northern anchovy egg development and an automated procedure for the assignment of age to staged eggs. In. R. Lasker (ed.). *A egg production method for estimating spawning biomass of pelagic fish: Application to the northern anchovy, *Engraulis mordax**, p. 43-50. US Dep. Commerce., NOAA Tech. Rep. NMFS 36.
- McNatt, R.A, and J.A. Rice. 2004 Hypoxia-induced growth rate reduction in two juvenile estuary-dependent fishes *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 311: 147–156.
- Marín, V., R. Escribano., L. Delgado., G. Olivares., y P. Hidalgo. 2001. Nearshore circulation in a coastal upwelling site off the northern Humboldt Current System. *Cont. Shelf Res.* 21:1317–1329.

- McCartney, M.S., 1977. Subantarctic mode water. In: Angel, M. (Ed.), *A Voyage of Discovery*, Pergamon Press, Oxford, 103-119.
- McNatt, R.A, and J.A. Rice. 2004 Hypoxia-induced growth rate reduction in two juvenile estuary-dependent fishes *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 311: 147-156.
- Montecino V, G Pizarro y D Quiroz 1998. Primary Production off the Chilean Coast. In: G Hooloway, P Müller and D Henderson (Eds). *Biotic Impacts of Extratropical Climate Variability in the Pacific*. Proceedings Hawaiian Winter Workshop. NOAA Publication, USA. pp. 69-76.
- Montecino V y D Quiroz 2000. Specific primary production and phytoplankton size structure in an upwelling area off the coast of Chile (30°S). *Aquat. Sci.* 62: 364-380.
- Montecino V, PT Strub, F Chavez, A Thomas, J Tarazona y T Baumgartner 2006. Bio-physical interactions off Western South-America. In: A.R. Robinson y K.H. Brink (eds.). *The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses*. The Sea. Harvard Press. 14:329-390.
- Morales CE, JL Blanco, M Braun, H Reyes y N Silva 1996a. Chlorophyll-a distribution and associated oceanographic conditions in the upwelling region off northern Chile during the winter and spring 1993. *Deep-Sea Res. I*, 43, 3: 267-289.
- Morales, C.E., Braun, M., Reyes,H., Blanco, J.L. y A. Davies. 1996. Anchovy larval distribution in the coastal zone off northern Chile: the effect of low dissolved oxygen concentration and of a cold-warm sequence 1990-95. *Invest. Mar. Valparaíso*. 24: 77-96.
- Morales, C., Hormazábal, S., Blanco, J.L., 1999. Interannual variability in the mesoscale distribution of the depth of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18-24°S): Implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *Journal of Marine Research* 57, 909-932.
- Morales CE, JL Blanco, M Braun y N Silva 2001. Chlorophyll-a distribution and mesoscale physical processes in upwelling and adjacent oceanic areas zones off northern Chile (summer-autumn 1994). *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 81, 193-206.
- Moser, H. and E. Ahlstrom. 1985. Staging Anchovy Eggs. In: R. Lasker (ed.). *An egg production method for estimating spawning biomass of pelagic fish: Application to the northern anchovy, *Engraulis mordax**. p. 37-41. US Dep. Commer., NOAA Tech. Rep. NMFS 36
- Mullins, H.T., Thompson, J.B., McDougall, K., Vercoutere, T.L., 1985. Oxygen-minimum zone edge effects, evidence from the central California coastal upwelling system. *Geology* 13, 491-494.
- Palma, S. (1994). Composición y distribución del macroplancton gelatinoso recolectado frente a la costa central de Chile. *Rev. Biol. Mar., Valparaíso*, 29(1): 23-45.

- Palma S., y Apablaza P. (2004). Abundancia estacional y distribución vertical del zooplancton gelatinoso carnívoro en un área de surgencia en el norte del sistema de la corriente Humboldt. *Invest. Mar.*, Valparaíso, 32(1): 49-70.
- Palma, S., y Rosales, S., (1995). Composición, abundancia y distribución estacional del macroplankton de la bahía de Valparaíso. *Investigaciones Marinas* 23, 49-66.
- Parsons T., Y. Maita y C. M. Lalli. 1984. A Manual of Chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 173 pp.
- Perry, R.I. y S.J. Smith. 1994. Identifying habitat associations of marine fishes using survey data: an application to the Northwest Atlantic. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 51:589-602.
- Piolle, J.-F., Bentamy, A., 2002. Mean Wind Fields (MWF product) - User Manual - Volume 2: QuikSCAT. CERSAT, Plouzané, p. 47.
- Purcell JE (1992) Effects of predation by the scyphomedusan *Chrysaora quinquecirrha* on zooplankton populations in Chesapeake Bay, USA. *Mar Ecol Prog Ser* 87:65–76
- Rabalais, N., R. E. Turner, y W. J. Wiseman, 2002. Gulf of Mexico hypoxia, A.K.A. “The Dead Zone”. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 2002. 33:235–63
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey and M. G. Schlax, 2007: Daily High-resolution Blended Analyses. (*J. of Climate*, In press)
- Rio, M.H., Hernandez, F., 2004. A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model. *Journal of Geophysical Research* 109 (C12), doi:10.1029/2003JC002226.
- Santander, H. Alheit J. and Smith P.E., 1984. Estimación de la Biomasa de la población desovante de anchoveta peruana *Engraulis ringens* en 1981 por aplicación del Método de Producción de Huevos. *Bol. Inst. Mar. Perú-Callao* 8(6):209-250.
- Rykaczewski, R. and Checkley D.M. 2008. Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *National Academy of Sciences of the USA.* 105: 1965-1970. doi/10.1073/pnas.0711777105.
- Rosenberg R., Hellman B. And Johansson B. 1991. Hypoxic tolerance of marine benthic fauna. *Marine Ecology Progress Series* 79:127-131.
- Sedlacek, C. and Marcus N. H. 2005. Egg production of the copepod *Acartia tonsa*: The influence of hypoxia and food concentration. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 318 (2005) 183–190
- Silva, N., Neshyba, S., 1979. On the southernmost extension of the Peru-Chile Undercurrent. *Deep-Sea Research Part A* 26, 1387-1393.

- Sparre P y S. Venema 1992. Introduction to tropical fish stock assessment Part 1 y 2 FAO Fish. Tech. Paper (306/1): 376 pp.
- Stratoudakis, Y., Bernal, M., Borchers, D. L. y Borges, M. F. 2003. Changes in the distribution of sardine eggs and larvae off Portugal, 1985–2000. *Fisheries Oceanography* 12 (1), 49-60. doi: 10.1046/j.1365-2419.2003.00222.
- Stratoudakis, Y. Bernal M, Ganias K, Uriarte A .2006. The daily egg production method: recent advances, current applications and future challenges *Fish and Fisheries* 7 (1), 35–57. doi:10.1111/j.1467-2979.2006.00206.
- Strub, P.T., Mesias, J.M., Montecino, V., Rutllant, J., Salinas, S., 1998. Coastal ocean circulation off western South America. Coastal segment (6,E). In: Robinson, A.R., Brink, K.H. (Eds.), *The Sea*, Vol. 11. John Wiley y Sons, New York. pp 273-313.
- Thompson, J.B., Mullins, H.T., Newton, C.R., Vercoutere, T., 1985. Alternative biofacies model for dysaerobic communities. *Lethaia* 18, 167-179.
- Ulloa, R., S. Palma, L. Linacre & N. Silva. (2000). Seasonal changes in the bathymetric distribution of siphonophores, chaetognaths and euphausiids associated to water masses off Valparaíso, Chile (Southeast Pacific). En: J. Farber (ed.). *Oceanography in the Eastern Pacific*. CICESE, Ensenada, 1: 72-83.
- Ulloa, O., Escribano, R., Hormazabal, S., Quiñones, R.A., González, R.R., Ramos, M., 2001. Evolution and biological effects of the 1997-98 El Niño in the upwelling ecosystem off northern Chile. *Geophysical Research Letters* 28, 1591-1594.
- U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center. 2006. 2-minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2v2)
- Wessel, P., W. H. F. Smith. 1996. A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database, *J. Geophys. Res.*, 101, #B4, pp. 8741-8743
- Wishner, K., Levin, L.A., Gowing, M., Mullineaux, L., 1990. Involvement of the oxygen minimum in the benthic zonation on a deep seamount. *Nature* 346, 57-59.
- Wyrtki, K., 1962. The oxygen minima in relation to ocean circulation. *Deep-Sea Research* 9, 11-23.

XII. PERSONAL PARTICIPANTE Y HORAS HOMBRE

Personal con actividades hasta la elaboración de este informe (incluye colaboradores)

Personal Profesional

Función

Universidad Arturo Prat

Rosalino Fuenzalida F.	Jefe Proyecto.
Gabriel Claramunt Q.	Análisis estadístico espacio temporal de huevos de anchoveta.
Lililana Herrera C.	Análisis CLOA
Edgardo Santander P.	Análisis CLOA
Pedro Pizarro F.	Experimentos bentónicos y diseño muestral
Cristian Carrasco F.	Experimentos bentónicos y diseño muestral
Paola Moreno G.	Identificación de huevos y larvas de anchoveta
Cristian Azocar S.	Identificación de huevos y larvas de anchoveta

Universidad de Concepción

Ruben Escribano V.	Coordinación UDEC, Procesos biológicos
Carmen Morales V.	Procesos biológicos

Universidad de Antofagasta

Marcelo Oliva M.	Análisis de hipoxia en huevos y larvas de anchoveta
Manuel Rojo R.	Análisis de hipoxia en huevos y larvas de anchoveta

Consultores Independientes

José Garcés-Vargas	Análisis satelital
Sergio Rosales G.	Modelo de circulación

Personal Técnico

Agustín Arcos R.	Muestreo; bio-oceanográfico
Jorge Charlin F.	Muestreo; bio-oceanográfico
Jorge Toro M.	Muestreo; bio-oceanográfico
Jeannelle Jaque B.	Muestreo; bio-oceanográfico
Daniel Mujica V.	Muestreo; bio-oceanográfico
Daniela Bravo P.	Muestreo; bentónico
José Sánchez R.	Muestreo; bentónico

HORAS HOMBRES DEL EQUIPO DE TRABAJO**Universidad Arturo Prat**

Nombre	Actividad									Total
		1	2	3	4	5	M	E	S	
Rosalino Fuenzalida	Total	25	15	20	50	50	35	15	10	220
Gabriel Claramunt	Total	10	10	25	30	25	30	15	15	160
Paola Moreno	Total	15	15	30	25	35	25	10	10	165
Liliana Herrera	Total	10	10	25	40	15	30	20	10	160
Edgardo Santander	Total	15	20	35	40	30	15	10	5	170
Pedro Pizarro	Total	35	40	55	40	40	15	25	15	265
Cristián Carrasco	Total	25	35	30	35	30	20	20	5	200

Universidad de Concepción

Nombre	Actividad									Total
		1	M	E	S	E	S	7	8	
Rubén Escribano	Total	10	7	17	35	17	17	17	15	135
Carmen Morales	Total	15	15	15	30	15	15	15	10	130

Universidad de Antofagasta

Nombre	Actividad									Total
		1	M	E	S	E	S	7	8	
Marcelo Oliva	Total	12	12	22	27	22	17	12	12	136
Manuel Rojo	Total	5	15	15	17	12	12	12	17	105

Consultores Independientes

Nombre	Actividad									Total
		1	M	E	S	E	S	7	8	
Sergio Rosales	Total	2	12	12	22	12	12	12	17	101
José Garcés	Total	2	12	12	22	12	12	12	17	101

XIII. ANEXO TALLER

El taller de difusión se realizó el 12 de junio de 2009 en las dependencias de la Universidad Arturo Prat, entre las 09:00 hasta 13:30 los asistentes fueron los siguientes:

Willy Ormazabal	Dirección Zonal XV, I y II región
Juan Carlos Villarroel	Profesional SUBPESCA
Javier Rivera	SUBPESCA Unidad de Recursos Bentónicos
Alejandra Ordenes	SUBPESCA Valparaíso
Gloria Deluchi	Escuela de Derecho UNAP
Mario Carrasco	Pesquera Camanchaca
Cristian Carrasco	Universidad Arturo Prat
Cristian Azócar	Universidad Arturo Prat
Daniela Bravo	Universidad Arturo Prat
Sergio Rosales	Consultor Independiente
Marcelo Oliva	Universidad de Antofagasta
José Garces-Vargas	Universidad Austral de Chile
Cristian Toledo	Instituto de Fomento Pesquero
Eduardo Díaz	Instituto de Fomento Pesquero
Carolina Navarro	Instituto de Fomento Pesquero
Carlos Gaspar	Instituto de Fomento Pesquero
Miguel Araya	Universidad Arturo Prat
Adolfo Vargas	PROMAR Pacífico LTDA
Jessica Pizarro	Universidad Arturo Prat
Marianela Medina	Universidad Arturo Prat
Liliana Herrera	Universidad Arturo Prat
Marco Soto	Director Zonal XV, I y II región
Patricio Rivas	Sernapesca
Manuel Rojo	Universidad de Antofagasta
Luis Bustos	Corpesca
Pedro Pizarro	Universidad Arturo Prat
Edgardo Santander	Universidad Arturo Prat

Gabriel Claramunt Universidad Arturo Prat
Rosalino Fuenzalida Universidad Arturo Prat

Respecto de los resultados expuestos, la discusión estuvo principalmente dirigida al impacto de la CMO sobre los recursos bentónicos. Considerando la problemática resultante de la intrusión de esta discontinuidad química a la zona costera a sitios de actividad artesanal, con el consiguiente impacto sobre los recursos y la actividad económica en torno a ellos. Se acordó recomendar lo siguiente:

- Implementar una red de monitoreo en las zonas costera para el registro de las condiciones oceanográficas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y viento superficial), que permitan ir evaluando los cambios en el sistema, i.e. El Niño, La Niña, variaciones intraestacionales, y sinópticas a tiempo real.
- El registro de información podrá ser realizado en los sitios que resultaran más vulnerables a los cambios de oxígeno disuelto, dada la actividad pesquera que allí se desarrolla (áreas de manejo).
- Esta red de monitoreo permitirá a las autoridades locales competentes tomar decisiones de manejo de los recursos pesqueros, especialmente los bentónicos, que son los principalmente afectados ante la intrusión de la capa mínima de oxígeno (CMO). Una de las ideas que se trató es el actuar rápidamente ante una intrusión de la CMO en la zona costera, permitiendo a los pescadores extraer los recursos de las áreas de manejo antes que estos mueran.

PROGRAMA TALLER PROYECTO FIP 2007-45
Efectos de la variabilidad de la capa de mínimo de oxígeno (CMO) en la distribución y la abundancia de los principales recursos pesqueros de la zona norte.

09:00 - 09:30 Acreditación (Entrega de carpetas)

09:30 - 09:40 Presentación general del Proyecto
Rosalino Fuenzalida F.
Universidad Arturo Prat

09:40 – 10:00 Presentación Resultados Oceanografía
Rosalino Fuenzalida F.
Universidad Arturo Prat

10:00 - 10:10 Presentación Resultados Satelitales
José Garcés-Vargas
Universidad Austral de Chile

10:10- 10:30 Presentación Resultados Clorofila a
Edgardo Santander P.
Universidad Arturo Prat

10:30- 10:50 Presentación Resultados Modelo de Circulación
Sergio Rosales G.

10:50 -11:15 Café

11:15 - 11:35 Presentación Resultados Experimentos
Marcelo Oliva M.
Universidad de Antofagasta

11:35- 12:00 Presentación Resultados Huevos y Larvas de anchoveta y Depredadores
Gabriel Claramunt Q.
Universidad Arturo Prat

12:00- 12:15 Presentación Resultados Recursos Bentónicos
Pedro Pizarro F.
Universidad Arturo Prat

12:15 - 13:00 Discusión y Conclusiones

Lugar de realización: Sala Video-Conferencia, Edificio INTE
Universidad Arturo Prat – Avda. Arturo Prat 2120, Iquique
Martes 9 de junio de 2009