



INFORME FINAL

PROYECTO FIP N°2008-20

**“MONITOREO DE LAS CONDICIONES BIO-OCEANOGRÁFICAS
EN LAS VIII y IX REGIONES, AÑO 2008”**

Agosto, 2010

REQUIRENTE

CONSEJO DE INVESTIGACION PESQUERA, CIP

EJECUTOR

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
CENTRO DE INVESTIGACION
OCEANOGRAFICA DEL PACIFICO SUR
ORIENTAL, COPAS

JEFE DE PROYECTO

Dr. Fabián Tapia

INVESTIGADORES

Dr. Leonardo Castro
Dr. Giovanni Daneri
Dra. Camila Fernández
Dr. Humberto González
Dra. Pamela Hidalgo
Dra. Carmen Morales
Dr. Oscar Pizarro

1. RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe describe las actividades del proyecto FIP 2008-20 “Monitoreo de las condiciones bio-oceanográficas en las VIII y IX Regiones, año 2008”, cuyo objetivo general fue caracterizar la variabilidad espacial y temporal de las condiciones y procesos bio-oceanográficos en las principales áreas de desove y reclutamiento de pequeños pelágicos en la región de estudio. Las actividades desarrolladas incluyeron un crucero de monitoreo estacional llevado a cabo entre el 5 y 13 de Enero de 2009 a bordo del AGOR Vidal Gormáz, cubriendo 40 estaciones a lo largo de 5 transectas espaciadas cada 30 millas náuticas entre los 35°30’S y los 37°30’S, y hasta 100 mn de la costa. Adicionalmente, se llevó a cabo un programa de monitoreo mensual en dos estaciones oceanográficas en la plataforma continental frente a Bahía Coliumo (36.5°S–73°07’W).

1.1. Crucero estacional

Durante el crucero de monitoreo de Enero 2009 se observaron condiciones de surgencia activa, reflejadas en las distribuciones horizontales y verticales de la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, así como en los patrones de variabilidad detectados por imágenes satelitales para TSM, clorofila, y anomalía del nivel del mar. Se detectó un frente térmico delimitado por la isoterma de 13°C, que se proyectó desde Punta Lavapié en forma paralela al quiebre de la plataforma continental. Las distribuciones de salinidad, densidad y nutrientes presentaron valores mayores asociados a esta pluma, mientras que el oxígeno presentó un mínimo ($<4 \text{ mL L}^{-1}$) centrado en la misma posición. La combinación de propiedades físico-químicas del agua encontrada sobre la plataforma indica que corresponden a Aguas Ecuatoriales SubSuperficiales (AESS) afloradas por efecto de la surgencia costera.

La distribución superficial de clorofila total fue heterogénea, con un foco costero de altos valores ($>4 \text{ mg m}^{-3}$) frente a la Bahía Coliumo y concentraciones moderadas (1 mg m^{-3}) en el sector oceánico. Un promedio de $40 \pm 29 \%$ de la clorofila total en superficie correspondió a la fracción nano-planctónica. En el eje vertical, la clorofila total estuvo concentrada mayoritariamente entre 0 y 40 m de profundidad, con los mayores

valores observados en las estaciones costeras. El fitoplancton de mayor tamaño se concentró mayoritariamente sobre la plataforma continental y estuvo compuesto en un 77% por diatomeas, principalmente de los géneros *Thalassiosira*, *Skeletonema* y *Chaetoceros*, con una biomasa integrada promedio de 298.4 mgC m⁻². Los análisis multivariados y geoestadísticos realizados indicaron que la distribución espacial de la biomasa fitoplanctónica está dada en gran medida por la batimetría costera, y por la presencia de condiciones físico-químicas típicas de surgencia cerca de la costa.

La biomasa del zooplancton mostró una tendencia a aumentar sobre una franja costera y en el estrato de 0-50 m, con las mayores agregaciones cerca de la desembocadura del río Itata y en el Golfo de Arauco, y dominado numéricamente por copépodos (> 70%) y poliquetos (> 23%). Los copépodos se distribuyeron sobre toda el área estudiada, pero presentaron mayores concentraciones en las 2 transectas de más al norte y en las estaciones al interior del Golfo de Arauco. En el ictioplancton, las especies más abundantes en el estado huevo fueron el mote (*Normanichthys crockeri*) con 49.3 huevos / 100 m³ y el pampanito (*Stromateus stellatus*) con 35.3 huevos / 100 m³, con ambas abundancias promedio registradas en el estrato 0-200 m. Las especies más abundantes en estado de larva fueron *Protomyctophum chilensis* (74.6 larvas/100m³) seguido de *Hypsoblennius sordidus* y *Merluccius gayi* con 35.5 y 35.1 larvas/100m³, respectivamente. En cuanto a las especies objetivo, se encontraron huevos de anchoveta (*Engraulis ringens*) en bajas concentraciones (1 – 3 h/100m³) y en sólo 2 estaciones costeras del extremo norte del área de muestreo. Las larvas de esta especie se concentraron en estaciones costeras al sur de Pta. Lavapié, en abundancias de 0.5 – 27.5 larvas/100m³. En la misma zona se concentraron las larvas de sardina común (*Strangomera bentincki*). Los huevos de merluza común (*Merluccius gayi*) se encontraron cerca de la costa en el extremo norte del área (transectas 1 y 3) y en concentraciones de 0.5 – 9.7 huevos/100m³. Las larvas de esta especie aparecieron en el extremo sur del área de estudio y en concentraciones de 1 – 69.1 larvas/100m³. Verticalmente, la presencia de huevos y larvas fue mayor en el estrato 0-50 m. Las muy bajas abundancias de huevos en relación con las abundancias de larvas de las tres especies objetivo serían normales para la fecha de muestreo, y se deberían a que en Enero estas especies ya habrían llegado al término de su estación reproductiva principal, que

corresponde a invierno-inicios de primavera en anchoveta y sardina común, y a inicios de primavera en merluza común. Este desfase, y la mayor duración del desarrollo larval, explicarían la dominancia numérica de larvas por sobre huevos de las especies objetivo. La mayor abundancia de larvas fuera del Golfo de Arauco, sin embargo, no era esperada y podría deberse a exportación de las mismas desde aguas interiores del golfo – que anteriormente ha sido señalada anteriormente como potencial área de crianza y retención durante el verano –, o a su transporte desde la zona costera más al sur (cercañas de Isla Mocha) que en proyectos anteriores ha sido señalada como una zona importante de desove de sardinas y anchovetas.

1.2. Serie de tiempo

Las condiciones oceanográficas observadas mensualmente en la Estación 18 (36°30.8'S – 73°7.7'W), sobre la plataforma continental de Chile central, mostraron un claro patrón estacional y condiciones típicamente esperadas para la época de surgencia activa durante la primavera-verano 2008-2009. La temperatura superficial aumentó a 14-15°C, mientras que la isoterma de 11.5°C ascendió hasta ca. 20 m de la superficie. Un ascenso similar se observó para isohalinas e isopícnas características del Agua Ecuatorial SubSuperficial, con concentraciones de oxígeno disuelto $< 2 \text{ mL L}^{-1}$. El oxígeno disuelto y nutrientes mostraron una marcada estacionalidad con una columna de agua bien oxigenada en invierno y un empobrecimiento en primavera-verano, así como una disminución de nutrientes en otoño-invierno y un aumento en primavera-verano, debido a eventos de surgencia costera que llevan AESS a la superficie.

La clorofila total alcanzó máximas concentraciones en Octubre 2008 (ca. 50 mg m^{-3}), y un 71% de esta biomasa correspondió a la fracción nanoplanctónica ($< 20 \text{ um}$). Las concentraciones de clorofila observadas para esta fracción de tamaños durante la primavera-verano de 2008 son los valores más altos hasta ahora observados en la serie de tiempo, con un máximo de 24 mg m^{-3} que es sustancialmente mayor que lo observado en años previos. Estas altas concentraciones cubrieron un rango de profundidades de 30 m desde la superficie, y persistieron durante toda la primavera y el verano, con un patrón de distribución muy similar a la clorofila total. La abundancia total de diatomeas se

incrementó a inicios de la primavera de 2008 (Octubre), alcanzó su máximo en Enero 2009 con 7.6×10^6 células L^{-1} en superficie, y luego disminuyó en forma gradual para alcanzar valores mínimos en Mayo 2009.

Los principales componentes del microzooplancton fueron los dinoflagelados y ciliados lorizados, que en su conjunto representaron más del 85% de las abundancias totales registradas en todo el período de estudio. La abundancia de microzooplancton mostró una clara variación estacional, con un marcado aumento a inicios de primavera (Octubre 2008) y una disminución gradual hasta alcanzar un mínimo en otoño (Mayo 2009). Estos cambios fueron más abruptos en superficie que en el estrato de 10 m de profundidad.

La biomasa del zooplancton alcanzó valores máximos en Octubre 2008 y Enero 2009, períodos en que se intensificaron los vientos favorables a la surgencia. La biomasa zoopláctónica en la Estación 18 ha mostrado un incremento desde Agosto 2004 hasta Junio 2009, con valores de 2.16 mg C m^{-2} y 6.25 mg C m^{-2} , respectivamente. En términos de abundancia se registró una dominancia numérica de copépodos (>90%), principalmente *Paracalanus cf. indicus* (>50%), *Oithona similis* (>20%) y *Calanoides patagoniensis* (> 10%), especies estrechamente asociadas a la zona costera y a los centros de surgencia. En cuanto al ictioplancton, las abundancias de huevos y larvas de las tres especies objetivo (*Engraulis ringens*, *Strangomera bentincki* y *Merluccius gayi*) fueron muy bajas en relación a años anteriores. Su aparición en el plancton tuvo una marcada estacionalidad y varió en forma sincrónica para huevos de anchoveta y merluza común, y para larvas de las 3 especies a inicios de primavera (Octubre-Noviembre 2008). Adicionalmente, se observó que los máximos larvales ocurrieron normalmente, con posterioridad a los periodos en que se espera el mayor desove de anchoveta y sardina común.

Los valores integrados de Producción Primaria (PP) y Respiración Comunitaria (RC) mostraron una marcada estacionalidad, con una tasa máxima de PP en Septiembre 2009 ($11.55 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). A diferencia de años anteriores, la RC fue mayor que la PP durante gran parte del periodo, reflejando condiciones de heterotrofia en el sistema. El flujo total de carbono biogénico varió entre un mínimo de $358 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en Abril 2009 y un máximo de $2048 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en Diciembre 2008. Más de un 90% de este material

correspondió a pellets fecales. Un 57% de este material fecal correspondió a pellet fecales de eufáusidos y apendicularia.

El análisis de la variabilidad superficial de TSM, clorofila (CLA), y anomalía del nivel del mar (ANM) a partir de imágenes satelitales indicó el predominio de la surgencia costera como proceso modulador de las condiciones físico-químicas y biológicas sobre la plataforma continental. La Estación 18 se encuentra dentro de un área directamente influenciada por la variabilidad de mesoescala inducida por la surgencia costera. Las escalas características de variabilidad temporal sobre la plataforma continental al norte de Pta. Lavapié fueron de ca. 50 días para la TSM y ANM, y 20 días o menos para la clorofila. En esta región se observaron temperaturas anómalamente altas en Diciembre de 2008, seguidas por altas concentraciones de clorofila en Enero 2009, mes en que se realizó el crucero de monitoreo bio-oceanográfico, y luego un período de altas concentraciones en Marzo 2009.

En general, la distribución de variables hidrográficas y biológicas en la región estudiada reflejó el efecto de la surgencia estacional, particularmente cerca de la costa, superpuesto sobre el ciclo anual de variabilidad inducido por fluctuaciones de mayor escala. Estas condiciones han sido observado comúnmente en los cruceros de monitoreo del programa FIP durante primavera y verano.

INDICE GENERAL

1. RESUMEN EJECUTIVO.....	1
1.1. Crucero estacional.....	1
1.2. Serie de tiempo.....	3
2. INTRODUCCION.....	14
3. OBJETIVO GENERAL.....	17
4. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
5. METODOLOGIA POR OBJETIVO.....	18
5.1. Objetivo específico 1: Determinar la distribución espacial, a nivel de meso-escala (km), de las variables bio-oceanográficas temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa del fitoplancton y penetración de la luz, en la zona de estudio, durante el periodo de primavera, en la estructura vertical de 0 a 200 m de profundidad.....	18
5.1.1. Descripción general del crucero.....	18
5.1.2. Muestreo.....	22
5.1.3. Análisis en laboratorio.....	22
5.2. Objetivo específico 2: Determinar la abundancia, distribución espacial y composición del plancton, incluyendo el macrozooplancton, ictioplancton, mesozooplancton, microplancton, nanoplancton y picoplancton de la zona de estudio durante un periodo de primavera y su asociación con las variables bio-oceanográficas indicadas en 5.1.....	24
5.2.1. Muestreo.....	24
5.2.2. Análisis en laboratorio.....	27
5.2.3. Asociación entre variables oceanográficas y biológicas.....	28
5.3. Objetivo específico 3: Desarrollar una serie de tiempo de frecuencia mensual de las variables señaladas en los objetivos específicos 4.1 y 4.2, en estaciones seleccionadas, dentro de la zona de estudio.....	30
5.3.1. Serie de tiempo.....	30
5.3.2. Métodos de muestreo en las estaciones de monitoreo mensual.....	30
5.3.3. Análisis de muestras e información.....	31
5.4. Objetivo específico 4: Estimar las siguientes tasas biológicas: producción primaria, respiración comunitaria del plancton, flujo vertical de material particulado (acoplamiento pelágico-bentónico) y su variabilidad mensual en estaciones seleccionadas de la zona de estudio.....	31
5.4.1. Método de muestreo.....	31
5.4.2. Métodos de medición y análisis.....	32
5.4. Objetivo específico 4.5: Determinar la variabilidad superficial de las variables temperatura del mar, clorofila-a y anomalía del nivel del mar por medio de percepción remota. La frecuencia mínima de análisis debe ser al menos mensual. Y asociar estas variaciones espacio-temporales con la actividad pesquera.....	34
6. RESULTADOS.....	36
6.1. Objetivo específico 1. Determinar la distribución espacial, a nivel de meso-escala (km), de las variables bio-oceanográficas temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa del fitoplancton y penetración de la luz, en la zona de estudio, durante el periodo de primavera, en la estructura vertical de 0 a 200 m de profundidad.....	36
6.2.1. Hidrografía.....	36
6.2.2. Imágenes TSM y clorofila superficial.....	38
6.2.3. Vientos superficiales y transporte de Ekman.....	60

6.2.4. Nivel del mar y topografía dinámica	60
6.2.5. Distribución de nutrientes	64
6.2.6. Biomasa de fitoplancton	71
<i>6.2. Objetivo específico 2. Determinar la abundancia, distribución espacial y composición del plancton, incluyendo el macrozooplancton, ictioplancton, mesozooplancton, microplancton, nanoplancton y picoplancton en la zona de estudio durante un período de primavera y su asociación con las variables bio-oceanográficas indicadas en 4.1.</i>	<i>83</i>
6.2.1. Composición, abundancia y distribución del microplancton	83
6.2.2. Composición, abundancia y distribución del macrozooplancton	93
6.2.3. Composición, abundancia y distribución del ictioplancton	100
<i>6.3. Objetivo específico 3. Determinar las variaciones mensuales en la zona costera de las variables señaladas en 4.1 y 4.2, con observaciones realizadas en, a lo menos, 2 estaciones costeras dentro de la zona de estudio.</i>	<i>105</i>
6.3.1. Hidrografía en las Estaciones 18 y 5	105
6.3.2. Variables químicas de la columna de agua en la Estación 18	111
6.3.3. Biomasa y composición del fitoplancton en la Estación 18	113
6.3.4. Abundancia y composición del mesozooplancton en la Estación 18	116
6.3.5. Biomasa y composición del macrozooplancton en la Estación 18	122
6.3.6. Biomasa y composición del ictioplancton en las Estaciones 18 y 5	128
<i>6.4. Objetivo específico 4. Estimar las siguientes tasas biológicas: producción primaria, respiración comunitaria del plancton, flujo vertical de material particulado (acoplamiento pelágico-bentónico) y su variabilidad mensual en estaciones seleccionadas de la zona de estudio.</i>	<i>133</i>
6.4.1. Producción primaria y respiración comunitaria en la Estación 18	133
6.4.2. Flujo vertical de material particulado en la Estación 18	133
<i>6.5. Objetivo específico 5. Determinar la variabilidad superficial de las variables temperatura del mar, clorofila-a y anomalía del nivel del mar por medio de percepción remota. La frecuencia mínima de análisis debe ser al menos mensual. Y asociar estas variaciones espacio-temporales con la actividad pesquera.</i>	<i>138</i>
6.5.1. Condiciones promedio y escalas de variabilidad	138
6.5.2. Asociación entre variabilidad ambiental y actividad pesquera	145
7. DISCUSION.....	147
7.1. Condiciones bio-oceanográficas durante el crucero estacional.....	147
7.2. Variabilidad temporal en condiciones bio-oceanográficas: serie de tiempo.....	149
8. CONCLUSIONES	154
8.1. Crucero oceanográfico de Enero 2009	154
8.2. Serie de tiempo	156
8.3. Conclusión general	158
9. REFERENCIAS	160
10. ANEXO 1 – Personal participante	164
11. ANEXO 2 – Manuscritos	165

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Personal científico embarcado y responsabilidades en crucero FIP 2008-20	21
Tabla 2. Muestras y variables analizadas por estación.	21
Tabla 3. Caracterización de los muestreos de zoo-ictioplancton, durante el crucero de monitoreo oceanográfico FIP 2008-20 en Enero de 2009.	26
Tabla 4. Resumen de estaciones de CTD realizadas durante el crucero FIP 2008-20, Enero 2009.....	39
Tabla 5. Estadística básica de concentraciones en superficie (mg m^{-3}) de clorofila-a total (Cl-a T) y fracciones (Cl-a <20 y Cl-a<3) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	71
Tabla 6. Estadística básica de estimaciones integradas entre 0 y 30 m (mg m^{-2}) para clorofila-a total (Cl-a T) y fracciones (Cl-a <20 y Cl-a<3) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	72
Tabla 7. Estadística básica de concentraciones en superficie (mg m^{-3}) de feopigmentos totales (Fgm-a T) y fracciones (Fmg-a <20 y Fmg-a<3) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	72
Tabla 8. Estadística básica de estimaciones integradas entre 0 y 30 m (mg m^{-2}) para feopigmentos totales (Fgm-a T) y fracciones (Fmg-a <20 y Fmg-a<3) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009)...	72
Tabla 9. (A) Análisis de Componentes Principales realizado sobre un conjunto de 155 mediciones de variables hidrográficas y concentraciones de nutrientes realizadas durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. Se indican los coeficientes asignados a cada variable por los 2 primeros componentes principales (CP), y el porcentaje de variabilidad total explicado por cada uno. (B) Coeficientes de correlación de Spearman entre los 2 primeros CP y las concentraciones de pigmentos. Se indican en negrita las correlaciones con $p < 0.001$	79
Tabla 10. Análisis de Correlaciones Canónicas realizado sobre un conjunto de 90 mediciones de variables hidrográficas, de concentraciones de nutrientes, y de clorofila fraccionada realizadas entre 0 y 20 m de profundidad durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. Se indican los coeficientes asignados a cada variable original para cada variable canónica explicativa (U) y variable canónica respuesta (V). Se indican los resultados del análisis de correlación entre cada par de variables canónicas. Los coeficientes en negrita corresponden a aquellas variables originales que mostraron correlaciones significativas con la respectiva variable canónica.	81
Tabla 11. Biomasa integrada promedio (0-10m; mgC m^{-2}) y porcentaje (%) para diatomeas céntricas y penadas dominantes identificadas en la grilla FIP 2008-20.....	84
Tabla 12. Biomasa de diatomeas totales (mg C m^{-3}) para 0 y 10 m en las estaciones de la grilla FIP 2008-20.....	86
Tabla 13. Biomasa integrada (0-10 m; mgC m^{-2}) de microzooplancton: ciliados, dinoflagelados tecados y nauplii de crustáceos en las estaciones de la grilla FIP 2008-20.	88
Tabla 14. Biomasa integrada promedio (0-10m; mgC m^{-2}) y porcentaje (%) para los géneros dominantes de microzooplancton (dinoflagelados tecados y ciliados) en la grilla FIP 2008-20.	88
Tabla 15. Biomasa por estrato (0 y 10 m; mgC m^{-3}) para grupos de microzooplancton y pellets fecales en todas las estaciones de la grilla FIP 2008-20 (Enero 2009).	89
Tabla 16. Abundancia numérica y relativa (%) de los principales grupos taxonómicos encontrados durante el crucero de Enero de 2009.	95
Tabla 17. Abundancia numérica y relativa de las especies de copépodos encontradas durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	99
Tabla 18. Abundancia estandarizada de huevos de peces (en 100 m^3) en tres estratos de profundidad (50-0 m; 200-50 m; 0-200 m) durante el crucero de Enero 2009. (NEP: Número de estaciones positivas).	100
Tabla 19. Abundancia estandarizada de larvas de peces (100 m^3) en tres estratos de profundidad (50-0 m; 200-50 m; 0-200 m) durante el crucero de Enero 2009 (NEP: Número de estaciones positivas).	101
Tabla 20. Concentraciones (mg m^{-3}) de clorofila-a y feopigmentos totales (Cl-a T y Fgm-a T) y sus fracciones (<20 y 3 μm) en la columna de agua (0-80 m de profundidad) durante la serie de tiempo Estación 18 entre Junio 2008 y Junio 2009: estadística básica.	115
Tabla 21. Abundancia relativa (%) de los principales taxa encontrados en la Estación 18 durante el periodo Agosto 2008 – Junio 2009.	125
Tabla 22. Abundancia relativa (%) de las especies de copépodos encontradas durante los muestreos en la Estación 18 entre Agosto 2008 y Junio 2009.	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Caracterización de la batimetría (contornos, m) y variabilidad espacial de la Temperatura Superficial del Mar (TSM, colores) en Chile centro-sur. El campo de TSM corresponde al promedio de largo plazo (Julio 2002 – Agosto 2009) de imágenes satelitales MODIS-Aqua con una resolución espacial de 4 km. La estrella y cuadrado negro indican las posiciones de las estaciones de monitoreo 18 y 5 del Centro COPAS, respectivamente. Figura modificada de Tapia et al. (en preparación).....	19
Figura 2. Distribución geográfica de las estaciones realizadas durante el crucero de monitoreo bio-oceanográfico a bordo del AGOR Vidal Gormáz, entre el 5 y 13 de Enero de 2009. Los símbolos azules y rojos corresponden a estaciones oceanográficas y bio-oceanográficas, respectivamente. Los números corresponden al número de estación indicado en la Tabla 4. Los contornos grises corresponden a isóbatas (m). Las estaciones 20 y 23 corresponden a las Estaciones 18 y 40 del Centro COPAS.	20
Figura 3. Distribución horizontal de temperatura (°C) a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.	40
Figura 4. Distribución horizontal de salinidad (psu) a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.....	41
Figura 5. Distribución horizontal de densidad (kg m⁻³) a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.	42
Figura 6. Distribución horizontal de oxígeno disuelto (mL L⁻¹) a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.....	43
Figura 7. Distribución horizontal de fluorescencia (volts) a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.	44
Figura 8. Distribución horizontal de la profundidad de las isotermas de 8°C, 11°C, 12°C y 13°C durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.....	45
Figura 9. Distribución de la profundidad de la capa de mezcla durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009). La profundidad de la capa de mezcla se estimó aplicando el criterio del gradiente de temperatura. La diferencia de temperatura y profundidad de referencia utilizada fue de 0.2°C y 5 metros, respectivamente.	46
Figura 10. Distribución vertical de (A) temperatura (°C), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m ⁻³) y (D) oxígeno disuelto (mL L ⁻¹) a lo largo de la transecta 1 (35°30' S), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	47
Figura 11. Distribución vertical de (A) temperatura (°C), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m ⁻³) y (D) oxígeno disuelto (mL L ⁻¹) a lo largo de la transecta 2 (36°00' S), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	48
Figura 12. Distribución vertical de (A) temperatura (°C), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m ⁻³) y (D) oxígeno disuelto (mL L ⁻¹) a lo largo de la transecta 3 (36°30' S), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	49
Figura 13. Distribución vertical de (A) temperatura (°C), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m ⁻³) y (D) oxígeno disuelto (mL L ⁻¹) a lo largo de la transecta 4 (37°00' S), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	50
Figura 14. Distribución vertical de (A) temperatura (°C), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m ⁻³) y (D) oxígeno disuelto (mL L ⁻¹) a lo largo de la transecta 5 (37°30' S), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	51
Figura 15. Diagramas T-S para las distintas transectas realizadas durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009). Las líneas curvas al interior de cada diagrama representan líneas de igual densidad (sigma-t).	52
Figura 16. Profundidad de la isopicna de 26.5 (1026,5 kg m ⁻³) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009). Esta isopicna representa el núcleo del Agua Ecuatorial Sub-Superficial (AESS) en la región.....	53
Figura 17. Perfiles longitudinales de temperatura (°C), salinidad (psu) y densidad (kg/m ³), a lo largo de estaciones oceánicas (74° 30'S) y costeras. Crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	54
Figura 18. Distribución horizontal de alturas dinámicas (cm dinámicos) durante el crucero FIP 2008-20 referidas a 500 m de profundidad.....	55

Figura 19. Imágenes satelitales de Clorofila-a (mg m^{-3} , paneles de la izquierda) y Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$, paneles de la derecha) en la costa de Chile centro-sur durante los dos primeros días (6-7 Enero, 2009) del crucero FIP 2008-20.....	56
Figura 20. Imágenes satelitales de Clorofila-a (mg m^{-3} , paneles de la izquierda) y Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$, paneles de la derecha) en la costa de Chile centro-sur durante el tercer y cuarto día (8-9 Enero, 2009) del crucero FIP 2008-20.	57
Figura 21. Imágenes satelitales de Clorofila-a (mg m^{-3} , paneles de la izquierda) y Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$, paneles de la derecha) en la costa de Chile centro-sur durante el quinto y sexto día (10-11 Enero, 2009) del crucero FIP 2008-20.....	58
Figura 22. Imágenes satelitales de Clorofila-a (mg m^{-3} , panel izquierdo) y Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$, panel derecho) en la costa de Chile centro-sur durante el séptimo día (12 Enero, 2009) del crucero FIP 2008-20.....	59
Figura 23. Campo vectorial del viento superficial derivado del satélite QuikSCAT para el periodo del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).....	61
Figura 24. Transporte de Ekman ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por 1000 m de costa) calculado para Enero 2009 desde series diarias de viento satelital QuikSCAT para cinco posiciones cercanas a la costa, centradas a $35^{\circ} 45' \text{S}$, $36^{\circ} 45' \text{S}$, $37^{\circ} 45' \text{S}$	62
Figura 25. (A, B) Anomalías del nivel del mar (cm) y (C, D) topografía dinámica (cm) en la región de estudio durante el crucero FIP 2008-20. Las imágenes corresponden al 7 de Enero de 2009 (A, C) y 14 de Enero de 2009 (B, D), y provienen del procesamiento y combinación de datos de varios satélites realizado por Ssalto/Duacs y distribuidos por Aviso (http://www.aviso.oceanobs.com/duacs/).....	63
Figura 30. Distribución horizontal de la concentración de clorofila-a (mg m^{-3}) superficial (A-B) e integrada entre 0 y 30 m (D-F) durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. (A, D) Clorofila-a total, (B, E) Clorofila-a $<20 \mu\text{m}$, (C, F) Clorofila-a $<3 \mu\text{m}$	73
Figura 31. Distribución horizontal de la concentración de feopigmentos (mg m^{-3}) en superficie (A-C) e integrada entre 0 y 30 m (D-F) durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. (A, D) Total feopigmentos, (B, E) Feopigmentos $<20 \mu\text{m}$, (C, F) Feopigmentos $<3 \mu\text{m}$	74
Figura 32. Distribución vertical de clorofila-a (mg m^{-3}) total y fraccionada por tamaños a lo largo de cada transecta (T1 a T5) durante el crucero FIP 2008-20(Enero 2009).....	75
Figura 33. Distribución de las concentraciones superficiales de clorofila-a total (mg m^{-3} , en verde) y nutrientes (μM , azul y rojo) a lo largo de cada transecta del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009). Las líneas gris y negra segmentada corresponden a la distribución de TSM y a la batimetría, respectivamente. Los datos de TSM fueron obtenidos promediando imágenes satelitales MODIS-Aqua disponibles para el período del crucero. La información batimétrica fue obtenida a partir del modelo de relieve global ETOPO1 (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html).	76
Figura 34. Perfil costa-océano de (A) densidad (σ_t) y (B) concentración de clorofila-a total (mg m^{-3}) a lo largo de la transecta 3 del crucero FIP 2008-20. Para construir los perfiles se agregó un perfil oceánico, correspondiente a la estación 4 del crucero Remolinos, que se realizó a bordo del AGOR Vidal Gormáz inmediatamente después del crucero FIP 2008-20.....	78
Figura 35. Análisis geoestadístico de las escalas espaciales de variabilidad en clorofila-a (paneles superiores), TSM (paneles centrales), y profundidad (paneles inferiores) sobre el área de estudio. Los datos de clorofila y TSM que se muestran en los mapas e histogramas corresponden a promedios de imágenes satelitales MODIS-A colectadas durante la primera quincena de Enero 2009. Los datos batimétricos provienen del modelo global de relieve ETOPO1. De costa a océano, los contornos negros en los mapas de distribución corresponden a 10 y 1 mg m^{-3} para clorofila, 13 y 15°C para TSM, y a 100, 200 y 1000 m para batimetría. Los símbolos azules y negros en los variogramas isotrópicos corresponden a datos satelitales (o de batimetría global) e <i>in situ</i> , respectivamente. Los variogramas anisotrópicos sólo fueron calculados para los datos satelitales y de batimetría digital.....	82
Figura 36. Biomasa fitoplanctónica integrada (0-10 m; mg C m^{-2}) de diatomeas totales (A) y los géneros dominantes <i>Thalassiosira</i> (B), <i>Skeletonema</i> (C) y <i>Chaetoceros</i> (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	85
Figura 37. Biomasa fitoplanctónica integrada (0-10 m; mg C m^{-2}) del género <i>Chaetoceros</i> (A) y las especies dominantes <i>Ch. debilis</i> (B), <i>Ch. compressus</i> (C) y <i>Ch. radicans</i> (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).	85

Figura 38. Biomasa integrada (0-10 m; mg C m ⁻²) de microzooplancton total (A) y grupos dominantes, nauplii (B), dinoflagelados tecados (C) y ciliados (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).....	90
Figura 39. Biomasa del microzooplancton integrada (0-10 m; mg C m ⁻²) de dinoflagelados totales (A) y los géneros dominantes <i>Diplopsalis</i> spp. (B) <i>Protoperidinium</i> spp. (C) y <i>Dinophysis</i> spp. (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).....	90
Figura 40. Biomasa del microzooplancton integrada (0-10 m; mg C m ⁻²) de tintínidos totales (A) y los géneros dominantes <i>Helicostomella</i> spp. (B), <i>Dictycysta</i> spp. (C) y <i>Eutimnuss</i> spp. (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).....	91
Figura 41. Biomasa de material fecal integrado (0-10 m; mg C m ⁻²) de pellets totales (A) y separados por grupos dominantes de eufáusidos (B), indeterminados (C) y copépodos (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).....	91
Figura 42. Distribución espacial de la biomasa zooplanctónica integrada sobre tres distintos estratos de profundidad durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).....	94
Figura 43. Distribución vertical de los grupos taxonómicos encontrados durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).....	95
Figura 44. Análisis de componentes principales de la comunidad de copépodos en el área costera-oceánica cubierta durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. Las elipses representan grupos faunísticos con estrecha asociación entre especies. Los ejes de coordenadas corresponden al índice de correlación.....	97
Figura 45. Distribución espacial de los principales grupos de zooplancton encontrados durante el crucero de enero 2009. (A) Copépodos, (B) poliquetos, (C) larvas de decápodos, (D) gelatinosos, (E) grupos no clasificados, y (F) eufáusidos.	98
Figura 46. Huevos y larvas de anchoveta, sardina común y merluza común durante el crucero de enero 2009. a) Huevos de anchoveta (0-50m), b) huevos de anchoveta (0-200m), c) larvas de anchoveta (0-50-m), d) larvas de sardina común (0-50m), e) larvas de sardina común (0-200m), f) huevos de merluza común (0-50m), g) huevos de merluza común (0-200m) y h) larvas de merluza común (0-50m).	102
Figura 47. Huevos y larvas de mote, pampanito y lenguado de ojos grandes durante el crucero de enero 2009. a) Huevos de mote (0-50m), b) huevos de mote (0-200m), c) larvas de mote (0-50-m), d) larvas de pampanito (0-50m), e) huevos de pampanito (50-200m), f) huevos de pampanito (0-200m), g) huevos de lenguado de ojos grandes (0-50m) y h) huevos de lenguado de ojos grandes (50-200m), e i) huevos de lenguado de ojos grandes (0-200m).	103
Figura 48. Huevos y larvas de agujilla, <i>Protomyctophum chilensis</i> e <i>Hygophum bruuni</i> durante el crucero de enero 2009. a) Huevos de agujilla (0-50m), b) huevos de agujilla (0-200m), c) larvas de <i>P. chilensis</i> (0-50m), d) larvas <i>P. chilensis</i> (0-200m), e) larvas de <i>H. bruuni</i> (0-50m), f) larvas de <i>H. bruuni</i> (50-200m), g) larvas de <i>H. bruuni</i> (0-200m).	104
Figura 49. Variabilidad en el forzamiento atmosférico (A), descargas de agua dulce (B) y TSM en el área donde se encuentra la Estación 18. Los datos de viento corresponden a estrés meridional acumulado sobre períodos de 1 semana y provienen de imágenes QuikSCAT para un pixel centrado en 36°37.5'S y 73°37.5'W. Los datos de caudal para los ríos Itata y BioBio fueron obtenidos de la Dirección General de Aguas. Los datos de TSM provienen de imágenes semanales MODIS-Aqua para un área de 3x3 pixeles (12x12 km ²) centrada en 36°30'S, 73°7.5'W, alrededor de la Estación 18.....	108
Figura 50. Serie de tiempo de la estructura vertical de (A) temperatura, (B) salinidad, (C) oxígeno disuelto y (D) densidad en la Estación 18 entre Agosto 2002 y Septiembre 2009. Los símbolos negros sobre el panel superior corresponden a las fechas de muestreo. La barra gris indica las fechas correspondientes al presente informe.	109
Figura 51. Climatologías mensuales de la estructura vertical de (A) temperatura, (B) salinidad, (C) oxígeno disuelto y (D) densidad en la Estación 18 . En los cálculos se utilizaron observaciones colectadas entre Agosto 2002 y Septiembre 2009.	109
Figura 52. Serie de tiempo de la estructura vertical de anomalías de (A) temperatura, (B) salinidad, (C) oxígeno disuelto y (D) densidad en la Estación 18 , desde Agosto 2002 a Septiembre 2009. Los contornos gruesos indican el cero en cada panel, y los símbolos negros sobre el panel superior corresponden a las fechas de muestreo. La barra gris indica las fechas correspondientes al presente informe.	110

Figura 53. Variabilidad en perfiles de (A) temperatura, (B) salinidad, (C) oxígeno disuelto y (D) fluorescencia en la Estación 5 , frente a Bahía Coliumo, para el periodo Enero 2008 a Septiembre 2009. Los símbolos sobre el panel superior indican las fechas de muestreo.	110
Figura 54. Variación mensual en los perfiles de (A) nitratos, (B) nitritos, (C) amonio, (D) fosfatos y (E) silicatos en la Estación 18 entre Agosto 2002 y Septiembre 2009. Los símbolos sobre el panel superior indican las fechas de muestreo. La barra gris indica las fechas correspondientes al presente informe.	112
Figura 55. Climatologías mensuales de la estructura vertical de (A) nitratos, (B) nitritos, (C) amonio, (D) fosfatos y (E) silicatos en la Estación 18 entre Agosto 2002 y Septiembre 2009.	112
Figura 56. Variabilidad temporal en los perfiles de clorofila-a (mg m^{-3}) en la Estación 18 para el período comprendido entre Agosto 2008 y Agosto 2009. Panel superior: clorofila-a total; panel intermedio: fracción $<20 \mu\text{m}$; panel inferior: fracción $<3 \mu\text{m}$	114
Figura 57. Variabilidad temporal en los perfiles de feopigmentos (mg m^{-3}) en la Estación 18 para el período comprendido entre Agosto 2008 y Agosto 2009. Panel superior: clorofila-a total; panel intermedio: fracción $<20 \mu\text{m}$; panel inferior: fracción $<3 \mu\text{m}$	114
Figura 58. Abundancia de diatomeas y sus principales géneros en dos estratos de profundidad (0 y 10 m) en la Estación 18 para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.	117
Figura 59. Abundancia estratificada de <i>Chaetoceros</i> y sus principales especies en la Estación 18, para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.	118
Figura 60. Abundancia estratificada de microzooplancton total a 0 y 10 m de profundidad en la Estación 18, para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.	119
Figura 61. Abundancia de dinoflagelados a 0 y 10m de profundidad en la Estación 18 para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.	120
Figura 62. Abundancia estratificada de tintínidos a 0 y 10m de profundidad y sus principales géneros en la Estación 18, para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.	121
Figura 63. Variabilidad temporal de la biomasa zooplanctónica total (panel superior, mgC m^{-3}) y de la abundancia de los principales grupos taxonómicos encontrados en la Estación 18 entre Agosto 2008 y Junio 2009.	123
Figura 64. Variabilidad temporal de la biomasa zooplanctónica total (mgC m^{-3}) y por estrato de profundidad en la Estación 18 entre Agosto 2004 y Junio 2009.	124
Figura 65. Variabilidad temporal en la abundancia de las principales especies de copépodos encontradas en la Estación 18 entre Agosto 2008 y Junio 2009.	127
Figura 66. Abundancia de huevos y larvas (individuos en 100 m^3) de las tres especies objetivo en la Estación 18 para el periodo Enero 2008 – Julio 2009. Los rectángulos sombreados indican periodos considerados históricamente como de mayor desove.	130
Figura 67. Abundancia de huevos y larvas (individuos en 100 m^3) de las tres especies objetivo en la Estación 18 para el periodo Julio 2004 – Julio 2009. Los rectángulos sombreados indican periodos considerados históricamente como de mayor desove.	131
Figura 68. Abundancia de huevos y larvas (individuos en 100 m^3) de las tres especies objetivo en la Estación 5 para el periodo Julio 2007 – Julio 2009. Los rectángulos sombreados indican periodos considerados históricamente como de mayor desove.	132
Figura 69. Variabilidad temporal de la tasa de Producción Primaria bruta (GPP), Respiración Comunitaria (RC) y de la razón GPP/RC en la Estación 18 desde Septiembre 2003. La línea vertical segmentada indica el inicio del período correspondiente al proyecto FIP 2008-20.	135
Figura 70. Variabilidad temporal de la tasa de Producción Primaria bruta (PPB), Respiración Comunitaria (RC) y la razón PPB/RC en la Estación 18 para el periodo Septiembre 2008 a Septiembre 2009.	135
Figura 71. Flujo vertical ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) de material litogénico y orgánico obtenido desde trampas de sedimento instaladas a 40 m de profundidad en la Estación 18 durante Junio 2008 – Junio 2009.	136
Figura 72. Principales componentes biogénicos encontrados en las muestras de trampa de sedimento instaladas a 40 m de profundidad en la Estación 18 durante Junio 2008 – Junio 2009.	136
Figura 73. Flujo y composición del material fecal colectado en las trampas de sedimento instaladas a 40 m de profundidad en la Estación 18 durante Junio 2008 – Junio 2009.	137
Figura 74. Principales componentes microplanctónicos observados en las muestras de trampas de sedimento instaladas a 40 m de profundidad en la Estación 18 durante Junio 2008 – Junio 2009.	137

Figura 75. Patrones de variabilidad espacial en TSM, clorofila-a superficial (CLA) y anomalía del nivel del mar (ANM) en la región de estudio. Los paneles superiores corresponden a promedios para todo el período analizado (Julio 2002 a Diciembre 2009 para TSM y CLA, y Julio 2002 a Julio 2009 para ANM), y los paneles inferiores muestran las condiciones promedio durante el periodo Septiembre 2008 – Septiembre 2009. Los contornos corresponden a 13°C (TSM), 5 mg m ⁻³ (clorofila), y 0 cm (ANM). El símbolo indica la posición de la Estación 18 del Centro COPAS.	141
Figura 76. Patrones de variabilidad temporal en TSM, clorofila-a y anomalía del nivel del mar en la región de estudio. Los mapas en los paneles superiores muestran escalas de decorrelación estimadas para las series de tiempo en cada píxel ($\alpha=0.05$). Los mapas de los paneles inferiores corresponden a las auto-correlaciones promedio para las escalas temporales indicadas arriba. Los contornos corresponden a escalas de 60 días (paneles superiores) y a correlaciones de 0.5 (paneles inferiores). El símbolo indica la posición de la Estación 18 del Centro COPAS.	142
Figura 77. Comparación entre valores de TSM (A) y clorofila-a superficial (B) estimados para el área de la Estación 18 desde datos satelitales y aquellos medidos a 1 m de profundidad durante los cruceros mensuales.	143
Figura 78. Variabilidad temporal de (A) TSM, (B) clorofila-a (CLA), y (C) anomalía del nivel del mar (ANM) en la plataforma continental frente a Concepción. Las series de tiempo de TSM y CLA corresponden a promedios de imágenes MODIS-Aqua para un área de 3x3 píxeles (12 km x 12 km) centrada en 36°30'S, 73°7.5'W, alrededor de la Estación 18. La serie de tiempo de ANM corresponde a valores extraídos de imágenes Aviso para un píxel de 1/3 de grado (ca. 30 km) centrado en 36°38.25'S, 73°00'W.	143
Figura 79. Climatologías (centradas en verano) de (A) TSM, (B) clorofila-a y (C) anomalía del nivel del mar, calculadas para el área de la Estación 18 desde imágenes satelitales. Los símbolos negros y líneas de error corresponden al promedio \pm 1 DS. Las líneas grises muestran la variabilidad registrada para cada variable durante el período Julio 2008 – Julio 2009.	144
Figura 80. Variación mensual de los desembarcos de sardina y anchoveta en la región del BioBio (A) durante el período cubierto por la serie de tiempo de la Estación 18. Los paneles B y C presentan series de promedios mensuales para variables estudiadas a partir de imágenes satelitales para la región.	146

2. INTRODUCCION

Las corrientes de borde oriental, entre ellas el sistema de corrientes de Humboldt en la costa occidental sudamericana, constituyen algunas de las áreas más productivas del océano mundial. Esto debido al proceso de surgencia costera y el consiguiente afloramiento de aguas sub-superficiales de origen ecuatorial (AESS, Strub et al. 1998), que se caracterizan por sus bajas temperaturas, altas salinidades y bajo contenido de oxígeno ($<1 \text{ mL L}^{-1}$), además de altas concentraciones de nutrientes (Brandhorst 1971, Silva 1983). Estas aguas provendrían del Pacífico Ecuatorial Oriental (8°S), desde donde son transportadas hacia el sur por la contra-corriente de Chile-Perú o Corriente de Günther (Silva y Neshyba 1979).

Varios centros de surgencia costera han sido identificados a lo largo de la costa de Chile (Brandhorst 1971, Arcos y Wilson 1984, Fonseca y Farías 1987). La existencia y localización de dichos centros son producto de la coacción de vientos del sur-suroeste con la topografía costera (Brandhorst 1971), y junto a otros procesos oceanográficos de mayor escala, asociados principalmente al forzamiento remoto (e.g. ondas atrapadas a la costa, ENSO- El Niño, Shaffer et al. 1997, Shaffer et al. 1999), determinan que las AESS más someras surjan a lo largo de la costa chilena, exponiendo a la superficie aguas frías (Fig. 1), ricas en nutrientes y pobres en oxígeno. Sobre la plataforma continental de Chile central se encuentra una de las áreas de surgencia más productivas y menos estudiadas del mundo. La zona central de Chile tiene una serie de características que la hacen única dentro de los ecosistemas de surgencia de borde oriental. En primer lugar, posee una ancha plataforma continental (60 mn), bordeada por dos profundos cañones submarinos (BioBio e Itata, Sobarzo 1998); exhibe surgencia de tipo estacional durante primavera-verano (Arcos y Navarro 1986, Peterson et al. 1988); recibe aportes significativos de agua dulce proveniente del río BioBio, uno de los ríos más caudalosos de Chile (Faúndez et al. 2001); y comprende un conjunto de bahías con diferentes tamaños y topografías (e.g. bahías de Concepción, Coronel, San Vicente, Coliumo, y Golfo de Arauco) donde se concentra gran parte de la población humana y de la actividad pesquera (Ahumada 1989).

Las consecuencias más notables del proceso de surgencia costera en la zona central de Chile corresponden a (1) la fertilización de la capa fótica que puede sustentar

un aumento sustancial en la biomasa del fitoplancton y eslabones tróficos subsiguientes, y (2) una alta productividad pesquera que se asocia a una mayor eficiencia del ecosistema en convertir la producción primaria en biomasa pesquera (Barber y Smith 1981, Lluch-Belda et al. 1989). Las tasas de producción primaria registradas durante el período de surgencia costera frente a Concepción fluctúan entre los 0,16 y 20 g C m⁻² d⁻¹ (Fossing et al. 1995, Daneri et al. 2000, Farías et al. 2004), siendo este último uno de los valores más altos registrados para los océanos. Diversas hipótesis que apuntan a explicar la alta producción biológica de la región se basan en la interacción de procesos físicos y las características topográficas de la línea de costa y plataforma continental. Parte de éstas se relacionan con el desarrollo de estructuras de mesoescala, como giros y filamentos, que por efecto de circulación determinarían zonas de retención de nutrientes y condiciones favorables para el desarrollo larval de especies de importancia comercial como la sardina y anchoveta (Cáceres y Arcos 1991, Arcos et al. 1996), y que en aguas más oceánicas favorecerían la presencia de jurel (Hormazábal et al. 2004, Correa-Ramirez et al. 2007). Los procesos de retención sobre la plataforma continental de la región se verían favorecidos por el fuerte efecto que la batimetría, marcada por la presencia de los cañones submarinos de BioBio e Itata, tiene sobre los flujos forzados por la surgencia costera frente a Concepción (Sobarzo y Djurfeldt 2004, Sobarzo et al. 2005). Por otro lado, ondas atrapadas a la costa podrían modular la intensidad de la surgencia costera en esta región, ya que dependiendo de su fase podrían producir una profundización o acercamiento a la superficie de la termoclina (Shaffer et al. 1997, Pizarro 1999, Shaffer et al. 1999).

Los recursos pesqueros de la VIII Región, predominantemente conformados por la sardina común y anchoveta, han sufrido fuertes fluctuaciones en abundancia en las últimas décadas (e.g. Arcos et al. 2001, Castro et al. 2002). La ausencia de información bio-oceanográfica sistematizada para la zona ha impedido establecer cuál es la relación entre cambios ambientales y variaciones de los stocks de estos recursos que, en gran medida, dependen de la sobrevivencia de larvas y juveniles bajo condiciones ambientales favorables. Fluctuaciones asociadas a ciclos ENOS han sido observadas históricamente, como por ejemplo la catastrófica reducción observada en las costas del Perú y, en cierta medida, en el norte de Chile durante El Niño 1982 (Arntz y Fahrbach 1996). No obstante,

no se cuenta con una adecuada serie de tiempo que permita investigar los orígenes de las mencionadas fluctuaciones, como recientemente se ha hecho con los stocks de sardina y anchoveta de las costas de California utilizando la serie de tiempo colectada por la CalCOFI durante las últimas décadas (e.g. Rykaczewski y Checkley 2008). Por ello, desde el año 2004 el Consejo de Investigación Pesquera ha estimado conveniente desarrollar una línea de investigación bio-oceanográfica para la VIII Región, que permita establecer una línea base de parámetros ambientales, así como la caracterización de los patrones de variabilidad espacial y temporal que afectan el desarrollo y la sobrevivencia de peces pelágicos pequeños (sardina común y anchoveta) en la zona costera. Recientemente, estas observaciones se han extendido hasta la IX Región, dado que también representa una zona importante en el desarrollo de estas especies pelágicas.

En el presente informe, se entrega un resumen de actividades y de la información generada en el marco del proyecto FIP 2008-20, que tuvo como objetivo caracterizar y monitorear las condiciones bio-oceanográficas frente a las costas de Chile centro-sur, más particularmente en la zonas de desove y crecimiento de pequeños pelágicos. Este proyecto representa una continuidad de un sistema de observación sistemática de las condiciones bio-oceanográficas frente a las costas de Chile centro-sur, iniciado en Julio de 2004 (FIP 2004-20) por el Centro FONDAP-COPAS de la Universidad de Concepción. Los resultados bio-oceanográficos obtenidos hasta el presente forman la base de un sistema de información único para la región de estudio, y sobre la cual hoy se puede tener una visión más completa e integrada del sistema que sustenta importantes pesquerías pelágicas en Chile central.

3. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la variabilidad espacial y temporal de las condiciones y procesos bio-oceanográficos en las principales áreas de desove y reclutamiento de pequeños pelágicos en las VIII y IX regiones.

4. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 4.1. Determinar la distribución espacial, a nivel de meso-escala (km), de las variables bio-oceanográficas temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa del fitoplancton y penetración de la luz, en la zona de estudio, durante el período de primavera, en la estructura vertical de 0 a 200 m de profundidad.
- 4.2. Determinar la abundancia, distribución espacial y composición del plancton, incluyendo el macrozooplancton, ictioplancton, mesozooplancton, microplancton, nanoplancton y picoplancton en la zona de estudio durante un período de primavera y su asociación con las variables bio-oceanográficas indicadas en 4.1.
- 4.3. Determinar las variaciones mensuales en la zona costera de las variables señaladas en 4.1 y 4.2, con observaciones realizadas en, a lo menos, 2 estaciones costeras dentro de la zona de estudio.
- 4.4. Estimar las siguientes tasas biológicas: producción primaria, respiración comunitaria del plancton, flujo vertical de material particulado (acoplamiento pelágico-bentónico) y su variabilidad mensual en estaciones seleccionadas de la zona de estudio.
- 4.5. Determinar la variabilidad superficial de las variables temperatura del mar, clorofila-a y anomalía del nivel del mar por medio de percepción remota. La frecuencia mínima de análisis debe ser al menos mensual. Y asociar estas variaciones espacio-temporales con la actividad pesquera.

5. METODOLOGIA POR OBJETIVO

5.1. Objetivo específico 1: *Determinar la distribución espacial, a nivel de meso-escala (km), de las variables bio-oceanográficas temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa del fitoplancton y penetración de la luz, en la zona de estudio, durante el período de primavera, en la estructura vertical de 0 a 200 m de profundidad.*

5.1.1. Descripción general del crucero

El crucero bio-oceanográfico se inició el día 5 de Enero del 2009 a bordo del AGOR Vidal Gormáz, buque oceanográfico de la Armada de Chile, zarpando desde Valparaíso y recalando en Talcahuano el 13 de Enero. Durante el crucero se obtuvo información sobre la distribución vertical y de mesoescala (10-100 km) de la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa del fitoplancton y penetración de la luz, además de la distribución espacial y composición del plancton, y se estimaron tasas de producción primaria y respiración comunitaria del plancton, entre otras (ver Tabla 1).

El plan original de muestreo consideraba la realización del crucero durante la primavera. Sin embargo, la disponibilidad de una embarcación oceanográfica que reuniera las condiciones necesarias para este estudio determinó que se llevara a cabo en el mes de Enero. Aunque las condiciones meteorológicas encontradas durante la mayor parte del crucero no fueron del todo favorables (vientos por sobre 30 nudos y olas de 4-5 m), fue posible realizar 40 de las 42 estaciones propuestas en el plan original de muestreo (Fig. 2). Consideraciones logísticas, operativas y/o de seguridad generaron cambios menores en la asignación de algunas estaciones a las categorías “oceanográfica” (i.e. sólo perfil de CTD) y “bio-oceanográfica” (i.e. CTD + muestreo de agua y arrastres de plancton). El plan original consideraba la realización de 10 estaciones oceanográficas y 32 bio-oceanográficas (ver Fig. 2). Durante el crucero fue posible realizar 9 estaciones oceanográficas y 31 bio-oceanográficas, manteniendo la cobertura latitudinal y longitudinal propuesta con excepción de la transecta de más al sur, en que la estación más costera (Est. 36, Fig. 2) tuvo que ser eliminada por ser muy somera. Dicha estación fue reemplazada por una situada entre las Est. 39 y 38 (Est. 43, ver Fig. 2).

En todas las estaciones se llevaron a cabo lances de roseta equipada con un CTD Seabird 25, con sensores de luz PAR, oxígeno disuelto y fluorescencia. Adicionalmente, en las estaciones bio-oceanográficas se tomaron muestras de agua de mar con las botellas Niskin de 8 L de la roseta en al menos cinco niveles. Dichas muestras fueron utilizadas para determinaciones de oxígeno disuelto y nutrientes, además de picoplancton, nanoplancton y microplancton. Se realizaron también muestreos de zooplancton e ictioplancton con redes Tucker Trawl. Más detalles de los métodos de muestreo y análisis de muestras se encuentran en la siguiente sección, por objetivos, y en la Tabla 2.

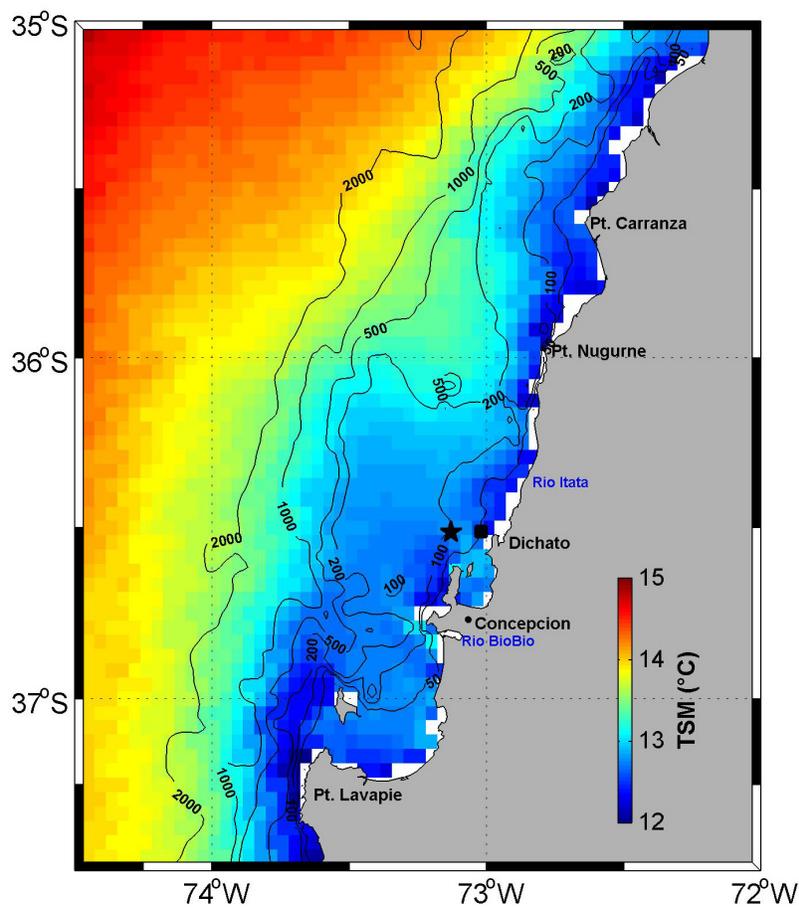


Figura 1. Caracterización de la batimetría (contornos, m) y variabilidad espacial de la Temperatura Superficial del Mar (TSM, colores) en Chile centro-sur. El campo de TSM corresponde al promedio de largo plazo (Julio 2002 – Agosto 2009) de imágenes satelitales MODIS-Aqua con una resolución espacial de 4 km. La estrella y cuadrado negro indican las posiciones de las estaciones de monitoreo 18 y 5 del Centro COPAS, respectivamente. Figura modificada de Tapia et al. (en preparación).

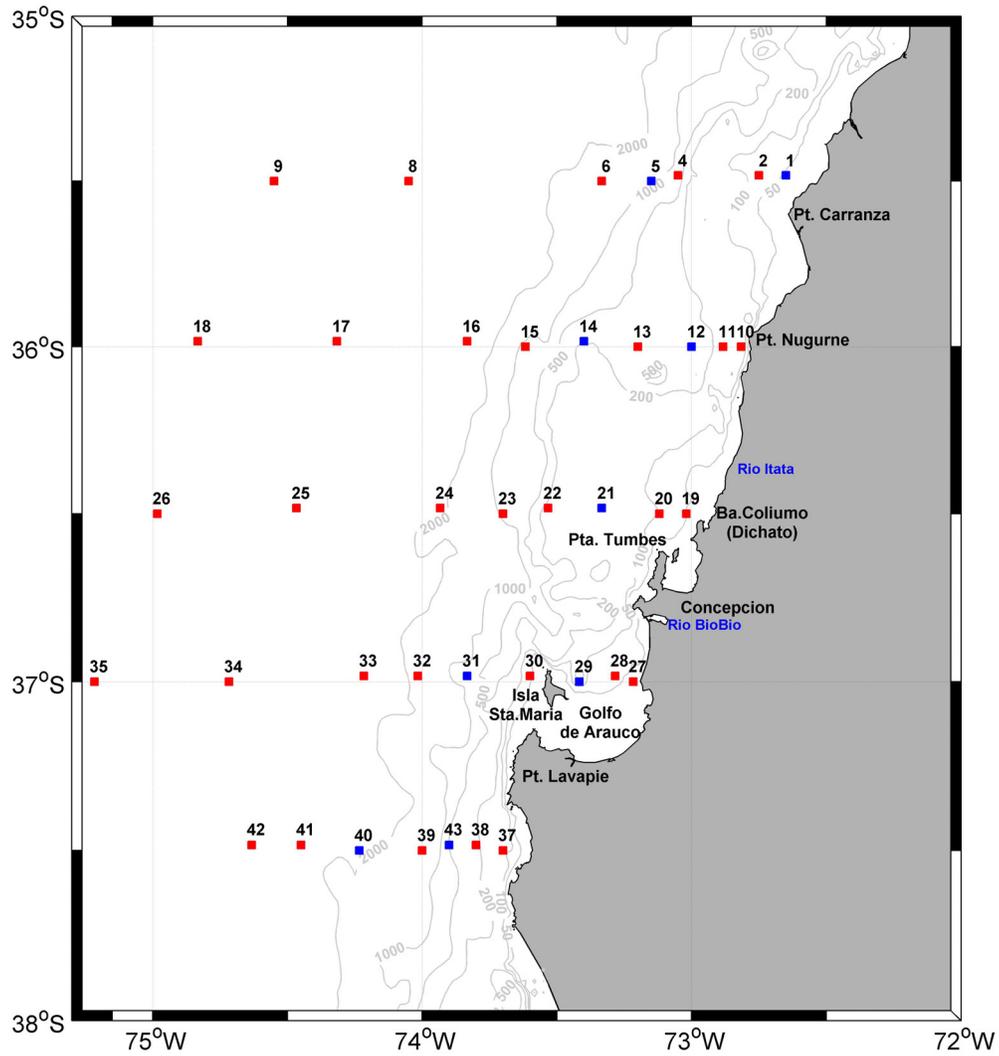


Figura 2. Distribución geográfica de las estaciones realizadas durante el crucero de monitoreo bio-oceanográfico a bordo del AGOR Vidal Gormáz, entre el 5 y 13 de Enero de 2009. Los símbolos azules y rojos corresponden a estaciones oceanográficas y bio-oceanográficas, respectivamente. Los números corresponden al número de estación indicado en la Tabla 4. Los contornos grises corresponden a isóbatas (m). Las estaciones 20 y 23 corresponden a las Estaciones 18 y 40 del Centro COPAS.

Tabla 1. Personal científico embarcado y responsabilidades en crucero FIP 2008-20

Nombre	RUT	Institución	Actividad
Jefe de Expedición			
Fabián Tapia	11.697.553-K	UdeC	Jefe de crucero
Personal participante			
Rubén Escribano	8.471.380-5	UdeC	Muestreo zoo-ictioplancton
Valeria Anabalón	12.735.204-6	UdeC	DOC, POC
Loreto Torreblanca	15.708.746-0	UdeC	Picoplancton, Nanoplancton, Fitoplancton
Elda Riquelme	12.018.040-1	UdeC	Clorofila fraccionada
Susana Giglio	12.261.692-4	UdeC	CTD-Roseta
Nadín Ramírez	15.464.115-7	PUCV	CTD-Roseta
Oscar Vergara	16.555.497-3	PUCV	CTD-Roseta
Cecilia Torres	13.471.660-6	UACH	Fitoplancton, POC, Microzooplancton
Francisca Muñoz	16.537.323-5	UACH	Fitoplancton, POC, Microzooplancton
Katty Donoso	15.344.290-8	UdeC	Muestreo zoo-ictioplancton
Odette Vergara	13.802.573-K	UdeC	Muestreo zoo-ictioplancton
Lorena Lizárraga	16.430.860-K	UdeC	Oxígeno disuelto, DOC, Curvas P/I
Marcelo Fuentes	13.959.534-3	UdeC	Muestreo zoo-ictioplancton
Oscar Chiang	13.848.263-4	UdeC	Oxígeno disuelto, DOC, Curvas P/I
Camila Fernández	12.696.060-3	UdeC	Gases, Nutrientes, Isótopos naturales
María Estrella Alcamán	15.659.360-5	UdeC	Gases, Nutrientes, Isótopos naturales

UdeC : Universidad de Concepción
 UACH : Universidad Austral de Chile
 PUCV : Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Tabla 2. Muestras y variables analizadas por estación.

Medición	Profundidad (m)	Estación
Oxígeno/gases	Todas	Bio-oceanográficas
Nutrientes	Todas	Bio-oceanográficas
DOC	0, 20 0, 10, 50	Bio-oceanográficas
Zoo-ictioplancton	Estratificados (2 prof + 1 integrado)	Bio-oceanográficas
Picoplancton	0 10, 20, 35, 50, 75 y 100 10 y 50	Todas Bio-oceanográficas Oceánicas en 4 primeras transectas
Nanoplancton	0 10, 20, 35, 50, 75 y 100 10 y 50	Todas Bio-oceanográficas Oceánicas en 4 primeras transectas
Fitoplancton	0, 10, 20, 50 0 10 y 50	Bio-oceanográficas Todas B.O. y oceánicas en 4 primeras transectas
Clorofila fraccionada	0 10, 20, 35, 50, 75, 100 10 y 50	Todas Bio-oceanográficas Oceánicas en 4 primeras transectas
POC	0, 20 0, 10 y 50	Bio-oceanográficas Bio-oceanográficas
Microzooplancton	0, 10, 20, 50	Bio-oceanográficas
Isótopos naturales	Todas	Una estación por transecta
PP con ¹³ C	3 prof. en zona fótica e.g. 0,10, 20	Una estación por transecta
Curvas PI con oxígeno	Máximo de fluorescencia	Tres estaciones por transecta

5.1.2. Muestreo

En todas las estaciones oceanográficas se obtuvieron perfiles de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia utilizando una roseta de 12 botellas Niskin (8 L) y provista de un CTD Seabird 25 más los sensores respectivos. El registro continuo de dichas variables se realizó hasta los 600 m, o hasta 10 m desde el fondo dependiendo de la profundidad de la estación. En las estaciones bio-oceanográficas, se utilizaron las botellas Niskin para obtener muestras de agua desde al menos 5 profundidades. Los niveles elegidos dependieron de la profundidad de la columna de agua muestreada. Se obtuvieron volúmenes para mediciones de oxígeno disuelto, concentraciones de nutrientes (nitrato, nitrito, fosfato y silicato), y estimaciones de biomasa del fitoplancton desde mediciones de clorofila-a fraccionada en 3 clases de tamaño (clorofila-a total, <20 μm y <3 μm), las que representan las fracciones pico-, nano-, y micro-planctónica (ver Tabla 2). Además, en dos estaciones se tomaron muestras para determinaciones de salinidad en laboratorio, las que junto a las determinaciones de oxígeno disuelto por el método de Winkler se utilizaron para verificar y corregir las mediciones continuas efectuadas por los sensores del CTDO. Durante el procesamiento de los datos de CTD obtenidos desde el crucero se determinó un desperfecto en el sensor de luz PAR (i.e. radiación fotosintéticamente activa), por lo que no fue posible contar con esta información para la columna de agua.

5.1.3. Análisis en laboratorio

Análisis de salinidad. Las muestras de agua para salinidad se llevaron a laboratorio en envases de vidrio sellados herméticamente para posterior análisis en salinómetro GIDLINE, equipo existente en el Laboratorio de Calibración del PROFC en la UdeC.

Análisis de oxígeno disuelto. La determinación de oxígeno disuelto se realizó usando el método de Winkler (Williams & Jenkinson 1982; Knap et al. 1993). El método de Winkler consiste en producir una serie de reacciones químicas que liberan iones de yodo equivalentes al oxígeno disuelto en la muestra de agua de mar. La concentración de iones

de yodo se determina posteriormente a través de una titulación con una solución de tiosulfato, utilizando un dispensador automático Dosimat 665 Metrohm y detección visual del punto final de titulación. El oxígeno disuelto en cada muestra fue fijado químicamente adicionando a cada botella 1 ml de solución de Cloruro de Manganeso ($MnCl_2$) seguido por 1 ml de solución yodada alcalina, compuesta por Yoduro de Sodio (NaI) e Hidróxido de Sodio (NaOH). Justo antes de la titulación, las botellas fueron acidificadas con 1 ml de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4).

Análisis de nutrientes. Las determinaciones de los nutrientes nitrato, nitrito, fosfato, y silicato se realizaron utilizando técnicas de espectrofotometría, para lo cual se dispuso de dos equipamientos COPAS: 1) analizador de flujo continuo con autoanalizador y 2) métodos manuales estándar. La determinación de nitrato está basada en el método de Strickland y Parsons (1968). El nitrato es reducido a nitrito usando una columna de Cd-Cu. El nitrito producido reacciona con sulfamida en una solución ácida y el compuesto diazo resultante en presencia de N-(1-Naptil) etilenodiamina forma un compuesto azo fuertemente coloreado. Para determinación de ortofostato reactivo se emplea la metodología propuesta por Grasshoff et al. (1983). La muestra de agua de mar que contiene fosfato reacciona con un reactivo compuesto de molibdato de amonio-ácido ascórbico y tartrato de antimonio potasio, resultando en un complejo coloreado. El método utilizado en la determinación de silicato está descrito en UNESCO (1983) y se basa en la reacción que se produce entre los compuestos solubles de silicio en aguas naturales y molibdato de amonio, que llevan a la formación del ácido β -silicomolíbico de color amarillo. Este complejo es luego reducido, cambiando a un complejo de color azul, mediante la utilización de ácido oxálico y ácido ascórbico.

Biomasa fitoplanctónica. Las muestras de agua se obtuvieron en volúmenes de 1-2 L en bidones oscuros para filtración inmediata. Se utilizó el procedimiento estándar para determinar clorofila total (Parsons et al. 1984). Para clorofila-a total se utilizaron filtros GF/F (tamaño poro ca. 0,7 μm). La clorofila-a $< 20 \mu m$ se obtuvo por filtración con un tamiz de 20 μm , submuestra que fue filtrada sobre filtros de 3 μm . A su vez, la submuestra de clorofila-a $< 3 \mu m$ obtenida fue filtrada por filtros GF/F. Los filtros fueron

preservados en nitrógeno líquido para análisis posterior. En el laboratorio, la clorofila-a fue extraída en acetona 90% durante 24 horas y luego leída mediante un fluorómetro Turner Design TD-700 previamente calibrado.

Análisis de la información. Toda la información recopilada del crucero ha sido almacenada en una base de datos. Los datos de temperatura, salinidad, densidad y oxígeno permitieron el análisis de la distribución espacial (horizontal y vertical) de las masas de aguas en el período de estudio. Este análisis permitió a su vez estimar las características que influyen sobre la distribución de nutrientes y de los diversos componentes del plancton, incluyendo la estratificación, profundidad de la capa de mezcla, base de la termoclina, oxiclina y nutriclina, y patrón de circulación general. En un análisis más global se caracterizó la distribución de mesoescala de la Temperatura Superficial del Mar (TSM), Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO), concentración de clorofila-a y nutrientes. Todas las variables bio-oceanográficas se analizaron gráficamente en términos de su distribución espacial, mediante el uso de mapas de distribución horizontal y construcción de secciones verticales latitudinales y meridionales.

5.2. Objetivo específico 2: *Determinar la abundancia, distribución espacial y composición del plancton, incluyendo el macrozooplancton, ictioplancton, mesozooplancton, microplancton, nanoplancton y picoplancton de la zona de estudio durante un período de primavera y su asociación con las variables bio-oceanográficas indicadas en 5.1.*

5.2.1. Muestreo

Para cumplir con este objetivo se utilizaron dos sistemas de muestreo en las estaciones bio-oceanográficas indicadas en la Figura 2. Se obtuvieron 67 muestras de zooplancton para los análisis de los componentes del macrozooplancton, mesozooplancton e ictioplancton, con lances oblicuos estratificados de red Tucker Trawl de 1 m² de boca,

equipada con malla de 200 μm (alternativamente con malla de 300 μm) y flujómetro digital calibrado General Oceanics. Los estratos de muestreo correspondieron a 0-50 m y 50-200 m para las estaciones más profundas, y 0-35 m para aquellas estaciones más costeras y poco profundas. El estrato superior de 0-50 m representa la capa de agua fótica, oxigenada y de mezcla, donde se espera que se concentre el zooplancton epipelágico y larvas y huevos de peces, mientras que el estrato sub-superficial de 50-200 m representa el hábitat de especies bajo la termoclina y eventualmente asociadas a la ZMO o a su límite superior.

Los arrastres de la red Tucker Trawl incluyeron un muestreo integrado de 0-200 m y luego los dos estratos indicados más arriba. Los arrastres se realizaron a una velocidad aproximada de 2 nudos, lo cual minimiza errores de muestreo asociados al escape al arte por parte del macrozooplancton como eufáusidos, y de larvas de peces en estado avanzado de desarrollo. Las muestras de zooplancton fueron inmediatamente fraccionadas a bordo para preservación de una fracción en un congelador (-5°C) para posterior determinación de biomasa, y una segunda fracción para fijación en formalina al 5% neutralizada a un $\text{pH}=7$ con tetraborato de sodio. En la Tabla 3 se presenta información detallada de los muestreos de zooplancton.

Tabla 3. Caracterización de los muestreos de zoo-ictioplancton, durante el crucero de monitoreo oceanográfico FIP 2008-20 en Enero de 2009.

REFERENCIA	TRANSECTA	ESTACION	FECHA	MALLA	ESTRATO	FORMALINA	BIOMASA
1	1	1	06/01/2009	200	0-35	3/4	1/4
2					35-0	1	
3	1	2	06/01/2009	200	0-50	3/4	1/4
4					50-0	1	
5	1	4	07/01/2009	200	200-0	1	
6					150-200	3/4	1/4
7					150-0	3/4	1/4
8	1	6	07/01/2009	200	0-200	1	
9					200-50	3/4	1/4
10					50-0	3/4	1/4
11	1	8	07/01/2009	200	0-200	1	
12					200-50	3/4	1/4
13					50-0	3/4	1/4
14	2	10	10/01/2009	200	0-50	3/4	1/4
15					50-0	1	
16	2	11	10/01/2009	200	0-150	1	
17					150-50	1	
18					50-0	1	
19	2	13	10/01/2009	200	0-200	1	
20					200-50	7/8	1/8
21					50-0	31/32	1/32
22	2	16	10/01/2009	200	0-200	1	
23					200-50	7/8	1/8
24					50-0	7/8	1/8
25	2	17	10/01/2009	200	0-200	1	
26					200-50	7/8	1/8
27					50-0	7/8	1/8
28	2	18	09/01/2009	200	0-200	1	
29					200-50	7/8	1/8
30					50-0	7/8	1/8
31	3	19	08/01/2009	200	0-40	1/2	
32					40-0	1/2	
33	3	20	09/01/2009	200	0-80	1	
34					80-50	3/4	1/4
35					50-0	7/8	1/8
36	3	22	09/01/2009	200	0-140	1	
37					140-50	7/8	1/8
38					50-0	7/8	1/8
39	3	24	09/01/2009	200	0-200	1	
40					200-50	3/4	1/4
41					50-0	3/4	1/4
42	3	26	09/01/2009	200	0-200	1	
43					200-50	7/8	1/8
44					50-0	7/8	1/8
45	4	27	08/01/2009	200	0-30	1	
46					30-0	1	
47	4	28	08/01/2009	200	0-50	1	
48					50-0	1/4	
49					0-50	1	
50	4	30	11/01/2009	200	50-0	15/16	1/16
51					0-200	1	
52					200-0	7/8	1/8
53	5	36	12/01/2009	300	0-50	7/8	1/8
54					50-0	1	
55				60	0-50	7/8	1/8
56	5	37	12/01/2009	300	0-200	1	
57					200-50	7/8	1/8
58				60	50-0	7/8	1/8
59				60	0-200	3/4	1/4
60	5	39	12/01/2009	300	0-200	1	
61					200-50	7/8	1/8
62				60	50-0	15/16	1/16
63	5	41	12/01/2009	60	0-200	7/8	1/8
64					300	0-200	1
65				300	200-50	7/8	1/8
66				300	50-0	7/8	1/8
67	60	300	0-200	7/8	1/8		

El muestreo de los componentes menores del plancton ($<200\ \mu\text{m}$) se realizó a partir de agua de las botellas Niskin de 8 L adosadas a la roseta, en al menos 2 profundidades dentro de los primeros 50 m. Para los efectos de este estudio, y por motivos presupuestarios, las fracciones de pico- y nanoplancton se determinaron mediante clorofila-a fraccionada por tamaño ($<3\ \mu\text{m}$ para picoplancton y 3-20 μm para nanoplancton). Las muestras de picoplancton (1350 μl de muestra) fueron depositadas en crioviales y fijadas (paraformaldehído 1% conc. final) y almacenadas en nitrógeno líquido hasta su traslado al laboratorio, donde fueron transferidas a un congelador (-80°C) hasta su análisis. Las muestras de nanoplancton (2 muestras de 50 ml c/u) fueron depositadas en tubos de centrifuga y fijadas en glutaraldehído 2% y lugol 2% (concentraciones finales), y mantenidas en frío ($4-6^{\circ}\text{C}$) y oscuridad hasta su análisis. Para la fracción micropláctónica ($> 20\ \mu\text{m}$) se aplicaron dos procedimientos durante el muestreo, uno general para microplancton y otro específico para fitoplancton. En el primer caso, los volúmenes de agua de mar utilizada fluctuaron entre 10 L (áreas productivas) y 28 L (áreas oligotróficas). Estas muestras fueron filtradas a bordo usando un tamiz de 23 μm . Los organismos retenidos en el tamiz fueron concentrados hasta un volumen final de aproximadamente 100 ml y preservados con formalina 2%. En el segundo caso, las muestras para micro-fitoplancton sin tamizar (250 ml) fueron almacenadas en frascos plásticos y preservadas con Lugol al 2%. Para el microplancton, se colectaron y analizaron muestras desde dos profundidades que normalmente correspondieron a superficie y 10 m.

5.2.2. Análisis en laboratorio

Picoplancton y nanoplanton. La determinación de picoplancton y nanoplancton se realizó mediante análisis de clorofila-a. Las abundancias de cada componente se estimaron sobre la base de su tamaño y fluorescencia. Para los cálculos de biomasa se utilizaron factores de conversión disponibles en la literatura especializada (Kana y Glibert 1987, Lee y Fuhrman 1987, Campbell et al. 1994).

Microplancton. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio a nivel de grupos y géneros dominantes usando un microscopio invertido, con cámaras de sedimentación, mediante el método de Utermöhl (1958). La biomasa (como carbono) de esta fracción, se estimó midiendo los individuos de algunos grupos dominantes provistos de cubiertas minerales u orgánicas (e.g. tintínidos) de acuerdo a sus formas geométricas (Edler 1979).

Mesoplancton y macroplancton. En el laboratorio, las muestras congeladas de zooplancton fueron filtradas sobre filtro GF/F muflados y pre-pesados, y secadas a 60 °C por 24 h. Se obtuvo así el peso seco de cada muestra, que corresponde a la biomasa de zooplancton muestreado. La fracción de muestra fijada en formalina fue analizada para composición de especies de mesozooplancton e ictioplancton (200-1000 μm) y macrozooplancton (>1000 μm). La abundancia de los grupos y especies dominantes fue expresada por metro cúbico y metro cuadrado.

Ictioplancton. El análisis de la composición y abundancia de los huevos y larvas de peces se realizó sobre las muestras fijadas en formalina (como en el caso anterior). Para ello, en primer lugar se procedió a separar bajo la lupa todos los huevos y larvas de peces presentes en cada muestra. Luego se identificaron y enumeraron por especies, con énfasis en las especies-recurso de la zona, tales como merluza, anchoveta y sardina común.

5.2.3. Asociación entre variables oceanográficas y biológicas

Se utilizó un análisis geoestadístico, específicamente el cálculo de variogramas experimentales omnidireccionales y direccionales (ver Goovaerts 1997), para caracterizar la estructura espacial y escalas de variabilidad típicas de las concentraciones de clorofila (total) y temperatura superficial medidas *in situ* durante el crucero oceanográfico. Posteriormente estos variogramas fueron comparados con aquellos obtenidos para imágenes satelitales de clorofila superficial y TSM sobre la región en que se realizó el crucero. Las imágenes correspondieron a promedios de datos MODIS-Aqua de nivel 3 (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODISA>), con una resolución de 4 km, y obtenidos durante la primera quincena de Enero 2009. Se calcularon además variogramas

omnidireccionales y direccionales para datos batimétricos de la región de estudio, obtenidos desde el modelo global de relieve Etopo1, con una resolución espacial de 1 mn y distribuido por el Centro de Datos Geofísicos de la NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>).

El grado de asociación entre los componentes planctónicos, en términos de distribución, abundancia y composición, y las variables bio-oceanográficas indicadas en 5.1, fue tratado mediante técnicas de análisis multivariado, como regresión múltiple paso-a-paso, análisis de componentes principales y conglomerados, y correlaciones canónicas (Legendre y Legendre 1998, Manly 2005). La distribución espacial de componentes del plancton se analizó y representó mediante técnicas cartográficas, que incluyeron construcción de contornos y métodos de análisis espacial. Dada la relevancia de los copépodos como componentes del zooplancton, se realizó un análisis comunitario centrado en las especies de este grupo que se detectaron en la región de estudio durante el crucero oceanográfico. Del total de 56 especies identificadas, se estimaron las abundancias relativas (%) para seleccionar el grupo de especies dominantes. De este total, 28 especies resultaron con abundancias promedio superiores a 0.1% (Tabla 16). Sobre este grupo se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) con el objeto de establecer grupos faunísticos con especies correlacionadas, y que pudieran representar ensambles espaciales de especies o patrones espaciales comunitarios. El ACP se aplicó sobre la matriz de correlación de las especies, con una rotación tipo Varimax y para 3 factores o componentes principales. Para mayor detalle sobre este análisis, se refiere al lector al manuscrito de Hidalgo et al. (Anexo 2), aceptado para publicación en la revista *ISI Progress in Oceanography*.

5.3. Objetivo específico 3: *Desarrollar una serie de tiempo de frecuencia mensual de las variables señaladas en los objetivos específicos 4.1 y 4.2, en estaciones seleccionadas, dentro de la zona de estudio.*

5.3.1. Serie de tiempo

Para estudiar la variabilidad temporal de las condiciones bio-oceanográficas se visitó en forma mensual (y durante 12 meses) una estación de muestreo con coordenadas 36°30.8'S – 73°7.7'W (Estación 18), ubicada sobre la plataforma continental a 20 km de la localidad de Dichato. Una segunda estación de muestreo con coordenadas 36°30.66'S - 73°1.14'W (Estación 5), y localizada a ca. 8 km de la costa, se realizó durante los mismos cruceros mensuales frente a Bahía Coliumo.

La Estación 18 se encuentra sobre la terraza del Itata (ver Fig. 1), a una profundidad aproximada de 90 m, y se encuentra afecta a impactos locales directos de los procesos que ocurren en la plataforma interior, incluyendo las bahías aledañas a la VII Región. La terraza del Itata en general representa el área de mayores y más extensas concentraciones de alimento (como clorofila-a) para grupos planctónicos, en comparación con áreas adyacentes. Las observaciones mensuales realizadas por el Centro COPAS durante los últimos 7 años (a partir de Julio 2002) indican que la Estación 18 refleja de manera apropiada la variabilidad bio-oceanográfica estacional e intra-estacional en la región, especialmente referida al forzamiento ejercido por la surgencia costera en la zona (ver manuscrito de Tapia et al. en Anexo 2).

En el pasado también se ha monitoreado en forma estacional (cada 3 meses) un punto localizado a 40 mn de la costa, sobre el talud continental (Estacion 40, 36°20' S - 73°44' W, 1000 m). Debido a restricciones presupuestarias dichas observaciones estacionales no fueron comprometidas en este proyecto.

5.3.2. Métodos de muestreo en las estaciones de monitoreo mensual.

En la Estación 18 se realizaron perfiles de CTDO-Fluorescencia-PAR hasta los 80 m, y se obtuvo muestras de agua a 12 profundidades. Desde las botellas Niskin se obtuvieron

muestras para salinidad, concentraciones de oxígeno disuelto, nutrientes, abundancia y biomasa (clorofila-a medida y carbono estimado) de los componentes del microplancton, nanoplancton y picoplancton. Además, se realizaron muestreos a 2 profundidades con botellas de 30 L para estimar abundancia y composición del microplancton, que requiere de mayores volúmenes para un análisis apropiado. Para el estudio del ictioplancton, mesozooplancton y macrozooplancton, se realizó un lance de red Tucker Trawl (descrita previamente) para muestrear los estratos 0-50 m y 50-80 m. El monitoreo de la Estación 5 incluyó un perfil de CTDO y el muestreo de ictioplancton en un estrato.

5.3.3. Análisis de muestras e información.

Los métodos de análisis de muestras para todas las variables son los mismos indicados para los Objetivos 5.1 y 5.2. La información proveniente de ambas estaciones se mantuvo en una base de datos actualizada mensualmente que constituyó la base del boletín oceanográfico mensual. Las variables en estudio fueron procesadas y analizadas con métodos de estudios de series de tiempo, estableciéndose las eventuales correlaciones y correspondencia entre variables del ambiente físico y químico y variables biológicas.

5.4. Objetivo específico 4: *Estimar las siguientes tasas biológicas: producción primaria, respiración comunitaria del plancton, flujo vertical de material particulado (acoplamiento pelágico-bentónico) y su variabilidad mensual en estaciones seleccionadas de la zona de estudio.*

5.4.1. Método de muestreo

En la Estación 18, y coincidente con los monitoreos del Objetivo 5.3, se realizaron los estudios para estimar mensualmente las tasas de producción primaria bruta (PPB), respiración comunitaria del plancton (RC) y flujo vertical de material particulado (FV). Los métodos aplicados consistieron en estimaciones *in situ* de cambios en la concentración de oxígeno disuelto. Para ello, los experimentos *in situ* se realizaron con

un sistema de incubación consistente en 5 cubos de acero inoxidable con porta-botellas posicionadas diagonalmente dentro del cubo, los cuales fueron dispuestos verticalmente en las mismas profundidades en las cuales fueron extraídas las muestras inicialmente. De cada profundidad se obtuvo 15 submuestras, las cuales se incubaron en botellas de borosilicato de 125 ml de capacidad nominal. Primero, se seleccionaron 5 profundidades para estimar PPB y RC de acuerdo a perfil de fluorescencia y luz proveniente del CTDO-fluor.-Luz. En forma simultánea, se puso en el agua una trampa de sedimentos boyante, acoplada al sistema de incubación para PPB y RC.

Paralelamente, se estimaron tasas de producción primaria neta (PPN) en la misma línea de incubación *in situ*, a partir de técnicas con $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$ (Slawyk y Raimbault 1995, Slawyk et al. 1998), para medir procesos asimilativos de carbono y nitrógeno, incluyendo producción primaria neta, producción nueva (i.e. aquella sostenida por el aporte de nitrato advectado hacia la zona fótica) y producción regenerada (i.e. la proporción de fijación de Carbono sustentada por la regeneración de amonio en la zona fótica). Cada uno de los términos de esta producción autotrófica es fundamental para la comprensión del funcionamiento trófico de los ecosistemas marinos.

El flujo vertical de material particulado fue estimado mediante trampas de sedimento cilíndricas pareadas de 122 cm^2 de área de colecta, y una razón alto:diámetro de 8,3. Las trampas fueron instaladas mensualmente en la Estación 18 mn, por períodos de entre 8 y 12 horas. En estas muestras se estimaron los flujos de seston, materia orgánica total y fracción litogénica. Además, se estimaron flujos de material biológico como microplancton (diatomeas, tintínidos, nauplii de crustáceos) y detritus (pellet fecales de zooplancton).

5.4.2. Métodos de medición y análisis

Las tasas de Producción Primaria Bruta (PPB) y tasas de Respiración Comunitaria (RC) fueron estimadas a través de la cantidad de oxígeno producida por fotosíntesis y la cantidad de oxígeno consumida por respiración, respectivamente. Se utilizó la técnica de las botellas claras y oscuras, con 5 réplicas para cada tiempo final y 5 réplicas para el tiempo inicial. Las concentraciones de oxígeno disuelto en las botellas se determinó

utilizando una versión semi-automática del método Winkler (Williams y Jenkinson 1982, Knap et al. 1993), basado en un detector fotométrico de punto final, un dispensador Dosimat Metrohom 665 de 5 ml de capacidad y un registrador Cole Parmer. Los valores de tasas de PP y RC integrados en la columna de agua se calcularon a partir de las diferencias de las concentraciones de oxígeno entre los distintos tratamientos:

Producción Primaria Bruta = $[O_2]$ botellas claras - $[O_2]$ botellas oscuras

Respiración Comunitaria: $[O_2]$ botellas tiempo cero - $[O_2]$ botellas oscuras

Los valores de Producción Primaria fueron convertidos a valores de producción de carbono utilizando un coeficiente fotosintético de 1,25 mientras que las tasas de utilización de oxígeno fueron convertidas a carbono orgánico utilizando un coeficiente de respiración de 1,0 (Daneri et al. 2000).

Las tasas de producción primaria neta fueron medidas utilizando el isótopo estable ^{13}C en su forma $NaH^{13}CO_3$. Esta técnica esta basada en la asimilación biológica de carbono marcado por organismos foto-autótrofos, y su posterior detección por medio de espectrometría de masas en el compartimiento orgánico particulado. En forma paralela, se utilizó la técnica de doble marcaje que permite medir en forma simultanea la asimilación de carbono y amonio por medio del uso de los isótopos estables ^{13}C y $^{15}NH_4$. Las tasas de asimilación de amonio, que permiten estimar la producción primaria regenerada, fueron medidas utilizando el isótopo estable ^{15}N en su forma $^{15}NH_4Cl$. Esta técnica está basada en la asimilación de amonio marcado ^{15}N y su posterior detección por medio de espectrometría de masas en el compartimiento orgánico particulado. La producción primaria nueva se estimó a partir de la tasa de asimilación de nitrato, utilizando el isótopo estable ^{15}N en su forma $Na^{15}NO_3$ (técnica descrita anteriormente). Para cada estimación se tomaron muestras de nutrientes (NH_4 , NO_2 , NO_3) representativas de las condiciones iniciales y finales.

El cálculo de asimilación de carbono ($mgC\ m^{-3}\ t^{-1}$) se obtuvo mediante la ecuación (Fernández et al. 2005):

$$\rho DI^{13}C = \left[\frac{(\%R_{POC} - 1.112) * \left(\frac{POC * 1000}{12 * V_f} \right)}{\%R_{DIC}} \right] * \frac{12}{1000}$$

donde V_f es el volumen filtrado, POC es la cantidad de carbono orgánico particulado recuperado y analizado por espectrometría de masa (μg), $\%R_{DIC}$ corresponde al exceso de enriquecimiento (^{13}C) después de la inoculación (tiempo T_0), y $\%R_{POC}$ es el enriquecimiento de ^{13}C en el filtro después de la incubación. Los flujos de asimilación de nitrógeno inorgánico (NH_4 o NO_3), expresados en $\text{nM/unidad de tiempo}$, fueron estimados mediante la ecuación (Dugdale y Wilkerson 1986):

$$\rho = \frac{R_{NOP}}{Ro_{NID} * T} * NOP$$

donde R_{NOP} es el exceso de ^{15}N en la fracción NOP después de la incubación, Ro_{NID} es el enriquecimiento en exceso en ^{15}N en tiempo T_0 , después de inoculación de trazador, NOP es la concentración de NOP (nM) al final del tiempo de incubación, y T es el tiempo de incubación en horas.

5.4. Objetivo específico 4.5: *Determinar la variabilidad superficial de las variables temperatura del mar, clorofila-a y anomalía del nivel del mar por medio de percepción remota. La frecuencia mínima de análisis debe ser al menos mensual. Y asociar estas variaciones espacio-temporales con la actividad pesquera.*

Los patrones de variabilidad en las condiciones de superficie en la región cubierta por el crucero de Enero 2009, y que incluye a las estaciones costeras de monitoreo mensual, fueron caracterizados a partir de imágenes satelitales de campos de viento, radiación PAR en superficie, temperatura superficial del mar (TSM), concentración superficial de clorofila-a, y anomalía del nivel del mar. La información sobre campos de viento fue

obtenida desde imágenes QuikSCAT de Nivel 3 con resolución temporal diaria y resolución espacial de ca. 28 km (ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/ocean_wind/quikscat/L3). Los campos de radiación PAR en superficie fueron obtenidos de la misión SeaWiFS, y correspondieron a imágenes semanales (promedios de 8 días) con una resolución espacial de 9 km (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS>). Las distribuciones de TSM y clorofila-a superficial provinieron de imágenes semanales (promedios de 8 días) de Nivel 3 del satélite MODIS-Aqua, con una resolución espacial de 4 km (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODISA>). Para el análisis de la anomalía del nivel del mar en la región se utilizaron imágenes semanales (promedios de 7 días) producidas a partir de información de múltiples satélites por Ssalto/Duacs, y distribuidas por Aviso (<http://www.aviso.oceanobs.com/duacs>), con una resolución espacial de ca. 37 km.

La evaluación de escalas temporales de variabilidad sobre toda la región de estudio estuvo basada en análisis de auto-correlación de las series de tiempo correspondientes a cada píxel en las imágenes promedio de TSM, clorofila-a superficial y anomalía del nivel del mar. Se utilizó un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ para determinar la escala temporal de decorrelación en cada serie de tiempo.

Considerando que en el área donde se ubica la Estación 18 se observan patrones de variabilidad que están claramente forzados por la surgencia, y que son típicos para una extensa zona sobre la plataforma continental de la región, desde las series de imágenes satelitales disponibles para el área se extrajo información sobre la variabilidad temporal con una resolución semanal para TSM, clorofila y ANM. De esta forma, se obtuvieron series de tiempo de TSM y clorofila que corresponden a promedios de datos MODIS para un área de 3x3 píxeles (12 km x 12 km) centrada en 36°30'S, 73°7.5'W. La serie de tiempo de ANM correspondió a valores registrados para un píxel de 1/3 de grado de resolución espacial (ca. 35 km), y centrado en 36°38.25'S, 73°00'W. Estas series de tiempo fueron utilizadas para calcular climatologías para el período 2002-2009, contra las que luego fueron comparadas las observaciones colectadas en el periodo 2008-2009.

Finalmente, las series de tiempo de TSM, clorofila y ANM fueron convertidas a series de promedios mensuales y se compararon mediante correlaciones cruzadas con las series de desembarques mensuales de sardina común y anchoveta, generadas a partir de datos proporcionados por SERNAPESCA para los puertos de la región del BioBio. En los

análisis de correlación cruzada se utilizó la serie de anomalías en los desembarques, las que fueron calculadas como desviaciones del promedio para cada mes calculado sobre los últimos 8 años.

A pesar de que los desembarques no constituyen un índice de abundancia sin tener información sobre el esfuerzo de pesca, estos datos son un indicador de la actividad pesquera y muestran un patrón estacional e interanual que podría tener relación con los cambios en las condiciones bio-oceanográficas en la región.

6. RESULTADOS

6.1. Objetivo específico 1. *Determinar la distribución espacial, a nivel de meso-escala (km), de las variables bio-oceanográficas temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa del fitoplancton y penetración de la luz, en la zona de estudio, durante el período de primavera, en la estructura vertical de 0 a 200 m de profundidad.*

6.2.1. Hidrografía

En la Figura 2 se muestra la posición del conjunto de estaciones de CTD-O realizadas durante el crucero FIP 2008-20 en Enero de 2009. La posición, fecha y profundidad de muestreo en cada estación se lista en la Tabla 4.

En general, las distribuciones horizontales y verticales de variables hidrográficas y del oxígeno disuelto reflejaron el efecto de la surgencia costera a lo largo de la región estudiada, presentando condiciones oceanográficas típicas de la época en que se realizó el crucero. La distribución horizontal de temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto y fluorescencia a 6 niveles de profundidad se muestra en las figuras 3, 4, 5, 6 y 7, respectivamente. La temperatura a 5 y 10 m de profundidad (Fig. 3a,b) presentó un marcado gradiente hacia fuera de la costa, con valores $<12^{\circ}\text{C}$ cerca de la costa y $>15^{\circ}\text{C}$ en la zona oceánica. La isoterma de 13°C demarca el borde externo de un frente térmico que se extiende hacia el norte, en una dirección paralela al quiebre de la plataforma

continental, desde las Puntas Lavapié y Tumbes (Fig. 3a,b). Consistentemente, las distribuciones de salinidad y densidad presentaron valores mayores (> 34.2 y >26) asociados a esta pluma (Fig. 4 y 5), mientras que el oxígeno presentó un mínimo (<4 mL L⁻¹) centrado en la misma posición (Fig. 6). En tanto, la distribución de fluorescencia indicó mayores concentraciones de pigmentos fotosintéticos en las capas superficiales y cerca de la costa al norte de Pta. Lavapié, y principalmente sobre la terraza del Itata al norte de Pta. Tumbes (Fig. 7a,b). La distribución superficial de estas variables es consistente con una intensificación de la surgencia costera en relación a los principales accidentes topográficos en la región, transportando a superficie aguas más frías, más densas y con menor contenido de oxígeno, mayoritariamente en las estaciones costeras hacia el norte de Punta Lavapié. Este rasgo ha sido observado comúnmente en los cruceros de monitoreo del programa FIP durante primavera y verano, y se refleja en la estructura promedio de TSM revelada por imágenes satelitales para la región (Fig. 1).

El efecto de la surgencia sobre la distribución horizontal de temperaturas se pudo detectar además en las distribuciones de profundidad de las isotermas de 12 y 11°C (Fig. 8), que se encontraban a profundidades menores o iguales a 20 m a lo largo de una banda costera desde Pta. Lavapié hacia el norte, con aguas de 12°C a menos de 10 m de profundidad alrededor de Pta. Nugurne (Fig. 8c). La profundidad de la capa de mezcla alcanzó valores menores a 15 m en toda la banda costera al norte de Pta. Lavapié, llegando a profundidades <10 m al interior del Golfo de Arauco (Fig. 9).

Las secciones hidrográficas verticales a lo largo de cada transecta mostraron con mayor claridad la presencia de aguas densas con bajo contenido de oxígeno cerca de la costa frente a Pta. Nugurne (transecta 2, Fig. 11) y frente a Bahía Coliumo (transecta 3, Fig. 12), donde se aprecia un núcleo de aguas con bajas concentraciones entre profundidades de 100 y 400 m, y una elevación de las isolíneas de bajo contenido de oxígeno disuelto (< 4 mL/L) hacia la costa. Este núcleo de aguas de alta salinidad, detectado con mayor claridad frente a la transecta 3, presenta características típicas del Agua Ecuatorial Sub-Superficial (AESS), como lo indican los diagramas T-S confeccionados a partir de los perfiles hidrográficos en cada transecta (Fig. 15). La profundidad de la isopicna de 26.5 (σ_t), que comúnmente se asocia al núcleo de esta masa de agua, presentó un claro patrón de disminución entre el quiebre de la plataforma y

la línea de costa, llegando a menos de 50 m de la superficie frente a la Bahía de Coliumo (Fig. 16). La presencia de AESS al norte de los 37°S y entre profundidades de 100 y 400 m quedó en evidencia al confeccionar secciones hidrográficas longitudinales utilizando estaciones oceánicas de cada transecta (Fig. 17).

Las alturas dinámicas, referidas a 500 m de profundidad, mostraron una significativa disminución hacia la costa (Fig. 18) y sugieren un flujo geostrófico en superficie hacia el norte, el cual es característico del periodo de primavera y verano observado en previos cruceros en la región. La presencia de este flujo hacia el norte es además consistente con la distribución de salinidad y otras variables oceanográficas en superficie. Al norte de 36°30'S el contorno de 7.2 cm-dinámicos se aleja de la costa, sugiriendo que parte del flujo costero se extiende hacia el oeste, formando un pequeño giro. Este rasgo es consistente con observaciones satelitales de nivel del mar (ver abajo) y constituye un rasgo típico durante la estación de surgencia en la región (e.g. Letelier et al. 2009).

6.2.2. Imágenes TSM y clorofila superficial

Las imágenes de concentración de clorofila-a y temperatura superficial del mar registradas para la región (33-39°S y 71-77°W) durante el crucero muestran la presencia persistente de aguas más frías y altas concentraciones de clorofila en la zona costera, particularmente en el área cubierta por el muestreo y en asociación con los principales accidentes topográficos desde Pta. Lavapié hacia el norte (Fig. 19-22). Durante todo el crucero se observaron proyecciones de estructuras tipo filamentos y meandros hacia el océano, principalmente entre los 35°S y 37°S. En torno a los 36°S, las aguas frías de superficie se proyectaron hasta los 75°W y mantuvieron una estructura similar durante todo el crucero (Fig. 19-22).

Tabla 4. Resumen de estaciones de CTD realizadas durante el crucero FIP 2008-20, Enero 2009.

Número Estación	Número Lance	Fecha	Hora	Z sonda (m)	Z CTD (m)	LATITUD		LONGITUD	
						Grados	Minutos	Grados	Minutos
1	1	6/1/09	18:11	40	35	35	29	72	39
1	2	6/1/09	19:10	40	35	35	29	72	39
1	3	6/1/09	19:27	40	35	35	29	72	39
2	4	6/1/09	20:35	56	45	35	29	72	45
4	5	7/1/09	1:20	420	400	35	29	73	3
5	6	7/1/09	4:18	280	250	35	30	73	9
6	7	7/1/09	6:00	830	600	35	30	73	20
8	8	7/1/09	11:30	4700	600	35	30	74	3
8	9	7/1/09	13:00	4700	60	35	30	74	3
9	10	7/1/09	15:50	4500	500	35	30	74	33
17	11	7/1/09	23:18	4800	500	35	59	74	19
27	12	8/1/09	11:40	38	30	37	0	73	13
28	13	8/1/09	13:10	60	50	36	59	73	17
29	14	8/1/09	14:45	70	60	37	0	73	25
19	15	8/1/09	21:30	57	50	36	30	73	1.2
20	16	8/1/09	23:35	90	80	36	30	73	7.2
20	17	9/1/09	0:30	90	30	36	30	73	7.2
21	18	9/1/09	2:35	110	100	36	29	73	20
22	19	9/1/09	4:10	140	120	36	29	73	32
23	20	9/1/09	6:40	560	500	36	30	73	42
24	21	9/1/09	9:30	2800	600	36	29	73	56
24	22	9/1/09	10:50	2800	30	36	29	73	56
25	23	9/1/09	14:20	3500	550	36	29	74	28
26	24	9/1/09	18:05	4000	600	36	30	74	59
18	25	9/1/09	22:00	4200	600	35	59	74	50
18	26	9/1/09	23:00	4200	30	35	59	74	50
17	27	10/1/09	2:00	4800	600	35	59	74	19
16	28	10/1/09	5:30	875	600	35	59	73	50
15	29	10/1/09	8:05	900	600	36	0	73	37
14	30	10/1/09	10:40	205	180	35	59	73	24
13	31	10/1/09	12:00	389	350	36	0	73	12
12	32	10/1/09	15:00	330	300	36	0	73	0
11	33	10/1/09	16:00	160	150	36	0	72	53
11	34	10/1/09	17:45	160	30	36	0	72	53
10	35	10/1/09	19:00	67	40	36	0	72	49
30	36	11/1/09	3:30	55	45	36	59	73	36
31	37	11/1/09	5:40	547	500	36	59	73	50
32	38	11/1/09	7:30	1000	600	36	59	74	1
32	39	11/1/09	9:10	1000	30	36	59	74	1
33	40	11/1/09	11:40	2800	600	36	59	74	13
42	41	11/1/09	18:25	4000	600	37	29	74	38
34	42	12/1/09	2:20	3700	600	37	0	74	43
35	43	12/1/09	5:40	4230	600	37	0	75	13
41	44	12/1/09	11:20	1600	600	37	29	74	27
40	45	12/1/09	13:30	2000	600	37	30	74	14
39	46	12/1/09	15:30	1370	600	37	30	74	0
39	47	12/1/09	16:55	1370	30	37	30	74	0
43	48	12/1/09	18:06	536	500	37	29	73	54
38	49	12/1/09	20:00	230	200	37	29	73	48
37	50	12/1/09	21:40	80	70	37	30	73	42

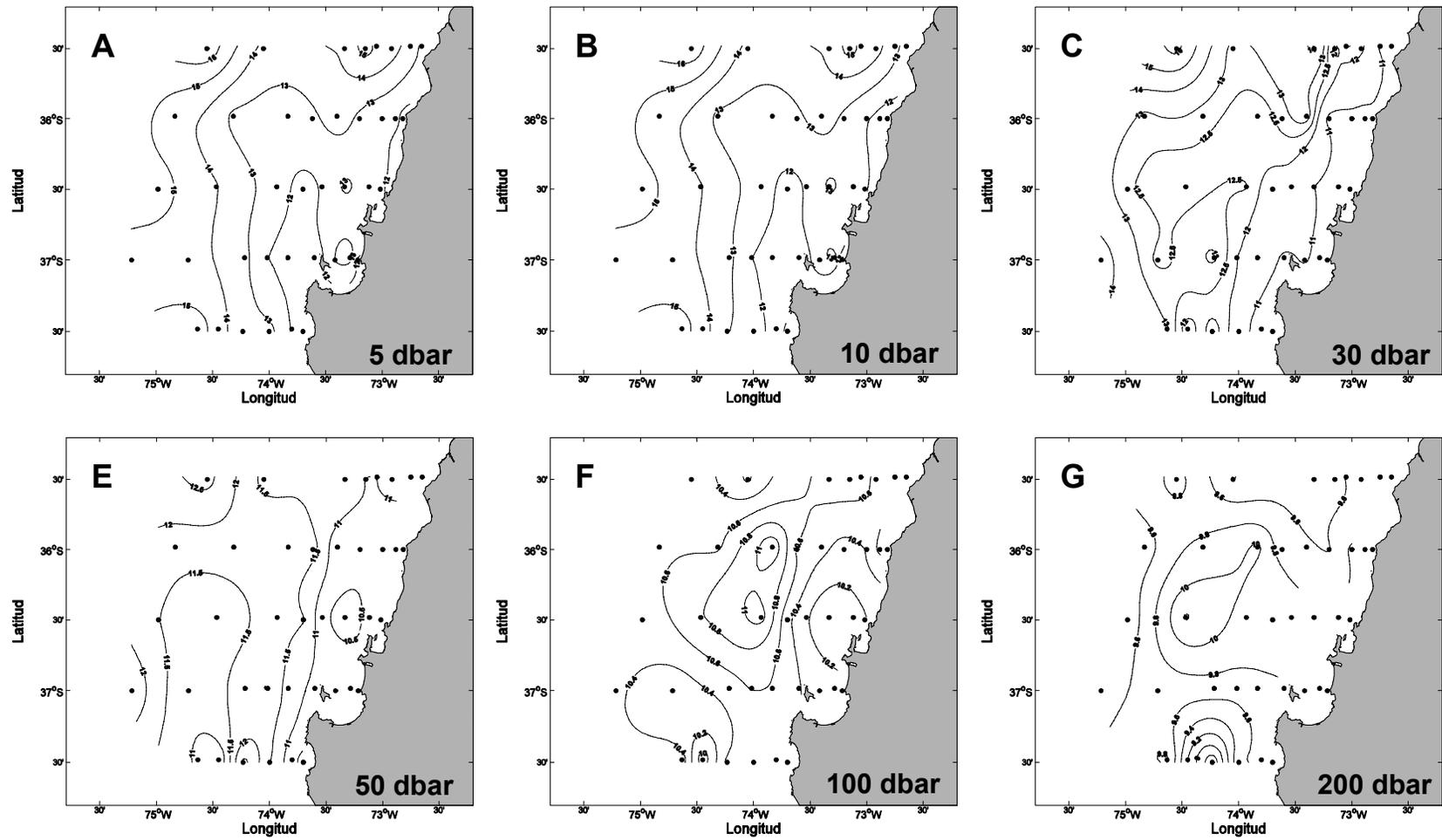


Figura 3. Distribución horizontal de temperatura (°C) a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.

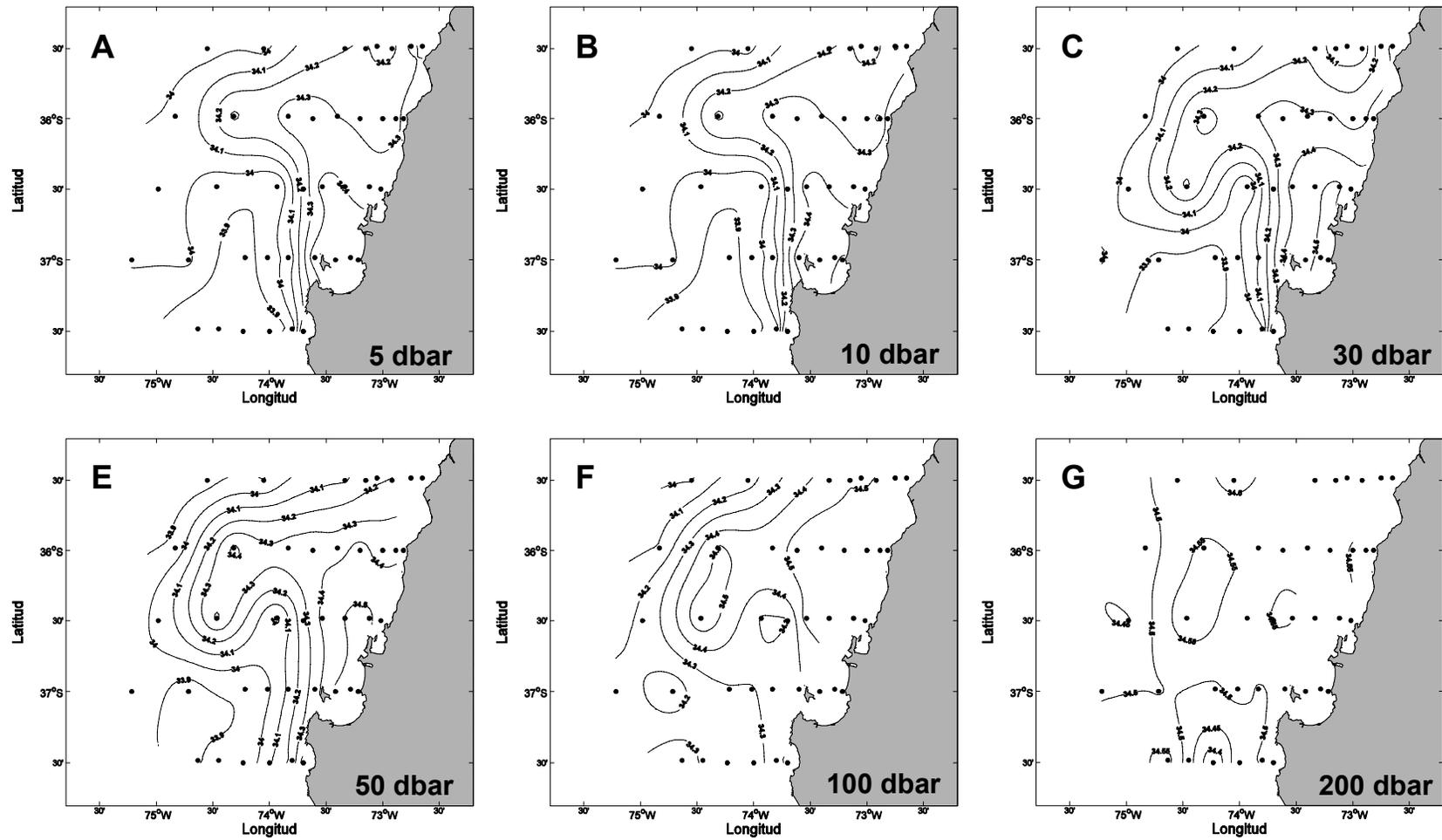


Figura 4. Distribución horizontal de **salinidad (psu)** a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.

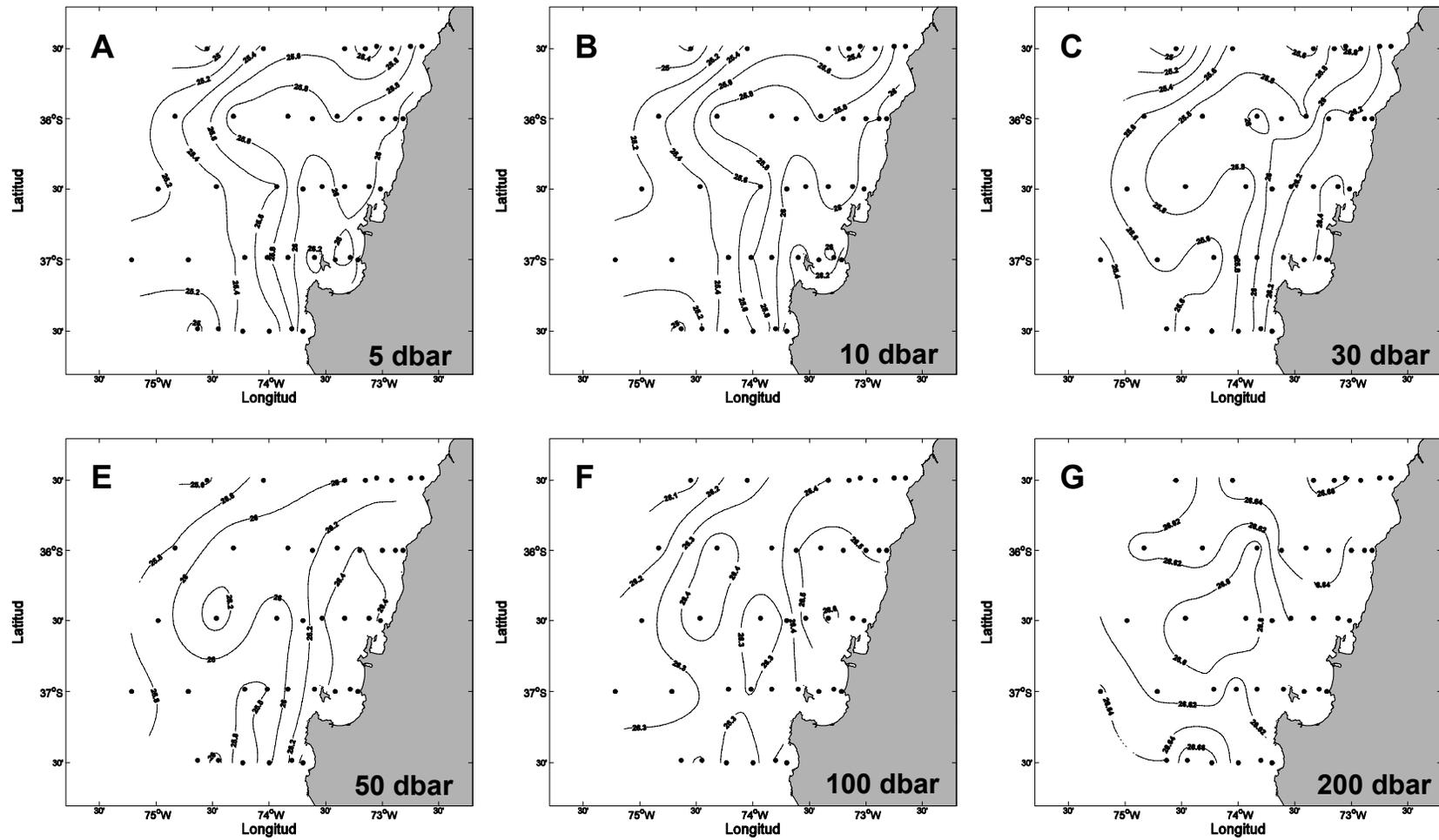


Figura 5. Distribución horizontal de densidad (kg m^{-3}) a distintas profundidades durante el crucero FIP 2002-20 de Enero 2009.

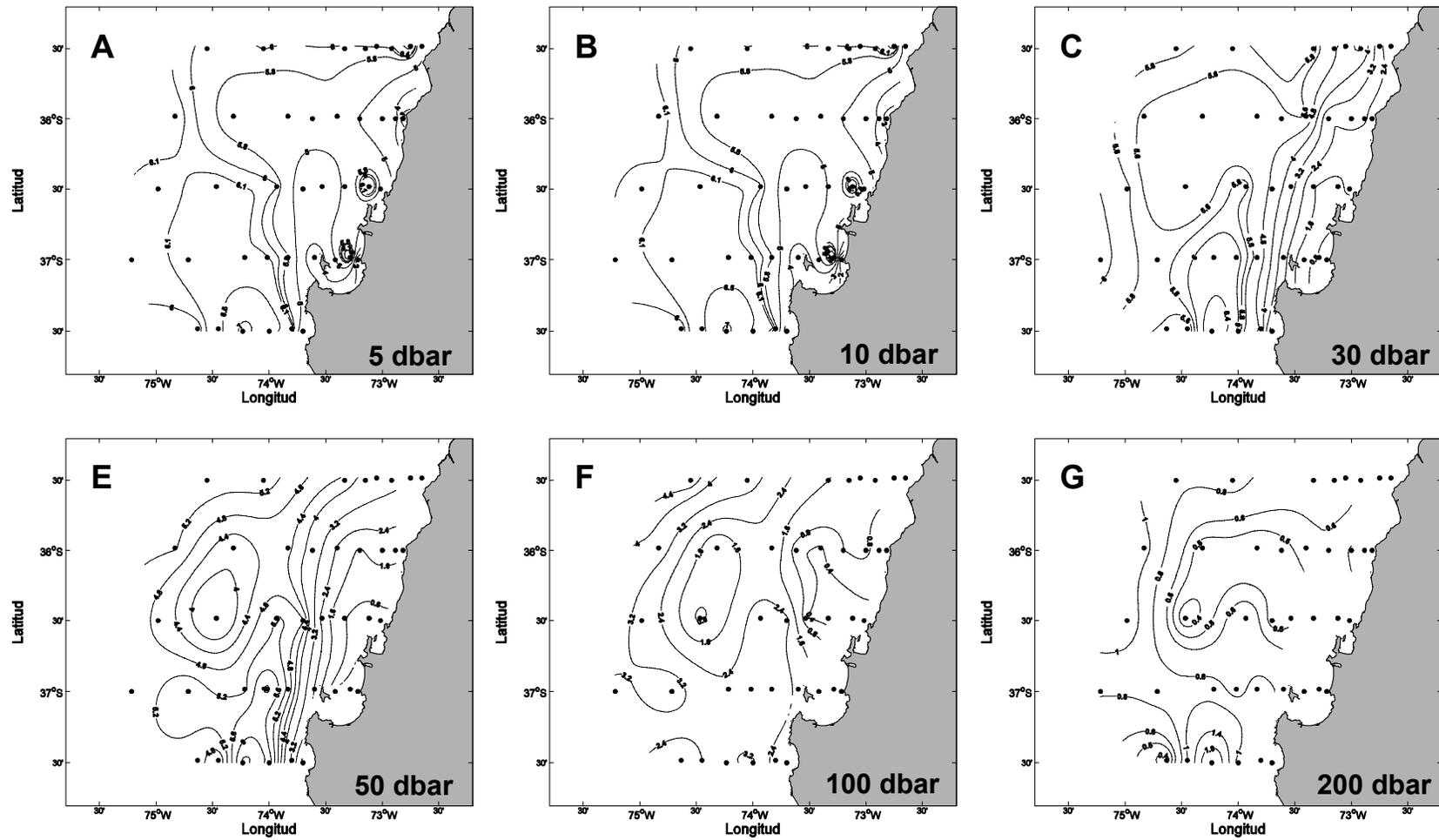


Figura 6. Distribución horizontal de oxígeno disuelto (mL L^{-1}) a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.

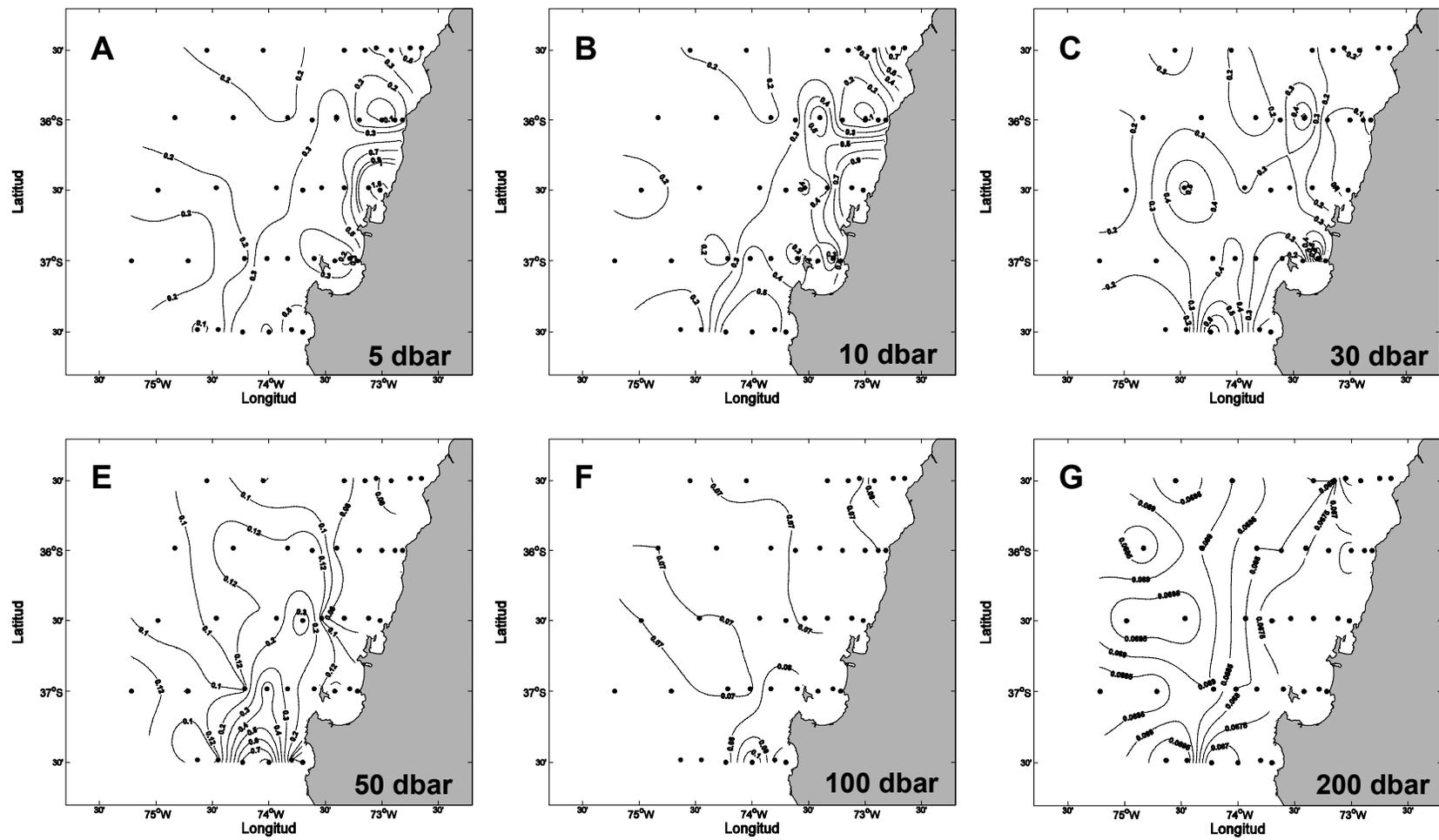


Figura 7. Distribución horizontal de **fluorescencia (volts)** a distintas profundidades durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.

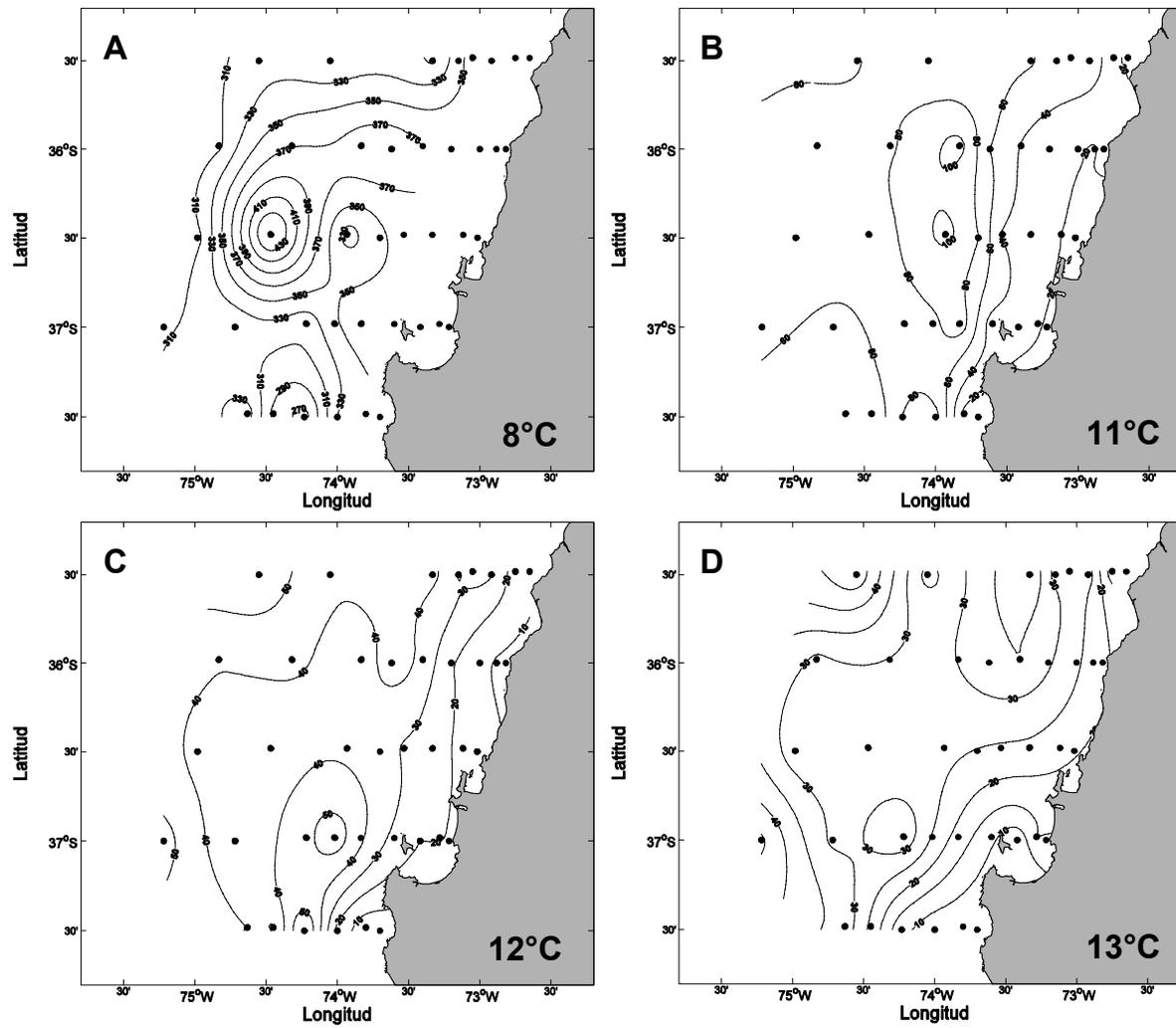


Figura 8. Distribución horizontal de la profundidad de las isotermas de 8°C, 11°C, 12°C y 13°C durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009.

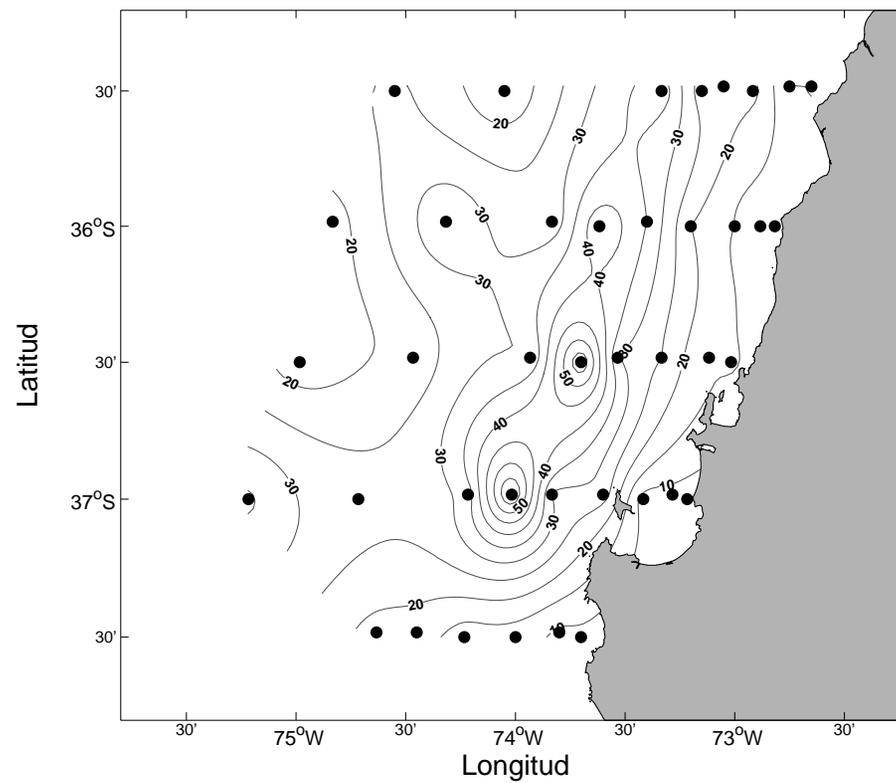


Figura 9. Distribución de la profundidad de la capa de mezcla durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009). La profundidad de la capa de mezcla se estimó aplicando el criterio del gradiente de temperatura. La diferencia de temperatura y profundidad de referencia utilizada fue de 0.2°C y 5 metros, respectivamente.

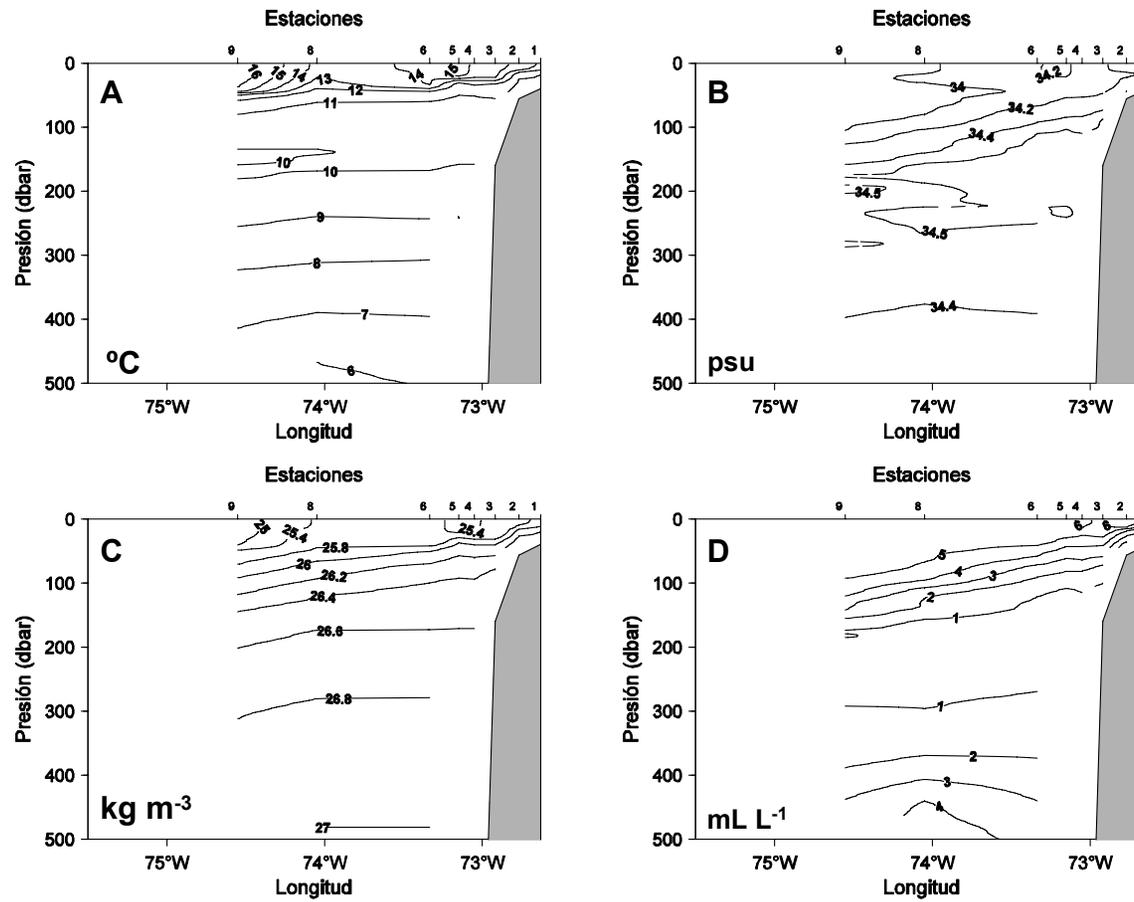


Figura 10. Distribución vertical de (A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m^{-3}) y (D) oxígeno disuelto (mL L^{-1}) a lo largo de la transecta 1 ($35^{\circ}30' \text{ S}$), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

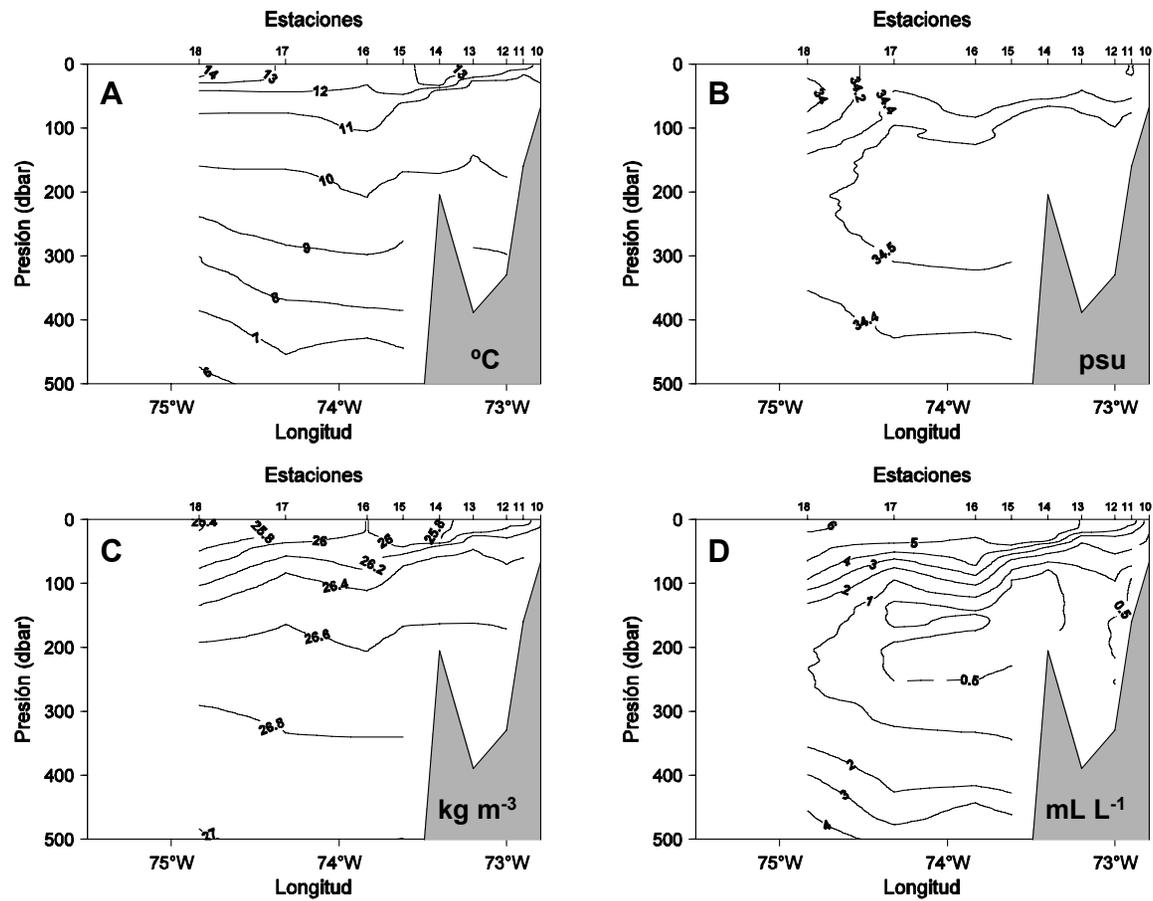


Figura 11. Distribución vertical de (A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m^{-3}) y (D) oxígeno disuelto (mL L^{-1}) a lo largo de la **transecta 2** ($36^{\circ}00' \text{ S}$), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

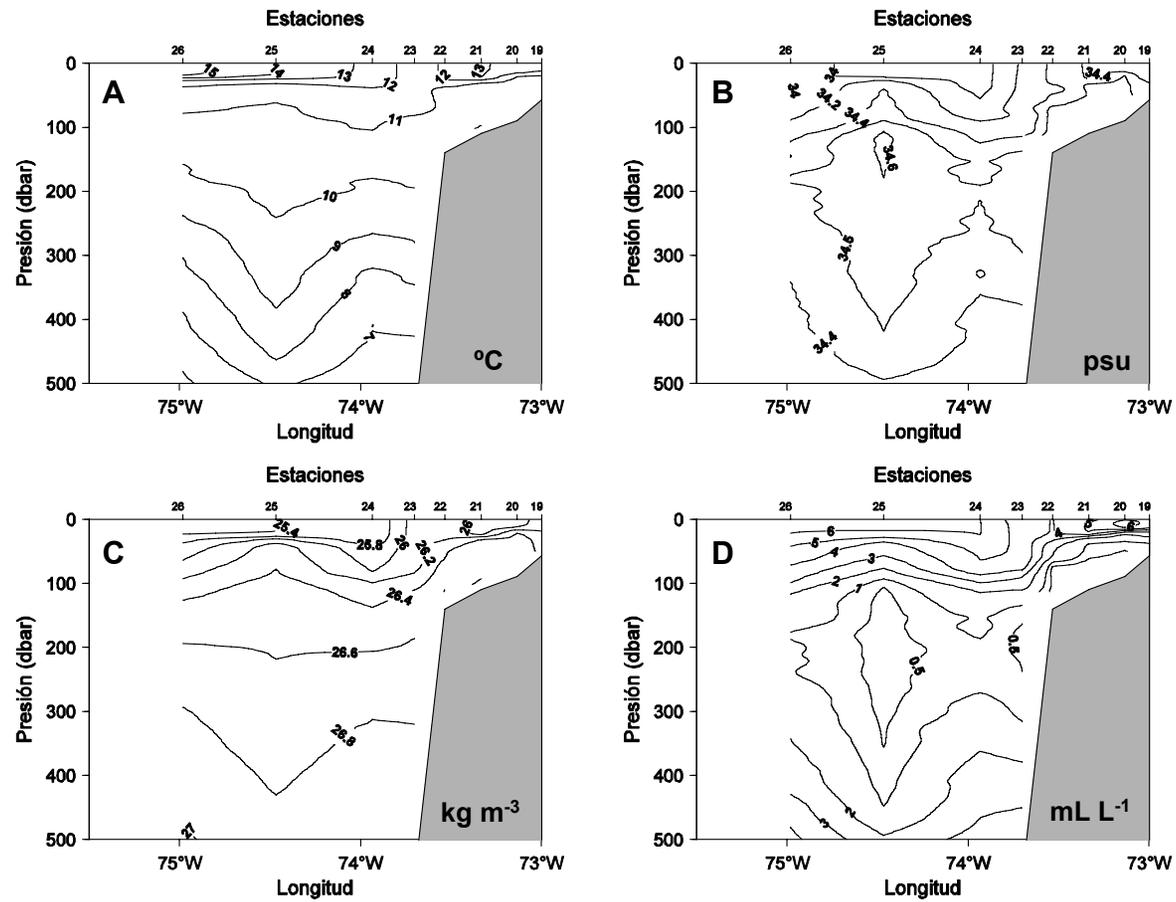


Figura 12. Distribución vertical de (A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m^{-3}) y (D) oxígeno disuelto (mL L^{-1}) a lo largo de la transecta 3 ($36^{\circ}30' \text{ S}$), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

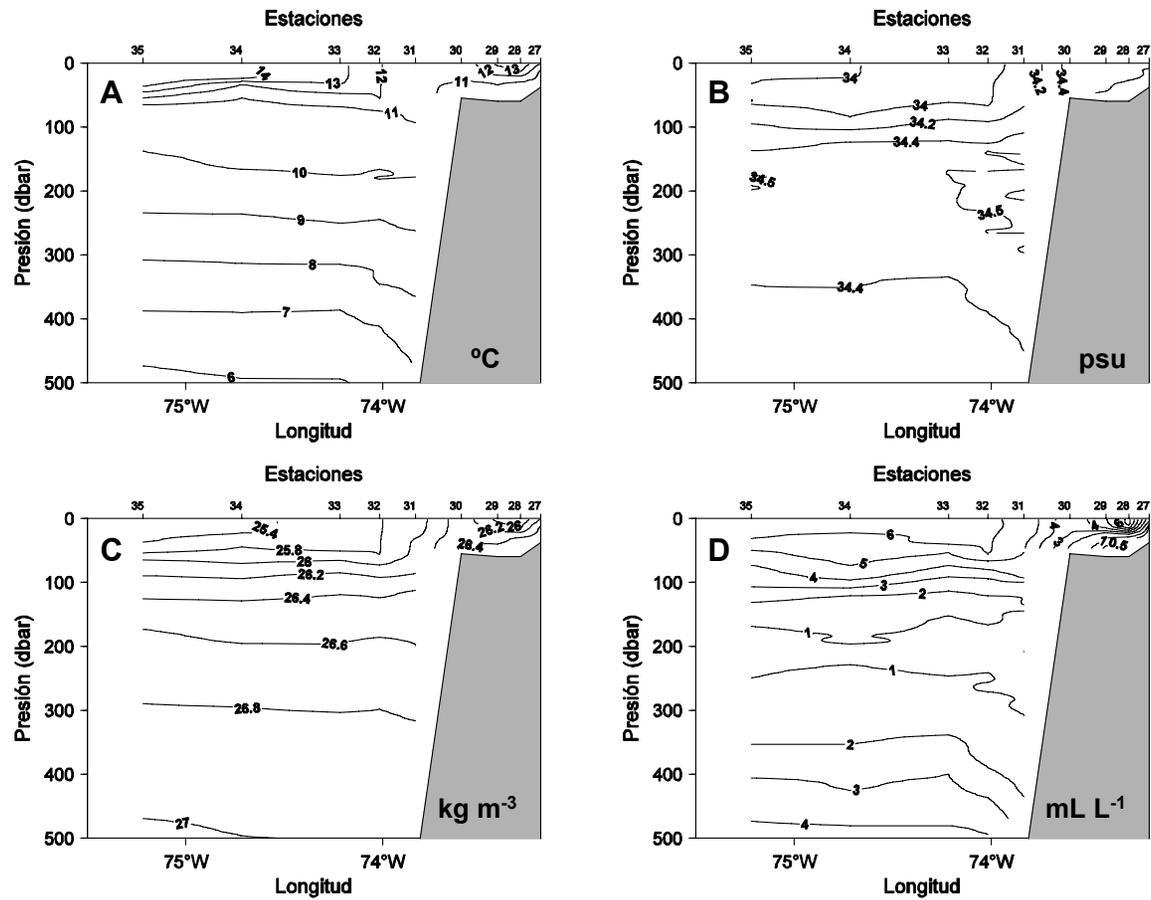


Figura 13. Distribución vertical de (A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m^{-3}) y (D) oxígeno disuelto (mL L^{-1}) a lo largo de la transecta 4 ($37^{\circ}00' \text{ S}$), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

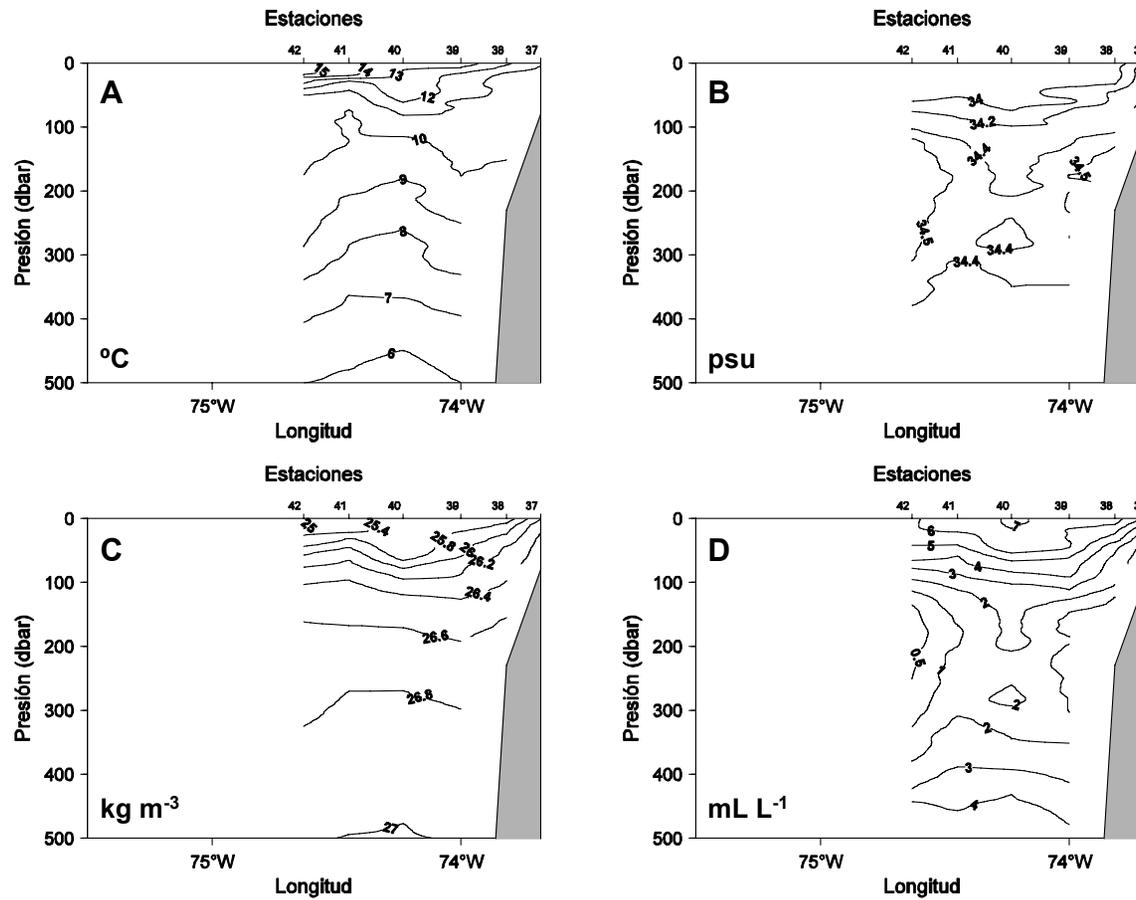


Figura 14. Distribución vertical de (A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) salinidad (psu), (C) densidad (kg m^{-3}) y (D) oxígeno disuelto (mL L^{-1}) a lo largo de la transecta 5 ($37^{\circ}30' \text{ S}$), crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

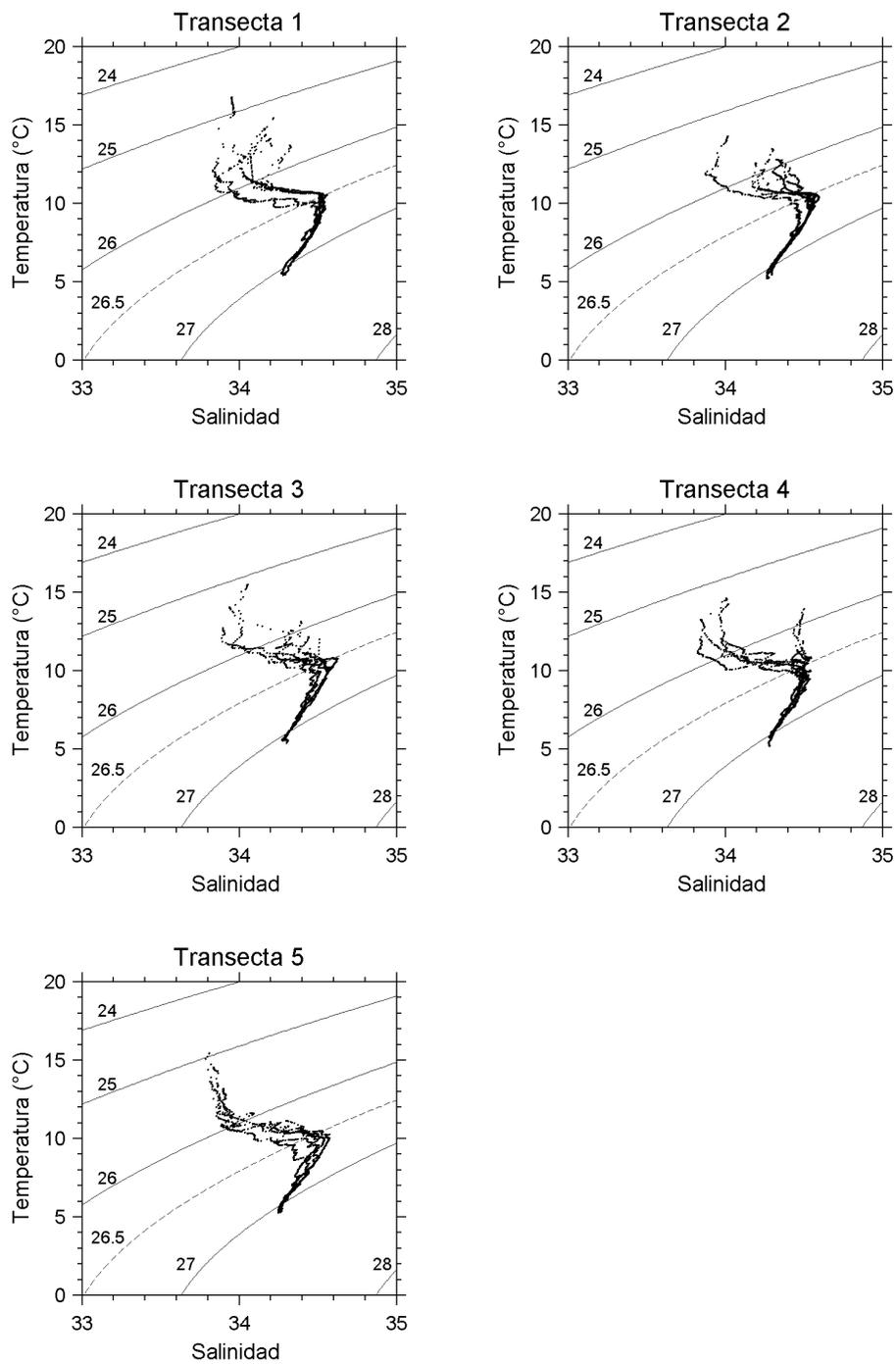


Figura 15. Diagramas T-S para las distintas transectas realizadas durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009). Las líneas curvas al interior de cada diagrama representan líneas de igual densidad (sigma-t).

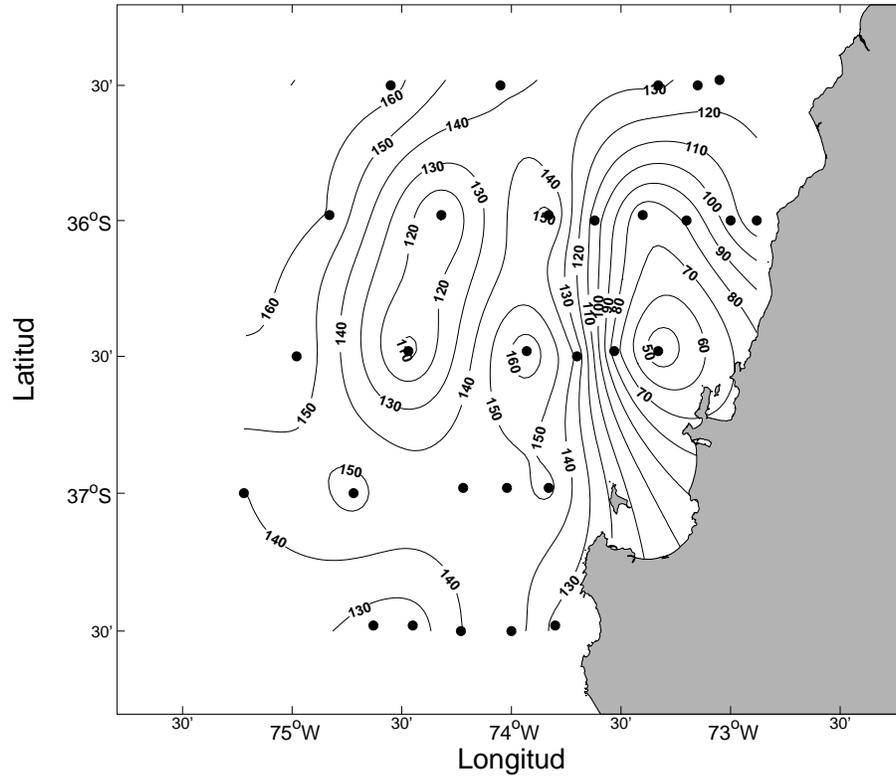


Figura 16. Profundidad de la isopieca de 26.5 ($1026,5 \text{ kg m}^{-3}$) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009). Esta isopieca representa el núcleo del Agua Ecuatorial Sub-Superficial (AESS) en la región.

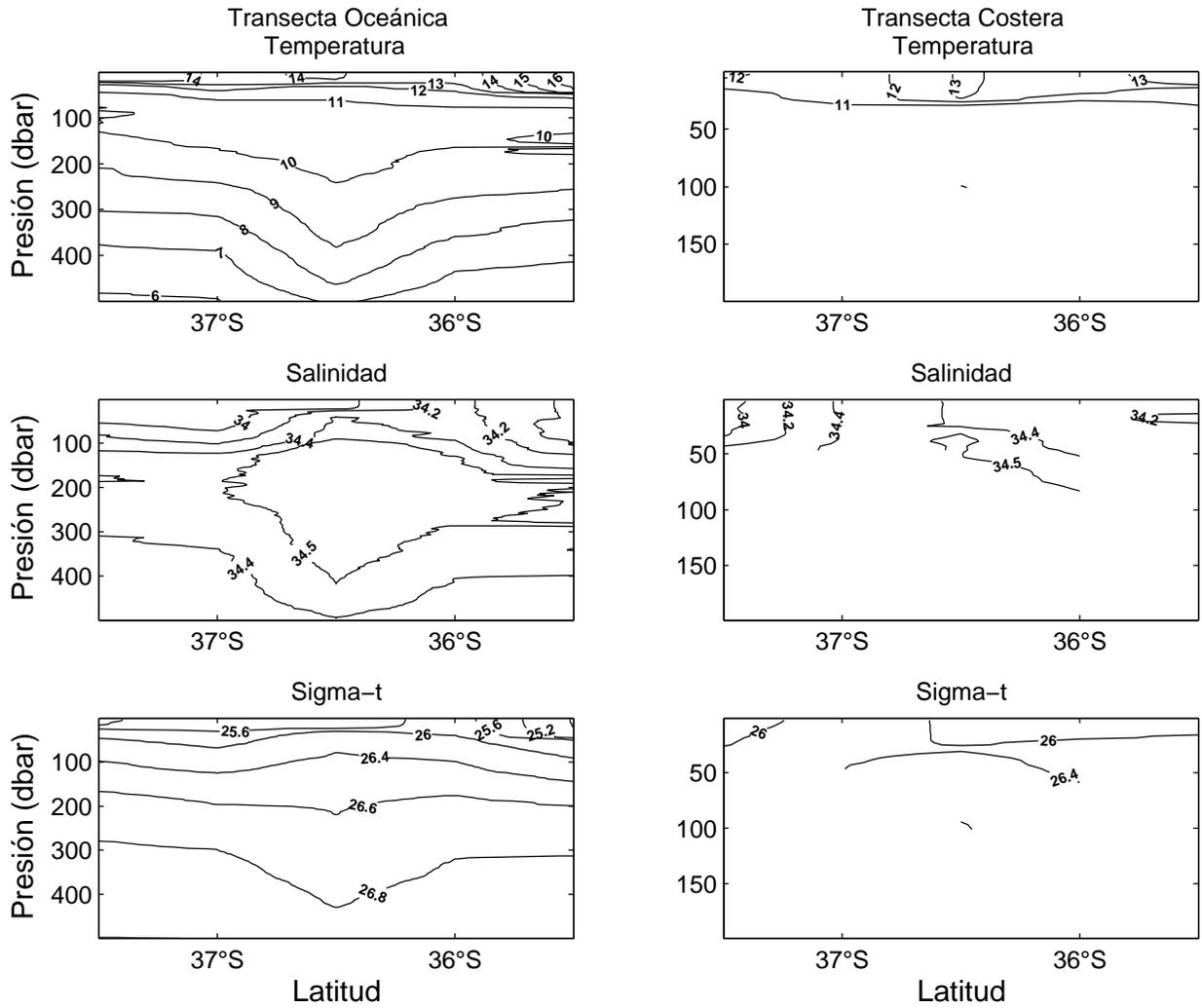


Figura 17. Perfiles longitudinales de temperatura (°C), salinidad (psu) y densidad (kg/m³), a lo largo de estaciones oceánicas (74° 30'S) y costeras. Crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

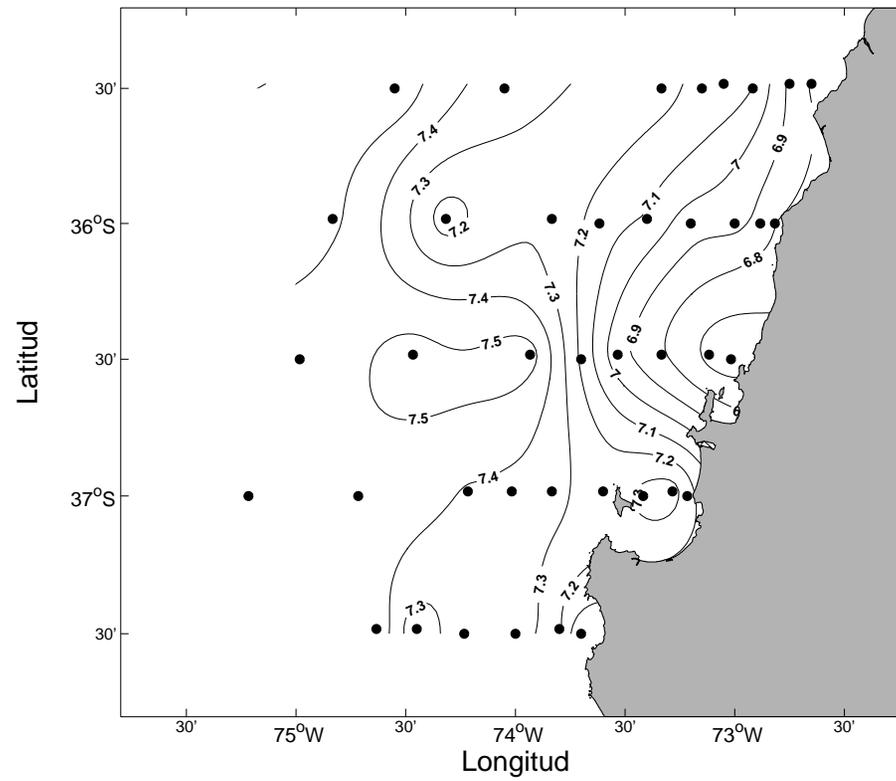


Figura 18. Distribución horizontal de alturas dinámicas (cm dinámicos) durante el crucero FIP 2008-20 referidas a 500 m de profundidad.

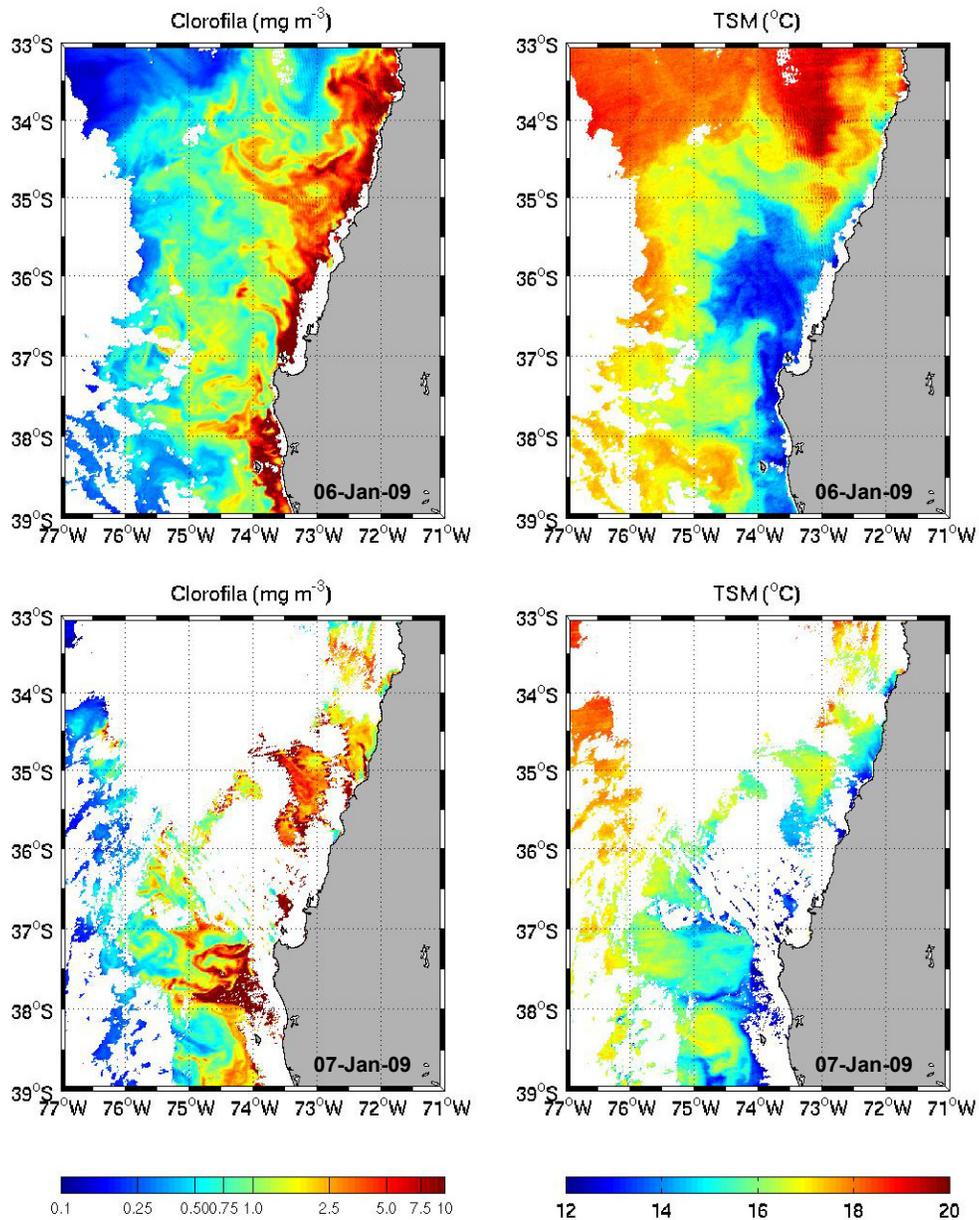


Figura 19. Imágenes satelitales de Clorofila-a (mg m^{-3} , paneles de la izquierda) y Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$, paneles de la derecha) en la costa de Chile centro-sur durante los dos primeros días (6-7 Enero, 2009) del crucero FIP 2008-20.

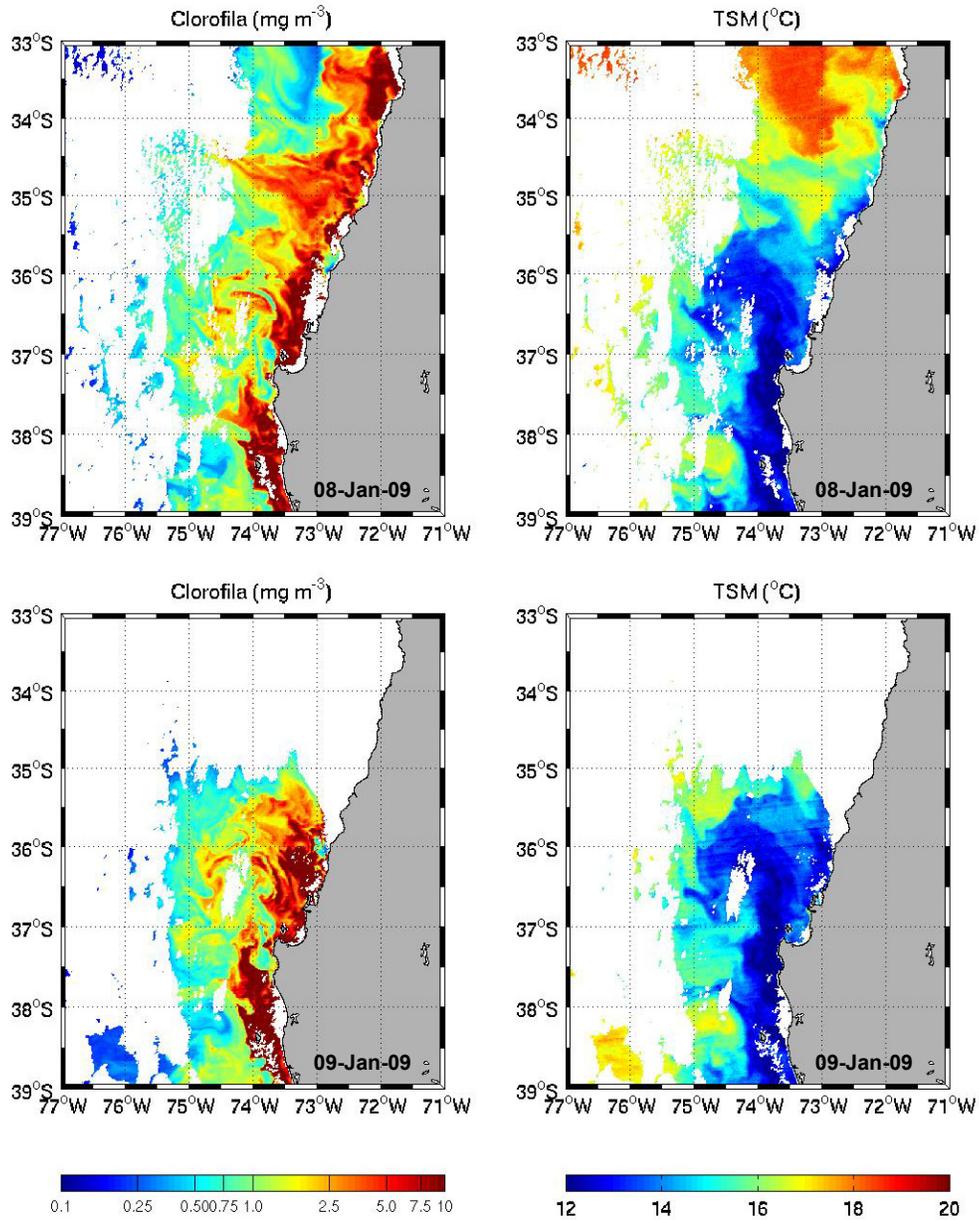


Figura 20. Imágenes satelitales de Clorofila-a (mg m^{-3} , paneles de la izquierda) y Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$, paneles de la derecha) en la costa de Chile centro-sur durante el tercer y cuarto día (8-9 Enero, 2009) del crucero FIP 2008-20.

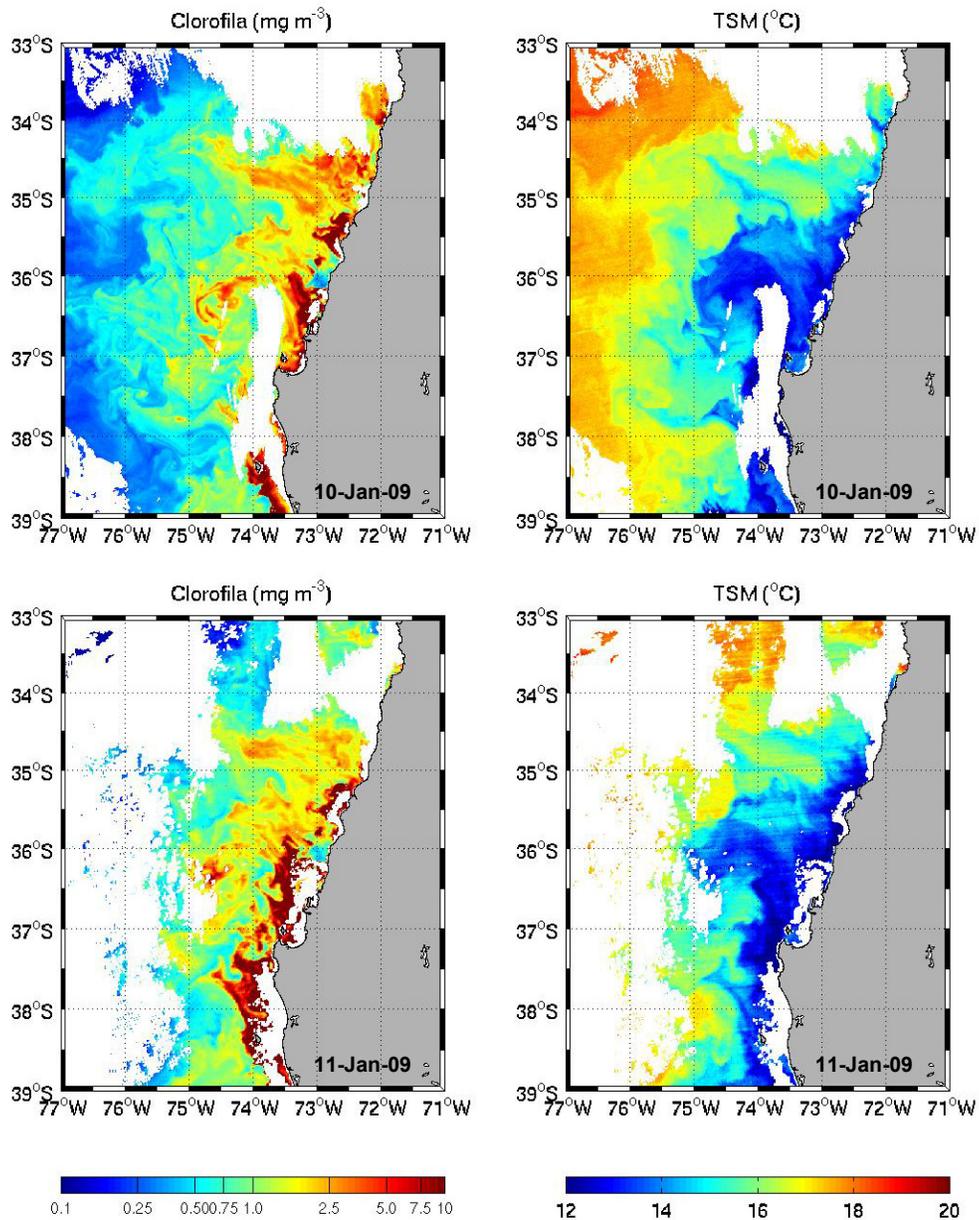


Figura 21. Imágenes satelitales de Clorofila-a (mg m^{-3} , paneles de la izquierda) y Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$, paneles de la derecha) en la costa de Chile centro-sur durante el quinto y sexto día (10-11 Enero, 2009) del crucero FIP 2008-20.

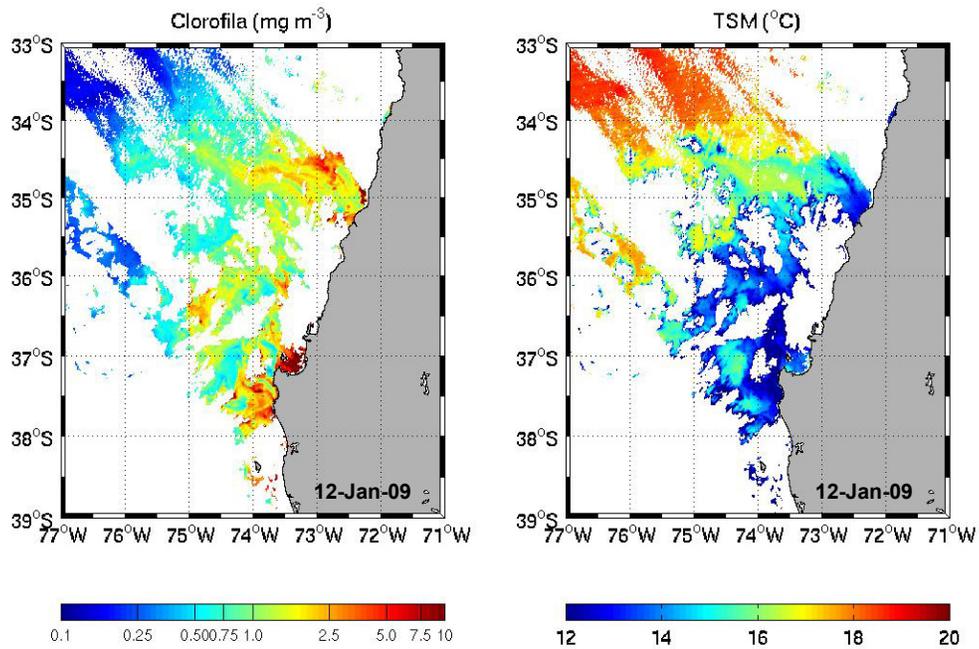


Figura 22. Imágenes satelitales de Clorofila-a (mg m^{-3} , panel izquierdo) y Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$, panel derecho) en la costa de Chile centro-sur durante el séptimo día (12 Enero, 2009) del crucero FIP 2008-20.

6.2.3. Vientos superficiales y transporte de Ekman

Los campos de viento superficial obtenidos de QuikSCAT para el período del 4 al 14 de Enero de 2009, mostraron un patrón persistente de vientos del S-SW que se intensifican cerca de la costa y al norte de Pta. Lavapié, alcanzando velocidades de hasta 15 m s^{-1} (Fig. 23). Como resultado de este patrón de vientos, los cálculos de transporte de Ekman en 3 puntos a lo largo de la costa señalaron valores positivos durante todo el período comprendido por el crucero, y prácticamente durante los primeros 20 días de Enero 2009 en toda la región (Fig. 24). Se detectó un incremento sostenido en el transporte de Ekman entre el comienzo y el penúltimo día del crucero, seguido de una breve relajación que se acentuó en el extremo sur de la región de estudio. En general, la intensificación y debilitamiento de los vientos meridionales – y los cambios correspondientes en el transporte de Ekman – se alternaron sobre escalas de tiempo de 5 a 6 días (Fig. 24).

6.2.4. Nivel del mar y topografía dinámica

Las anomalías del nivel del mar durante el crucero (Fig. 25a,b) mostraron una estructura espacial que concuerda con los patrones observados en las imágenes satelitales de TSM y clorofila, y con lo indicado por la data atmosférica e hidrográfica en cuanto al período de surgencia activa en que se realizaron las observaciones. La franja costera de anomalías negativas – con valores de hasta -5 cm al oeste y norte de Pta. Lavapié – persistió en la región durante toda la duración del crucero (Fig. 25a,b). Se observó además una estructura persistente en la topografía dinámica (Fig. 25c,d), que concuerda con las alturas dinámicas calculadas a partir de la data hidrográfica (Fig. 18) y que sugiere la existencia de un flujo costero de tipo geostrófico desde Pta. Lavapié y en dirección norte. Este flujo incrementaría el área de la plataforma continental sobre la cual se percibe la influencia físico-química de la surgencia en Pta. Lavapié y otras localidades de la región de estudio.

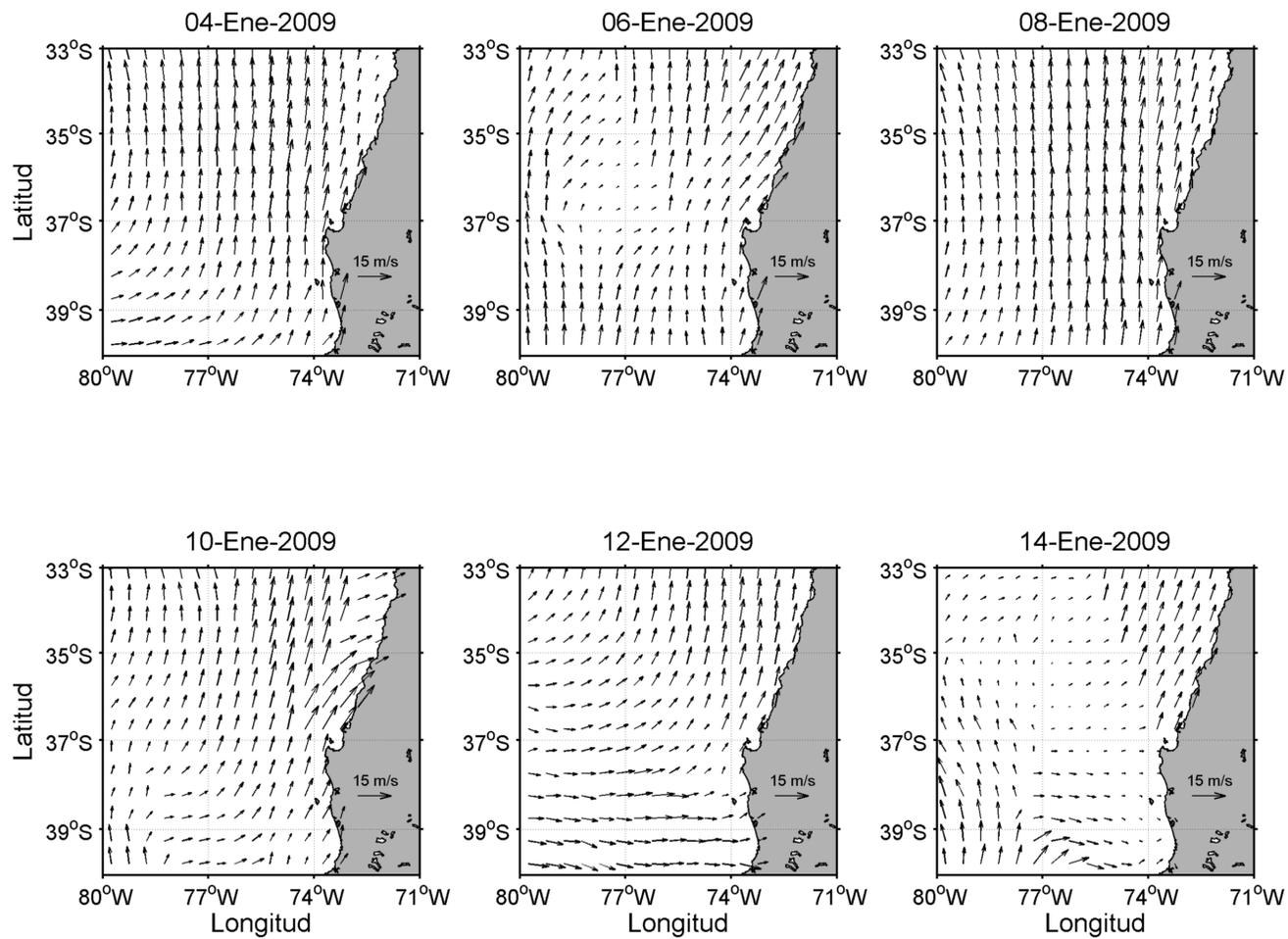


Figura 23. Campo vectorial del viento superficial derivado del satélite QuikSCAT para el período del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

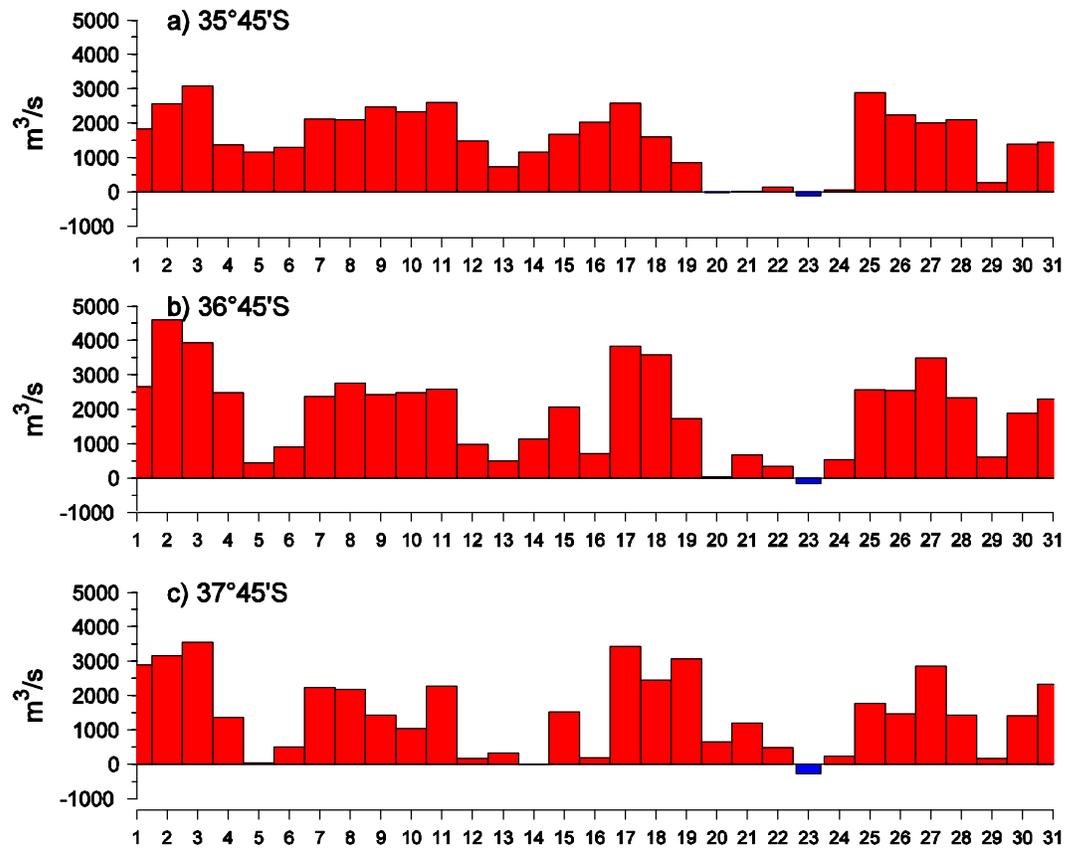


Figura 24. Transporte de Ekman ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ por 1000 m de costa) calculado para Enero 2009 desde series diarias de viento satelital QuikSCAT para cinco posiciones cercanas a la costa, centradas a $35^\circ 45'S$, $36^\circ 45'S$, $37^\circ 45'S$.

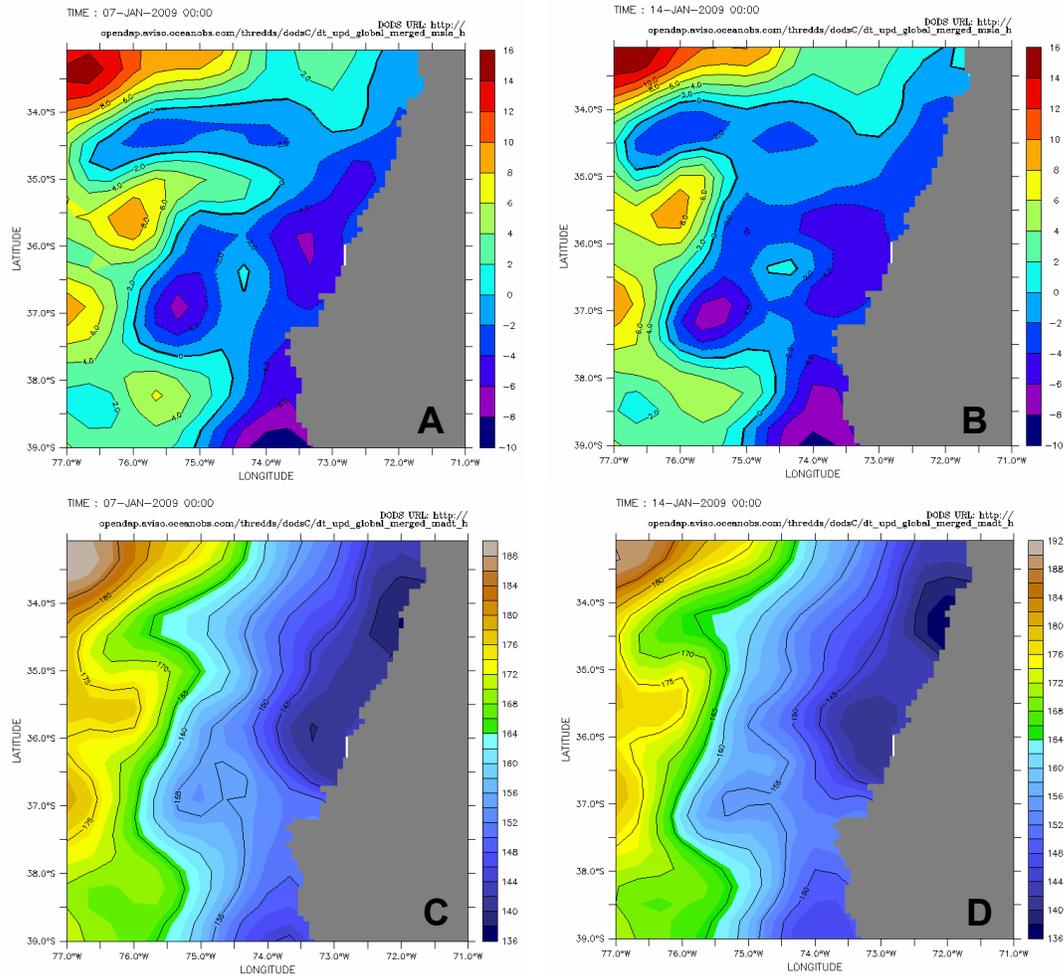


Figura 25. (A, B) Anomalías del nivel del mar (cm) y (C, D) topografía dinámica (cm) en la región de estudio durante el crucero FIP 2008-20. Las imágenes corresponden al 7 de Enero de 2009 (A, C) y 14 de Enero de 2009 (B, D), y provienen del procesamiento y combinación de datos de varios satélites realizado por Ssalto/Duacs y distribuidos por Aviso (<http://www.aviso.oceanobs.com/duacs/>).

6.2.5. Distribución de nutrientes

Las concentraciones superficiales de los principales nutrientes inorgánicos variaron entre 5 y 27 μM para nitrato, 0.01 y 1 μM para nitrito, 0.1 y 3 μM para fosfato y 0.4 y 18 μM para silicato (Fig. 26). Dichas concentraciones corresponden a valores típicamente encontrados en esta zona durante periodos de surgencia activa, particularmente en meses de verano. Las distribuciones espaciales de estos tres nutrientes en superficie fueron consistentes entre sí (Fig. 26), y se condicen con los patrones hidrográficos y atmosféricos ya descritos para el período de observación. En efecto, las más altas concentraciones superficiales de los tres nutrientes se encontraron sobre una banda que se proyecta hacia el norte desde Pta. Lavapié, tal como se observó en las distribuciones de temperatura, densidad y oxígeno disuelto (Fig. 3, 5, 6), y en las estaciones costeras frente a Pta. Nugurne (Fig. 26). Esta consistencia en los patrones espaciales sugiere un escenario de surgencia intensa y persistente, con aguas de superficie recientemente afloradas, y con propiedades físico-químicas aún no alteradas en forma sustancial por consumo biológico en la capas superficiales ligado a productores primarios. La distribución de nutrientes sugiere además un patrón de advección hacia el N-NW de Pta. Lavapié.

En general, los perfiles de nitrato, fosfato y silicato mostraron un aumento en función de la profundidad para todas las transectas (Fig. 27-28). Las menores concentraciones de estos nutrientes en superficie fueron observadas en las estaciones más alejadas de la costa, mientras que en la zona costera la distribución de nutrientes reflejó el transporte de aguas sub-superficiales con altos niveles de nutrientes hacia la superficie, indicando una mayor velocidad de aporte de nutrientes por advección vertical, que la tasa a la cual pueden ser consumidos por el fitoplancton. Las concentraciones de nitrito muestran una variación latitudinal marcada, contrapuesta a la tendencia observada para los nitratos. En la primera transecta se observan concentraciones cercanas a 0 en la zona central y superiores a 0.2 μM en la zona costera y en las estaciones más alejadas de la costa, ambas zonas de alto consumo de nitrato. La misma tendencia se acentúa en las transectas 2 y 3 con concentraciones de nitrito que superan los 0.4 μM en los primeros 50 m de la columna de agua en las estaciones 10 y 16 (Fig. 27). Altas concentraciones se

observaron además en la transecta 4, marcada por la influencia del golfo de Arauco donde el grosor de la capa de mezcla alcanza sólo 10 m (Fig. 27). En dicha transecta el consumo de nitrato es significativo, registrándose valores inferiores al resto de las transectas en superficie. Asimismo, altas concentraciones de silicatos reflejan intensa actividad fitoplanctónica en el área (Fig. 28).

En conjunto, las secciones verticales de nitratos, nitritos, fosfatos y silicatos a lo largo de las transectas permitieron además visualizar la escala – en los ejes vertical y zonal – y marca espacial de la surgencia costera sobre la distribución de propiedades físico-químicas en la región de estudio. Por ejemplo, existe una diferencia marcada en la estructura vertical de nitratos y nitritos al sur y al norte de Pta. Lavapié (i.e. Transecta 5 vs. T4-T1), que dice relación con cambios notorios en la topografía costera y batimetría de la plataforma continental en el área de estudio. El filamento con altas concentraciones superficiales de nitrato (ca. 20 μM) que se proyecta desde Pta. Lavapié hacia el norte (Fig. 26) es claramente visible en la transecta 4 como un núcleo ubicado sobre el quiebre de la plataforma continental, en el lado oeste de la Isla Santa María (estación 30), y que llega a profundidades de 100-150 m (Fig. 27). Este núcleo de altas concentraciones de nitrato se proyecta hacia el N-NW y es visible además en las transectas 2 y 3, mientras que al mismo tiempo se observan concentraciones relativamente altas de nitrato sobre toda la plataforma continental (Fig. 27).

Las secciones verticales de fosfatos y silicatos (Fig. 28) mostraron bajas concentraciones superficiales (primeros 10 m de profundidad) ligadas a un alto consumo por parte del fitoplancton. En las capas sub-superficiales, se observaron acumulaciones en las transectas 4 (estación 33 y 34) y transecta 3 (estación 25). Al mismo tiempo, el comportamiento conservativo del fosfato permite observar una tendencia ascendente (50m) de la isolinia 2.5 μM a nivel de la estación 25. Dicho patrón corresponde además con una acumulación de nitratos observada en la Figura 27 (estación 25) y a una acumulación de silicatos. Lo opuesto se observa en la transecta 4. Una profundización (50m) de isoclinas de nitrato, fosfato y silicatos se observó en la estación 34. Esta distribución está probablemente relacionada con la circulación de sub-mesoescala en el área.

Finalmente, las distribuciones latitudinales y verticales de N^* y P^* muestran un déficit sostenido de nitrógeno respecto del fosfato, que sugiere la influencia de procesos biológicos asociados a aguas pobres en oxígeno disuelto. Dichos procesos (por ejemplo desnitrificación) son responsables de la pérdida de nitrato (gracias a su transformación en nitrógeno molecular) y acumulación de nitrito en estaciones cercanas a la costa, especialmente en las transectas 2, 3 y 4 y siguen el patrón de extensión de aguas de surgencia y son especialmente visibles entre la superficie y los 200 m de profundidad.

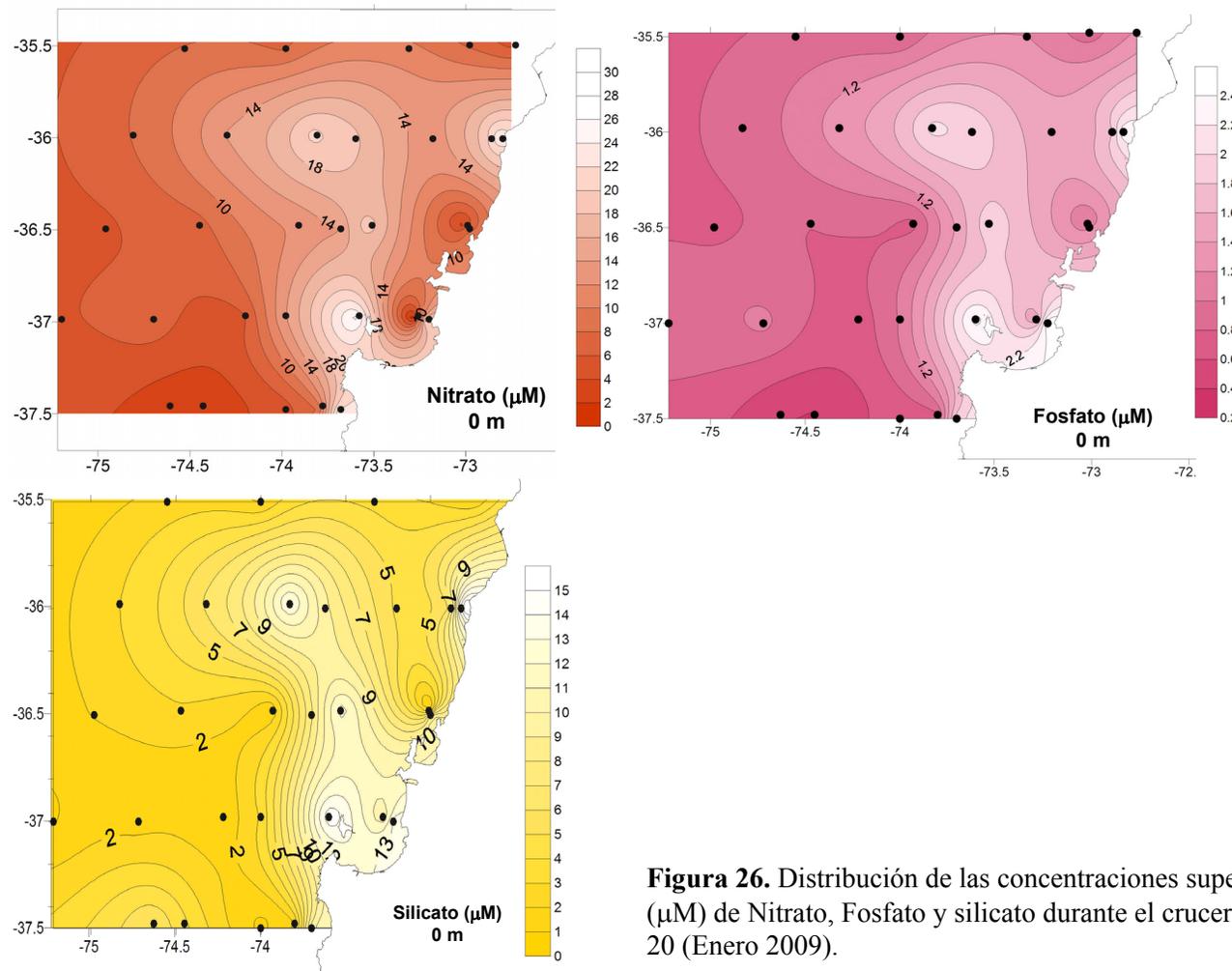


Figura 26. Distribución de las concentraciones superficiales (μM) de Nitrato, Fosfato y silicato durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

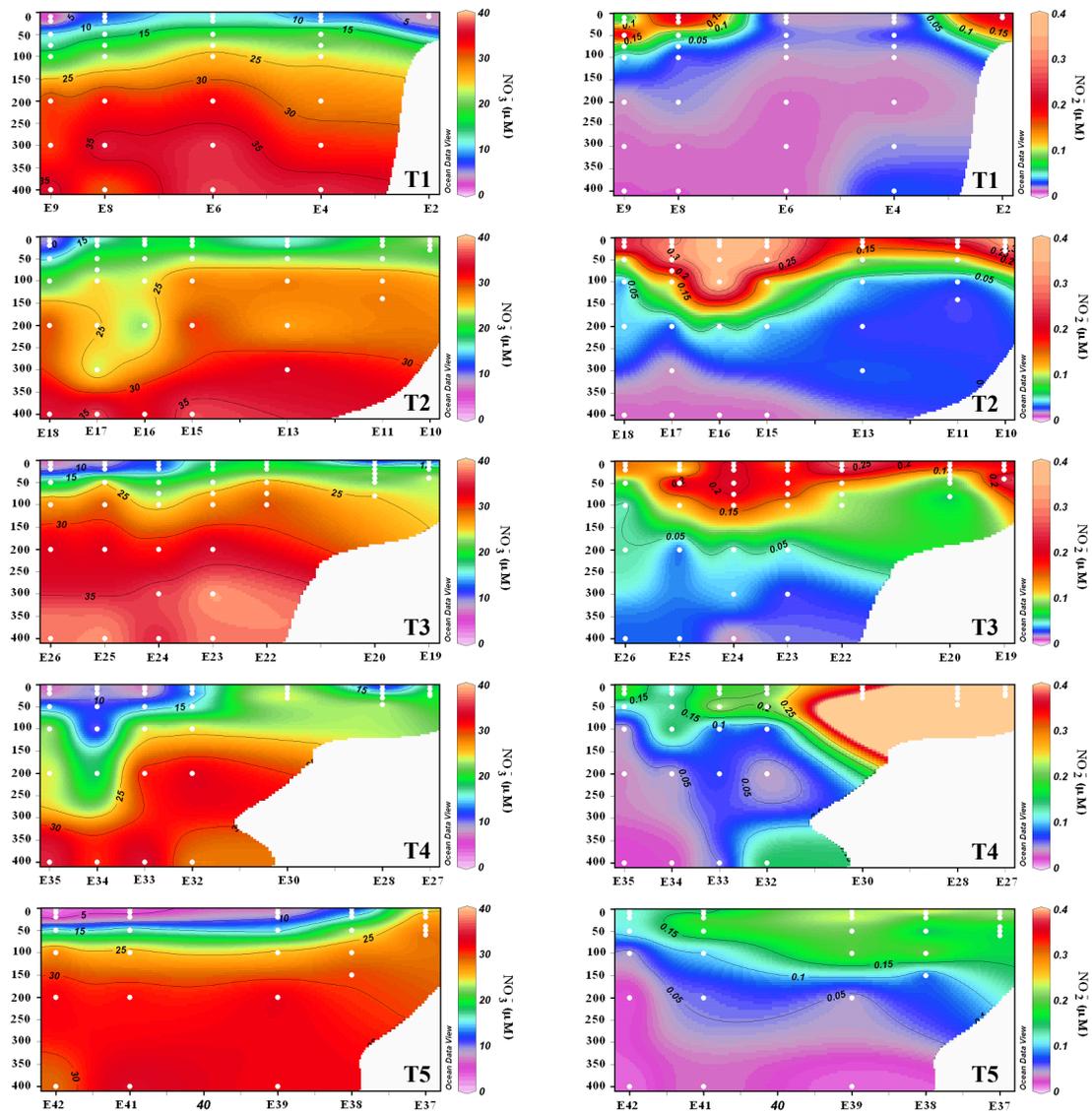


Figura 27. Distribución vertical de las concentraciones de **nitrito** (izquierda) y **nitrate** (derecha) a lo largo de cada transecta.

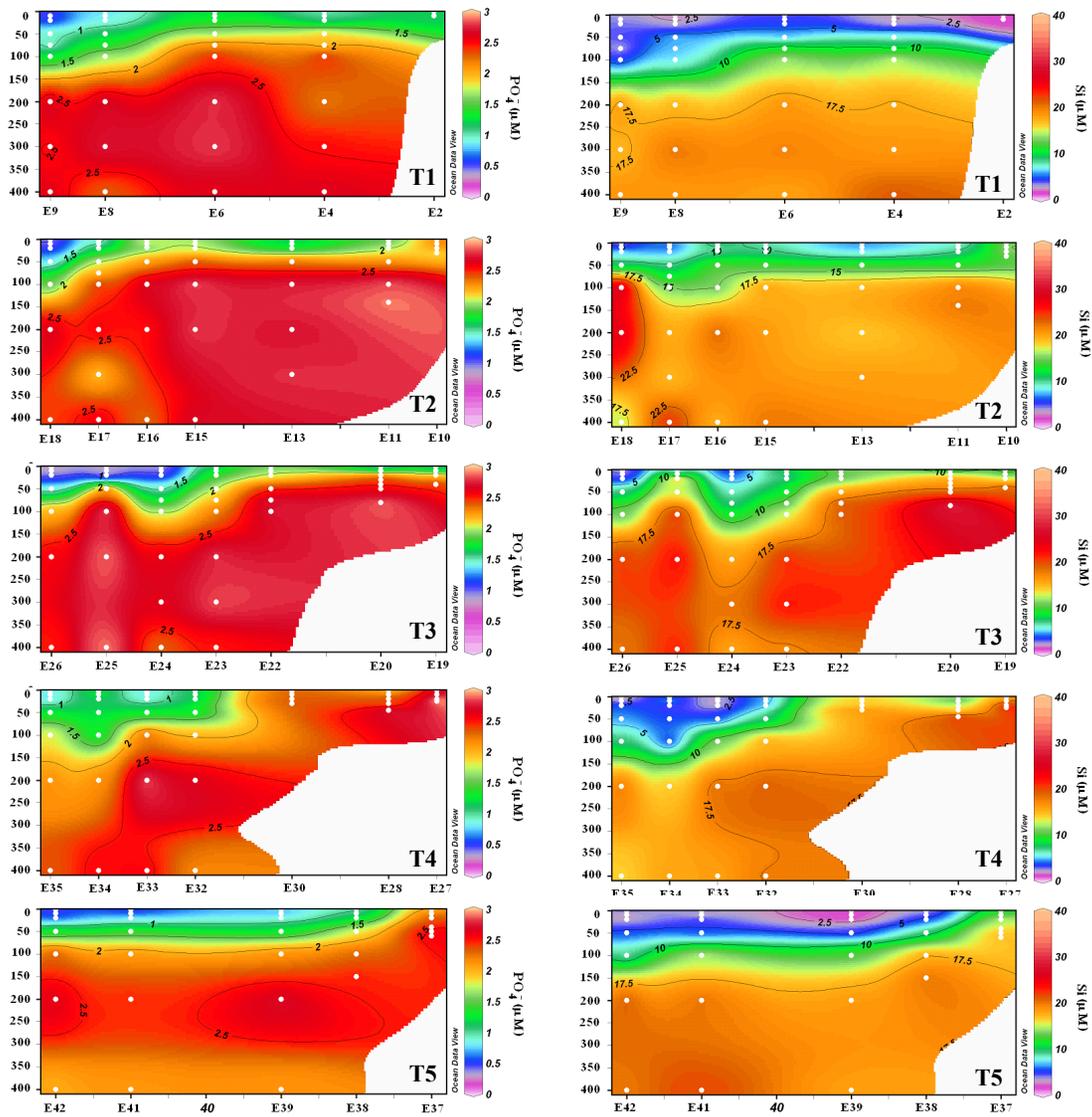


Figura 28. Distribución vertical de las concentraciones de **fosfato** (izquierda) y **silicato** (derecha) a lo largo de cada transecta.

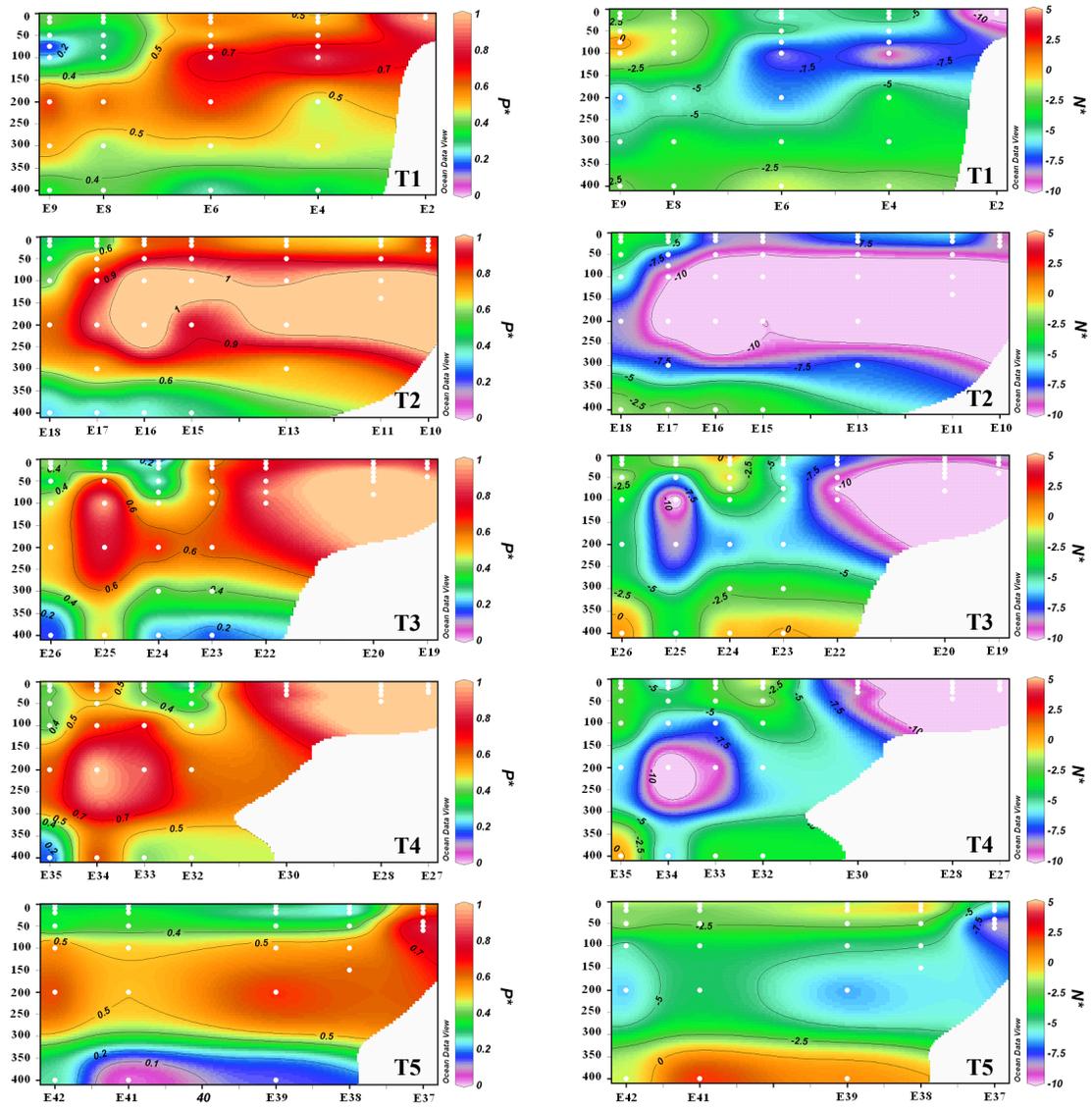


Figura 29. Distribución vertical de P^* (izquierda) y N^* (derecha) a lo largo de cada transecta.

6.2.6. Biomasa de fitoplancton

6.2.6.1. Distribución de la biomasa fitoplanctónica: pico-, nano- y micro-plancton

La biomasa del fitoplancton en superficie fue estimada como clorofila-a total (Cl-a T) y clorofila-a fraccionada por $<20 \mu\text{m}$ (Cl-a <20) y $<3 \mu\text{m}$ (Cl-a <3) en casi todas las estaciones, con excepción de aquellas donde el mal tiempo no lo permitió, y cubriendo el 97% de las estaciones planificadas. Las estadísticas básicas de dichas estimaciones se presentan en la Tabla 5. La distribución superficial de Cl-a T (Fig. 30a) fue heterogénea, con un foco costero de altos valores ($>4 \text{ mg m}^{-3}$) en la transecta frente a la Bahía Coliumo y concentraciones moderadas a bajas ($<1 \text{ mg m}^{-3}$) en el sector oceánico. La comparación entre las concentraciones superficiales de Cl-a T y las fracciones de tamaño indica que una proporción importante del total (media \pm DS: $40 \pm 29 \%$) estuvo dominada por la fracción nano-planctónica. Esto se nota claramente en la distribuciones de las concentraciones de Cl-a <20 (Fig. 30b), con dos focos muy marcados tanto en la zona costera como en la oceánica. La contribución de Cl-a <3 fue comparativamente muy menor (media \pm DS: $4 \pm 5\%$) y las mayores concentraciones ($>0,1 \text{ mg m}^{-3}$) se ubicaron en aguas oceánicas y hacia el extremo norte de la región estudiada, donde la Cl-a T fue menor (Fig. 30c). En términos de clorofila-a integrada de 0 a 30 m, las distribuciones de Cl-a T (Fig. 30d), Cl-a <20 (Fig. 30e), y Cl-a <3 (Fig. 30f) fueron muy similares a las distribuciones superficiales. Las estadísticas básicas de estas estimaciones se presentan en la Tabla 6.

Tabla 5. Estadística básica de concentraciones en superficie (mg m^{-3}) de clorofila-a total (Cl-a T) y fracciones (Cl-a <20 y Cl-a <3) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

Profundidad	Clorofila	n	Media DS	Mediana	Rango
Superficial	Cl-a T	30	3.31 ± 4.31	1.68	0.42 - 18.33
0 m	Cl-a <20	30	0.75 ± 0.49	0.58	0.16 - 1.84
	Cl-a <3	30	0.06 ± 0.05	0.04	0.01 - 0.18

Tabla 6. Estadística básica de estimaciones integradas entre 0 y 30 m (mg m^{-2}) para clorofila-a total (Cl-a T) y fracciones (Cl-a <20 y Cl-a<3) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

Distribución	Clorofila	n	Media	DS	Mediana	Rango
Integrada (0-30m)	Cl-a T	31	65.6 ± 78.8		32.9	7.87 - 352.0
	Cl-a <20	31	14.2 ± 8.8		12.0	3.50 - 42.4
	Cl-a <3	31	1.2 ± 1.0		0.9	0.10 - 3.2

A nivel superficial (0 m) los feopigmentos totales (Fgm-a T) – productos de degradación de la biomasa fitoplanctónica – mostraron una distribución similar a la de Cl-a T, con mayores concentraciones ($>1 \text{ mg m}^{-3}$) cerca de la costa y un máximo frente al Golfo de Arauco, al oeste de la Isla Santa María (Fig. 31a). Al igual que en el caso de la clorofila-a, la mayor proporción de Fgm-a T estuvo dominada por la fracción nano-planctónica, y su distribución fue similar a la de Cl-a<20 (Fig. 31b). La estadística básica de dichas estimaciones se presenta en la Tabla 7. La proporción de feopigmentos en la fracción $<3\mu\text{m}$ (Fgm-a <3) fue comparativamente menor y se distribuyó en forma similar a la de Cl-a<3 (Fig. 31c). Las concentraciones integradas (0-30 m) de Fgm-a T (Fig. 31d), Fgm-a <20 (Fig. 31e), y Fgm-a <3 (Fig. 31f) mostraron distribuciones muy similares a las superficiales. La estadística básica de dichas estimaciones se presenta en la Tabla 8.

Tabla 7. Estadística básica de concentraciones en superficie (mg m^{-3}) de feopigmentos totales (Fgm-a T) y fracciones (Fgm-a <20 y Fgm-a<3) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

Profundidad	Feopigmentos	n	Media	DS	Mediana	Rango
0 m	Fgm-a T	30	1.68 ± 2.29		0.62	0.11 - 10.0
	Fgm-a <20	30	0.27 ± 0.16		0.21	0.03 - 0.60
	Fgm-a <3	30	0.06 ± 0.09		0.03	0.00 - 0.50

Tabla 8. Estadística básica de estimaciones integradas entre 0 y 30 m (mg m^{-2}) para feopigmentos totales (Fgm-a T) y fracciones (Fgm-a <20 y Fgm-a<3) durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

Distribución	Feopigmentos	n	Media	DS	Mediana	Rango
Integrada (0-30m)	Fgm-a T	31	25.2 ± 26.6		13.8	2.90 - 98.1
	Fgm-a <20	31	6.3 ± 4.2		4.9	0.96 - 17.0
	Fgm-a <3	31	1.0 ± 0.9		0.7	0.04 - 3.5

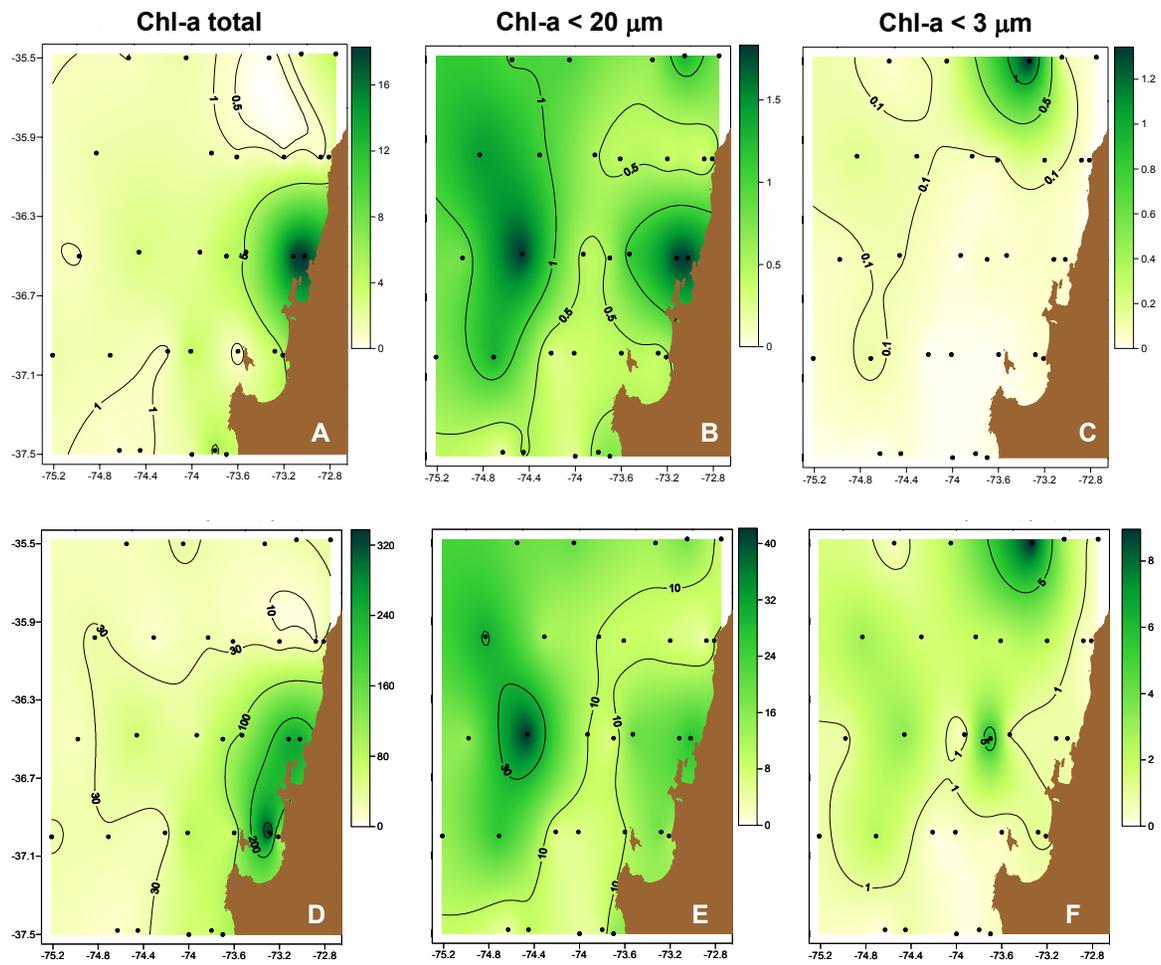


Figura 30. Distribución horizontal de la concentración de clorofila-a (mg m^{-3}) superficial (A-B) e integrada entre 0 y 30 m (D-F) durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. (A, D) Clorofila-a total, (B, E) Clorofila-a <20 μm , (C, F) Clorofila-a <3 μm .

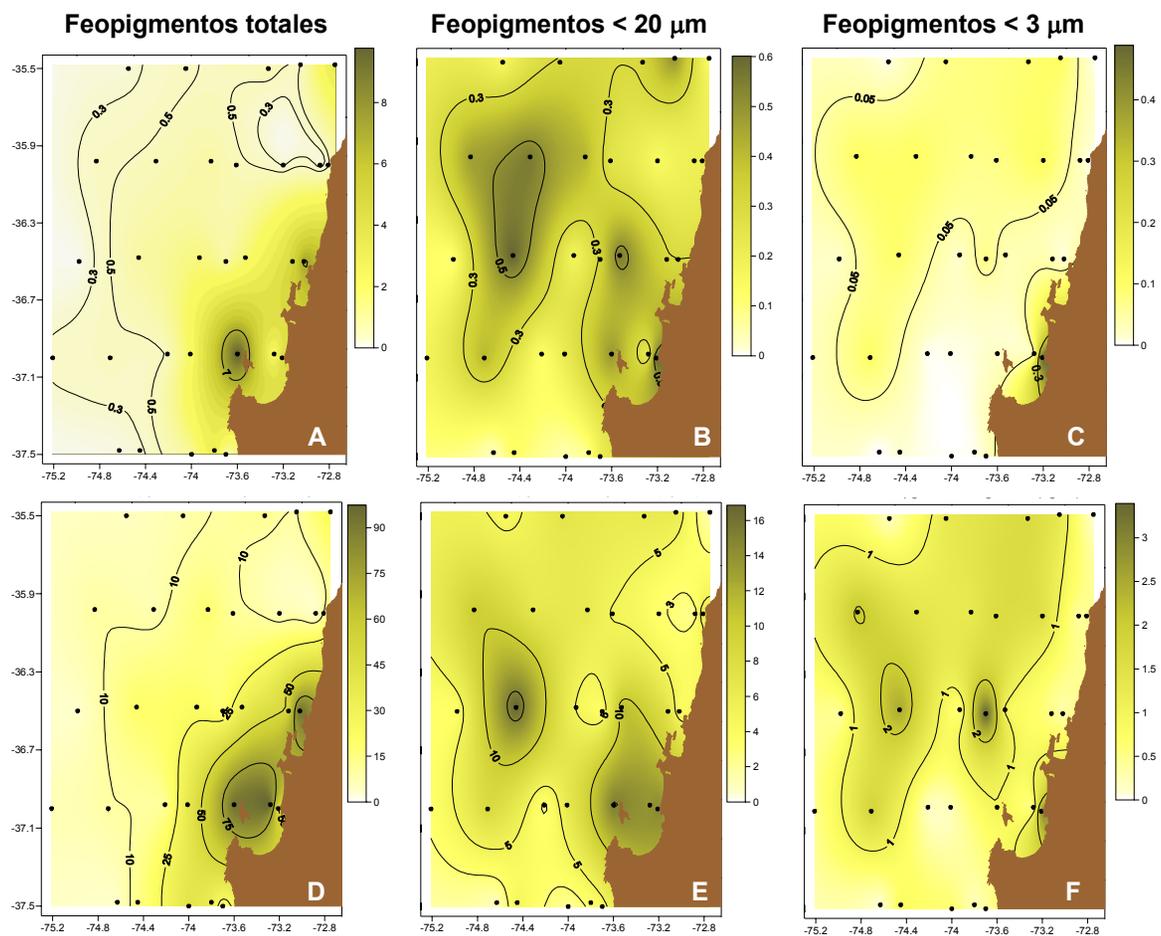


Figura 31. Distribución horizontal de la concentración de feopigmentos (mg m^{-3}) en superficie (A-C) e integrada entre 0 y 30 m (D-F) durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. (A, D) Total feopigmentos, (B, E) Feopigmentos <20 μm , (C, F) Feopigmentos <3 μm .

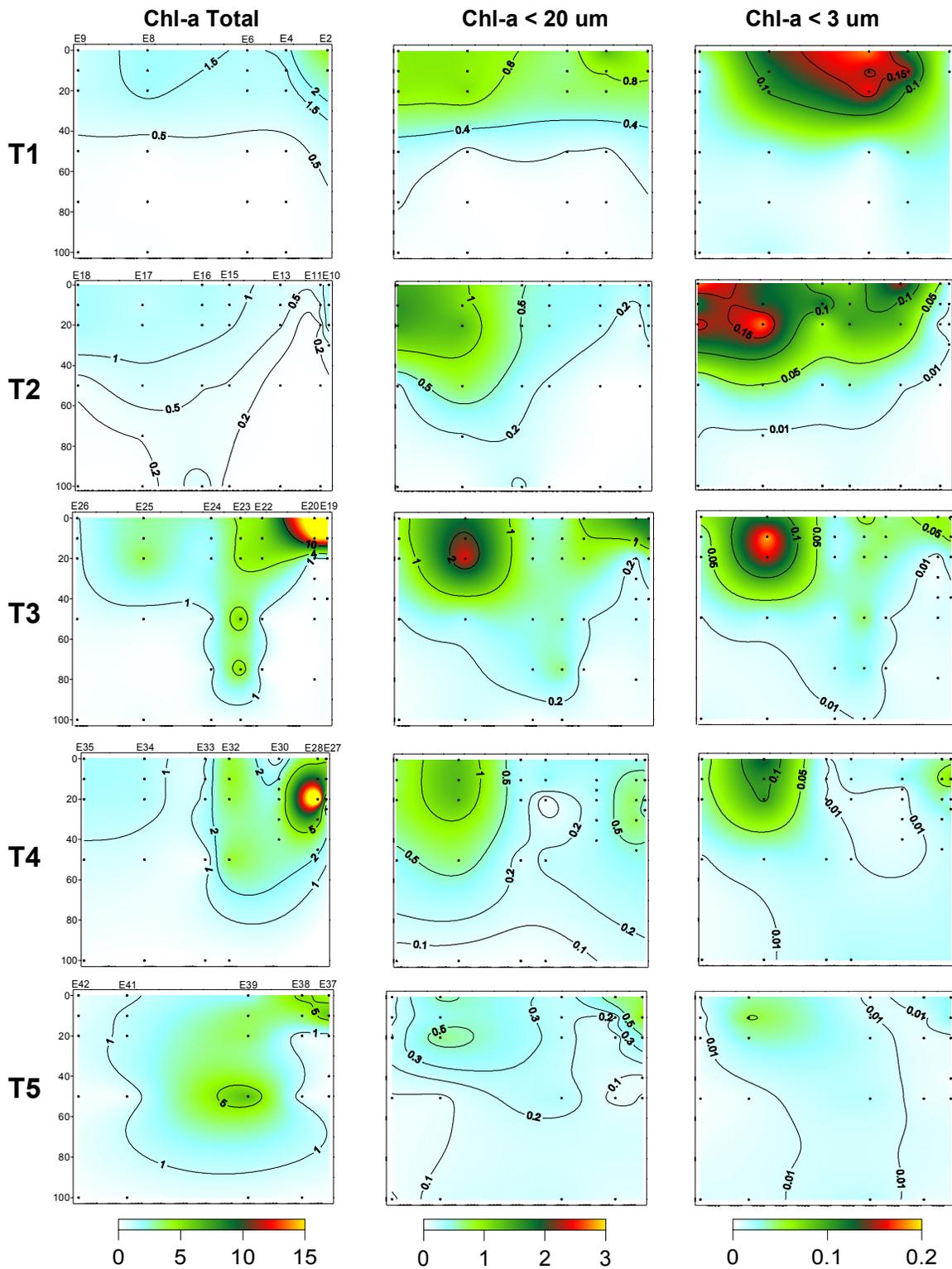


Figura 32. Distribución vertical de clorofila-a (mg m^{-3}) total y fraccionada por tamaños a lo largo de cada transecta (T1 a T5) durante el crucero FIP 2008-20(Enero 2009).

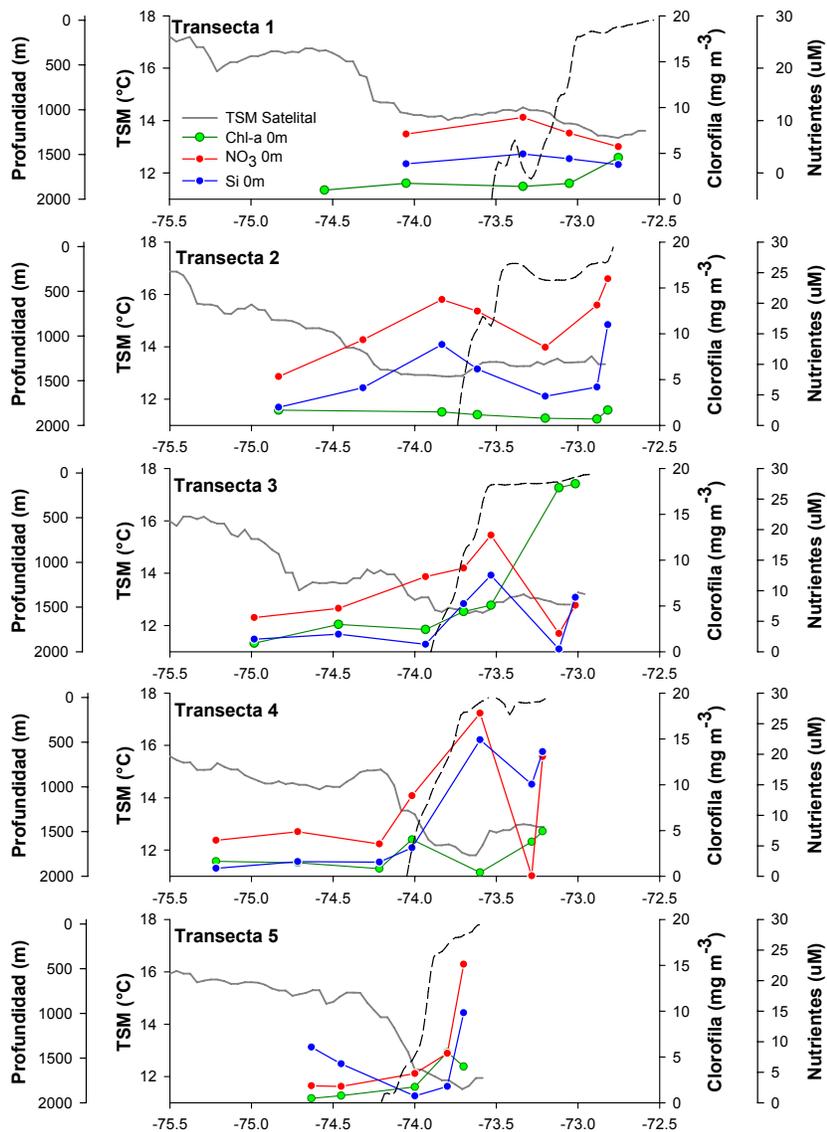


Figura 33. Distribución de las concentraciones superficiales de clorofila-a total (mg m^{-3} , en verde) y nutrientes (μM , azul y rojo) a lo largo de cada transecta del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009). Las líneas gris y negra segmentada corresponden a la distribución de TSM y a la batimetría, respectivamente. Los datos de TSM fueron obtenidos promediando imágenes satelitales MODIS-Aqua disponibles para el período del crucero. La información batimétrica fue obtenida a partir del modelo de relieve global ETOPO1 (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>).

En general, las mayores concentraciones de Cl-a T ($>1 \text{ mg m}^{-3}$) se encontraron en el extremo costero de cada transecta y mayoritariamente entre 0 y 40 m de profundidad (Fig. 32, paneles lado izquierdo). La excepción a este patrón fue la transecta 2, donde las concentraciones de Cl-a T fueron más bajas y los máximos se ubicaron hacia la zona oceánica. Esta distribución es consistente con la estructura observada en los perfiles hidrográficos de la transecta 2 (Fig. 11), que sugiere la presencia de un remolino de mesoescala en esta zona y que también abarca a la transecta 3 (Fig. 12). Esta estructura también parece influenciar las distribuciones de Cl-a <20 y Cl-a <3 en las transectas 2 y 3 (Fig. 33, paneles centrales y extremo derecho, respectivamente). En general, las mayores concentraciones de las fracciones de Cl-a <20 y Cl-a <3 aparecieron en el extremo oceánico de las transectas pero con un foco secundario en algunas estaciones costeras (e.g. transecta 3, Fig. 33). En la transecta 5, a diferencia de las transectas ubicadas al norte de Pta. Lavapié, se observó un foco de mayores concentraciones de Cl-a T en la sub-superficie (40-60 m de profundidad) y muy bajas concentraciones superficiales de las fracciones menores de clorofila-a.

Al examinar la distribución longitudinal (i.e. a lo largo de cada transecta) de la concentración superficial de clorofila-a con respecto a la TSM y concentraciones de nutrientes en superficie (Fig. 33), en conjunto con los perfiles verticales (Fig. 32), se aprecian patrones espaciales relacionados con las distribuciones horizontales y verticales de las propiedades físicas y químicas en la región de estudio, las que a su vez están relacionadas con los patrones espacio-temporales forzados por la surgencia costera, junto con la batimetría y la línea de costa en la región de estudio. Por ejemplo, en la Figura 34 se muestra la asociación entre la distribución de clorofila-a y el remolino de mesoescala detectado por nuestro muestreo hidrográfico a lo largo de la transecta 3 (Fig. 12). La distribución de densidad (Fig. 34a) indica un levantamiento de isopícnas en el centro del remolino de al menos 50 m, y un hundimiento en los bordes de esta estructura. La distribución de la clorofila-a (Fig. 34b) indica claramente un efecto de la estructura de densidad, provocando un hundimiento localizado de altas concentraciones cerca de la costa (exportación vertical), y una expansión de valores altos desde la costa hacia el centro del remolino. Los mecanismos de la extensión horizontal de la clorofila-a podrían ser: (1) exportación por advección o (2) generación *in situ* de biomasa por bombeo de

Ekman, asociada a una inyección de nutrientes en el centro del remolino. Las distribuciones de nutrientes observadas a lo largo del transecto 3 (Fig. 27-28) sugieren que posiblemente se trate de lo segundo.

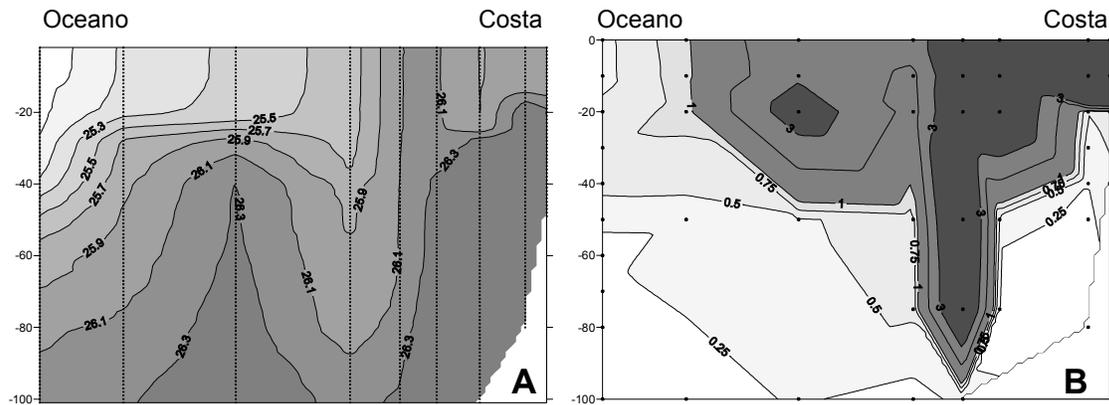


Figura 34. Perfil costa-océano de (A) densidad ($\sigma\text{-t}$) y (B) concentración de clorofila-a total (mg m^{-3}) a lo largo de la transecta 3 del crucero FIP 2008-20. Para construir los perfiles se agregó un perfil oceánico, correspondiente a la estación 4 del crucero Remolinos, que se realizó a bordo del AGOR Vidal Gormáz inmediatamente después del crucero FIP 2008-20.

Los resultados de un análisis de componentes principales (ACP), orientado a entender de forma más sintética las asociaciones espaciales entre la variabilidad oceanográfica y la clorofila-a, indicaron que un 84.8% de la variabilidad oceanográfica es explicada por los dos primeros componentes (CP1 y CP2 en la Tabla 9a). De acuerdo a los coeficientes obtenidos, el **CP1** reflejaría la variabilidad asociada a la zona de surgencia activa en la banda costera y principalmente en la zona sur del área de estudio (i.e. disminución de la temperatura y concentración de oxígeno, aumento de la salinidad y densidad, y aumento de las concentraciones de nitrato, fosfato y silicato), mientras que el **CP2** reflejaría principalmente la zona más afuera de la banda costera y/o sobre la plataforma ancha al norte de Punta Lavapié (i.e., Terraza del Itata), asociada a la intensa utilización del nitrato por el fitoplancton superficial (i.e. aumento en concentraciones de nitrito, disminución del nitrato, aumento en la temperatura).

Los resultados de un análisis de correlaciones de Spearman entre estos dos componentes principales (CP1 y CP2) y la distribución de clorofila-a y feopigmentos en

la región de estudio (Tabla 9b) indican una correlación negativa débil pero significativa entre la concentración de clorofila-a en sus tres fracciones de tamaño y la variabilidad asociada con CP1. En cambio, las correlaciones fueron mayores y positivas para las concentraciones de clorofila-a en todos los tamaños respecto del CP2 que, como se indicó anteriormente, reflejaría las zonas o condiciones asociadas a la utilización de nutrientes por el fitoplancton. Correlaciones positivas débiles pero significativas con el CP2 también se observaron para los feopigmentos en las fracciones <20 μm y <3 μm .

Tabla 9. (A) Análisis de Componentes Principales realizado sobre un conjunto de 155 mediciones de variables hidrográficas y concentraciones de nutrientes realizadas durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. Se indican los coeficientes asignados a cada variable por los 2 primeros componentes principales (CP), y el porcentaje de variabilidad total explicado por cada uno. (B) Coeficientes de correlación de Spearman entre los 2 primeros CP y las concentraciones de pigmentos. Se indican en negrita las correlaciones con $p < 0.001$.

A. Resultados ACP (Coeficientes)			B. Correlaciones de Spearman		
	CP1	CP2		CP1	CP2
Temperatura	-0.35	0.27	Cl-a Total	-0.39	0.60
Salinidad	0.35	0.12	Cl-a <20 μm	-0.49	0.68
Sigma-t	0.40	-0.14	Cl-a <3 μm	-0.41	0.52
Oxígeno	-0.39	-0.03	Feop Total	0.14	0.08
Nitrato	0.38	-0.22	Feop <20 μm	0.06	0.38
Nitrito	0.13	0.90	Feop <3 μm	-0.17	0.43
Fosfato	0.40	0.05			
Silicato	0.35	0.14			
%Variabilidad	72.16	12.68			

El predominio de variables físico-químicas asociadas a la surgencia costera como predictores de la concentración de clorofila-a fue confirmado, y mejor visualizado, al realizar un análisis de correlaciones canónicas. En dicho análisis se incluyó, además de las mediciones hidrográficas y concentraciones de nutrientes arriba indicadas, información sobre la profundidad (sonda) de cada estación y la profundidad relativa de cada medición, definida como la razón entre la profundidad a la que se tomó la muestra de agua y la profundidad de sonda de la estación. Los tres pares de variables canónicas producidos por el análisis mostraron correlaciones positivas y altamente significativas (Tabla 10), con la temperatura y profundidad de sonda como variables predictoras dominantes y la clorofila total como variable respuesta dominante en el primer par de variable canónicas (Tabla 10). El segundo y tercer par de variables canónicas mostraron

correlaciones más débiles pero significativas (Tabla 10). En el segundo par de variables canónicas se observó un dominio de la concentración de nitrato y oxígeno disuelto como variables predictoras, y de la fracción de clorofila $<20 \mu\text{m}$ como variable respuesta (Tabla 10). Finalmente, para el tercer par de variables canónicas se observó un dominio de la salinidad y profundidad relativa como variables predictoras, y de la fracción de clorofila $<3 \mu\text{m}$ como variable respuesta (Tabla 10). En conjunto, estos resultados indican que (1) un aumento en la biomasa fitoplanctónica total está significativamente asociado con aguas someras (costeras) y con baja temperatura, (2) que un aumento en la biomasa del nanofitoplancton está asociado con una disminución en el oxígeno y aumento en la concentración de nitrato propia de estaciones-profundidades influenciadas por la surgencia costera, y (3) que un aumento en la biomasa del picofitoplancton se asocia a incrementos en salinidad y disminuciones de la profundidad relativa propias de estaciones oceánicas cerca de la superficie.

Los resultados del análisis geoestadístico de las distribuciones horizontales de clorofila total y temperatura en superficie reflejaron la discrepancia entre las escalas espaciales típicas para estas dos variables. Mientras que los variogramas omnidireccionales calculados para clorofila superficial indicaron una escala de variabilidad típica (i.e. rango) de ca. 100 km, los variogramas calculados para TSM no mostraron una estabilización de la semivarianza dentro del rango de distancias utilizado, y que por convención corresponde a la mitad de la distancia máxima entre pares de observaciones (Isaaks y Srivastava 1989). Sólo fue posible detectar una estabilización de la semivarianza en TSM al aumentar el tamaño del área sobre la cual se calcula el variograma hasta un rango de ca. 450 km. Los variogramas calculados a partir de las observaciones *in situ* de clorofila y TSM mostraron patrones similares, aunque el bajo número de puntos sobre la grilla de muestreo del crucero afectó sustancialmente la resolución con que se pudo detectar dichos patrones (Fig. 35). Los variogramas calculados para la batimetría de la zona, en tanto, revelaron escalas de variabilidad muy similares a las observadas para clorofila (Fig. 35), lo que sugiere un rol importante de la batimetría costera en la determinación de patrones espaciales en la biomasa fitoplanctónica. Finalmente, los variogramas direccionales (o anisotrópicos) calculados para clorofila superficial, TSM y batimetría reflejaron la dominancia de la componente

perpendicular a la costa (eje x en Fig. 35) en la generación de estructura espacial en el océano costero.

Tabla 10. Análisis de Correlaciones Canónicas realizado sobre un conjunto de 90 mediciones de variables hidrográficas, de concentraciones de nutrientes, y de clorofila fraccionada realizadas entre 0 y 20 m de profundidad durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. Se indican los coeficientes asignados a cada variable original para cada variable canónica explicativa (U) y variable canónica respuesta (V). Se indican los resultados del análisis de correlación entre cada par de variables canónicas. Los coeficientes en negrita corresponden a aquellas variables originales que mostraron correlaciones significativas con la respectiva variable canónica.

<i>Variables explicativas</i>	Coeficientes		
	U1	U2	U3
Prof. muestra	0.03	0.18	-0.24
Temperatura	-0.79	0.75	-0.68
Salinidad	0.06	-1.53	-0.34
Oxígeno	0.01	-0.49	-0.79
Nitrato	-1.21	0.61	-0.71
Nitrito	-0.07	0.12	-0.36
Fosfato	0.61	1.01	-1.11
Silicato	-0.25	-0.52	0.77
Prof. sonda	-0.55	-0.88	0.25
Prof. relativa	0.10	-0.16	0.65

<i>Variables respuesta</i>	Coeficientes		
	V1	V2	V3
Clorofila Total	1.04	-0.45	-0.26
Clorofila <20 um	-0.83	-0.63	0.99
Clorofila <3 um	0.13	-0.22	-1.31

<i>Correlaciones entre variables canónicas</i>			
Coef. Correlacion	0.78	0.64	0.49
Chi-cuadrado	143.53	67.27	23.28
g.l.	30	18	8
p	0.000	0.000	0.003

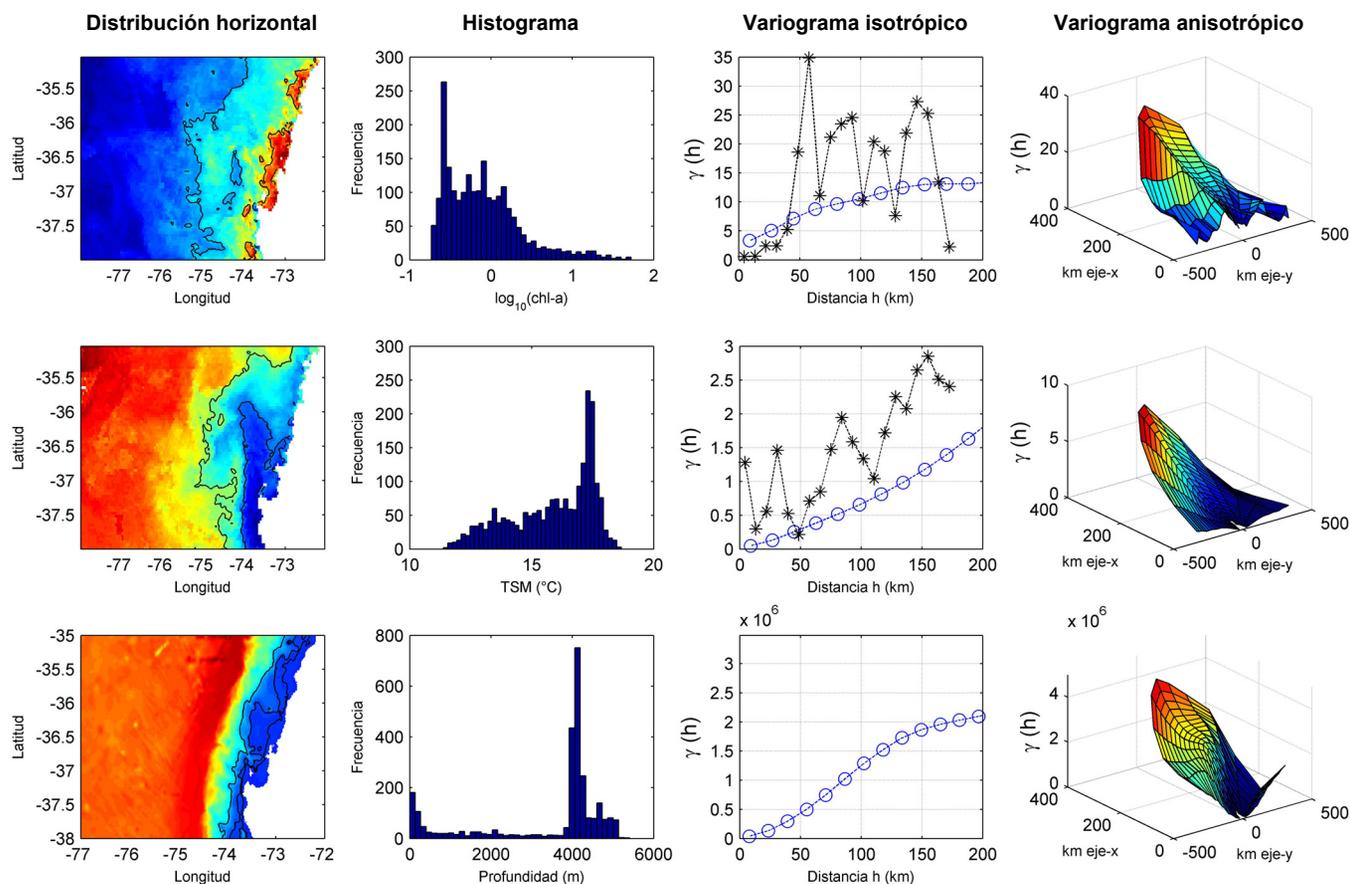


Figura 35. Análisis geoestadístico de las escalas espaciales de variabilidad en clorofila-a (paneles superiores), TSM (paneles centrales), y profundidad (paneles inferiores) sobre el área de estudio. Los datos de clorofila y TSM que se muestran en los mapas e histogramas corresponden a promedios de imágenes satelitales MODIS-A colectadas durante la primera quincena de Enero 2009. Los datos batimétricos provienen del modelo global de relieve ETOPO1. De costa a océano, los contornos negros en los mapas de distribución corresponden a 10 y 1 mg m⁻³ para clorofila, 13 y 15°C para TSM, y a 100, 200 y 1000 m para batimetría. Los símbolos azules y negros en los variogramas isotrópicos corresponden a datos satelitales (o de batimetría global) e *in situ*, respectivamente. Los variogramas anisotrópicos sólo fueron calculados para los datos satelitales y de batimetría digital.

6.2. Objetivo específico 2. *Determinar la abundancia, distribución espacial y composición del plancton, incluyendo el macrozooplancton, ictioplancton, mesozooplancton, microplancton, nanoplancton y picoplancton en la zona de estudio durante un período de primavera y su asociación con las variables bio-oceanográficas indicadas en 4.1.*

6.2.1. Composición, abundancia y distribución del microplancton

6.2.1.1. Fitoplancton. Los resultados de las biomásas integradas de diatomeas hasta 10 m de profundidad (mgC m^{-2}) evidenciaron una alta variabilidad y un patrón general con mayores abundancias en la zona de la plataforma continental (Fig. 36). Se identificaron 12 géneros de diatomeas de los cuales los más importantes fueron *Thalassiosira*, *Skeletonema* y *Chaetoceros* que, en promedio, representan $\sim 77\%$ de la abundancia total de diatomeas en la grilla muestreada (Tabla 11). En algunas estaciones dominaron géneros como *Corethron* ($\sim 92\%$, E15), *Leptocylindrus* (84%, E18) y *Pseudonitzschia* (77%, E18). El promedio de la biomasa integrada de diatomeas de todas las estaciones fue de 298.4 mgC m^{-2} , con valores máximos en las estaciones E19 – E37 y E38, con 1910 – 1202 – 1095 mgC m^{-2} , respectivamente. En contraste, las estaciones E13 – E11 y E4 presentaron las mínimas abundancias integradas con 1.6 – 0.3 y 0.2 mgC m^{-2} , respectivamente.

Con respecto a los 2 estratos de la columna de agua analizados (0 y 10 m), las biomásas totales de diatomeas mostraron alta variabilidad, concentrándose principalmente en superficie. La biomasa promedio de diatomeas en superficie y 10 m de profundidad, fueron de 33 y 27 mgC m^{-3} , respectivamente (Tabla 12). En superficie, la biomasa de diatomeas fue máxima en las estaciones E19, E37, E27 y E38, con 316.9 – 144.0 – 98.4 y 92.6 mgC m^{-3} , que en conjunto representan el 65% de las abundancias de todas las estaciones. En contraste, las menores abundancias se observaron en las estaciones oceánicas E17 – E13 – E11 y E4 con 0.19 – 0.11 – 0.01 y 0.01 mgC m^{-3} , respectivamente (Tabla 12). El estrato de los 10 m presentó las máximas biomásas en las estaciones costeras E38, E37, E20 y E32 con 126.3 – 96.3 – 83.9 y 76.9 mgC m^{-3} (Tabla 12), contribuyendo con un 49% de la abundancia de todas las estaciones en este estrato.

Las diatomeas estuvieron representadas principalmente por 7 especies del género *Chaetoceros*, siendo *Ch. debilis*, *Ch. compressus* y *Ch. radicans* las más abundantes (Fig. 37), contribuyendo en conjunto con un 85% de las abundancias totales de este género. El promedio para este género de biomasa total integrada, en todas las estaciones, fue de 198.7 mgC m⁻², presentando rangos máximos de biomasa de 484.5 (E19) – 300.6 (E20) – 213.0 (E32) – 132.8 (E38) – 115.1 (E30) mgC m⁻², mínimas biomasa de 0.5 (E26) – 0.4 (E16) - 0.3 (E18) – 0.2 (E11) – 0.1 (E4) mgC m⁻² y ausencia de células en las estaciones E28 y E15.

Tabla 11. Biomasa integrada promedio (0-10m; mgC m⁻²) y porcentaje (%) para diatomeas céntricas y penadas dominantes identificadas en la grilla FIP 2008-20.

Género	mgC m ⁻²	%
Diatomeas céntricas		
<i>Thalassiosira</i> spp.	93.7	33.3
<i>Skeletonema</i> spp.	78.2	27.8
<i>Chaetoceros</i> spp.	53.0	18.8
<i>Leptocylindrus</i> spp.	43.8	15.6
<i>Corethron</i> spp.	8.7	3.1
<i>Rhizosolenia</i> spp.	2.3	0.8
<i>Eucampia</i> spp.	1.6	0.6
Diatomeas penadas		
<i>Pseudonitzschia</i> spp.	16.1	89.9
<i>Pleurosigma</i> spp.	1.3	7.5
Penadas (0-100 µm)	0.2	1.2
<i>Cylindrotheca</i> spp.	0.1	0.7
<i>Asterionellopsis</i> spp.	0.1	0.7
<i>Thalassionema</i> spp.	0.03	0.2

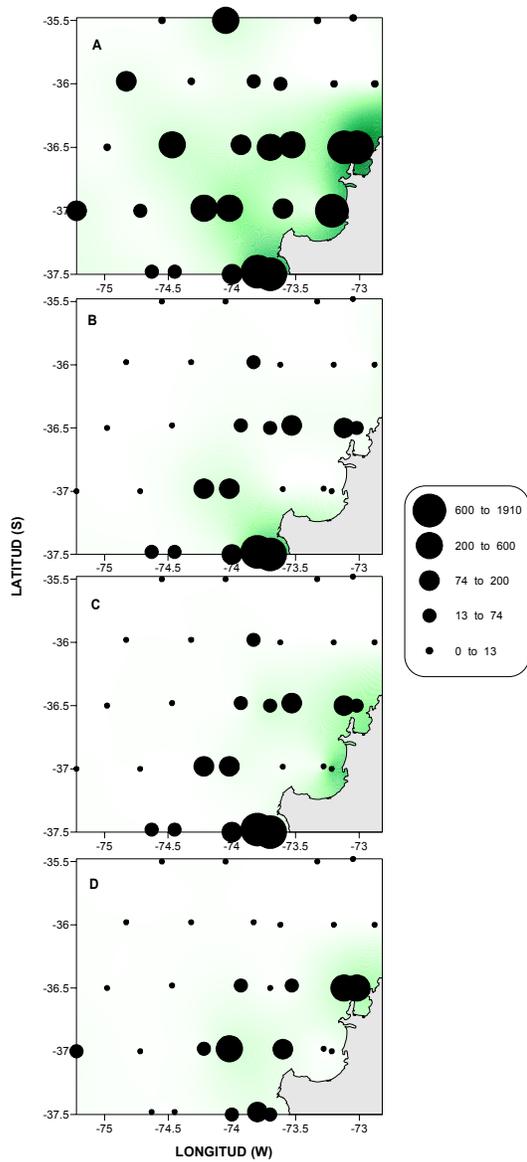


Figura 36. Biomasa fitoplanctónica integrada (0-10 m; mg C m⁻²) de diatomeas totales (A) y los géneros dominantes *Thalassiosira* (B), *Skeletonema* (C) y *Chaetoceros* (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

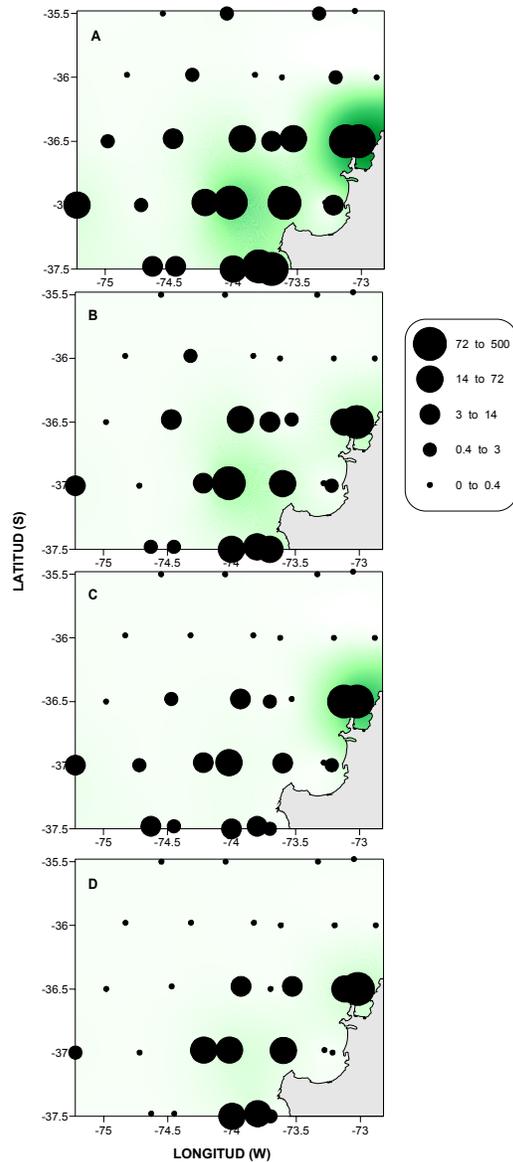


Figura 37. Biomasa fitoplanctónica integrada (0-10 m; mg C m⁻²) del género *Chaetoceros* (A) y las especies dominantes *Ch. debilis* (B), *Ch. compressus* (C) y *Ch. radicans* (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

Tabla 12. Biomasa de diatomeas totales (mg C m^{-3}) para 0 y 10 m en las estaciones de la grilla FIP 2008-20.

Estaciones	Fecha	$\mu\text{gC L}^{-1}$	
		0m	10m
E 4	06/01/09	0.01	0.02
E 6	07/01/09	1.5	1.0
E 8	07/01/09	28.3	14.7
E 17	07/01/09	0.2	1.0
E 27	08/01/09	98.4	67.9
E 28	08/01/09	5.2	9.6
E 19	08/01/09	316.9	65.1
E 20	09/01/09	90.0	83.9
E 22	09/01/09	18.3	40.1
E 23	09/01/09	35.0	33.5
E 24	09/01/09	8.9	21.7
E 25	09/01/09	32.7	13.9
E 26	09/01/09	1.2	0.8
E 18	09/01/09	8.8	8.1
E 16	10/01/09	8.4	3.4
E 15	10/01/09	2.4	3.7
E 13	10/01/09	0.1	0.2
E 11	10/01/09	0.0	0.1
E 10	10/01/09	1.8	31.8
E 30	11/01/09	0.5	25.1
E 32	11/01/09	38.9	76.9
E 33	11/01/09	27.6	15.2
E 42	11/01/09	9.5	2.8
E 34	12/01/09	2.8	1.4
E 35	12/01/09	10.3	10.9
E 41	12/01/09	1.8	4.4
E 39	12/01/09	12.3	23.3
E 38	12/01/09	92.6	126.3
E 37	12/01/09	144.0	96.3
Promedio		33.3	27.0

6.2.1.2. Microzooplancton. Los principales componentes del microzooplancton ($>20 \mu\text{m}$), estuvieron representados por los dinoflagelados tecados y ciliados lorizados, representando, en promedio, un 86 y 14% de la biomasa total, respectivamente (Fig. 38). Este grupo presentó mayores biomásas sobre la plataforma continental, extendiéndose en menor medida a sectores oceánicos (Fig. 39, 40). El promedio del microzooplancton total integrado entre 0 y 10 m fue de 50.1 mgC m^{-2} , con un máximo de 195.6 mgC m^{-2} en la estación E24 y un mínimo de 0.1 mgC m^{-2} en la estación E4 (Tabla 13). El promedio de las biomásas totales de dinoflagelados tecados alcanzó 17.6 mgC m^{-2} , con máximos en las estaciones E28, E27, E19 y E38 con 152.9, 96.5, 48.3 y 44.5 mgC m^{-2} , respectivamente. En contraste, las menores biomásas de este grupo se encontraron en las estaciones E4, E6, E17 y E26-34 con 0.01, 0.1, 0.2 y 0.5 mgC m^{-2} (Tabla 13).

Los géneros de dinoflagelados tecados con mayor representación fueron *Diplopsalis*, *Protoperidinium*, *Dinophysis*, *Ceratium*, y *Gonyaulax*, los cuales representaron un 67.6, 28.5, 3.2, 0.5, 0.2 %, respectivamente, de la biomasa de todas las estaciones analizadas (Tabla 14). En superficie, los dinoflagelados tecados mostraron biomásas máximas en las estaciones E27, E28 y E19, con valores 13.3, 12.4 y 8.1 mgC m⁻³ y disminuyendo en las E4, E6 y E17 a <0.01, 0.01 y 0.02 mgC m⁻³, respectivamente (Tabla 15). En el estrato de 10 m las máximas biomásas se presentaron en estaciones más costeras de la grilla (E28, E27, E38 y E22), con valores de 18.1, 6.0, 6.1 y 2.6 mgC m⁻³, respectivamente. Las biomásas más bajas para este estrato se registraron en las estaciones E4, E18 y E6- E9- E17 con <0.01, 0.01 y 0.02 mgC m⁻³, respectivamente (Tabla 15).

El promedio de las biomásas totales de ciliados fue de 2.9 mgC m⁻² con máximos en las estaciones E24, E22, E38 y E19, con 13.3, 9.4, 8.3 y 7.1 mgC m⁻², respectivamente. En contraste, las menores biomásas para este grupo se encontraron en las estaciones E4, E13- E11- E10 con 0.1 y 0.2 mg C m⁻² (Tabla 14). Los ciliados lorizados (tintínidos) estuvieron representados principalmente por 5 géneros: *Helicostomella*, *Dictiocysta*, *Eutintinnus*, *Favella* y *Protorabdonella*, los cuales contribuyeron, en promedio, con 35.6, 25.7, 21.2, 10.5 y 7.0 % de la biomasa total de todas las estaciones analizadas (Tabla 14). Las biomásas promedio de tintínidos para 0 y 10 m fueron de 0.32 y 0.27 mgC m⁻³, respectivamente. En superficie, las máximas biomásas de tintínidos fueron encontradas en las estaciones E22 y E38 con 1.6 y 1.1 mgC m⁻³, respectivamente, mientras que las mínimas se presentaron en las estaciones E9 y E11 con <0.01 y 0.01 mgC m⁻³. El estrato de 10 m presentó las mayores biomásas, en particular en las estaciones E24, y E28 con 1.7 y 1.2 mgC m⁻³. Las menores biomásas se encontraron en las estaciones E9 y E4 con valores de <0.01 mgC m⁻³ (Tabla 15).

Tabla 13. Biomasa integrada (0-10 m; mgC m⁻²) de microzooplancton: ciliados, dinoflagelados tecados y nauplii de crustáceos en las estaciones de la grilla FIP 2008-20.

Estación	Fecha	Dinoflagelados		
		Ciliados	tecados	Nauplii
E4	6/1/2009	0.1	0.01	0
E6	7/1/2009	3.5	0.1	1.9
E8	7/1/2009	1.1	1.3	23.4
E17	7/1/2009	0.5	0.2	17.9
E27	8/1/2009	4.8	96.5	0
E28	8/1/2009	6.5	152.9	23.2
E19	8/1/2009	7.1	48.3	0
E20	9/1/2009	3	13.8	13.9
E22	9/1/2009	9.4	41.7	9.7
E24	9/1/2009	13.3	8.7	173.7
E25	9/1/2009	2.9	8.4	8.9
E26	9/1/2009	0.5	0.5	37.9
E18	9/1/2009	0.6	0.7	10.9
E16	10/1/2009	0.5	0.6	0.3
E15	10/1/2009	0.6	1.1	0
E13	10/1/2009	0.2	0.6	1.1
E11	10/1/2009	0.2	0.8	0.4
E10	10/1/2009	0.2	1.1	18.2
E30	11/1/2009	2.9	10.3	11.7
E33	11/1/2009	1.7	11.3	45.9
E42	11/1/2009	1.2	2.3	101.7
E34	12/1/2009	0.6	0.5	31.7
E35	12/1/2009	1.5	2.2	88.9
E41	12/1/2009	1.1	3.3	57.7
E39	12/1/2009	4.6	4.8	25
E38	12/1/2009	8.3	44.5	79.4
E37	12/1/2009	4.9	34.8	0
Promedio		2.9	17.6	29.6

Tabla 14. Biomasa integrada promedio (0-10m; mgC m⁻²) y porcentaje (%) para los géneros dominantes de microzooplancton (dinoflagelados tecados y ciliados) en la grilla FIP 2008-20.

Género	mgC m ⁻²	%
Dinoflagelados tecados		
<i>Diplopsalis</i> spp.	9	67.6
<i>Protoperidinium</i> spp.	3.8	28.5
<i>Dinophysis</i> spp.	0.4	3.2
<i>Ceratium</i> spp.	0.1	0.5
<i>Gonyaulax</i> spp.	0.02	0.2
Ciliados lorizados (tintinidos)		
<i>Helicostomella</i> spp.	0.7	35.6
<i>Dictiocysta</i> spp.	0.5	25.7
<i>Eutintinnus</i> spp.	0.4	21.2
<i>Favella</i> spp.	0.2	10.5
<i>Protorabdonella</i> spp.	0.1	7

Tabla 15. Biomasa por estrato (0 y 10 m; mgC m⁻³) para grupos de microzooplancton y pellets fecales en todas las estaciones de la grilla FIP 2008-20 (Enero 2009).

Estación	Ciliados		Dinoflagelados		Nauplii		Pellets fecales	
	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m
E4	0.02	< 0.01	<0.01	<0.01	0	0	0.5	5.1
E6	0.3	0.01	0.01	0.02	0.1	0.3	0.09	0.9
E8	0.2	0.04	0.2	0.04	3.7	0.9	0.3	0.8
E9	<0.01	<0.01	0.04	0.02	3.9	5.3	0.1	0.2
E17	0.06	0.04	0.02	0.02	3	0.6	0.7	0.7
E27	0.5	0.5	13.3	6	0	0	3.2	0.9
E28	0.08	1.2	12.4	18.1	0	4.6	3.2	0.9
E19	0.9	0.5	8.1	1.5	0	0	1.8	1.2
E20	0.4	0.2	1.9	0.9	0	2.8	0.8	0
E22	1.6	0.3	5.8	2.6	1.9	0	3.8	0.7
E24	0.9	1.7	0.9	0.9	9.8	24.9	1.3	5.4
E25	0.09	0.5	0.2	1.5	0.9	0.8	0.1	4.2
E26	0.09	0.01	0.07	0.04	6.4	1.2	0.7	0.1
E18	0.09	0.03	0.1	0.01	2.1	0.07	1.7	1.2
E16	0.06	0.05	0.07	0.04	0.05	0	0.2	0.1
E15	0.06	0.05	0.07	0.04	0	0	2.2	3.3
E13	0.02	0.01	0.05	0.07	0.09	0.1	2.2	3.7
E11	0.01	0.02	0.04	0.1	0	0.08	1.7	0.5
E10	0.03	0.01	0.2	0.08	2.3	1.4	2.3	1.8
E30	0.6	0.03	1.9	0.2	0.9	1.4	3.4	1.3
E33	0.1	0.3	0.9	1.3	4.07	5.1	4.9	32.9
E42	0.1	0.1	0.3	0.1	13.9	6.4	5.3	0.7
E34	0.05	0.07	0.03	0.08	3.2	3.2	1.5	3.3
E35	0.09	0.2	0.2	0.3	11.9	5.9	5.7	2.8
E41	0.09	0.1	0.2	0.4	4.2	7.4	64.8	3.3
E39	0.7	0.3	0.5	0.5	2.7	2.3	7.9	24.1
E38	1.1	0.6	2.8	6.1	0	0	10.4	21.6
E37	0.7	0.3	6.6	0.4	2.7	3.2	5	5.4
Promedio	0.32	0.27	2	1.5	2.7	3.3	5	5.4

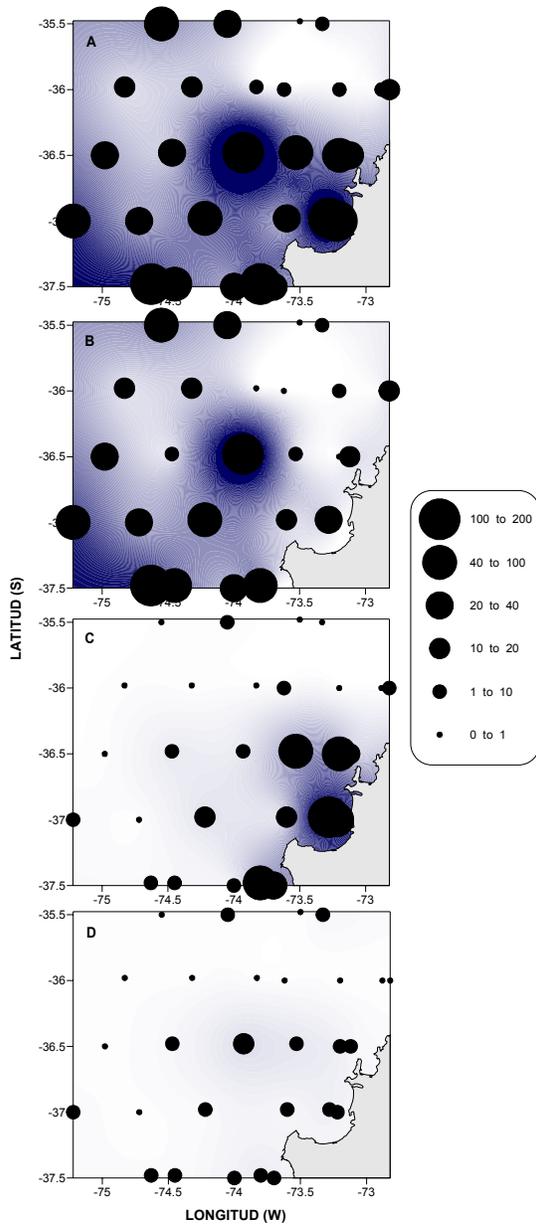


Figura 38. Biomasa integrada (0-10 m; mg C m⁻²) de microzooplancton total (A) y grupos dominantes, nauplii (B), dinoflagelados tecados (C) y ciliados (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

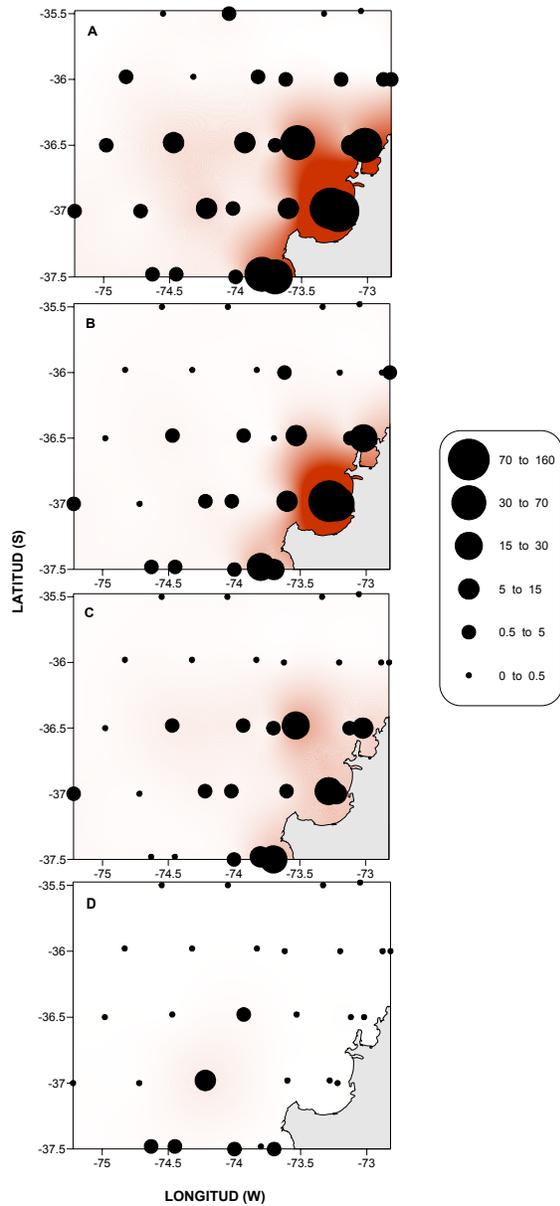


Figura 39. Biomasa del microzooplancton integrada (0-10 m; mg C m⁻²) de dinoflagelados totales (A) y los géneros dominantes *Diplopsalis* spp. (B) *Protoperidinium* spp. (C) y *Dinophysis* spp. (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

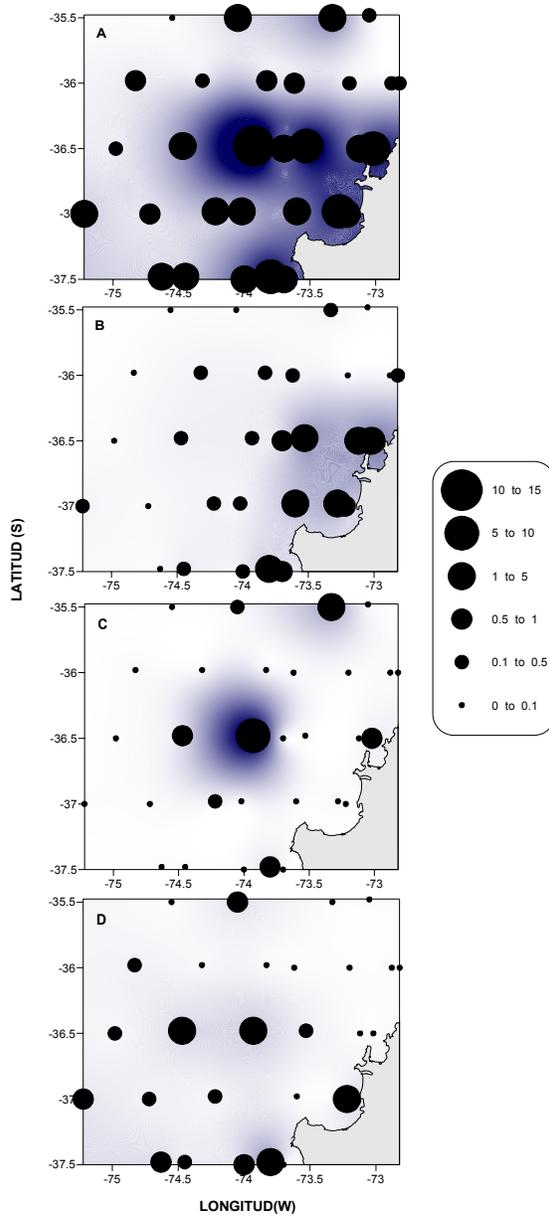


Figura 40. Biomasa del microzooplancton integrada (0-10 m; mg C m⁻²) de tintínidos totales (A) y los géneros dominantes *Helicostomella* spp. (B), *Dicticysta* spp. (C) y *Eutintinnus* spp. (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

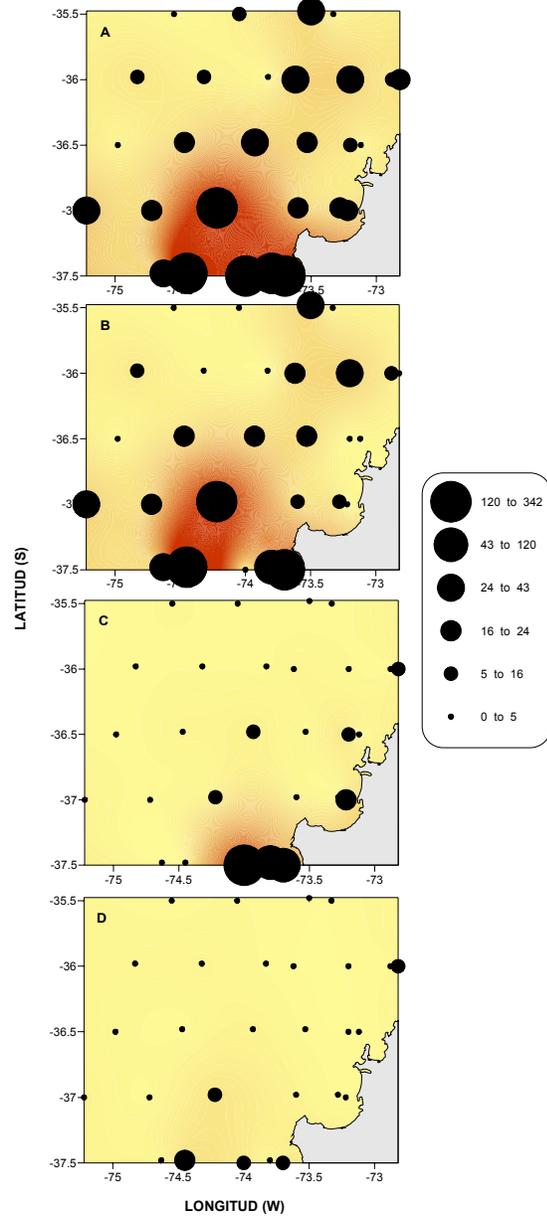


Figura 41. Biomasa de material fecal integrado (0-10 m; mg C m⁻²) de pellets totales (A) y separados por grupos dominantes de eufáusidos (B), indeterminados (C) y copépodos (D) en las estaciones bio-oceanográficas del crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

Las biomásas integradas de las larvas nauplii de crustáceos se concentraron preferentemente en el sector del quiebre de la plataforma continental y en estaciones más oceánicas de la grilla estudiada (Fig. 38b). El promedio de las biomásas totales integradas de todas las estaciones analizadas fue de 29.6 mgC m^{-2} y las máximas / mínimas abundancias fueron observadas en las estaciones E24, E42, E35, E38 / E6, E13, E11, E16 (Tabla 13). Al considerar los estratos de profundidad por separado, las biomásas promedio de larvas nauplii para 0 y 10 m fueron muy similares (5.0 y 5.4 mgC m^{-3}), con las máximas biomásas en superficie encontradas en las estaciones E41 y E38, al sur de Pta. Lavapié (64.8 y 10.4 mgC m^{-3}), y mínimas en las estaciones E6 y E9-E25 (0.09 y 0.1 mgC m^{-3}), ubicadas en el extremo norte y oceánico de la región de estudio. El estrato de 10 m presentó las mayores biomásas en particular en las estaciones E33, y E39 con 32.9 y 24.1 mgC m^{-3} . Las menores biomásas se encontraron en las estaciones E16 y E26 con valores de 0.1 mgC m^{-3} (Tabla 15).

6.2.1.3. Pellets fecales de zooplancton. El carbono de fecas de zooplancton presentó una alta variabilidad espacial (horizontal y vertical) en la columna de agua, concentrándose principalmente en la plataforma continental y en particular en la zona costera al sur del Golfo de Arauco (Fig. 41). La biomasa integrada promedio de pellet fecales de zooplancton en todas las estaciones analizadas fue de 52.1 mgC m^{-2} , con un rango que osciló entre 1.3 y 340.5 mgC m^{-2} . Los principales componentes de los pellet fecales de zooplancton fueron los producidos por los grupos de eufáusidos, copépodos, apendicularias, y un item denominado “pellet indeterminados” que corresponde a los pellet fecales que no pudieron ser clasificados dentro de los grupos anteriormente mencionados por encontrarse en avanzado estado de degradación, los que representaron el 68.9, 6.5, 0.3 y 24.3 % del total, respectivamente.

Las máximas biomásas totales integradas de fecas de zooplancton se ubicaron en las estaciones 41 y 37 de la transecta 5, con valores de 340.5 y 201.1 mgC m^{-2} . Las menores biomásas se encontraron en estaciones situadas más al norte (E9 y E16) con 1.7 y 1.3 mgC m^{-2} (Fig. 41). Finalmente, las biomásas de carbono fecal a 10 m de profundidad y en superficie fueron de 5.4 y 5.0 mgC m^{-3} , respectivamente.

6.2.2. Composición, abundancia y distribución del macrozooplancton

Como se indicó anteriormente, en cada estación bio-oceanográfica se obtuvieron muestras de zooplancton desde 3 estratos de profundidad: 0-200 m, 0-50 m y entre 50-200 m, o mayor a 50 m en aquellas estaciones donde la profundidad era inferior a los 200 m. Los valores de biomasa zooplanctónica (peso seco) integrada fluctuaron entre 0.09 y 90.61 g C m⁻², con un promedio (\pm SD) de 6.25 ± 19.12 g C m⁻², y con un coeficiente de variación de 45%. Las estimaciones de biomasa zooplanctónica por estrato de profundidad mostraron diferencias significativas entre el estrato superior (0 - 50 m) y el estrato profundo (50 -200 m). El estrato de 0-50 m mostró los valores más altos, con un promedio (\pm SD) de 1.27 ± 1.21 g C m⁻² y con un coeficiente de variación de 36%. Los bajos valores del estrato profundo fluctuaron entre 0.04 y 1.16 g C m⁻², con un promedio (\pm SD) de 0.42 ± 0.31 g C m⁻².

La distribución espacial de la biomasa de zooplancton por estrato de profundidad (Fig. 42) mostró una tendencia a la concentración de biomasa en el estrato de 0-50 m y principalmente sobre una franja costera. No obstante lo anterior, las distribuciones de biomasa en el estrato profundo (50-200 m) y en la columna integrada (0-200 m) indican un importante aporte de biomasa zooplanctónica en las estaciones oceánicas (Fig. 42), posiblemente representadas por la comunidad de eufáusidos y copépodos de mayor tamaño, tales como los de las familias Rhincalanidae y Euchaetidae.

El análisis de composición del mesozooplancton y macrozooplancton sobre las muestras estratificadas (0-50 m y 200-50 m) indicó que en términos globales (Tabla 16) hay una dominancia numérica de copépodos (>70%) y poliquetos (>23%). Con abundancias relativas mucho menores para gelatinosos y otros grupos de crustáceos holoplanctónicos (eufáusidos) y meroplanctónicos (larvas de decápodos y cirripedios). Todos estos grupos mayores se concentraron principalmente (>90%) en el estrato de 0 a 50 m (Fig. 43). Sólo en eufáusidos y en los grupos menores indicados en la Tabla 16 se observó una mayor representación numérica (ca. 10%) en el estrato de 50 a 200 m (Fig. 43).

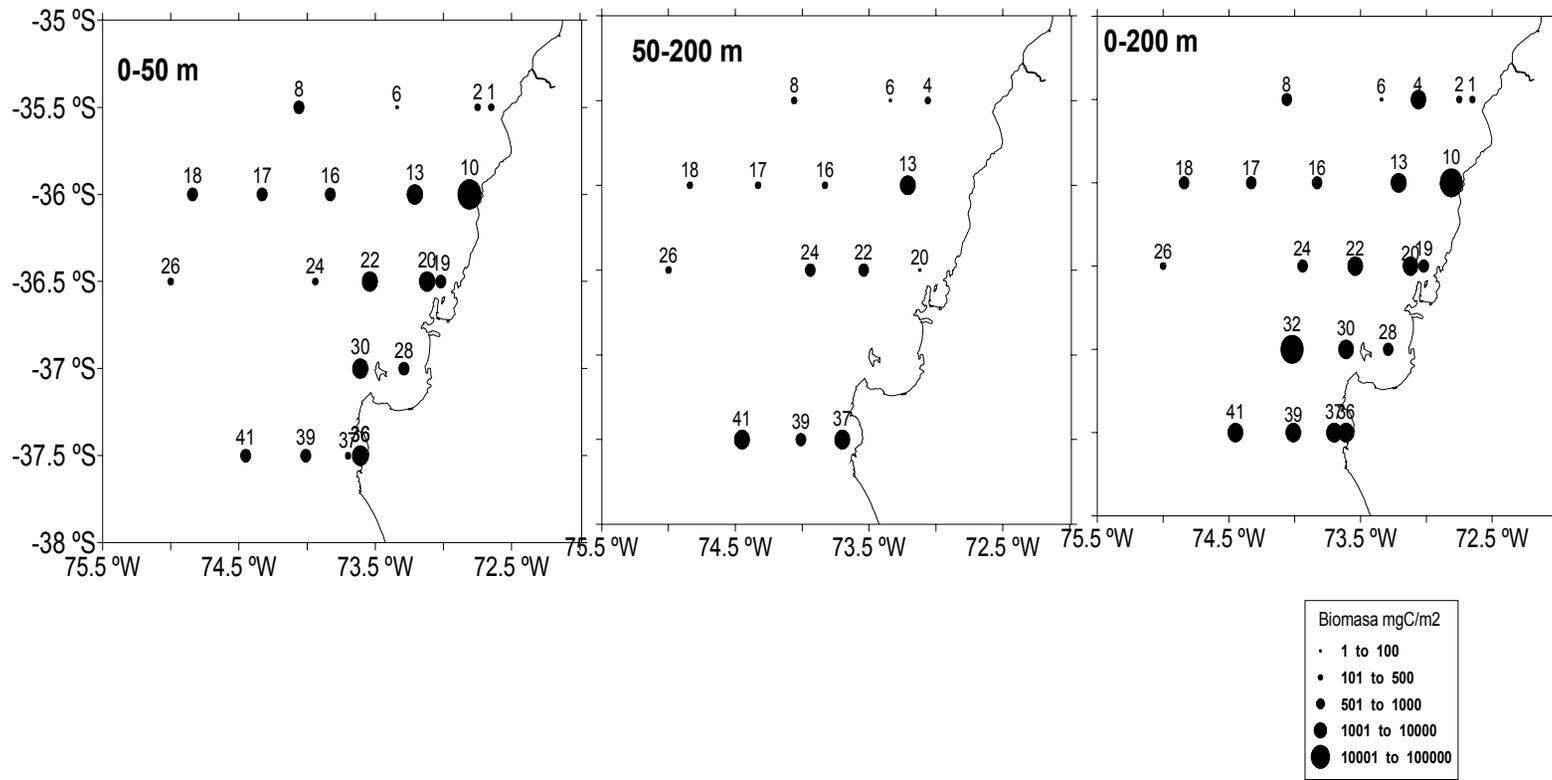


Figura 42. Distribución espacial de la biomasa zooplanctónica integrada sobre tres distintos estratos de profundidad durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

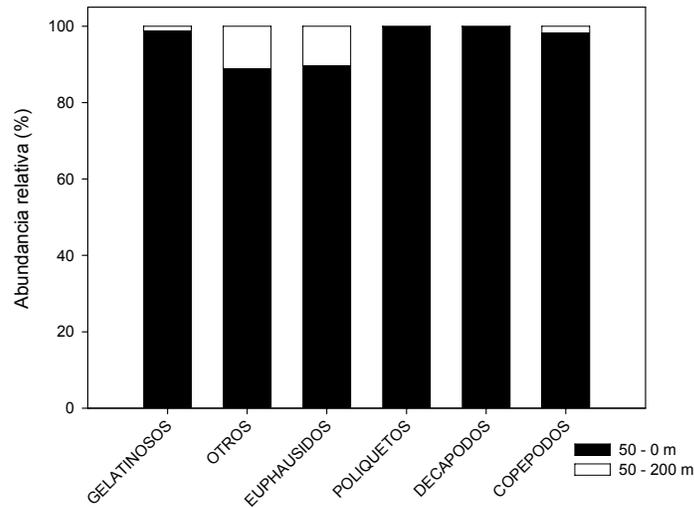


Figura 43. Distribución vertical de los grupos taxonómicos encontrados durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

Tabla 16. Abundancia numérica y relativa (%) de los principales grupos taxonómicos encontrados durante el crucero de Enero de 2009.

Grupo taxonómico	Abundancia	
	Indiv. m ⁻³	%
Copépodos	15303	71.8
Poliquetos	4991	23.4
Gelatinosos	502	2.4
Decápodos	404	1.9
Otros*	80	0.4
Eufáusidos	47	0.2

*: Bajas densidades (< 0.05 %) de estomatópodos, anfípodos, hipóridos, cladóceros, cirrípedios, isópodos y ctenóforos.

Los copépodos fueron el grupo dominante del componente zooplanctónico en la zona estudiada durante Enero 2009, con >70 % de los conteos totales (Tabla 16). Un análisis de la composición específica de este importante grupo (Tabla 17) indicó que cerca del 70% de todos los copépodos encontrados corresponden a las especies de pequeño tamaño (<1.5 mm) *Oithona similis* y *Paracalanus cf. indicus*, con abundancias sobre los 1000 individuos por metro cúbico. Pese a esta dominancia numérica de especies pequeñas, en términos de aportes a la producción de biomasa en la zona estudiada pueden ser más importantes los copépodos de tamaño intermedio (2 - 3 mm) como *Clausocalanus*

acuicornis, *Centropages brachiatus* y *Calanoides patagoniensis*, y los de mayor tamaño (> 4mm) como *Rhyncalanus nasutus*, y algunas especies de las familias Eucalanidae y Euchaetidae.

Si bien en el crucero 2009 se observó un mayor número de especies de copépodos en relación a cruceros anteriores en la misma zona – todos en el marco de monitoreos bio-oceanográficos FIP –, no es posible realizar una comparación directa de los resultados dado que cruceros anteriores se han realizado en momentos distintos de la temporada primavera-verano. No obstante lo anterior, se observa una persistencia de las especies dominantes, que corresponden a especies típicamente encontradas en áreas de surgencia (Escribano y Schneider 2007). El aumento en número de especies en relación a lo observado en años previos puede obedecer a cambios intra-estacionales en la estructura comunitaria, modulados por la variabilidad en el proceso de surgencia costera y la dinámica de la zona de mínima de oxígeno (Escribano et al. 2007 e Hidalgo et al. en Anexo 2).

El Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado sobre las 28 especies más abundantes de copépodos explicó un 61% de la varianza, y sugiere la existencia de ensamblajes faunísticos asociados a la variabilidad de condiciones de surgencia sobre la región cubierta por el crucero oceanográfico. La cercanía o grado de asociación entre grupos puede observarse en el diagrama 3-D de los CP que se presenta en la Figura 44. El primer CP mostró correlaciones positivas con las especies más abundantes, tales como *Centropages brachiatus* y las especies del género *Oithona*. El segundo CP mostró correlaciones positivas con la abundancia de *Calanus chilensis*, *Metridia lucens* y *Clausocalanus arcuicornis*. El tercer CP se asoció positivamente a la abundancia de *Calanoides patagoniensis* y *Acartia negligens*. Las características de estas especies y su distribución en la zona sugieren que el primer CP representa especies de condiciones más costeras y cuya distribución se centra en los focos de surgencia, el segundo CP corresponde a un grupo de especies más bien asociado a condiciones oceánicas o de aguas más cálidas, y el tercer CP representa especies de la zona costera, pero posiblemente con una distribución centrada más al sur.

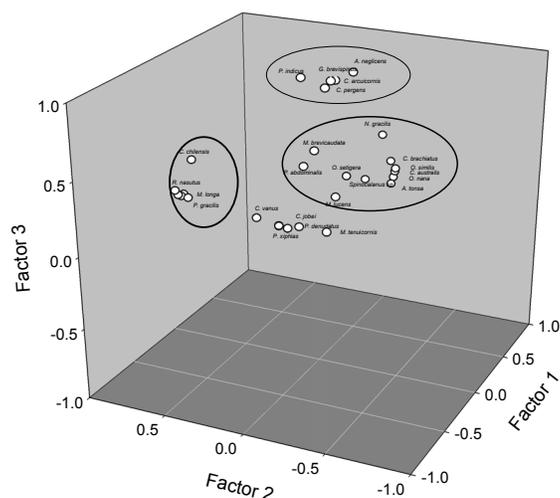


Figura 44. Análisis de componentes principales de la comunidad de copépodos en el área costera-oceánica cubierta durante el crucero FIP 2008-20 de Enero 2009. Las elipses representan grupos faunísticos con estrecha asociación entre especies. Los ejes de coordenadas corresponden al índice de correlación.

En cuanto a la distribución espacial de los principales grupos taxonómicos referidos en la Tabla 16, se observaron marcadas diferencias en los patrones de distribución horizontal (Fig. 44). Los copépodos (grupo dominante) se distribuyeron sobre toda el área estudiada, pero presentaron mayores concentraciones en las 2 transectas de más al norte y en las estaciones al interior del Golfo de Arauco (Fig. 44). Una concentración similar en estaciones costeras se observó para gelatinosos. Los poliquetos y larvas de decápodos, en tanto, se encontraron restringidos a las estaciones más costeras, mientras que los eufáusidos y otros grupos minoritarios se presentaron principalmente en estaciones intermedias y oceánicas, respectivamente (Fig. 45).

El análisis de la asociación entre estos patrones de distribución y las condiciones ambientales detectadas durante el crucero, y que consistió en una regresión múltiple paso-a-paso con la biomasa log-transformada como variable dependiente, indicó una correlación positiva débil pero significativa ($p < 0.05$) entre la TSM y las biomásas de copépodos ($r=0.19$), poliquetos ($r=0.2$) y gelatinosos ($r=0.16$). Las distribuciones de eufáusidos, en tanto, presentaron correlaciones negativas débiles pero significativas con la salinidad ($r=-0.38$). También se encontraron correlaciones negativas débiles entre la

densidad del agua de mar y las biomásas de copépodos ($r=-0.17$), poliquetos ($r=-0.30$) y gelatinosos ($r=-0.13$). La biomasa zooplanctónica integrada mostró una correlación negativa débil con el contenido de oxígeno disuelto ($r=-0.12$), sugiriendo que mayores concentraciones de biomasa se encontrarían en aguas de bajo oxígeno, y con ello un potencial efecto de la presencia de aguas de surgencia sobre los patrones de distribución de la biomasa zooplanctónica.

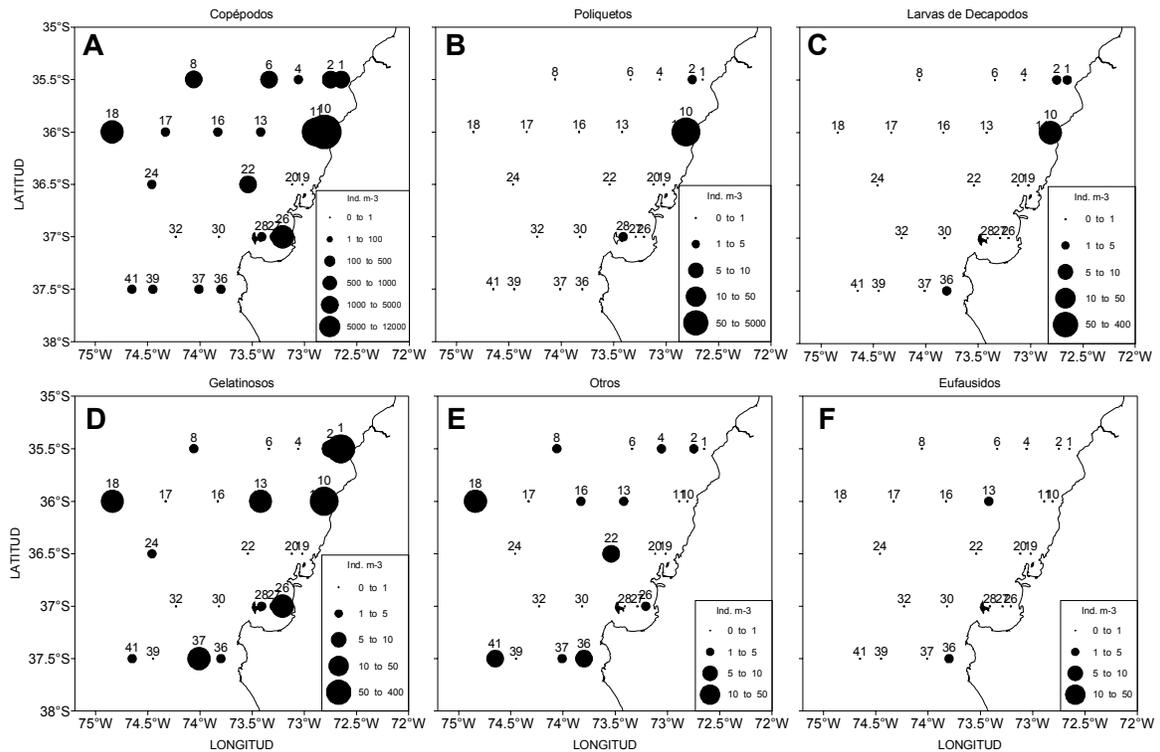


Figura 45. Distribución espacial de los principales grupos de zooplancton encontrados durante el crucero de enero 2009. (A) Copépodos, (B) poliquetos, (C) larvas de decápodos, (D) gelatinosos, (E) grupos no clasificados, y (F) eufáusidos.

Tabla 17. Abundancia numérica y relativa de las especies de copépodos encontradas durante el crucero FIP 2008-20 (Enero 2009).

Especie	Abundancia	
	N	%
<i>Oithona similis</i>	2318	43.7
<i>Paracalanus cf indicus</i>	1352.5	25.5
<i>Clausocalanus acucornis</i>	423.3	8
<i>Centropages brachiatus</i>	316.4	6
<i>Calanoides patagoniensis</i>	238.9	4.5
<i>Oithona setigera</i>	227.1	4.3
<i>Acartia tonsa</i>	128.6	2.4
<i>Rhincalanus nasutus</i>	107.3	2
<i>Pleuromamma gracilis</i>	47.4	0.9
<i>Ctenocalanus vanus</i>	44.7	0.8
<i>Metridia lucens</i>	19.1	0.4
<i>Aetideus armatus</i>	16.5	0.3
<i>Neocalanus gracilis</i>	11.3	0.2
<i>Mesocalanus tenuicornis</i>	7.8	0.1
<i>Oncaea venusta</i>	5.9	0.1
<i>Drepanopus forcipatus</i>	5.6	0.1
<i>Pleuromamma abdominalis</i>	5	0.1
<i>Triconia conifera</i>	4	0.1
<i>Calanus chilensis</i>	3	0.1
<i>Clausocalanus jobei</i>	2.5	<0.1
<i>Clausocalanus pergens</i>	2.1	<0.1
<i>Eucalanus hyalinus</i>	1.6	<0.1
<i>Calocalanus styliremis</i>	1.4	<0.1
<i>Oncaea media</i>	1.2	<0.1
<i>Nannocalanus minor</i>	1.2	<0.1
<i>Euchirella pulchra</i>	1	<0.1
<i>Paraeuchaeta weberi</i>	1	<0.1
<i>Metridia longa</i>	0.9	<0.1
<i>Euchaeta marina</i>	0.8	<0.1
<i>Euchirella rostrata</i>	0.7	<0.1
<i>Calanus australis</i>	0.6	<0.1
<i>Microsetella norvegica</i>	0.6	<0.1
<i>Vetтория granulosa</i>	0.6	<0.1
<i>Scolecithricella abbysal</i>	0.5	<0.1
<i>Clytemnestra rostrata</i>	0.5	<0.1
<i>Scaphocalanus curtus</i>	0.4	<0.1
<i>Eucalanus inermis</i>	0.4	<0.1
<i>Metridia brevicaudata</i>	0.4	<0.1
<i>Lucicutia longicornis</i>	0.4	<0.1
<i>Gaetanus brevispinus</i>	0.3	<0.1
<i>Lucicutia flavicornis</i>	0.3	<0.1
<i>Pleuromamma xiphias</i>	0.3	<0.1
<i>Clausocalanus ingens</i>	0.3	<0.1
<i>Scolecithrix bradyi</i>	0.3	<0.1
<i>Heterorhabdus spinifrons</i>	0.3	<0.1
<i>Oithona nana</i>	0.3	<0.1
<i>Microcalanus pigmaeus</i>	0.2	<0.1
<i>Pleuromamma quadrangulata</i>	0.2	<0.1
<i>Heterorhabdus papilliger</i>	0.2	<0.1
<i>Sapphirina sp</i>	0.1	<0.1
<i>Heterorhabdus lobatus</i>	0.1	<0.1
<i>Spinocalanus sp</i>	0.1	<0.1
<i>Paracalanus denudatus</i>	0.1	<0.1
<i>Mecynocera clausi</i>	0.1	<0.1
<i>Calocalanus tenuis</i>	<0.1	<0.1
<i>Candacia pachidactyla</i>	<0.1	<0.1
<i>Scolecithrix danae</i>	<0.1	<0.1
<i>Acartia negligens</i>	<0.1	<0.1
<i>Euchirella amoena</i>	<0.1	<0.1
<i>Augaptilus glacialis</i>	<0.1	<0.1
<i>Clytemnestra scutellata</i>	<0.1	<0.1
<i>Arrietelus plumifer</i>	<0.1	<0.1

6.2.3. Composición, abundancia y distribución del ictioplancton

Durante el crucero, un total de 7 taxa fueron identificados a nivel de huevos y 20 a nivel larval (Tabla 18). Las especies más abundantes en el estado huevo fueron el mote (*Normanichthys crockeri*) con 49.3 huevos / 100 m³ y el pampanito (*Stromateus stellatus*) con 35.3 huevos / 100 m³, con ambas abundancias promedio registradas en el estrato 0-200m. El mote y la agujilla (*Scomberesox saurus*) fueron las especies con presencia (en estado de huevos) en el mayor número de estaciones (5 estaciones cada una).

Tabla 18. Abundancia estandarizada de huevos de peces (en 100 m³) en tres estratos de profundidad (50-0 m; 200-50 m; 0-200 m) durante el crucero de Enero 2009. (NEP: Número de estaciones positivas).

Especies	ABUNDANCIA ESTANDARIZADA (100m ³)								
	ESTRATO								
	50-0			200-50			0-200		
	NEP	\bar{x}	DS	NEP	\bar{x}	DS	NEP	\bar{x}	DS
<i>Engraulis ringens</i>	1	1.8	0	0	0	0	2	2.1	1.57
<i>Strangomera bentincki</i>	1	0.2	0	0	0	0	0	0	0
<i>Normanichthys crockeri</i>	3	15.8	17.25	0	0	0	2	49.3	61.32
<i>Stromateus stellatus</i>	2	14.4	14.76	2	3.1	1.20	5	35.3	73.77
<i>Scomberesox saurus</i>	5	8.0	7.70	1	0.5	0	5	10.5	22.78
<i>Hippoglossina macrops</i>	4	15.5	27.61	2	1.0	0.66	2	1.0	0.75
<i>Merluccius gayi</i>	3	5.0	4.74	0	0	0	3	5.2	1.30
Indt.	3	3.4	3.46	4	2.1	2.34	4	6.3	11.95

En el estado larval (Tabla 19), las especies más abundantes fueron *Protomyctophum chilensis* (74.6 larvas/100m³, estrato 0-50 m) seguido de *Hypsoblennius sordidus* y *Merluccius gayi* con 35.5 y 35.1 larvas/100m³, respectivamente. Las especies con mayor presencia de larvas en términos de número de estaciones positivas fueron *Protomyctophum chilensis* e *Hygophum brunni* (*P. chilensis* : 13 estaciones en estrato 0-200 m; *P. chilensis* e *H. brunni*: 11 estaciones en estrato 0-50 m). Las tres especies objetivo de este estudio (*Engraulis ringens*, *Strangomera bentincki* y *Merluccius gayi*) se ubicaron entre las 6 especies más abundantes.

De las tres especies objetivo, se encontraron huevos de anchoveta en sólo 1 estación costera del sector norte (transecta 1, ver Fig. 46a-b) y en bajas concentraciones (1 – 3 h/100m³). Las larvas de esta especie se concentraron en las 3 estaciones más costeras de la transecta 5, al sur de Pta. Lavapié, en abundancias de 0.5 – 27.5

larvas/100m³ (Fig. 46c). En esta misma transecta estuvieron concentradas las larvas de sardina común (Fig. 46d-e). Finalmente, los huevos de merluza común se encontraron cerca de la costa, en las transectas 1 y 3 (Fig. 46f-d) y en concentraciones bajas (0.5 – 9.7 h/100m³). Las larvas de esta especie aparecieron en el extremo sur del área de estudio y en concentraciones de 1 – 69.1 larvas/100m³. Verticalmente, la presencia de huevos y larvas fue mayor en el estrato 0-50 m. De un total de 9 estaciones con huevos o larvas, sólo en 2 estaciones se encontraron huevos o larvas entre 50 y 200 m. En general, las larvas de estas tres especies aparecieron en mayores concentraciones que los huevos, lo que es esperable dada la fecha del crucero, y presentaron una distribución costera con mayores frecuencias en el extremo sur del área de estudio fuera del Golfo de Arauco. No se encontró huevos ni larvas de estas especies dentro del Golfo de Arauco, zona que históricamente ha mostrado mayores abundancias por ser área de crianza y retención en verano (Landaeta y Castro 2006).

Tabla 19. Abundancia estandarizada de larvas de peces (100 m³) en tres estratos de profundidad (50-0 m; 200-50 m; 0-200 m) durante el crucero de Enero 2009 (NEP: Número de estaciones positivas).

Especies	ABUNDANCIA ESTANDARIZADA (100m ³)								
	ESTRATO								
	50-0			200-50			0-200		
	NEP	\bar{x}	DS	NEP	\bar{x}	DS	NEP	\bar{x}	DS
<i>Engraulis rengins</i>	3	10.4	14.82	1	0.5	0	0	0	0
<i>Strangomera bentincki</i>	3	24.7	38.50	1	0.6	0	1	3.1	0
<i>Merluccius gayi</i>	2	35.1	48.17	0	0	0	1	0.4	0
<i>Hygophum bruuni</i>	11	31.7	53.87	4	1.3	1.21	9	3.7	6.48
<i>Protomyctophum (hierops) chilensis</i>	11	70.6	186.19	3	0.7	0.23	13	20.5	44.16
<i>Diogenichthys atlanticus</i>	1	0.5	0	0	0	0	1	0.4	0
<i>Lampanyctodes hectoris</i>	1	8.7	0	1	0.5	0	0	0	0
<i>Lampanyctus iselinoides</i>	3	5.8	6.71	2	1.4	1.26	2	0.9	0.14
<i>Lampanyctus parvicauda</i>	1	3.2	0	0	0	0	1	2.0	0
<i>Paralepididae</i>	1	1.2	0	0	0	0	0	0	0
<i>Hippoglossina macrops</i>	1	1.8	0	0	0	0	2	1.1	0.870
<i>Symbolophorus sp.</i>	1	3.6	0	0	0	0	0	0	0
<i>Sebastes oculatus</i>	1	3.6	0	0	0	0	0	0	0
<i>Hypsoblennius sordidus</i>	2	35.5	47.60	0	0	0	0	0	0
<i>Helcogrammoides cunninghami</i>	1	1.2	0	0	0	0	0	0	0
<i>Normanichthys crockeri</i>	4	19.2	33.27	0	0	0	3	0.7	0.88
<i>Scorpaenopsis saurus</i>	0	0.0	0	1	0.6	0	0	0	0
<i>Gobiesox marmoratus</i>	1	6.2	0	0	0	0	0	0	0
<i>Macrouridae</i>	4	4.0	5.51	0	0	0	1	0.1	0
<i>Vinciguerra lucetia</i>	1	1.0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Indt.</i>	5	4.0	2.09	1	0.6	0	2	0.5	0.22

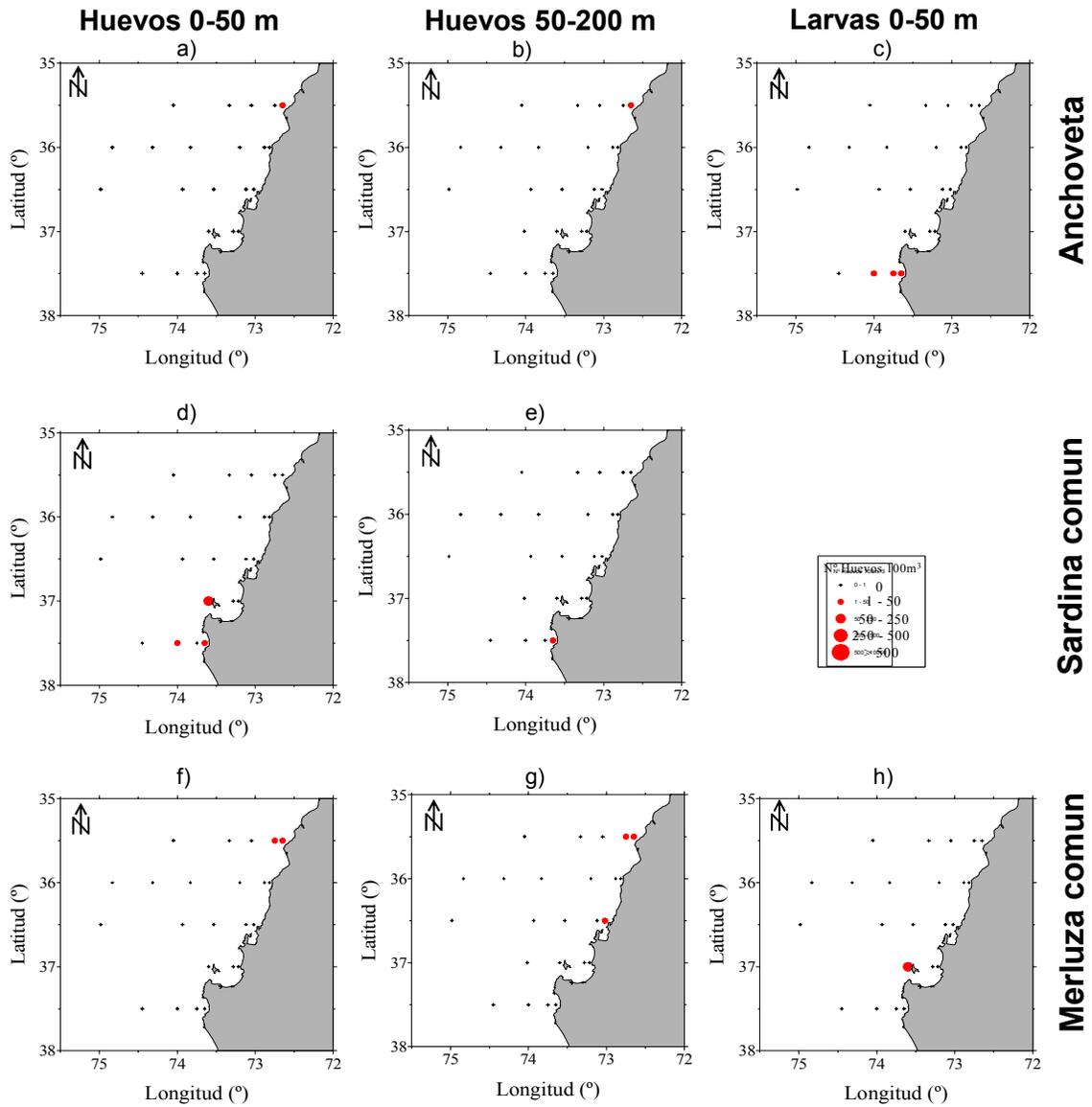


Figura 46. Huevos y larvas de anchoveta, sardina común y merluza común durante el crucero de enero 2009. a) Huevos de anchoveta (0-50m), b) huevos de anchoveta (0-200m), c) larvas de anchoveta (0-50-m), d) larvas de sardina común (0-50m), e) larvas de sardina común (0-200m), f) huevos de merluza común (0-50m), g) huevos de merluza común (0-200m) y h) larvas de merluza común (0-50m).

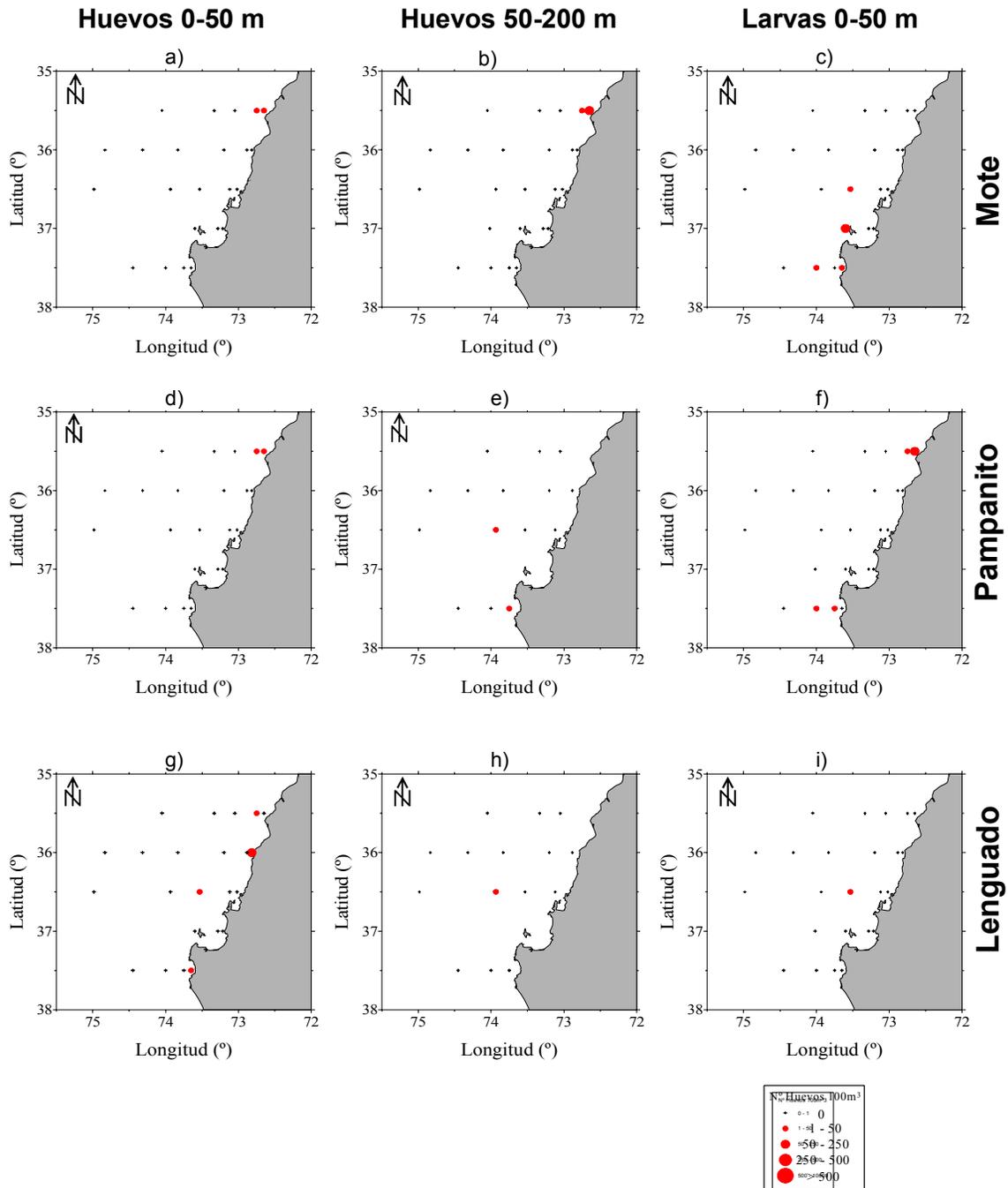


Figura 47. Huevos y larvas de mote, pampanito y lenguado de ojos grandes durante el crucero de enero 2009. a) Huevos de mote (0-50m), b) huevos de mote (0-200m), c) larvas de mote (0-50-m), d) larvas de pampanito (0-50m), e) huevos de pampanito (50-200m), f) huevos de pampanito (0-200m), g) huevos de lenguado de ojos grandes (0-50m) y h) huevos de lenguado de ojos grandes (50-200m), e i) huevos de lenguado de ojos grandes (0-200m).

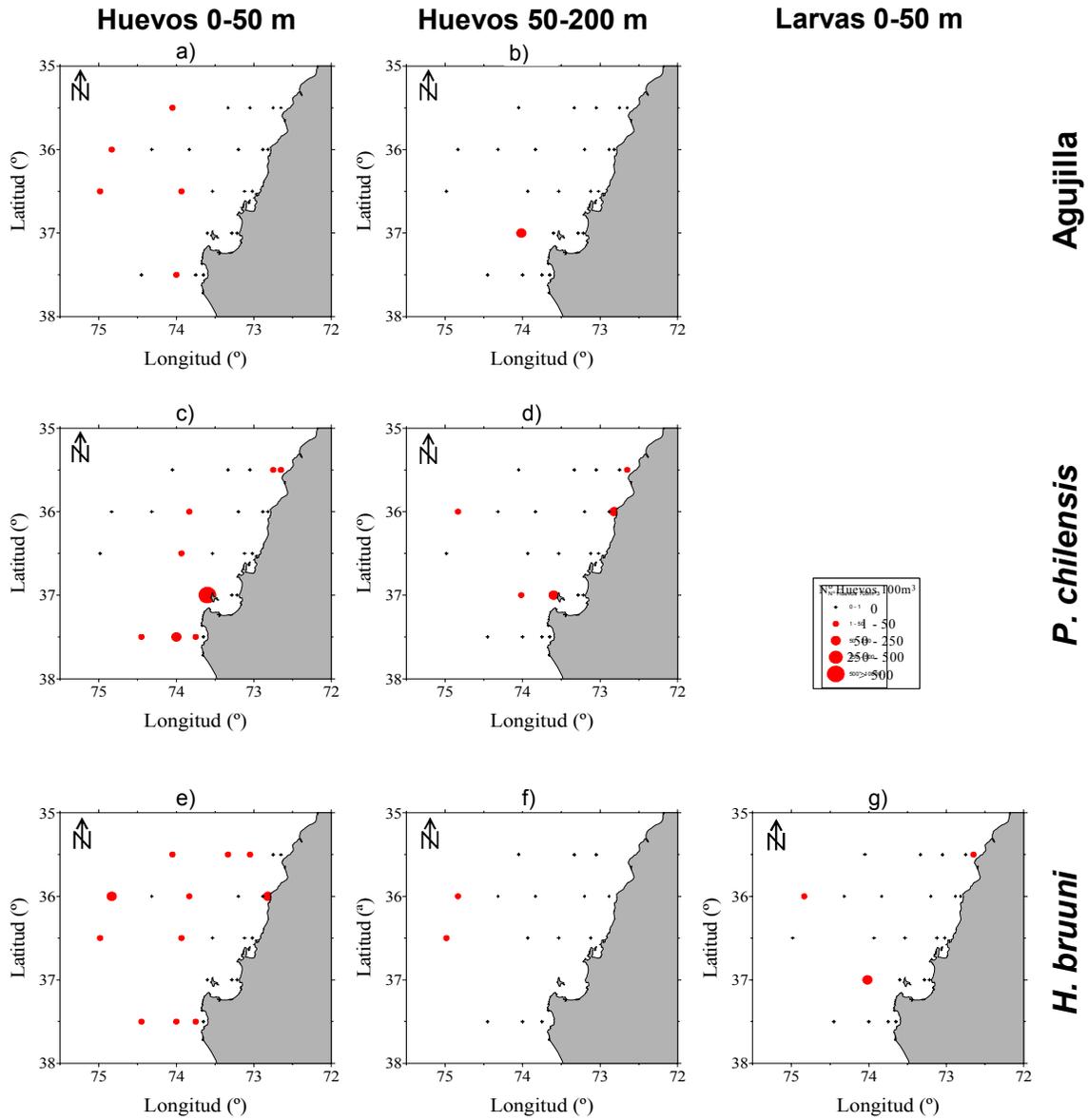


Figura 48. Huevos y larvas de agujilla, *Protomyctophum chilensis* e *Hygophum bruuni* durante el crucero de enero 2009. a) Huevos de agujilla (0-50m), b) huevos de agujilla (0-200m), c) larvas de *P. chilensis* (0-50m), d) larvas *P. chilensis* (0-200m), e) larvas de *H. bruuni* (0-50m), f) larvas de *H. bruuni* (50-200m), g) larvas de *H. bruuni* (0-200m).

La distribución de huevos de otras especies varió tanto en el sentido costa-océano como entre las zonas norte y sur (Fig. 47-48). Los huevos y larvas de mote (*Normanichthys crockeri*), pampanito (*Stromateus stellatus*) y lenguado de ojo grandes *Hyppoglossina macrops* tendieron a coincidir con la distribución de anchoveta, sardina común y merluza común (Fig. 47). Finalmente, otras especies como la agujilla (*Scomberesox saurus*) y los mictófidos *Protomyctophum (hieronps) chilensis* o *Hygophum bruuni* se encontraron en mayores concentraciones en estaciones oceánicas e intermedias a lo largo de toda la zona de estudio (Fig. 48).

6.3. Objetivo específico 3. *Determinar las variaciones mensuales en la zona costera de las variables señaladas en 4.1 y 4.2, con observaciones realizadas en, a lo menos, 2 estaciones costeras dentro de la zona de estudio.*

En el presente informe se entregan los resultados de las observaciones mensuales en las Estaciones 18 y 5 para el periodo correspondiente a este proyecto (Septiembre 2008-Agosto 2009). Para algunas variables se complementa esta información con la serie de tiempo completa desde el 2002 (hidrografía, nutrientes, biomasa de zooplancton, ictioplancton, producción primaria y respiración comunitaria). Para TSM y clorofila-a, se complementa la serie de tiempo de mediciones *in situ* con información para el área que comprende las dos estaciones, derivada de imágenes satelitales MODIS-Aqua.

6.3.1. Hidrografía en las Estaciones 18 y 5

Estación 18. El análisis de la data hidrográfica en la Estación 18 (Figura 50) mostró que durante los inviernos de 2008 y 2009 se reestablecieron parcialmente las condiciones observadas con anterioridad al invierno anómalamente frío y seco que se registró en 2007 (Fig. 49b-c, 50a). Las condiciones anómalas de dicho invierno se evidenciaron tanto en un cambio en el patrón de vientos meridionales en la zona (Fig. 49a) como en una disminución en el caudal del Río Itata (Fig. 49b) y en las anomalías de TSM en el área y en la región El Niño 1+2 (Fig. 49c), que generaron cambios en la estratificación y

ventilación de la columna de agua (Fig. 50b-d), así como en las distribuciones verticales de ciertos nutrientes inorgánicos (ver más adelante).

Durante la primavera-verano 2008-2009 se observaron condiciones típicamente esperadas para la época de surgencia activa, con un incremento en la temperatura superficial a valores de 14-15°C y el concurrente ascenso de la isoterma de 11.5°C hasta ca. 20 m de la superficie. Un ascenso similar se observó para isohalinas e isopícnas características del AESS (ver 6.2.1), con concentraciones de oxígeno disuelto $<2 \text{ mL L}^{-1}$ (Fig. 49 y Fig. 10 en Sobarzo et al. 2007). Las concentraciones de oxígeno disuelto en superficie llegaron a valores $<4 \text{ mL L}^{-1}$ durante Enero 2009 (Fig. 50c), período en que los vientos favorables a la surgencia soplaron en forma persistente en toda la región de estudio (Fig. 24-25).

A escala estacional (Fig. 51), la temperatura de los 10 primeros metros de la columna de agua siguió muy cercanamente el ciclo anual de flujo neto de calor superficial, resultando en una capa de mezcla somera y cálida desde Noviembre a Abril. Las oscilaciones de las isotermas bajo los 15 m de profundidad responden principalmente a la interacción entre vientos favorables a la surgencia costera, que predominan en primavera y verano, y los que favorecen el hundimiento en invierno (Fig. 51a). La distribución vertical de la salinidad (Fig. 51b) en los primeros 20 m está determinada en una escala estacional por el ciclo de descarga de agua dulce por ríos y precipitación, mientras que bajo los 25 m depende del patrón estacional de surgencia. La distribución del oxígeno disuelto (Fig. 51c) responde marcadamente al efecto de la surgencia en primavera y verano, y en casos extremos la isolínea de 0.5 mL L^{-1} puede ascender hasta los 20 m de profundidad, donde aguas hipóxicas alcanzarían la capa fótica. La mayor oxigenación de las capas más profundas en meses de invierno (notoriamente en los inviernos de 2005 y 2006, Fig. 50c), responde al efecto combinado del mayor aporte de agua dulce y al hundimiento de las capas superficiales propiciado por un predominio de vientos meridionales orientados hacia el polo (Fig. 49a).

Finalmente, al examinar las series de tiempo transformadas en anomalías (Fig. 52) se observaron marcadas diferencias inter-anales en la estructura de temperatura entre los períodos pre- y post-2007 (Fig. 52a), así como la intrusión a mayores profundidades de aguas superficiales menos salinas en los inviernos de 2005 y 2006 (Fig. 52b). Se observó

además una mayor ventilación de las capas más profundas en los inviernos de 2004, 2005 y 2006, lo que se contrapone con aguas menos oxigenadas en los 3 inviernos siguientes (Fig. 52c), y con un predominio de anomalías de densidad positivas en toda la columna de agua (Fig. 52d).

Estación 5. Las condiciones hidrográficas en la Estación 5, con una profundidad de 50 m y a ca. 6 km de la entrada de la Bahía de Coliumo, indican una mayor influencia continental que en la Estación 18. Esto se reflejó en un mayor aporte de agua dulce durante el período de invierno, que generó una capa de mezcla de muy baja salinidad en y una inversión térmica en Julio-Agosto 2009 (Fig. 53a-b). Estos periodos coincidieron con una mayor oxigenación del estrato superior (<30 m), mientras que las condiciones de bajo oxígeno en superficie (< 4 mL L⁻¹) ocurrieron sobre un período de 2-3 meses en verano (Diciembre a Febrero, Fig. 53c), y fueron consistentes con las variaciones observadas para el mismo periodo en la Estación 18 (Fig. 50c). La variabilidad en los perfiles de fluorescencia indicó que el fitoplancton se agregó fuertemente en la capa superficial (0-15 m) durante los meses de primavera y verano (Fig. 53d). Estas condiciones semi-estuarinas parecen estar fuertemente influenciadas por la cercanía de la desembocadura del Río Itata.

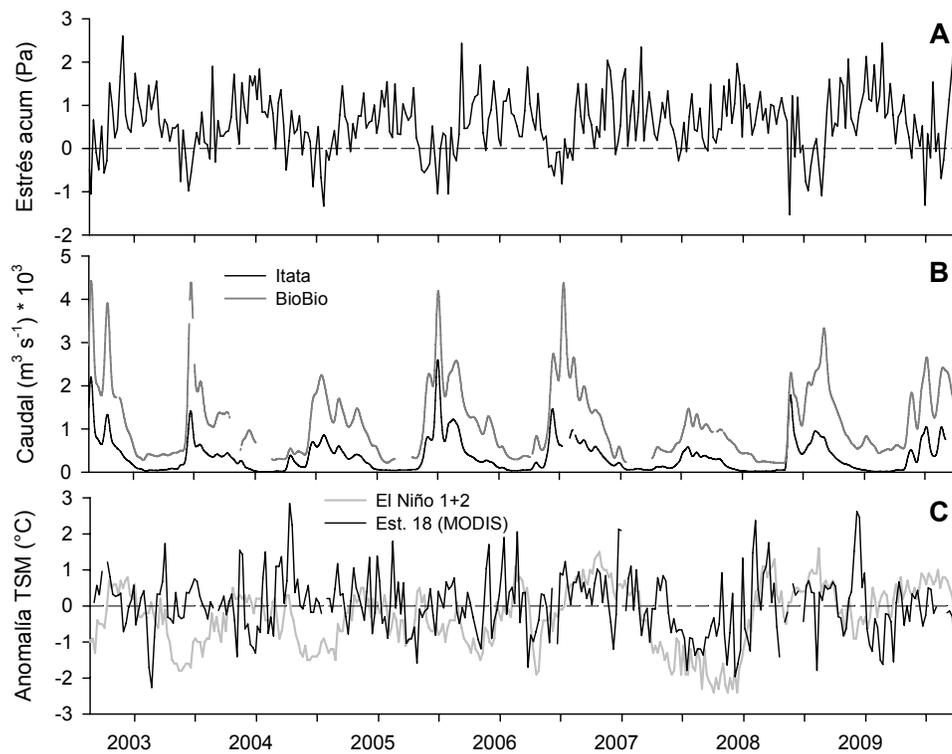


Figura 49. Variabilidad en el forzamiento atmosférico (A), descargas de agua dulce (B) y TSM en el área donde se encuentra la Estación 18. Los datos de viento corresponden a estrés meridional acumulado sobre períodos de 1 semana y provienen de imágenes QuikSCAT para un pixel centrado en 36°37.5'S y 73°37.5'W. Los datos de caudal para los ríos Itata y BioBio fueron obtenidos de la Dirección General de Aguas. Los datos de TSM provienen de imágenes semanales MODIS-Aqua para un área de 3x3 pixeles (12x12 km²) centrada en 36°30'S, 73°7.5'W, alrededor de la Estación 18.

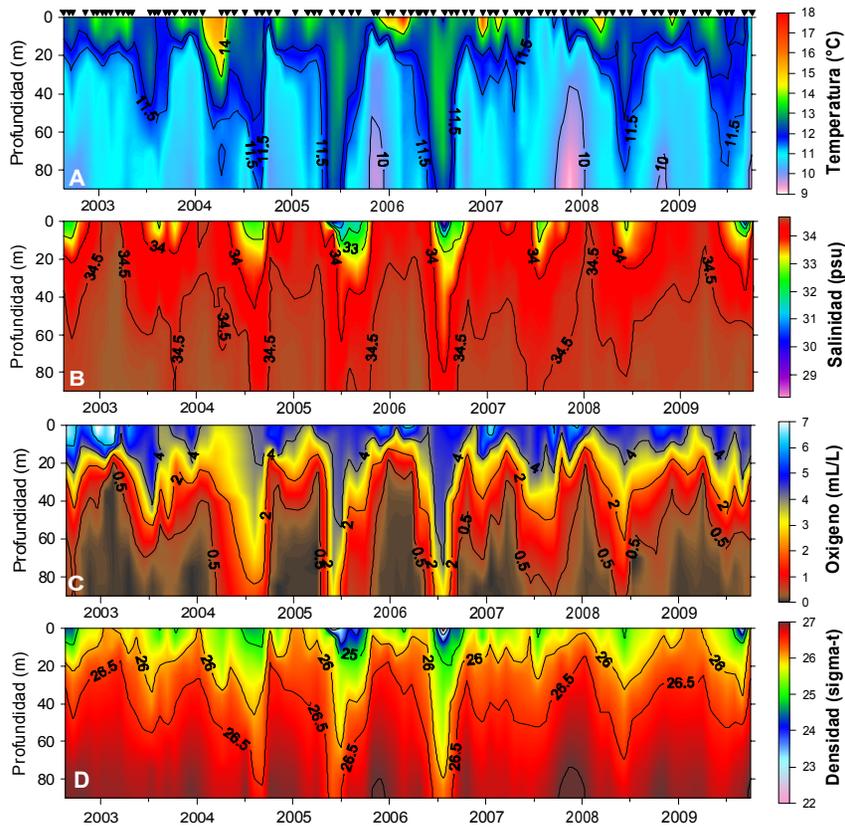


Figura 50. Serie de tiempo de la estructura vertical de (A) temperatura, (B) salinidad, (C) oxígeno disuelto y (D) densidad en la **Estación 18** entre Agosto 2002 y Septiembre 2009. Los símbolos negros sobre el panel superior corresponden a las fechas de muestreo. La barra gris indica las fechas correspondientes al presente informe.

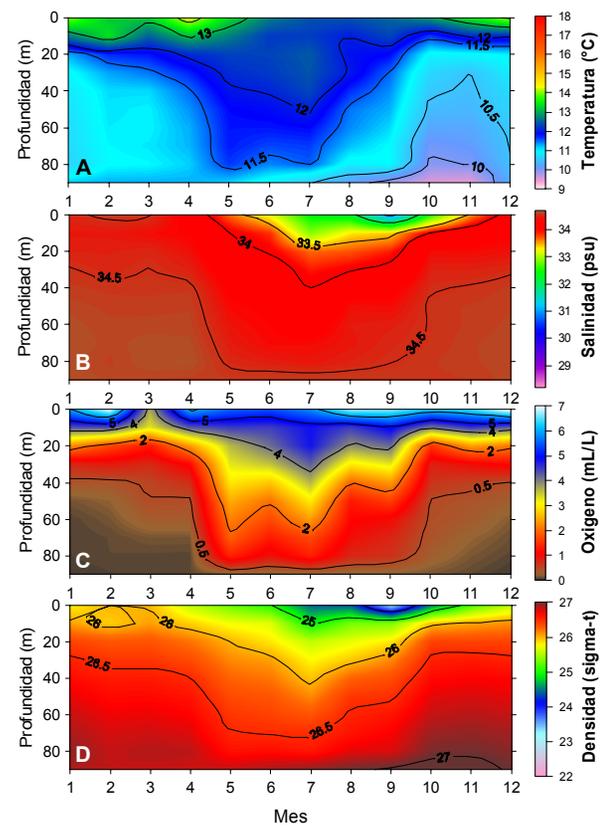


Figura 51. Climatologías mensuales de la estructura vertical de (A) temperatura, (B) salinidad, (C) oxígeno disuelto y (D) densidad en la **Estación 18**. En los cálculos se utilizaron observaciones colectadas entre Agosto 2002 y Septiembre 2009.

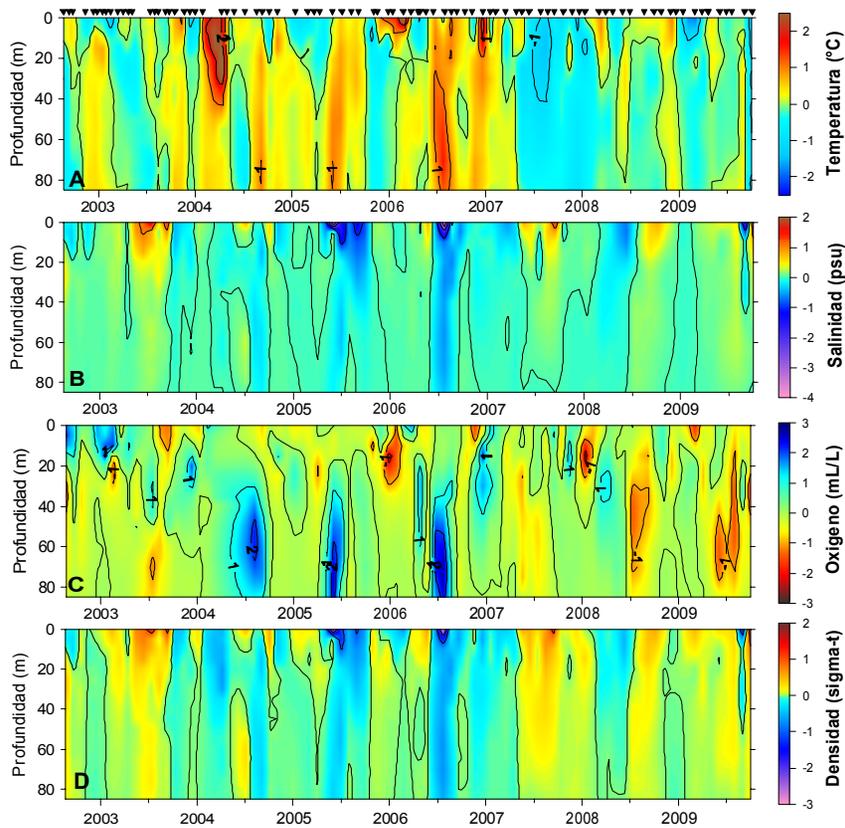


Figura 52. Serie de tiempo de la estructura vertical de anomalías de (A) temperatura, (B) salinidad, (C) oxígeno disuelto y (D) densidad en la **Estación 18**, desde Agosto 2002 a Septiembre 2009. Los contornos gruesos indican el cero en cada panel, y los símbolos negros sobre el panel superior corresponden a las fechas de muestreo. La barra gris indica las fechas correspondientes al presente informe.

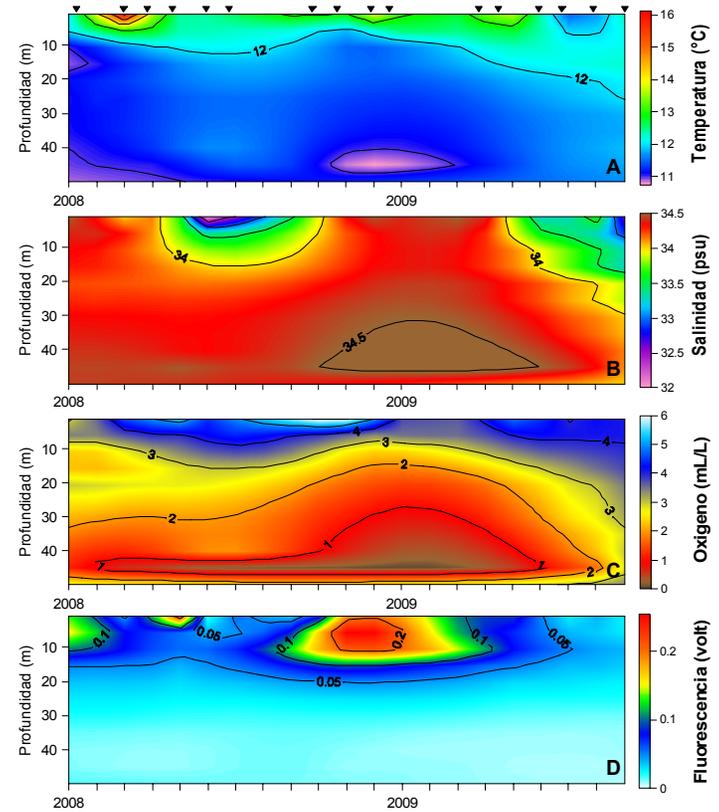


Figura 53. Variabilidad en perfiles de (A) temperatura, (B) salinidad, (C) oxígeno disuelto y (D) fluorescencia en la **Estación 5**, frente a Bahía Coliumo, para el periodo Enero 2008 a Septiembre 2009. Los símbolos sobre el panel superior indican las fechas de muestreo.

6.3.2. Variables químicas de la columna de agua en la Estación 18

Entre Septiembre 2008 y Septiembre 2009 se realizaron 13 muestreos de nutrientes en la Estación 18. Al comparar las distribuciones verticales observadas durante el último año con la serie de tiempo completa (Fig. 54) se destaca la persistencia de algunos cambios en la disponibilidad de nutrientes. Las concentraciones de fosfato y silicato en las capas más profundas siguieron siendo menores que lo observado antes de 2007 (Fig. 54d-e), por lo que la llegada de aguas con altas concentraciones de estos nutrientes a la zona fótica se ha hecho cada vez más infrecuente. Durante el último año esta situación fue particularmente notoria para el silicato (Fig. 54e), mientras que las concentraciones de nitrato fueron similares a los registrados en años previos al 2007 (Fig. 54), con concentraciones de 20 μM llegando hasta profundidades de 20 m y una disminución a valores por debajo de los 10 μM en la capa fótica durante el verano. No obstante, en el último invierno se verificó una disminución en las concentraciones de nitrato cerca del fondo, similar a la observada en el invierno de 2005 (Fig. 54).

El ciclo anual promedio de nutrientes calculado utilizando la serie completa (Fig. 55 muestra la disminución del nitrato en los primeros 10 m de la columna de agua durante primavera y parte del verano, reflejando su utilización por organismos autotróficos durante la época de surgencia. Durante toda la primavera y verano se observa un núcleo de altas concentraciones de nitrato ($> 25\mu\text{M}$) centrado en 40 m de profundidad, y una disminución/profundización de estas concentraciones durante el invierno (Fig. 55a). Las concentraciones de nitrito aumentan en las capas profundas durante la época más productiva (Fig. 55b). El amonio presenta un patrón estacional similar al del nitrito (Fig. 55c), aunque en promedio se observan concentraciones de hasta 30 μM , y por debajo de los 80 m, durante gran parte del año (Fig. 55c). El fosfato presenta un ciclo anual muy similar al del nitrato, con un ascenso de las isolíneas en primavera-verano y una disminución de sus concentraciones en superficie, y un incremento en las concentraciones cerca del fondo a fines de verano (Fig. 55d). Las concentraciones de silicato también aumentan a valores $> 30 \mu\text{M}$ cerca del fondo entre Enero y Julio, disminuyen a $< 10 \mu\text{M}$ cerca de la superficie en primavera-verano, y presentan un leve aumento en las capas más superficiales durante la época lluviosa (Fig. 55e).

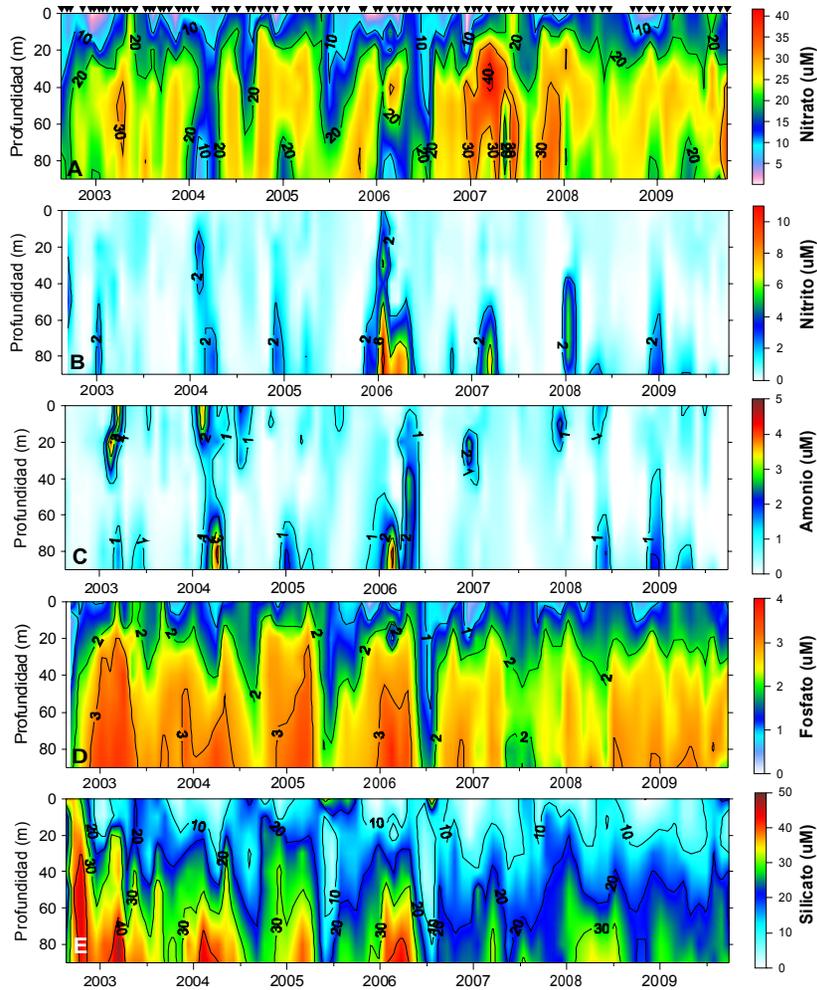


Figura 54. Variación mensual en los perfiles de (A) nitratos, (B) nitritos, (C) amonio, (D) fosfatos y (E) silicatos en la Estación 18 entre Agosto 2002 y Septiembre 2009. Los símbolos sobre el panel superior indican las fechas de muestreo. La barra gris indica las fechas correspondientes al presente informe.

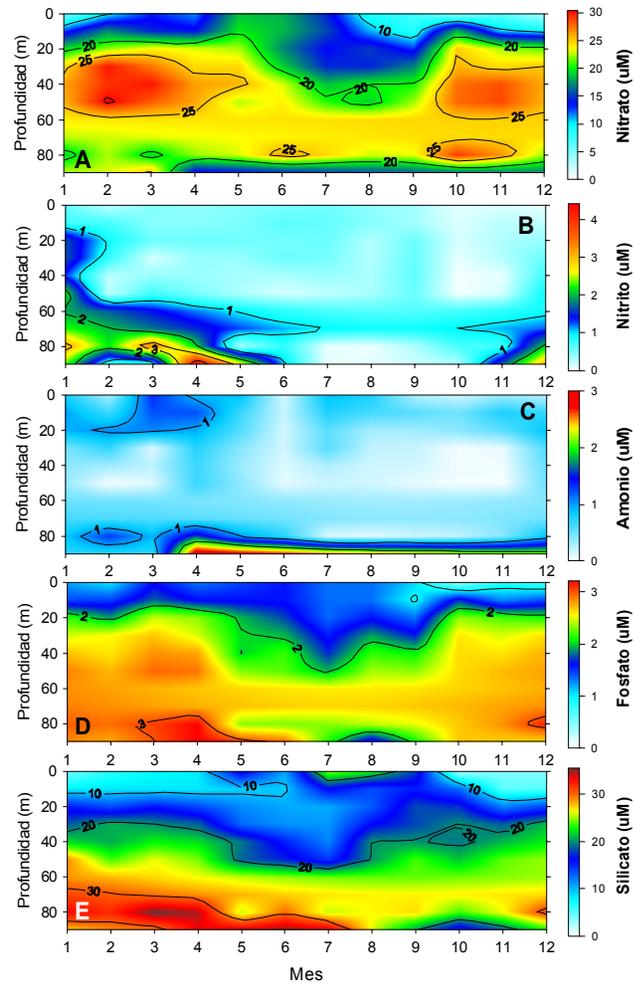


Figura 55. Climatologías mensuales de la estructura vertical de (A) nitratos, (B) nitritos, (C) amonio, (D) fosfatos y (E) silicatos en la Estación 18 entre Agosto 2002 y Septiembre 2009.

6.3.3. Biomasa y composición del fitoplancton en la Estación 18

La clorofila-a total (Cl-a T) en la Estación 18 mostró marcadas fluctuaciones estacionales, con altas concentraciones ($>20 \text{ mg m}^{-3}$) principalmente durante los muestreos de primavera y un máximo de ca. 50 mg m^{-3} en Octubre 2008 (Fig. 56, panel superior). Las mayores concentraciones de Cl-a T ($>2 \text{ mg m}^{-3}$) se ubicaron en la capa más superficial ($<30 \text{ m}$) durante la mayor parte del periodo. La clorofila de la fracción $<20 \mu\text{m}$ contribuyó en forma permanente a la biomasa fitoplanctónica total (media \pm DS: $71 \pm 34\%$), aunque no se observó una estacionalidad tan marcada como en el caso de Cl-a T. Los valores más altos de Cl-a <20 ($>2 \text{ mg m}^{-3}$) se encontraron en la capa superficial ($<20 \text{ m}$) y coincidieron con los máximos de Cl-a T (máximo en Octubre 2008). Finalmente, la clorofila de la fracción $<3 \mu\text{m}$ (Cl-a <3) fue un componente muy minoritario del total (media \pm DS: $7 \pm 9 \%$), sin una estacionalidad marcada, y con valores máximos ($>0.05 \text{ mg m}^{-3}$) durante muestreos de otoño e invierno (Fig. 56, panel inferior), asociados a la entrada de aguas oceánicas hacia la costa. Las estadísticas básicas de estas estimaciones se presentan en la Tabla 20.

Las concentraciones de feopigmentos totales (Fgm-a T) fueron en general bajas ($<1 \text{ mg m}^{-3}$) en la capa más superficial, pero incrementaron en los meses de primavera y verano (Octubre 2008 a Enero 2009). Este cambio se reflejó además en el resto de la columna de agua (Fig. 57, panel superior), lo que sugiere la exportación de materia orgánica durante meses de mayor biomasa fitoplanctónica y, presumiblemente, mayor producción biológica. Los feopigmentos en la fracción $<20 \mu\text{m}$ (Fgm-a <20) siguieron una tendencia muy similar a los Fgm-a T (Fig. 57, panel intermedio), lo cual es esperable dado que la contribución media (\pm DS) de esta fracción al total de feopigmentos fue $86 \pm 28\%$. Finalmente, las concentraciones de feopigmentos en la fracción $<3 \mu\text{m}$ (Fgm-a <3) fueron muy bajas (media \pm DS: $7 \pm 11 \%$ del total) y mostraron un patrón temporal similar al de Cl-a <3 (Fig. 56, panel inferior). Las estadísticas básicas de estas estimaciones se detallan en la Tabla 20.

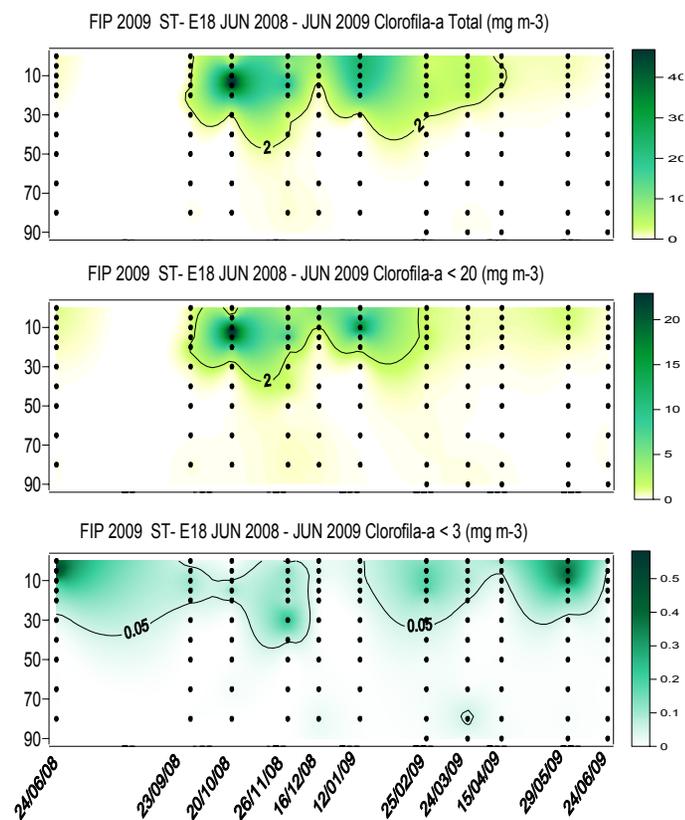


Figura 56. Variabilidad temporal en los perfiles de clorofila-a (mg m^{-3}) en la Estación 18 para el período comprendido entre Agosto 2008 y Agosto 2009. Panel superior: clorofila-a total; panel intermedio: fracción $<20 \mu\text{m}$; panel inferior: fracción $<3 \mu\text{m}$.

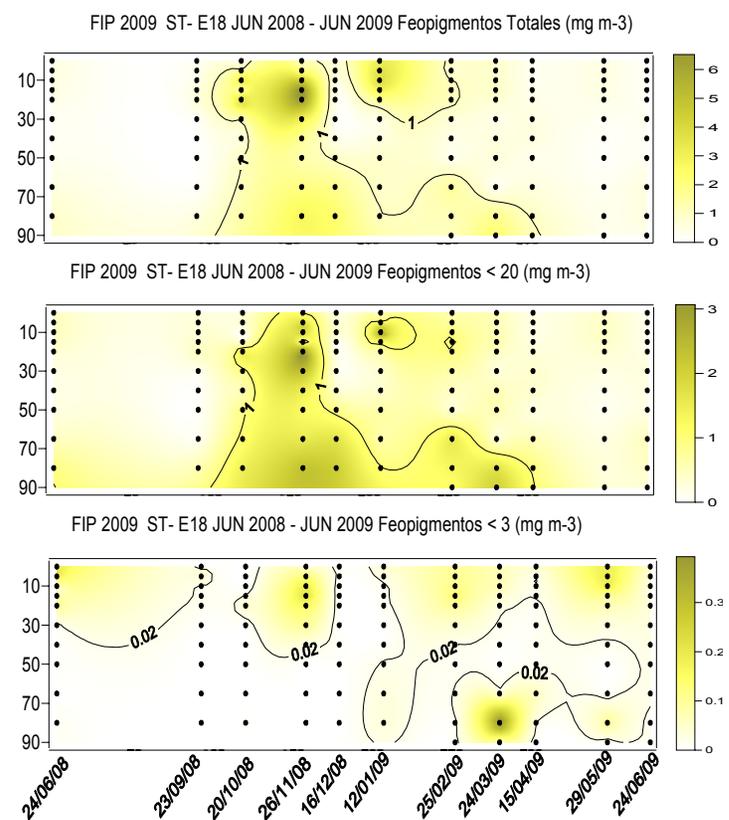


Figura 57. Variabilidad temporal en los perfiles de feopigmentos (mg m^{-3}) en la Estación 18 para el período comprendido entre Agosto 2008 y Agosto 2009. Panel superior: clorofila-a total; panel intermedio: fracción $<20 \mu\text{m}$; panel inferior: fracción $<3 \mu\text{m}$.

Tabla 20. Concentraciones (mg m^{-3}) de clorofila-a y feopigmentos totales (Cl-a T y Fgm-a T) y sus fracciones (<20 y 3 μm) en la columna de agua (0-80 m de profundidad) durante la serie de tiempo Estación 18 entre Junio 2008 y Junio 2009: estadística básica.

Estación	Pigmentos	n	Media DS	Mediana	Rango
18	Clorofila-a				
	Cl-a Tot	115	3.4 \pm 8.1	0.4	0.0 - 53.1
	Cl-a <20	115	1.4 \pm 3.9	0.3	0.0 - 25.5
	Cl-a <3	115	0.1 \pm 0.1	0.02	0.0 - 0.7
18	Feopigmentos-a				
	Fgm-a Tot	115	0.8 \pm 0.9	0.5	0.0 - 4.4
	Fgm-a <20	115	0.6 \pm 0.5	0.4	0.0 - 3.3
	Fgm-a <3	115	0.04 \pm 0.1	0.02	0.0 - 0.4

Los análisis de las muestras de diatomeas obtenidas de la Estación 18 durante el período Junio 2008 a Junio 2009 indicaron una alta variabilidad estacional y vertical (Fig. 58a). Las variaciones estacionales estuvieron determinadas por las bajas abundancias de diatomeas a los 0 y 10 m de profundidad durante Junio 2008 (1024 y 200 células L^{-1}), Mayo 2008 (2800 y 5080 células L^{-1}) y Junio 2009 (29360 y 16200 células L^{-1}). Se observó un aumento sustancial en la abundancia total de diatomeas a inicios de la primavera de 2008 (Octubre), seguido por un sostenido incremento que alcanzó su máximo en Enero 2009, con 7.6×10^6 células L^{-1} en superficie (Fig. 58a). La abundancia de diatomeas disminuyó en forma gradual durante el resto del verano, y alcanzó valores mínimos en Mayo 2009 (2800 células L^{-1}).

Los principales géneros de diatomeas durante el período de estudio correspondieron a *Chaetoceros*, *Skeletonema*, *Thalassiosira*, *Leptocylindrus* y *Corethron*, los que en promedio representaron más de 85% del total de diatomeas cuantificadas (Fig. 58b-f). Se observó una dominancia numérica de *Chaetoceros*, *Skeletonema* y *Thalassiosira*, que estuvieron presentes durante más del 90% del período de estudio (Fig. 58d-f). Por otro lado, *Leptocylindrus* y *Corethron* fueron menos abundantes y de aparición más esporádica (Fig. 58d-f). Las diatomeas del género *Chaetoceros* se presentaron en abundancias que oscilaron entre 1.6×10^3 y 3.8×10^6 células L^{-1} y se concentraron en el estrato más superficial, alcanzando sus máximas abundancias a fines del período primaveral (Fig. 59a). Las principales especies que componen este grupo correspondieron a *Chaetoceros compressus*, *Chaetoceros radicans*, *Chaetoceros debilis*,

Chaetoceros didymus y *Chaetoceros convolutus* (Fig. 59). Estas especies constituyeron el 66% de los conteos totales de *Chaetoceros* spp., y aproximadamente un 30% de todas las diatomeas cuantificadas.

6.3.4. Abundancia y composición del microzooplancton en la Estación 18

La abundancia de microzooplancton mostró una clara variación estacional, con un marcado aumento a inicios de primavera (Octubre 2008) y una disminución gradual hasta alcanzar un mínimo en otoño (Mayo 2009, Fig. 60). El aumento y disminución de las abundancias fue abrupto en el estrato de superficie, y más gradual en el estrato más profundo (10 m), donde se registró un máximo de abundancia en Noviembre 2008 y una disminución sostenida hasta valores mínimos en Abril 2009 (Fig. 60).

Los principales componentes observados en el microzooplancton fueron los dinoflagelados y ciliados lorizados, los que en su conjunto representaron más del 85% de las abundancias totales de estos organismos en todo el período de estudio. La abundancia de dinoflagelados totales alcanzó en promedio los 1567 ind L⁻¹, con densidades máximas de 6104 ind L⁻¹ en Marzo 2009 (Fig. 61). Los géneros de dinoflagelados más abundantes correspondieron a *Scrippsiella* y *Protoperidinium*, seguidos por *Diplopsalis*, *Gonyaulax*, *Dinophysis*, y *Ceratium* (Fig. 61). Estos 6 géneros representaron más del 70% del total de dinoflagelados encontrados en el área de estudio (Fig. 61). La abundancia de ciliados lorizados totales mostró un rápido aumento en primavera, entre Septiembre y Noviembre 2008, alcanzando un máximo de 2700 individuos L⁻¹ (Fig. 62). En Diciembre 2008 la abundancia disminuyó abruptamente y se mantuvo por debajo de 1000 individuos L⁻¹ durante todo el verano y hasta comienzos de otoño.

Los principales géneros de tintínidos identificados fueron *Helicostomella*, *Tintinnopsis* y *Codonellopsis*, los que correspondieron a más del 72% de los conteos totales y a un promedio del 25% del microzooplancton total en los dos estratos analizados para todo el período de estudio (Fig. 62). El género *Helicostomella* fue el más abundante (Fig. 62b) y apareció con mayor abundancia en el estrato de 10 m. El género *Codonellopsis*, en tanto, fue dos órdenes de magnitud menos abundante y sólo fue detectado en el área de estudio durante otoño e invierno (Fig. 62d).

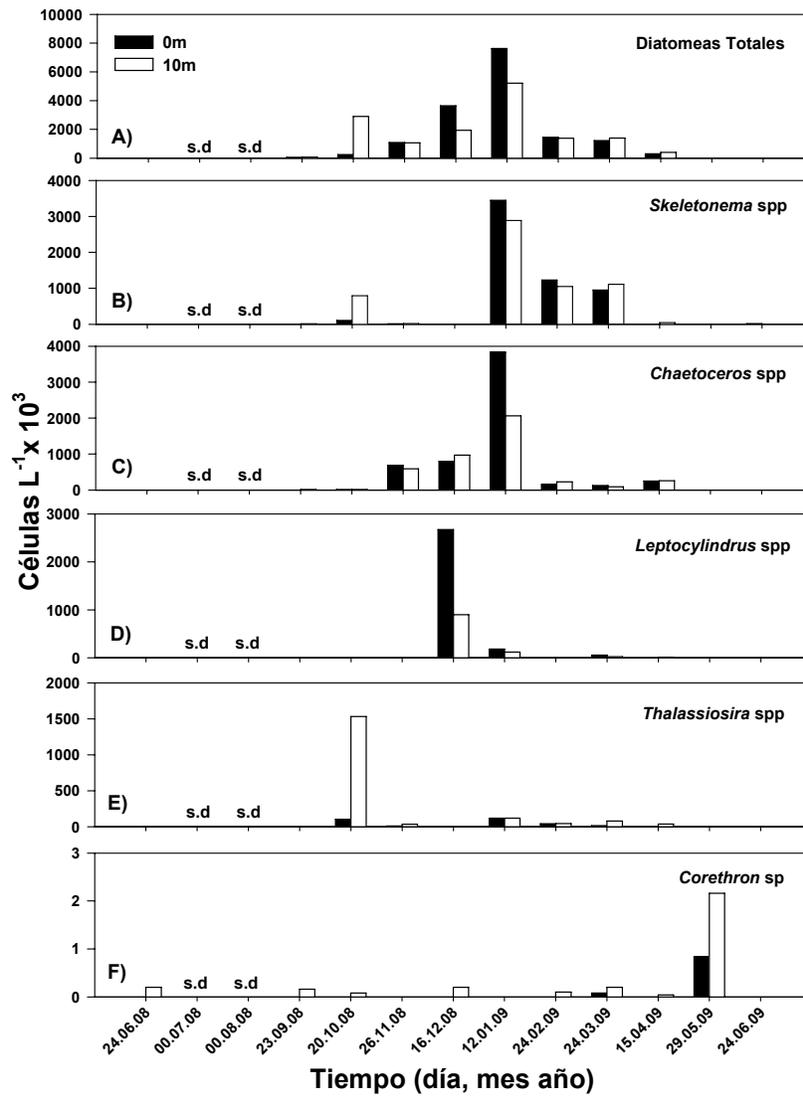


Figura 58. Abundancia de diatomeas y sus principales géneros en dos estratos de profundidad (0 y 10 m) en la Estación 18 para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.

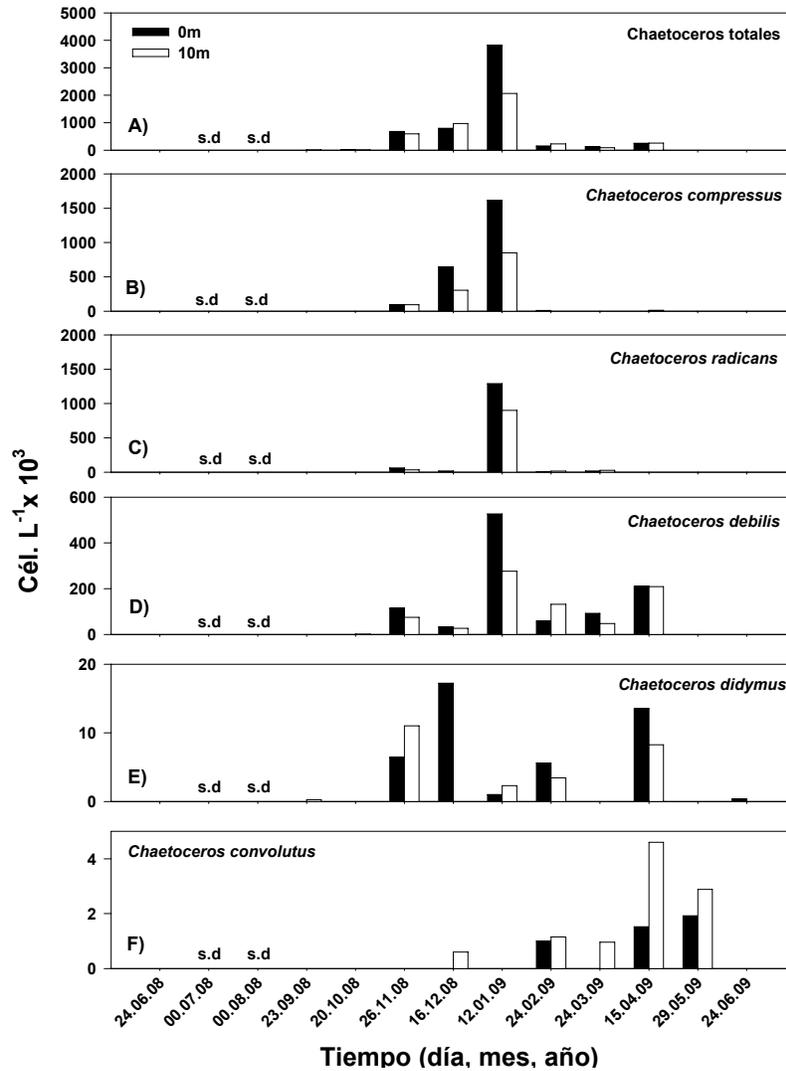


Figura 59. Abundancia estratificada de *Chaetoceros* y sus principales especies en la Estación18, para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.

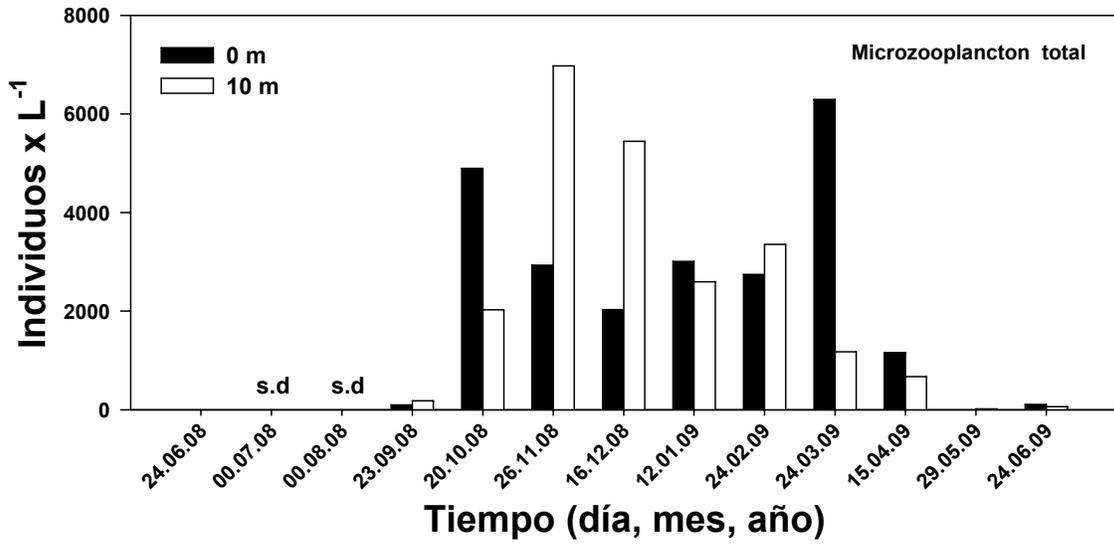


Figura 60. Abundancia estratificada de microzooplancton total a 0 y 10 m de profundidad en la Estación 18, para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.

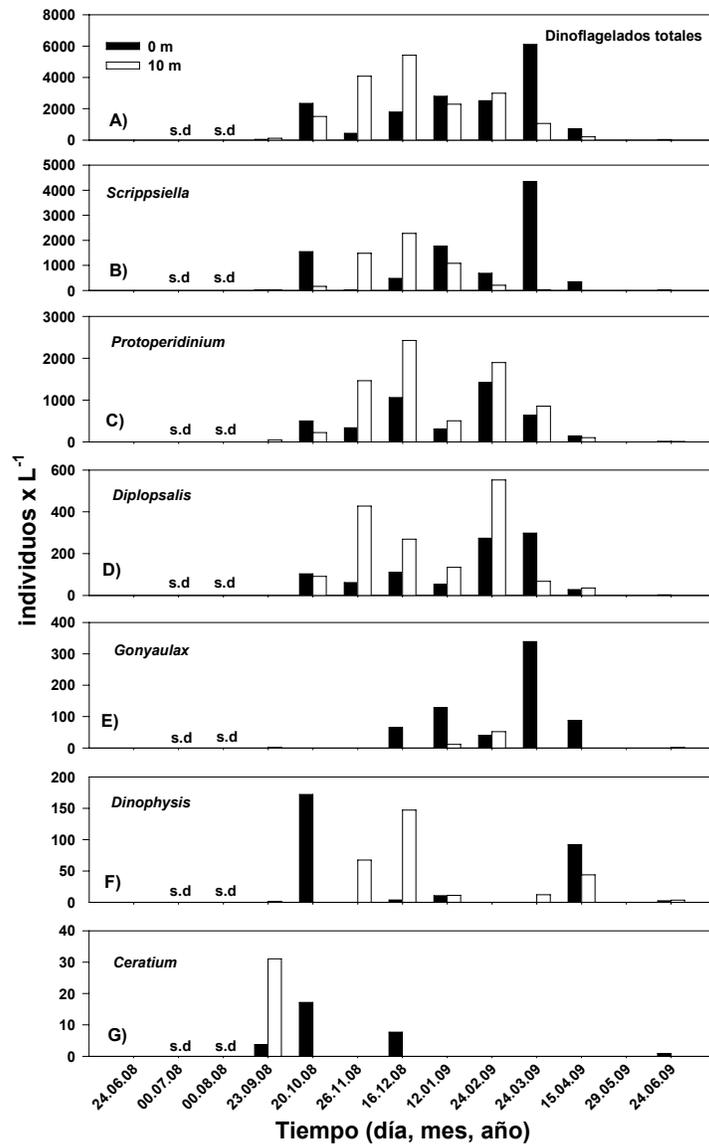


Figura 61. Abundancia de dinoflagelados a 0 y 10m de profundidad en la Estación18 para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.

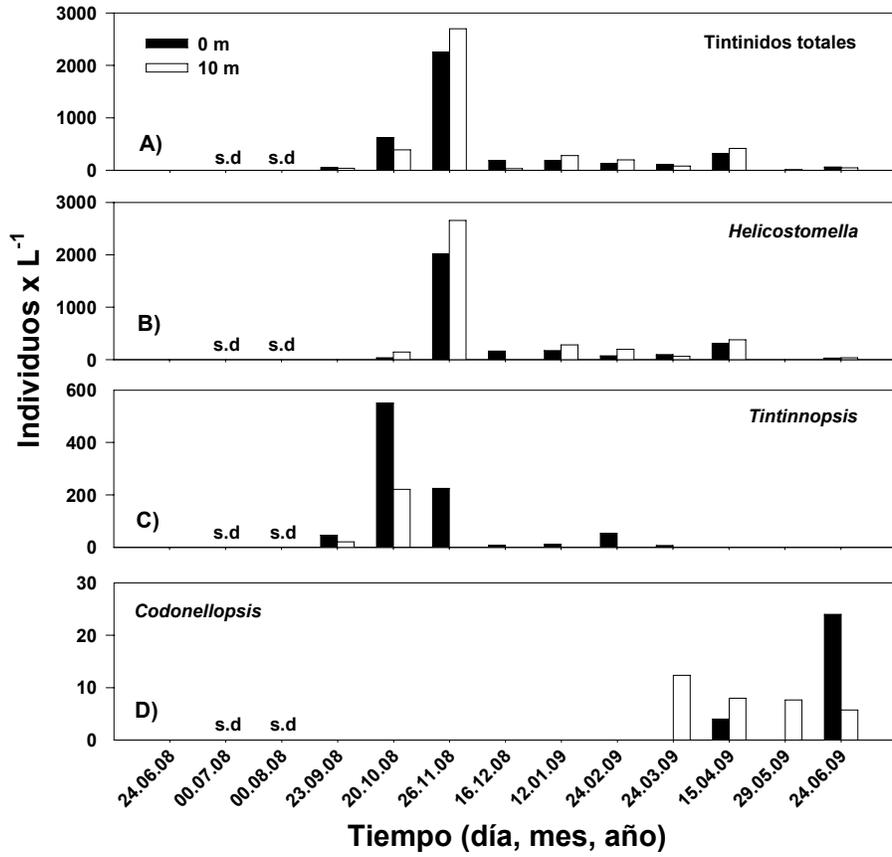


Figura 62. Abundancia estratificada de tintínidos a 0 y 10m de profundidad y sus principales géneros en la Estación 18, para el periodo Junio 2008 a Junio 2009.

6.3.5. Biomasa y composición del macrozooplancton en la Estación 18

6.3.5.1. Biomasa zooplanctónica. Durante el periodo Agosto 2008 - Junio 2009 se observaron biomásas máximas – tanto estratificadas (50 – 0 m y 80 – 50 m) como integradas (80 – 0 m) – en Octubre 2008 y Enero 2009 (Fig. 63, panel superior), períodos en que se intensificaron los vientos favorables a la surgencia.

Al examinar las biomásas observadas durante este estudio en conjunto con la información obtenida en los años anteriores (Fig. 64), se observa que los valores promedio de biomasa zooplanctónica en la Estación 18 han mostrado un incremento desde Agosto 2004 hasta Junio 2009, con valores de 2.16 mg C m⁻² y 6.25 mg C m⁻², respectivamente. Sin embargo, no existe un patrón claro de distribución temporal entre los años estudiados, manteniendo una tendencia de bajos valores en invierno y mayores concentraciones hacia finales de verano (Fig. 64). El periodo cubierto por el presente estudio mostró el mayor promedio anual observado, mientras que los años 2005, 2006 y 2007 se observaron 2.24, 1.49 y 1.54 mg C m⁻² en promedio, respectivamente, revelando una alta variabilidad inter-anual. En general, se observó que las mayores biomásas se presentaron hacia fines de verano, en asociación a la presencia de eufáusidos y de copéodos de mayor tamaño. Las fluctuaciones estacionales de la biomasa de zooplancton parecen estar fuertemente asociadas a cambios en la profundidad de la OMZ, dado que bajo condiciones de surgencia más intensa se observa una mayor agregación del zooplancton en la zona costera (Escribano et al., 2007).

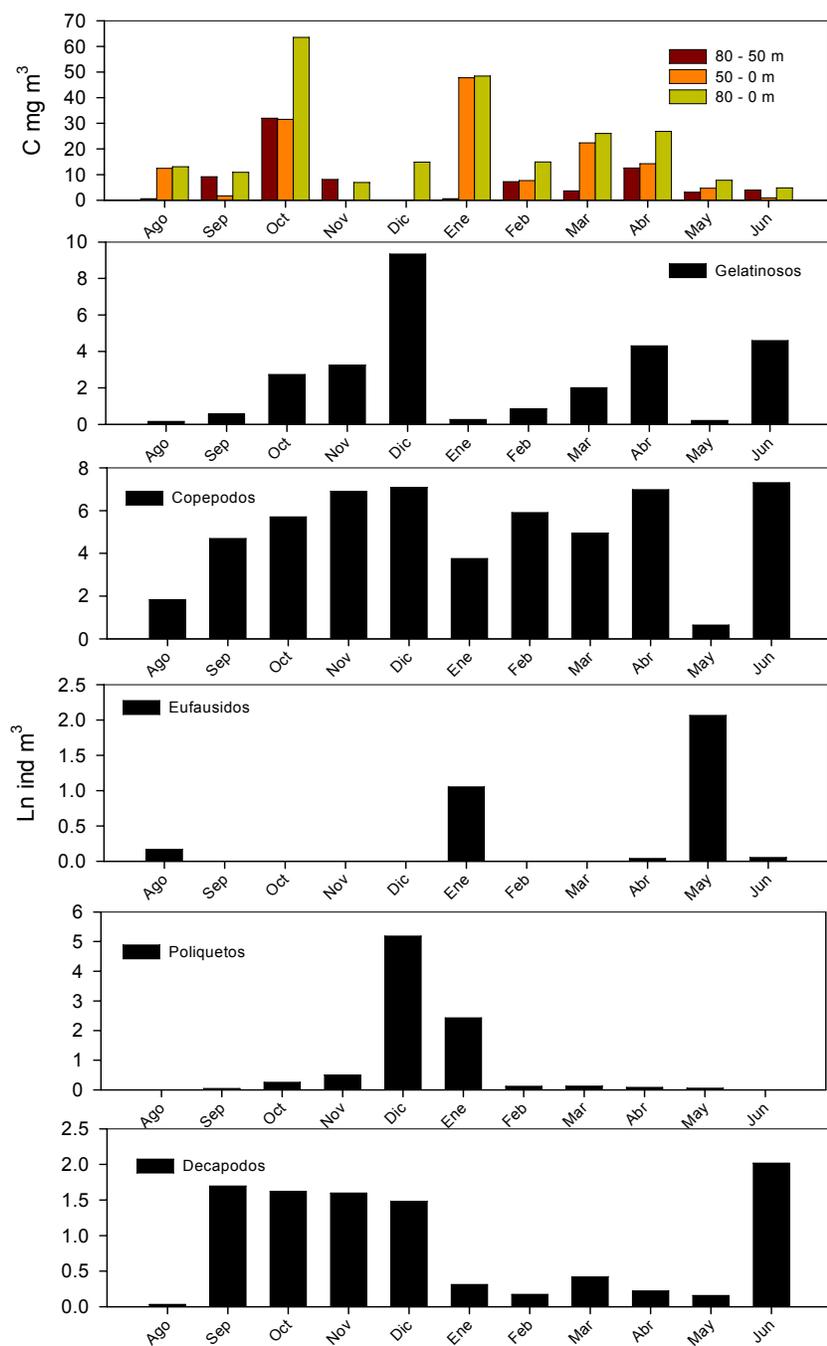


Figura 63. Variabilidad temporal de la biomasa zooplánctónica total (panel superior, mgC m⁻³) y de la abundancia de los principales grupos taxonómicos encontrados en la Estación 18 entre Agosto 2008 y Junio 2009.

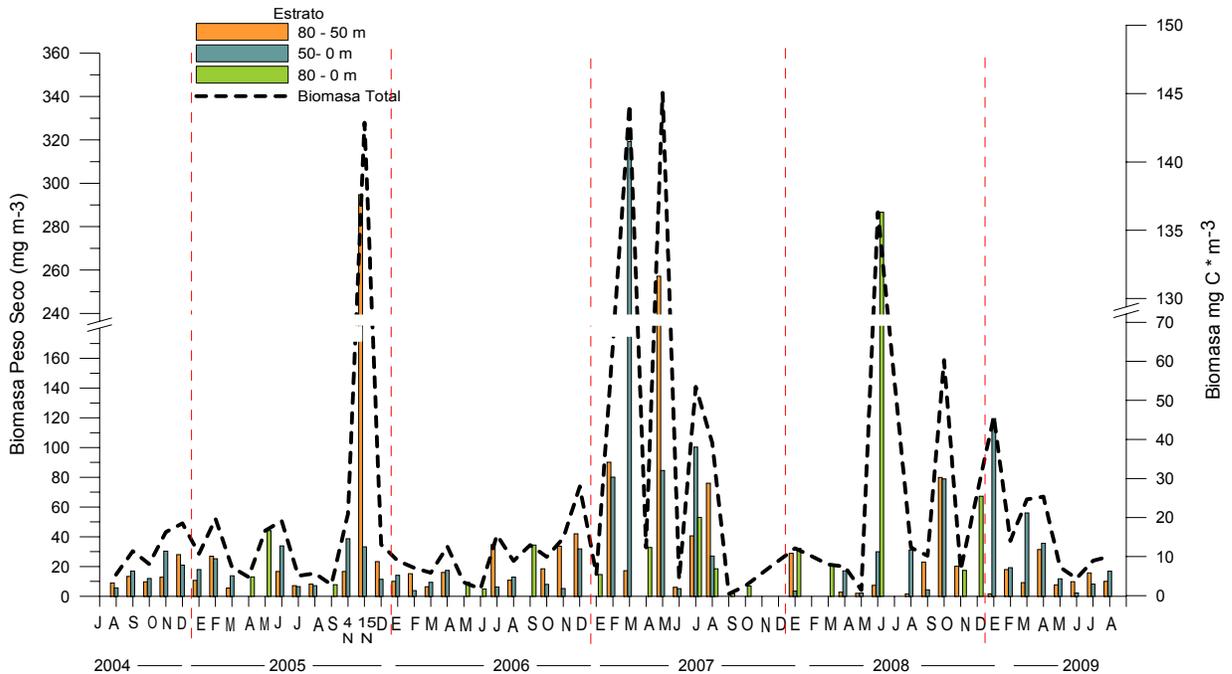


Figura 64. Variabilidad temporal de la biomasa zooplanctónica total (mgC m^{-3}) y por estrato de profundidad en la Estación 18 entre Agosto 2004 y Junio 2009.

6.3.5.2. Composición del meso y macrozooplancton. El seguimiento de la estructura comunitaria durante la serie temporal entre Agosto 2008 y Junio 2009 mostró, al igual que en años anteriores, la dominancia numérica de copépodos, que registraron un promedio (\pm d.s.) de $517 \pm 552 \text{ ind m}^{-3}$ y una abundancia relativa $>90\%$ (Fig. 63). Los otros dos grupos presentes en mayores abundancias correspondieron a poliquetos y gelatinosos, que representaron un 6% de los conteos totales. La Tabla 21 presenta un resumen de las abundancias relativas de los principales grupos encontrados durante el periodo de estudio.

Tabla 21. Abundancia relativa (%) de los principales taxa encontrados en la Estación 18 durante el periodo Agosto 2008 – Junio 2009.

Taxon	%
Copépodos	92.66
Poliquetos	3.08
Gelatinosos	3.02
Decápodos	0.77
Eufáusidos	0.15
Radiolarios	0.15
Larvas nauplii	<0.1
Larvas Mysidacea	<0.1
Isópodos	<0.1
Ostrácodos	<0.1
Anfípodos	<0.1
Larvas Stomatopoda	<0.1
Pterópodos	<0.1
Cladóceros	<0.1
Cefalópodos	<0.1

En cuanto a la variabilidad temporal de los distintos grupos encontrados, tanto los copépodos como los gelatinosos mostraron un incremento sostenido entre Agosto 2008 y Diciembre 2008, seguido por una caída abrupta y un nuevo incremento hacia Abril 2009 (Fig. 63). La abundancia de larvas de decápodos se mantuvo a un nivel constante entre Septiembre y Diciembre 2008, para luego caer en forma abrupta durante el periodo Enero – Mayo 2009 (verano a otoño) y mostrar un máximo valor en Junio 2009 (Fig. 63). Los eufáusidos se presentaron en forma esporádica, con mayores concentraciones en Mayo 2009, mientras que la abundancia de poliquetos alcanzó un máximo en Diciembre 2008 y luego decayó rápidamente hacia Febrero 2009 (Fig. 63).

Analizando la composición por especies de los copépodos (Tabla 22), grupo dominante numéricamente que además representa un importante aporte a la biomasa zooplanctónica total durante el periodo de estudio, las especies más abundantes fueron *Paracalanus cf. indicus* (>50%), *Oithona similis* (>20%) y *Calanoides patagoniensis* (>10%), especies muy asociadas a la zona costera y a los centros de surgencia (Escribano y Hidalgo 2000, Hidalgo y Escribano 2001). Aunque las tres especies mostraron un aumento en su abundancia entre Agosto y Diciembre 2008, no hubo un patrón de variación claro durante el resto del periodo de estudio que sugiriese un patrón de variabilidad asociado sólo con la surgencia costera. La abundancia de *Acartia tonsa* y

Centropages brachiatus mostró un aumento entre finales de verano y comienzos del invierno, mientras que *Rhincalanus nasutus* aumentó en su abundancia sólo durante primavera-verano, muy asociado a la época de surgencia (Fig. 65). La presencia de las especies durante todo el año refleja la alta y sostenida productividad de este sistema de surgencia, que permite que algunas especies del zooplancton se puedan reproducir durante todo el año (Hidalgo y Escribano 2007).

Tabla 22. Abundancia relativa (%) de las especies de copépodos encontradas durante los muestreos en la Estación 18 entre Agosto 2008 y Junio 2009.

Taxon	%	Taxon	%
<i>Paracalanus cf. indicus</i>	50	<i>Corycaeus amazonicus</i>	< 0.1
<i>Oithona similis</i>	20.9	<i>Lucicutia flavicornis</i>	< 0.1
<i>Calanoides patagoniensis</i>	11.7	<i>Vetoria granulosa</i>	< 0.1
<i>Acartia tonsa</i>	9.1	<i>Haloptilus longicornis</i>	< 0.1
<i>Centropages brachiatus</i>	2.1	<i>Calocalanus tenius</i>	< 0.1
<i>Rhincalanus nasutus</i>	1.4	<i>Oncaea venusta</i>	< 0.1
<i>Microcalanus pygmaeus</i>	1	<i>Scolecithrix bradyi</i>	< 0.1
<i>Metridia lucens</i>	0.9	<i>Mesocalanus tenuicornis</i>	< 0.1
<i>Pleuromamma gracilis</i>	0.6	<i>Euchirella sp.</i>	< 0.1
<i>Oncaea sp.</i>	0.5	<i>Eucalanus hyalinus</i>	< 0.1
<i>Drepanopus forcipatus</i>	0.5	<i>Clausocalanus furcatus</i>	< 0.1
<i>Clausocalanus arcuicornis</i>	0.4	<i>Amalothrix sp.</i>	< 0.1
<i>Heterorhabdus lobatus</i>	< 0.3	<i>Pleuromamma abdominalis</i>	< 0.1
<i>Oithona setigera</i>	< 0.3	<i>Haloptilus spinifrons</i>	< 0.1
<i>Scolecithricella abyssalis</i>	< 0.3	<i>Augaptilus sp.</i>	< 0.1
<i>Scaphocalanus curtus</i>	< 0.1	<i>Clytemnestra rostrata</i>	< 0.1
<i>Triconia conifera</i>	< 0.1	<i>Haloptilus oxicephalus</i>	< 0.1
<i>Heterorhabdus sp.</i>	< 0.1	<i>Calanus chilensis</i>	< 0.1
<i>Calocalanus styliremis</i>	< 0.1	<i>Nannocalanus minor</i>	< 0.1
<i>Aetideus armatus</i>	< 0.1	<i>Eucalanus inermis</i>	< 0.1
<i>Ctenocalanus vanus</i>	< 0.1	<i>Pleuromamma quadrangulata</i>	< 0.1
<i>Oncaea media</i>	< 0.1		

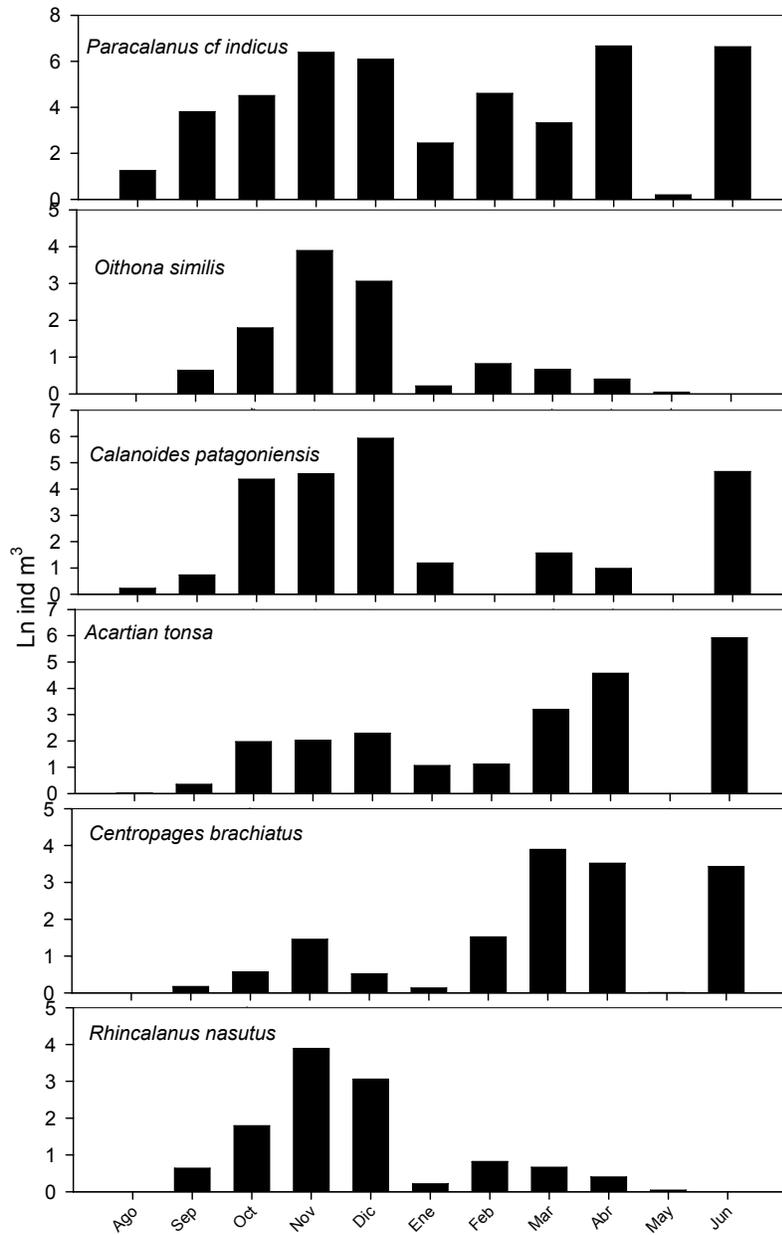


Figura 65. Variabilidad temporal en la abundancia de las principales especies de copéodos encontradas en la Estación 18 entre Agosto 2008 y Junio 2009.

6.3.6. Biomasa y composición del ictioplancton en las Estaciones 18 y 5

Estación 18. La información de ictioplancton de la serie de tiempo de la Estación 18 entre Agosto del 2008 a Julio del 2009 se muestra en la Figura 66, donde además se indican los periodos considerados históricamente como de mayor desove (rectángulos sombreados). Una inspección general de la data de abundancia de huevos de las 3 especies objetivo (*Engraulis ringens*, *Strangomera bentincki* y *Merluccius gayi*) reveló una marcada estacionalidad en sus variaciones, y una concordancia en las máximas abundancias de huevos de anchoveta y merluza común, y entre las larvas de las 3 especies objetivo a inicios de primavera (Octubre-Noviembre 2008). Adicionalmente, se observó que los máximos de abundancia de larvas ocurrieron con posterioridad a los periodos en que se espera el mayor desove de anchoveta y sardina común (Fig. 66). Un aspecto relevante es que las abundancias de las tres especies fueron muy bajas en relación a años anteriores tanto para los huevos durante el máximo reproductivo así como para las larvas en los meses sucesivos.

La inspección de la serie de tiempo completa disponible para la Estación 18 (Fig. 67) confirma que las abundancias de huevos y larvas de las tres especies objetivo durante el invierno y primavera 2008 fueron las más bajas de las últimas 5 temporadas de desove/reclutamiento (Junio 2004 a Julio 2009), y además muestra una alta variabilidad inter-anual en la abundancia de las tres especies y en el período en el cual se registra presencia de huevos y larvas. Se observa además que aunque algunas variaciones son coherentes para las tres especies (e.g. máximos de larvas en la primavera del 2006 y mínimos el 2008), las 3 series de tiempo no siempre fluctúan en forma sincrónica. Finalmente, aunque en algunos años se observa un máximo secundario en Febrero para sardina común y anchoveta, este máximo no se manifiesta en el ictioplancton todos los años (Fig. 67).

Estación 5. Las condiciones semi-estuarinas de la Estación 5, que parecen estar fuertemente influidas por la cercanía de la desembocadura del Río Itata, parecen propicias para el desove de los pequeños pelágicos, a juzgar por la información de huevos y larvas de anchoveta y sardina común observados durante 2007-2009 (Figura 68).

La serie de tiempo de ictioplancton en la Estación 5 (Fig. 68) mostró variaciones respecto a los patrones observados en la Estación 18, con mayores abundancias de huevos en todas las especies objetivo y a un aumento de la variabilidad en los meses de ocurrencia de los máximos de abundancia. Por ejemplo, durante el invierno 2008 el máximo en abundancia de huevos de anchoveta fue casi imperceptible en la Estación 18 (ca. 4 h 100m⁻³, Fig. 67), mientras que en la Estación 5 se observaron abundancias >600 h 100 m⁻³ para el mismo periodo (Fig. 68). En el invierno de 2009, las mínimas abundancias de huevos de merluza común en la Estación 18 (ca. 2 h 100 m⁻³) contrastaron con valores >60 h 100 m⁻³ en la Estación 5 (Fig. 67, 68). En la Estación 5, además, se detectaron máximos que no se identificaron en la Estación 18, como las altas abundancias de larvas y huevos de merluza común en el verano y otoño 2009, respectivamente (Fig. 68).

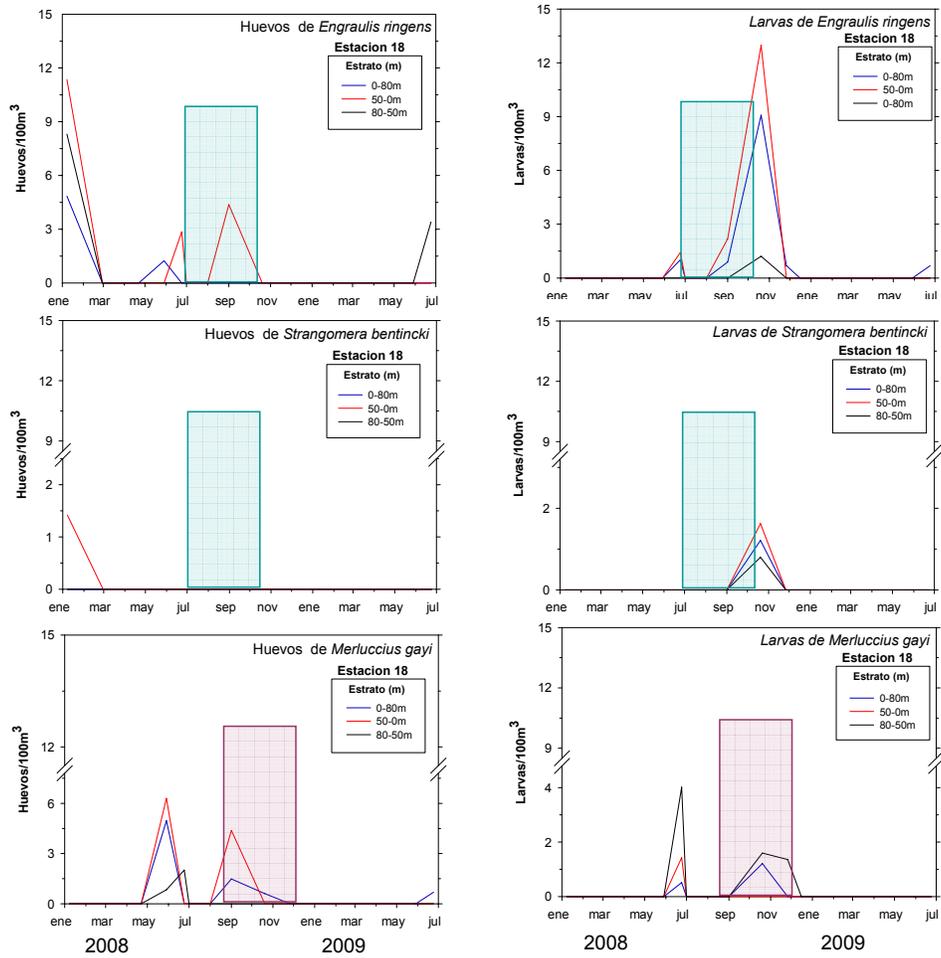


Figura 66. Abundancia de huevos y larvas (individuos en 100 m³) de las tres especies objetivo en la **Estación 18** para el periodo Enero 2008 – Julio 2009. Los rectángulos sombreados indican periodos considerados históricamente como de mayor desove.

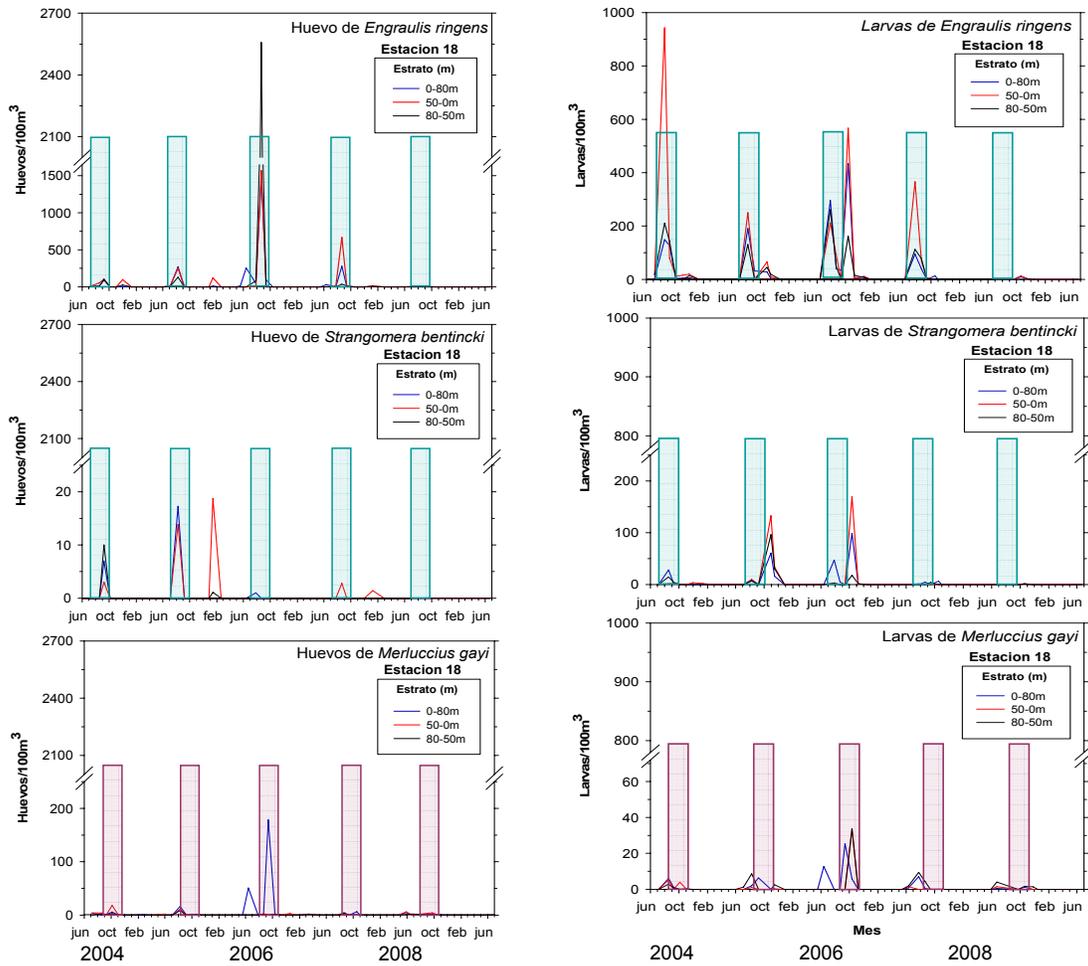


Figura 67. Abundancia de huevos y larvas (individuos en 100 m³) de las tres especies objetivo en la **Estacion 18** para el periodo Julio 2004 – Julio 2009. Los rectángulos sombreados indican periodos considerados históricamente como de mayor desove.

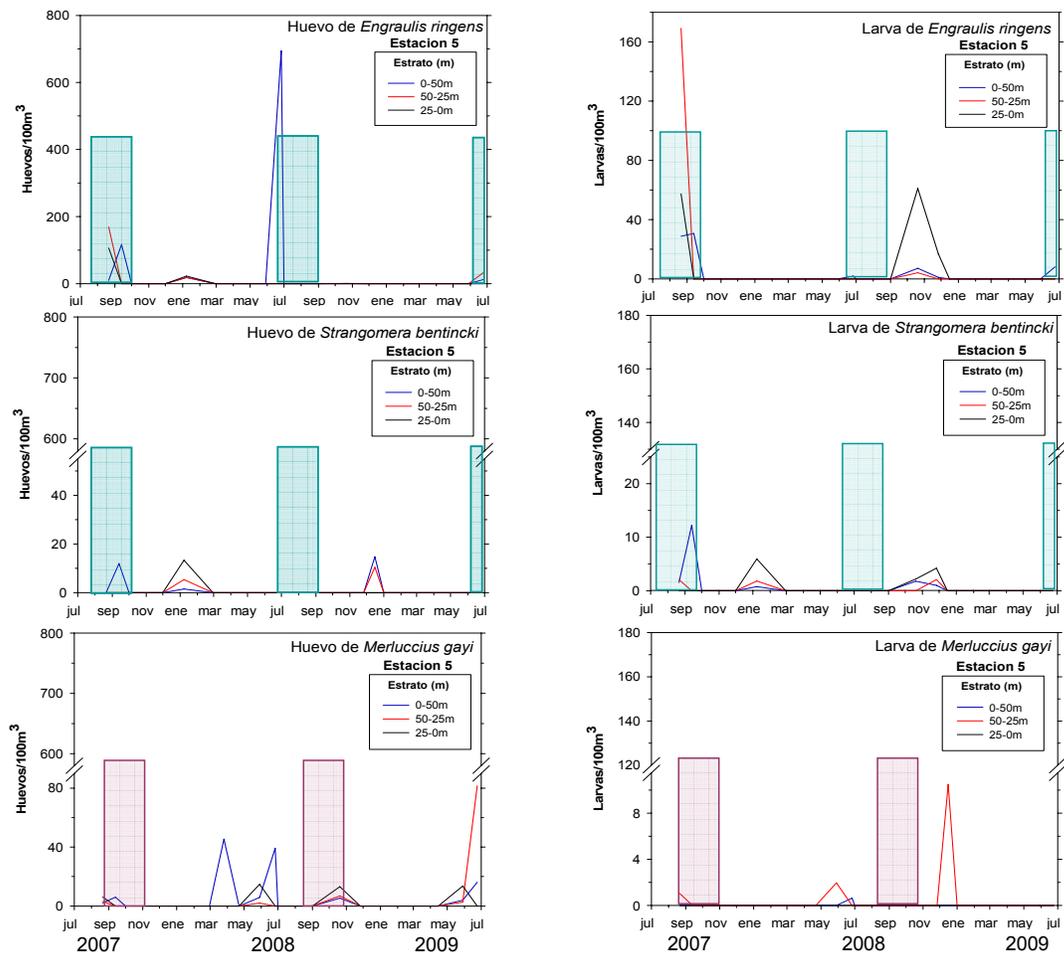


Figura 68. Abundancia de huevos y larvas (individuos en 100 m³) de las tres especies objetivo en la **Estacion 5** para el periodo Julio 2007 – Julio 2009. Los rectángulos sombreados indican periodos considerados históricamente como de mayor desove.

6.4. Objetivo específico 4. *Estimar las siguientes tasas biológicas: producción primaria, respiración comunitaria del plancton, flujo vertical de material particulado (acoplamiento pelágico-bentónico) y su variabilidad mensual en estaciones seleccionadas de la zona de estudio.*

6.4.1. Producción primaria y respiración comunitaria en la Estación 18

Desde el inicio de las observaciones mensuales en la Estación 18, los valores integrados de Producción Primaria (PP) y Respiración Comunitaria (RC) han mostrado una marcada estacionalidad (Fig 69). Cada año, los mayores valores de PP se presentan entre inicios de primavera y fines de verano (Octubre – Abril), con un rango de 2 - 25.8 g C m⁻² d⁻¹, y los valores bajos (< 2 g C m⁻² d⁻¹) se concentran entre Mayo y Septiembre (Fig. 69).

Durante el periodo de estudio correspondiente al presente informe, marcado con una línea segmentada en la Figura 69 y mostrado en detalle en la Figura 70, las tasas de PP siguen en general el mismo patrón estacional ya descrito, destacándose el alto valor registrado en Septiembre 2009 (11.55 g C m⁻² d⁻¹). A diferencia de años anteriores, la RC fue mayor que la PP durante gran parte del periodo, reflejando en la mayoría de estos experimentos un balance PP/RC < 1 que indica condiciones de heterotrofia en el sistema (Fig. 70, línea continua).

6.4.2. Flujo vertical de material particulado en la Estación 18

Se observó una alta variabilidad en la exportación de material particulado total, correspondiente a material litogénico (ML) más material orgánico total (MO), desde los 40 m superficiales de la columna de agua. Los valores de ML fueron entre 0.5 y 4 veces la MO (Fig. 71). Los flujos promedio de ML y MO entre Junio 2008 y Junio 2009 fueron de 1930 y 791 mg m⁻² d⁻¹, y alcanzaron las mayores tasas de exportación en Diciembre 2008 con 8358 y 2048 mg m⁻²d⁻¹ para ML y MO, respectivamente. A partir de Enero 2009 las tasas de exportación disminuyeron y alcanzaron valores mínimos en Abril que fueron un orden de magnitud menores que los registrados en Diciembre 2008 (ML=907 mg m⁻²d⁻¹ y MO=358 mg m⁻²d⁻¹, Fig. 71).

Los análisis de microscopía permitieron determinar que los elementos principales que contribuyen al flujo de la MO en la Estación 18 corresponden a pellets fecales de zooplancton, microzooplancton y microfitoplancton. En promedio, el conjunto de estos componentes correspondió al 25% de la MO, con rangos que oscilaron entre 4 y 52%. Del total de elementos biogénicos identificables, la fracción fecal representó más del 90%, mientras que las diatomeas aparecieron mínimamente representadas en Enero 2009 (Fig. 72). Además de estar presente y ser el más abundante durante el período de estudio, el componente fecal fue altamente variable (Fig. 73). Los máximos flujos se presentaron en Junio y Diciembre 2008 (483 y 418 $\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$, respectivamente) y los mínimos en Febrero (23.7 $\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$), Marzo (7.6 $\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$) y Mayo (17.2 $\text{mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$) de 2009. Esta dominancia de los pellets fecales en el flujo vertical de materia orgánica durante los meses de invierno, primavera e inicios de verano es consistente con lo observado durante los años previos de mediciones periódicas en la Estación 18 (Gonzalez et al. 2007, González et al. 2009).

Del material fecal colectado en las trampas de sedimento durante el período correspondiente al presente estudio, la mayor parte correspondió a fecas de eufáusidos y material fecal indeterminado (material amorfo y parcialmente degradado), además de fecas de apendicularias y copépodos (Fig. 73). En conjunto, los pellets fecales de eufáusidos y apendicularia representaron el 57% de material fecal total cuantificado.

El componente microplanctónico observado en las muestras de trampas de sedimento (Fig. 74) correspondió principalmente a diatomeas, dinoflagelados y ciliados. El promedio del carbono exportado por estos organismos fue de 6.4 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ y sus mayores contribuciones fueron observadas entre primavera-verano (10.4 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y comienzos de otoño (10.3 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$), al igual que en los años anteriores (proyectos FIP 2004 Escribano et al. 2005, Daneri et al. 2006, Farias et al. 2007, Castro et al. 2008). Los menores flujos de carbono de microplancton fueron observados en los meses de Junio 2008 (1 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y durante Mayo – Junio 2009 (0.4 y 0.6 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectivamente).

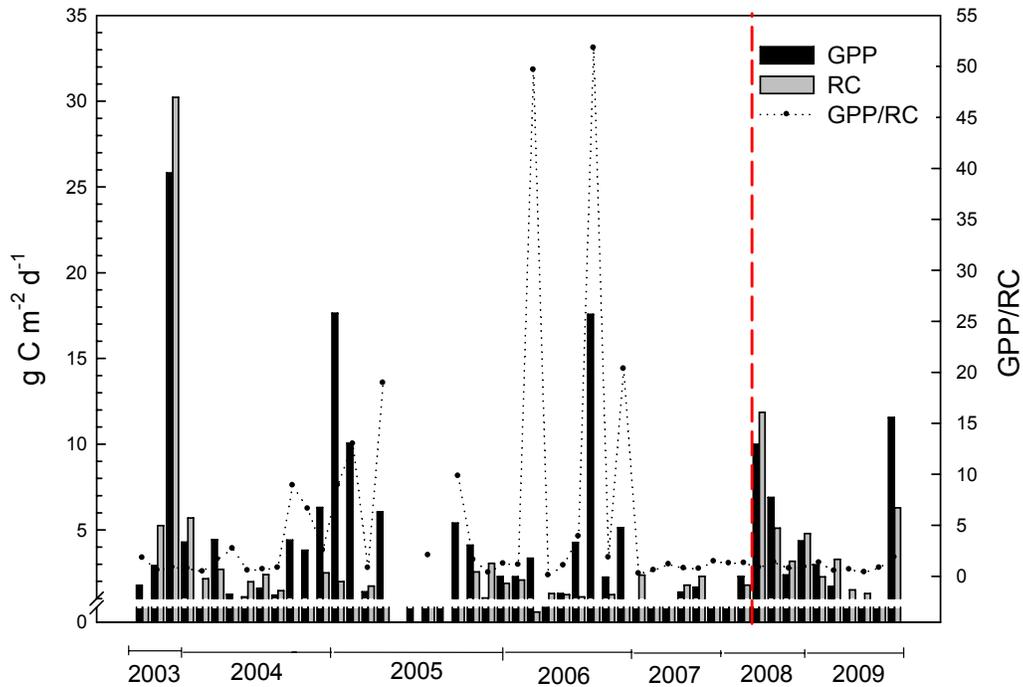


Figura 69. Variabilidad temporal de la tasa de Producción Primaria bruta (GPP), Respiración Comunitaria (RC) y de la razón GPP/RC en la Estación 18 desde Septiembre 2003. La línea vertical segmentada indica el inicio del período correspondiente al proyecto FIP 2008-20.

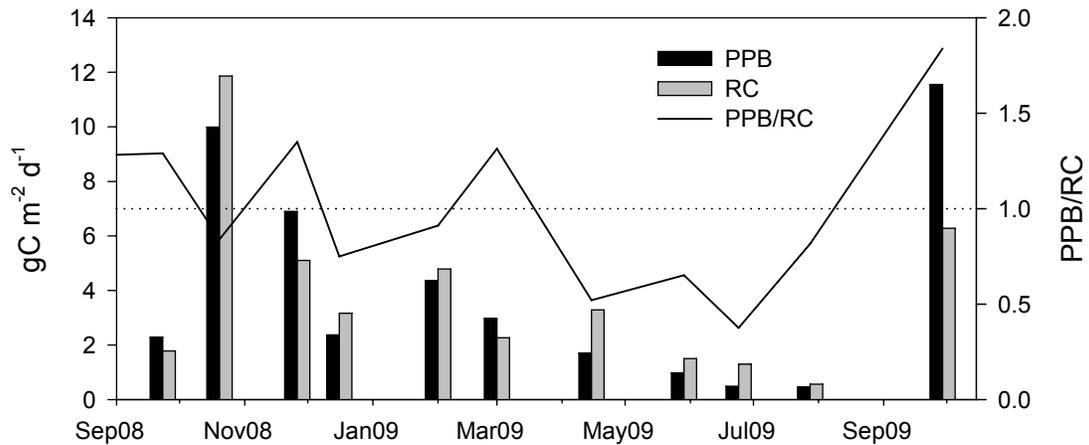


Figura 70. Variabilidad temporal de la tasa de Producción Primaria bruta (PPB), Respiración Comunitaria (RC) y la razón PPB/RC en la Estación 18 para el periodo Septiembre 2008 a Septiembre 2009.

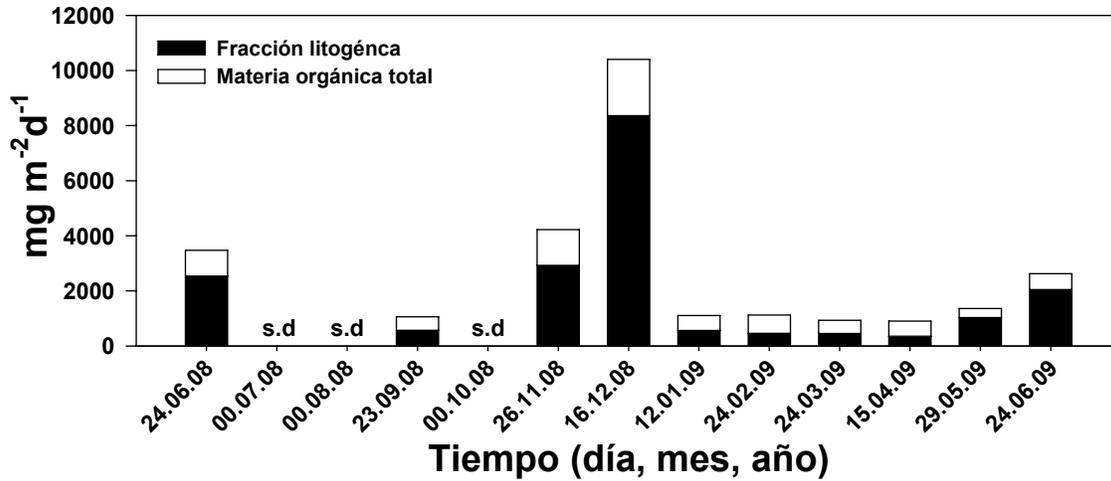


Figura 71. Flujo vertical ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) de material litogénico y orgánico obtenido desde trampas de sedimento instaladas a 40 m de profundidad en la Estación 18 durante Junio 2008 – Junio 2009.

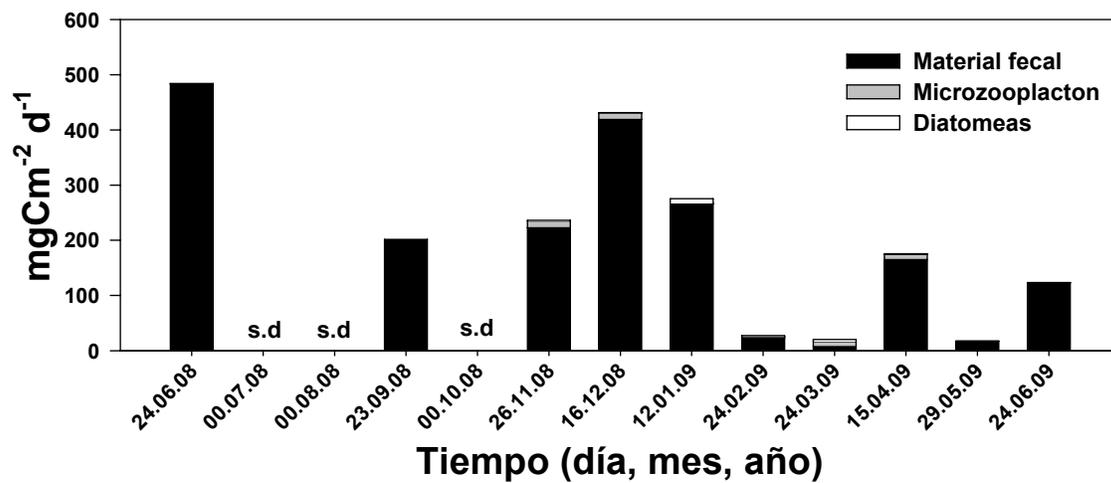


Figura 72. Principales componentes biogénicos encontrados en las muestras de trampa de sedimento instaladas a 40 m de profundidad en la Estación 18 durante Junio 2008 – Junio 2009.

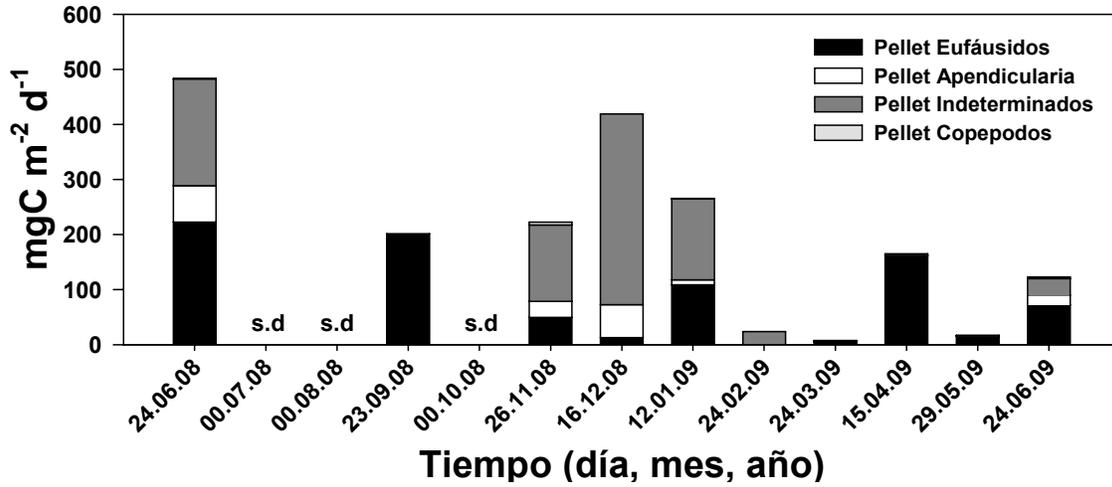


Figura 73. Flujo y composición del material fecal colectado en las trampas de sedimento instaladas a 40 m de profundidad en la Estacion18 durante Junio 2008 – Junio 2009.

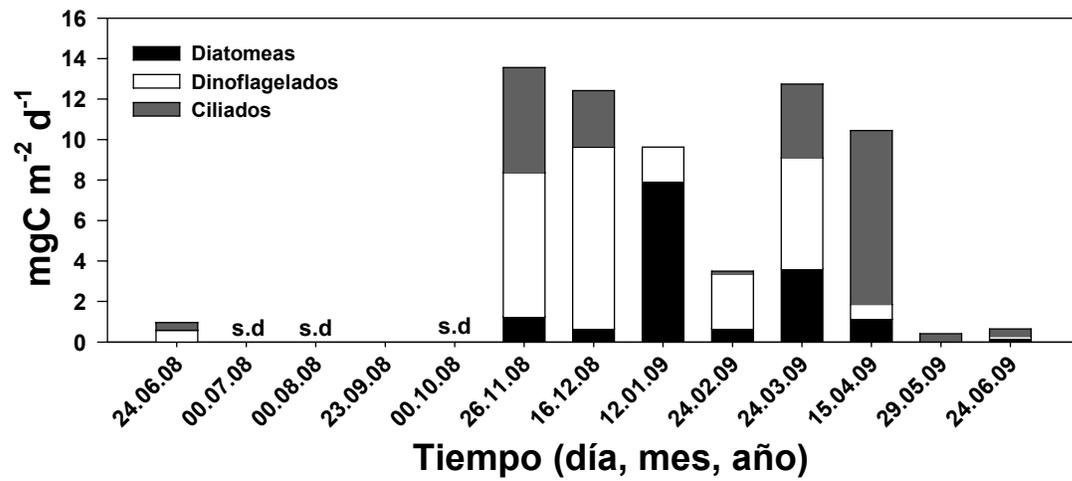


Figura 74. Principales componentes microplancónicos observados en las muestras de trampas de sedimento instaladas a 40 m de profundidad en la Estación 18 durante Junio 2008 – Junio 2009.

6.5. Objetivo específico 5. *Determinar la variabilidad superficial de las variables temperatura del mar, clorofila-a y anomalía del nivel del mar por medio de percepción remota. La frecuencia mínima de análisis debe ser al menos mensual. Y asociar estas variaciones espacio-temporales con la actividad pesquera.*

6.5.1. Condiciones promedio y escalas de variabilidad

Los campos promedio de TSM y clorofila obtenidos desde imágenes MODIS para el periodo 2002-2009 (Fig. 75) reflejaron el predominio de la surgencia costera como proceso modulador de las condiciones oceanográficas sobre la plataforma continental. La TSM mostró una distribución promedio que delimita claramente el borde de la plataforma continental, y que refleja el efecto de la topografía y batimetría costera sobre los patrones espaciales de afloramiento de agua sub-superficial de baja temperatura. Las temperaturas más bajas se concentraron alrededor de las principales puntas y cabos en la región (ver Fig. 1 y Fig. 75a) y la isolinia de 13°C (contorno negro en Fig. 75a) indicó claramente la posición del cañón del río Itata, sugiriendo un importante efecto de dicho cañón sobre los patrones de fertilización de la capa fótica en esa área. La distribución promedio de clorofila-a (Fig. 75b) muestra una franja costera con concentraciones $> 5 \text{ mg m}^{-3}$ restringidas a profundidades $< 100 \text{ m}$ (contorno negro en Fig. 75b), y con una clara discontinuidad en la zona del cañón del río Itata. Las concentraciones $> 10 \text{ mg m}^{-3}$ se encuentran a sotavento de las principales puntas en la región (Pta. Lavapié, Tumbes y Carranza), y llegan a valores cercanos a los 20 mg m^{-3} al interior del Golfo de Arauco. Finalmente, el promedio 2002-2009 de la anomalía del nivel del mar (Fig. 75c) mostró valores negativos en una zona restringida al NW de Pta. Lavapié. El promedio 2008-2009 de la ANM sobre la región de estudio (Fig. 75f) mostró un área más extensa con anomalías negativas al W de Pta. Lavapié, y una franja costera con anomalías que en promedio son positivas. Estos patrones están fuertemente influenciados por el patrón que se observa en la región durante los meses de otoño-invierno, oscureciendo el patrón típico de primavera-verano con surgencia activa y una banda costera de anomalías negativas (ver Fig. 25).

Los promedios de TSM y clorofila superficial para el periodo 2008-2009 no mostraron diferencias con los de más largo plazo (Fig. 75d, e), e indicaron que la Estación 18 se ubica en un punto fuertemente afectado por los patrones de meso-escala que genera la surgencia costera desde Pta. Lavapié al norte. Resultados de un análisis aun no publicado, pero que se adjunta a este informe como anexo (Tapia et al. en preparación, Anexo 2), indican que las condiciones físico-químicas y biológicas en la Estación 18 responden al forzamiento por vientos favorables a la surgencia medidos en Pta. Hualpén con un rezago de 2 a 3 días, y que las altas concentraciones de clorofila sobre la terraza del Itata se correlacionan con el viento favorable a la surgencia sobre escalas de hasta 20 días.

La evaluación de escalas temporales de variabilidad para toda la región de estudio, basada en análisis de auto-correlación de las series de tiempo correspondientes a cada píxel en las imágenes, indicó escalas de decorrelación de 50-60 días para la TSM sobre la plataforma continental al norte de Pta. Lavapié (Fig. 76a), y escalas de 20 días o menos para la clorofila sobre la misma zona (Fig. 76b). La variabilidad de ANM frente a Concepción, en tanto, tuvo escalas características de 50 días o menos, similares a las observadas para la TSM (Fig. 76c). Sobre dichas escalas, los coeficientes de auto-correlación promedio fueron muy similares para la TSM y ANM en la sección de la plataforma continental que comprende la Estación 18 (Fig. 76d, f). La auto-correlación promedio de las series de TSM fue mayor al interior del Golfo de Arauco y sobre el cañón del río Itata, y sustancialmente mayor al oeste del quiebre de la plataforma (Fig. 76d). Las auto-correlaciones para las series de clorofila fueron extremadamente bajas en comparación con las otras dos variables (Fig. 76e), y reflejan el alto grado de variabilidad temporal observado sobre la plataforma continental a lo largo de la región de estudio.

Al comparar los valores de TSM y clorofila derivados de imágenes MODIS con los medidos *in situ* durante los muestreos en la Estación 18, se observó una buena correlación para las series de temperatura, aunque los datos MODIS tienden a subestimar las temperaturas medidas con CTD a 1 m de profundidad (Fig. 77a). En el caso de la clorofila no se observó tal correspondencia, lo que probablemente es consecuencia del alto grado de heterogeneidad espacial en esta variable, y que puede generar gran disparidad con las mediciones *in situ*.

La serie de tiempo de TSM (Fig. 78a) mostró claramente las fluctuaciones estacionales, con mínimas en Julio y máximas en Enero-Febrero, y episodios de disminución abrupta en TSM durante el verano. Se observan además variaciones interanuales que ya habían sido detectadas en las mediciones de columna de agua en la Estación 18, en particular el invierno anómalamente frío en 2007 (Fig. 78a y 52a). También se observó con claridad el ciclo anual de la clorofila superficial, y la alta variabilidad registrada en primavera-verano sobre escalas de tiempo más cortas (Fig. 78b). La anomalía del nivel del mar, en tanto, mostró patrones estacionales menos claros (Fig. 78c), y un aparente cambio en el régimen de variabilidad a partir del otoño de 2006.

Al comparar las mediciones correspondientes al periodo 2008-2009 con las climatologías calculadas para las series de la Figura 78, se observaron temperaturas anómalamente altas en Diciembre de 2008 seguidas por concentraciones de clorofila anómalamente altas en Enero 2009, mes en que se realizó el cruceo de monitoreo bio-oceanográfico, y luego un período de altas concentraciones en Marzo 2009 (Fig. 79a, b). El máximo de clorofila de Enero 2009 se correspondió con un mínimo en la anomalía del nivel del mar, como consecuencia de la surgencia persistente detectada en la zona durante dicho mes.

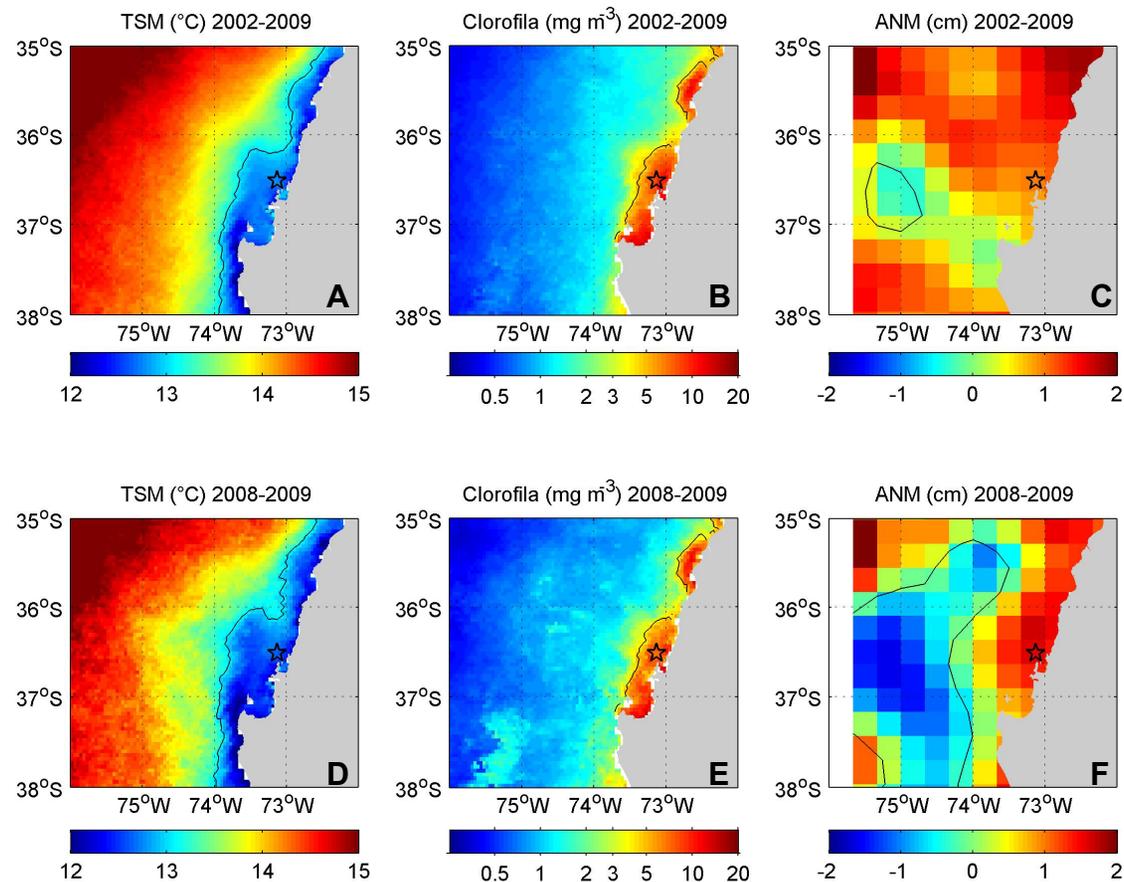


Figura 75. Patrones de variabilidad espacial en TSM, clorofila-a superficial (CLA) y anomalía del nivel del mar (ANM) en la región de estudio. Los paneles superiores corresponden a promedios para todo el período analizado (Julio 2002 a Diciembre 2009 para TSM y CLA, y Julio 2002 a Julio 2009 para ANM), y los paneles inferiores muestran las condiciones promedio durante el periodo Septiembre 2008 – Septiembre 2009. Los contornos corresponden a 13°C (TSM), 5 mg m⁻³ (clorofila), y 0 cm (ANM). El símbolo indica la posición de la Estación 18 del Centro COPAS.

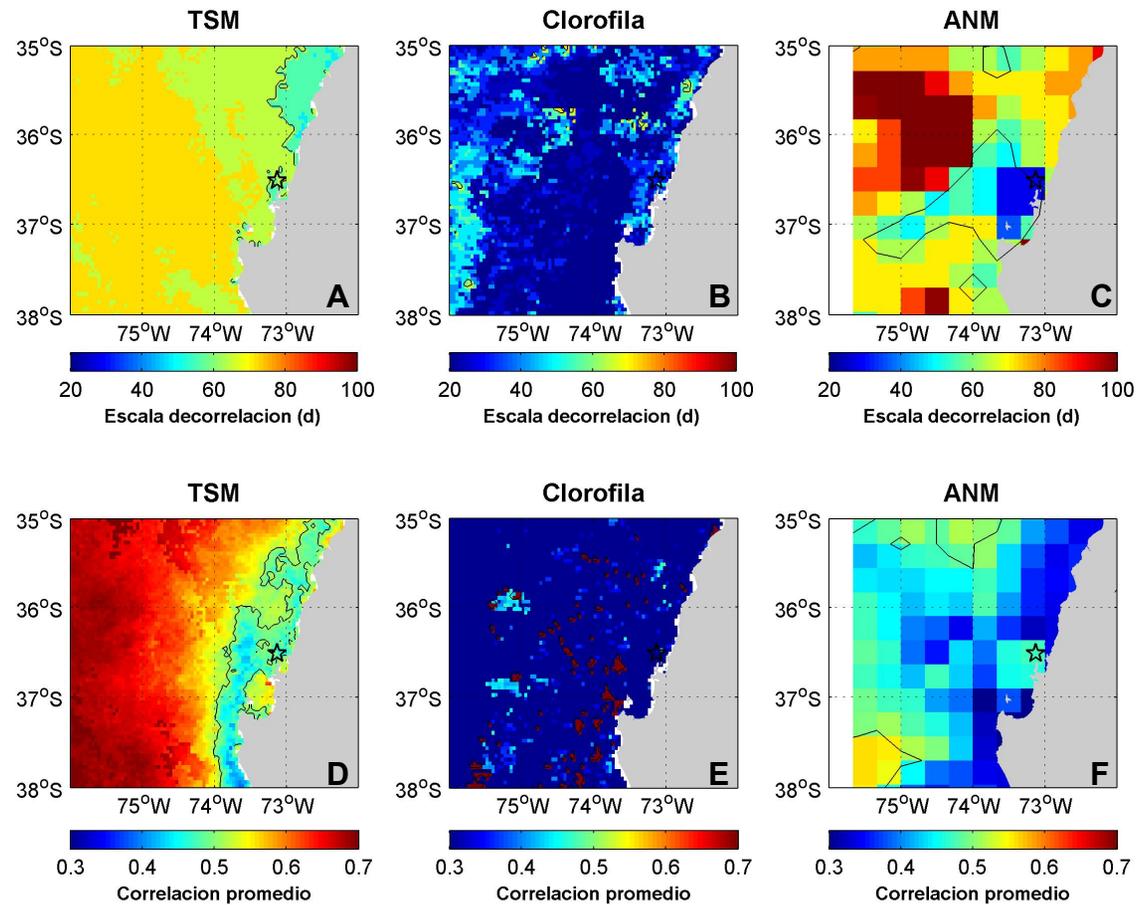


Figura 76. Patrones de variabilidad temporal en TSM, clorofila-a y anomalía del nivel del mar en la región de estudio. Los mapas en los paneles superiores muestran escalas de decorrelación estimadas para las series de tiempo en cada píxel ($\alpha=0.05$). Los mapas de los paneles inferiores corresponden a las auto-correlaciones promedio para las escalas temporales indicadas arriba. Los contornos corresponden a escalas de 60 días (paneles superiores) y a correlaciones de 0.5 (paneles inferiores). El símbolo indica la posición de la Estación 18 del Centro COPAS.

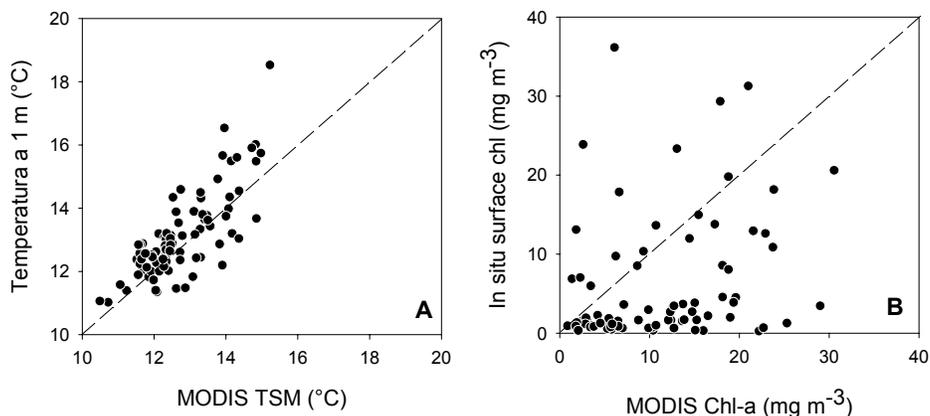


Figura 77. Comparación entre valores de TSM (A) y clorofila-a superficial (B) estimados para el área de la Estación 18 desde datos satelitales y aquellos medidos a 1 m de profundidad durante los cruceros mensuales.

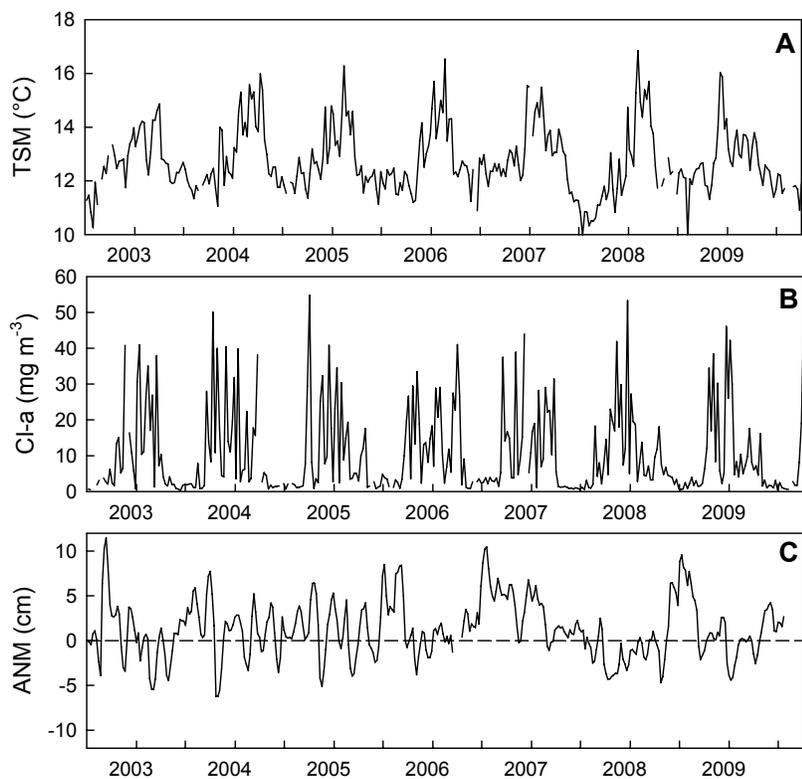


Figura 78. Variabilidad temporal de (A) TSM, (B) clorofila-a (CLA), y (C) anomalía del nivel del mar (ANM) en la plataforma continental frente a Concepción. Las series de tiempo de TSM y CLA corresponden a promedios de imágenes MODIS-Aqua para un área de 3x3 píxeles (12 km x 12 km) centrada en 36°30'S, 73°7.5'W, alrededor de la Estación 18. La serie de tiempo de ANM corresponde a valores extraídos de imágenes Aviso para un píxel de 1/3 de grado (ca. 30 km) centrado en 36°38.25'S, 73°00'W.

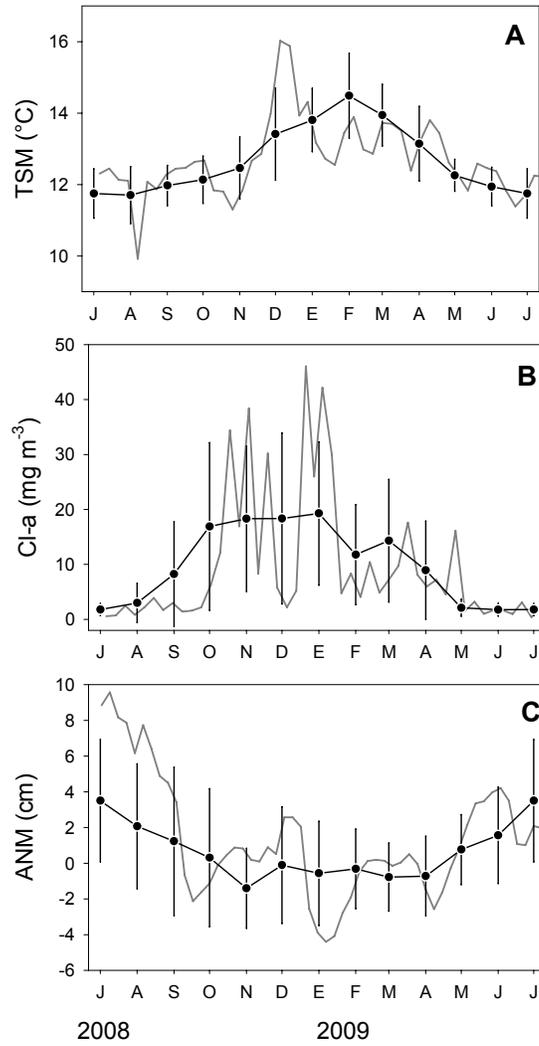


Figura 79. Climatologías (centradas en verano) de (A) TSM, (B) clorofila-a y (C) anomalía del nivel del mar, calculadas para el área de la Estación 18 desde imágenes satelitales. Los símbolos negros y líneas de error corresponden al promedio \pm 1 DS. Las líneas grises muestran la variabilidad registrada para cada variable durante el período Julio 2008 – Julio 2009.

6.5.2. Asociación entre variabilidad ambiental y actividad pesquera

Los análisis de correlación cruzada entre las series de tiempo de TSM, clorofila y ANM (previamente convertidas a series de promedios mensuales) y las anomalías (i.e. desviaciones del promedio para cada mes calculado sobre los últimos 8 años) en los desembarques mensuales de la Figura 80 sólo mostraron correlaciones significativas en el caso de la anomalía de TSM como predictor de los desembarques de sardina común. Se observó una correlación de $r=-0.35$ ($p<0.01$) para 6 meses de rezago de los desembarques de sardina común con respecto a la anomalía de TSM, indicando que períodos fríos podrían dar lugar a mayores capturas de esta especie. Considerando que los mayores desembarques de sardina común se observan en Abril de cada año, este resultado indicaría que la surgencia intensa a inicios de primavera podría tener un impacto positivo sobre el recurso capturado a fines de verano y comienzos de otoño.

Como ya se ha señalado, a pesar de que los desembarques no constituyen un índice de abundancia *per se*, estos datos son un indicador de la actividad pesquera y muestran un patrón estacional e interanual que podría tener relación con los cambios en las condiciones bio-oceanográficas en la región.

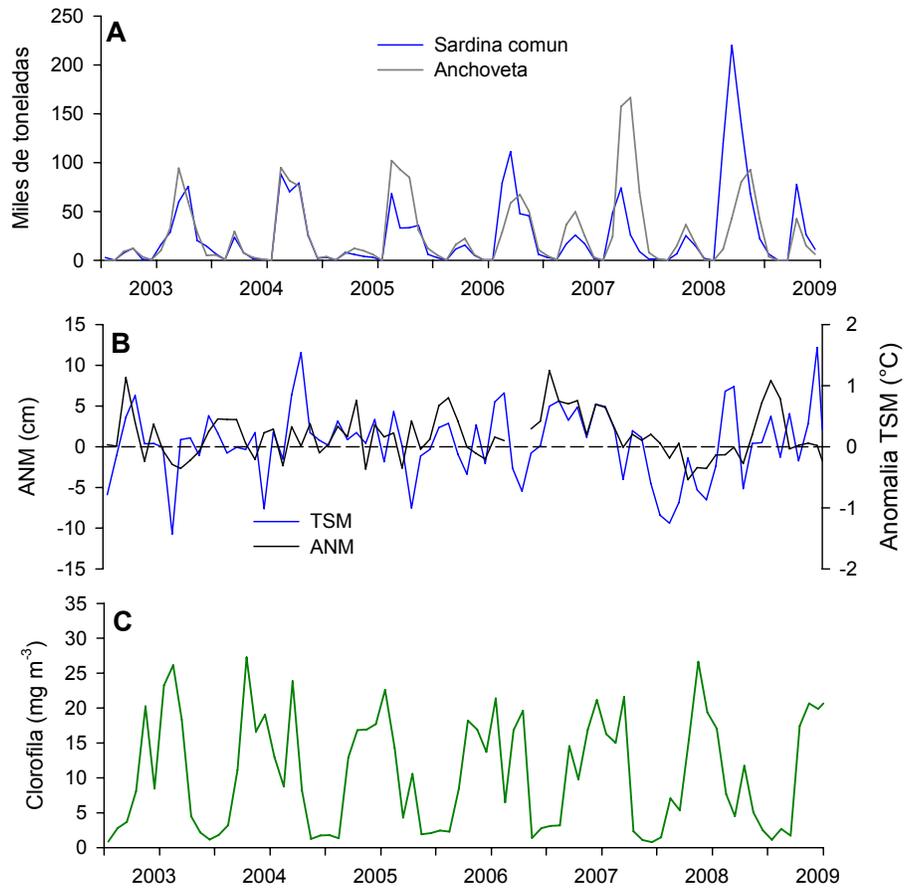


Figura 80. Variación mensual de los desembarcos de sardina y anchoveta en la región del BioBio (A) durante el período cubierto por la serie de tiempo de la Estación 18. Los paneles B y C presentan series de promedios mensuales para variables estudiadas a partir de imágenes satelitales para la región.

7. DISCUSION

7.1. Condiciones bio-oceanográficas durante el crucero estacional

Las condiciones bio-oceanográficas encontradas durante el crucero de monitoreo de Enero 2009 correspondieron a un escenario de surgencia activa, que se vio reflejado en las distribuciones horizontales y verticales de las variables hidrográficas, en los campos de viento y patrones de variabilidad observados desde imágenes satelitales para TSM y clorofila, y en las imágenes derivadas de altimetría que muestran el marcado desnivel en la franja costera producto del persistente forzamiento por viento y el transporte de Ekman resultante. Dicho escenario de forzamiento físico se reflejó además en las distribuciones horizontales y verticales de variables químicas medidas en la columna de agua, que indicaron la presencia de niveles de oxígeno, nutrientes, salinidad y temperatura propios de Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS) en las estaciones costeras, y una clara señal de inyección de nitrato y fosfato desde aguas profundas a la zona fótica. Las observaciones a lo largo de las transectas de más al norte indicaron que dicha inyección de nutrientes tuvo lugar a lo largo del frente de surgencia que se proyectó desde Pta. Lavapié al norte, con una clara estructura tridimensional. Esta estructura espacial de las condiciones físico-químicas en la columna de agua se percibió además en la distribución de la biomasa fitoplanctónica en el área estudiada, especialmente en relación con la batimetría costera y estructuras de mesoescala generadas por la interacción entre topografía costera y flujos forzados por el viento favorable a la surgencia.

La pluma de surgencia asociada a Punta Lavapié (37°10'S) se distinguió por presentar una lengua de agua fría, con aguas menores a 13°C y con salinidad mayor a 34.2 y bajo oxígeno ($< 4 \text{ mL L}^{-1}$), que se extendió en dirección norte a lo largo del quiebre de la plataforma continental de la región del BioBio. Este rasgo ha sido observado comúnmente en los cruceros de monitoreo del programa FIP y otros estudios durante primavera y verano (Cáceres y Arcos 1991, Sobarzo 1998, Letelier et al. 2009). Se observó además la presencia de aguas de baja salinidad al sur de Punta Lavapié, las que podrían provenir desde el sur de acuerdo a lo señalado por Brandhorst (1971). Las imágenes satelitales de TSM indicaron la presencia de meandros y filamentos de agua de

baja temperatura que se extendieron en dirección costa-océano, y cuyo origen está asociado a los principales promontorios y accidentes topográficos de la línea de costa.

Los distintos componentes de la comunidad planctónica presentaron un patrón de distribución concordante con la estructura de meso-escala detectada durante el crucero, particularmente con el gradiente costa océano descrito en la sección anterior. Destacó, además, la presencia de algunas zonas de mayores concentraciones que se repitieron entre los distintos grupos y que corresponderían a procesos oceanográficos de producción o concentración locales, como el Golfo de Arauco y el sector al norte de la Bahía de Concepción, sobre la terraza del Itata. Estudios recientes en estas áreas han demostrado que la interacción de la batimetría local, marcada por la existencia de dos cañones submarinos (BioBio e Itata), y los flujos costeros forzados por la surgencia costera promueve la recirculación y consecuente retención de aguas ricas en nutrientes, altas concentraciones de fitoplancton y macrozooplancton, entre los que se encuentran los huevos y larvas de pequeños pelágicos (Sobarzo y Djurfeldt 2004, Sobarzo et al. 2005, Landaeta y Castro 2006). Consistente con esto, la distribución de Clorofila-a Total integrada desde 0 a 30 m presentó mayores valores ($\geq 100 \text{ mg m}^{-2}$) entre la costa y la pluma de surgencia, con un foco de abundancia (ca. 200 mg m^{-2}) al interior del Golfo de Arauco. La biomasa del zooplancton también estuvo concentrada en las estaciones costeras y en el estrato superficial de 0 a 50 m, aunque en términos numéricos se observaron altas concentraciones de copépodos de pequeño tamaño y de organismos gelatinosos en las estaciones más oceánicas de las transectas de más al norte. Grupos como las larvas de crustáceos decápodos estuvieron presentes sólo en las estaciones más costeras, a pesar de que durante el crucero se registraron condiciones de surgencia activa, y niveles importantes de transporte de Ekman a lo largo de la región de estudio.

Las mediciones *in situ* y de percepción remota indicaron además la proyección de filamentos con altas cargas de pigmentos fotosintéticos en dirección a la zona oceánica. La presencia de estos procesos de meso-escala podría constituir un mecanismo de transporte desde la costa al océano adyacente (Hormazábal et al. 2004, Correa-Ramirez et al. 2007), de nutrientes, producción primaria y secundaria generada sobre la plataforma continental, representando un medio potencial de aporte de nutrientes capaz de generar incrementos locales en productividad primaria y, paralelamente, representar un medio de

abastecimiento trófico a la comunidad planctónica y nectónica fuera de la plataforma continental (Lutjeharms et al. 1991, Alvarez-Salgado et al. 2007). Paralelamente, la presencia de estas estructuras podría significar un medio de expatriación de organismos meroplanctónicos desde el borde costero (Morales et al. 2007) y así, representar pérdidas para las poblaciones locales, por ejemplo bentónicas, si es que mecanismos alternativos de retorno a la plataforma continental no se desarrollaran.

Las distribuciones de huevos y larvas de peces, en particular de las tres especies consideradas objetivo en este proyecto, se encontraron desplazadas con respecto a la biomasa fitoplanctónica y zooplanctónica. Las larvas de merluza común y anchoveta se encontraron concentradas en la zona externa del Golfo de Arauco y frente a Lebu, respectivamente, donde si bien las concentraciones de Clorofila Total no fueron tan altas como al NE de Punta Lavapié, se detectaron mayores abundancias de diatomeas. Larvas, de sardina común también se encontraron agregados en esta zona, mientras que los huevos de las otras dos especies aparecieron concentrados en la costa de Pta. Carranza, en el extremo norte de la grilla de muestreo. Este patrón ya había sido observado en el crucero anterior, realizado en Marzo de 2008. Las mayores abundancias de larvas de las tres especies objetivo en la zona sur (fuera del Golfo de Arauco) podrían deberse a exportación desde el mismo golfo, que ha sido caracterizado como una zona de retención durante el verano (Parada et al. 2001, Landaeta y Castro 2006), o de transporte desde las zonas de desove ubicadas mas al sur, en las cercanías de Isla Mocha (ver por ejemplo Atkinson et al. 2002). Esta última hipótesis concordaría con la presencia de la pluma de aguas más frías saliendo de Punta Lavapié, estructura de meso-escala que podría estar contribuyendo al desplazamiento de aguas desde la zona costera ubicada frente la IX región hacia la zona de Punta Lavapié (zona externa del Golfo de Arauco donde se encontraron la larvas).

7.2. Variabilidad temporal en condiciones bio-oceanográficas: serie de tiempo

Al concluir el periodo de ejecución de este proyecto, el Centro COPAS había completado 7 años de observaciones mensuales en la serie de tiempo de la Estación 18. Este conjunto de observaciones no sólo ha permitido establecer los patrones estacionales de variabilidad

en la estructura hidrográfica y en las condiciones físico-químicas predominantes sobre la plataforma continental. Su creciente cobertura temporal hace posible caracterizar la variabilidad interanual en los patrones biológicos y plantear hipótesis sobre los procesos que determinan en mayor medida la variabilidad física y biológica en el océano costero.

Las observaciones mensuales obtenidas durante el periodo de ejecución de este proyecto reflejaron la variabilidad estacional típica de esta zona de surgencia, con el ascenso de aguas frías, densas, y con bajo contenido de oxígeno disuelto hasta ca. 20 m de la superficie, y concurrente con un aumento en la estratificación térmica de las capas más superficiales por efecto de la radiación solar. La isolínea de 3 mL L⁻¹ de oxígeno se mantuvo a una profundidad promedio de 30 m durante la primavera-verano, y descendió a cerca de 40 m en el invierno. En años previos las oscilaciones estacionales de dicha isolínea han tenido mayor amplitud, llegando a desplazarse 60 m en la primavera de 2004 y en el invierno de 2006. El cambio en este rango de variación estacional en los perfiles de oxígeno está probablemente relacionado con cambios de mayor escala y que se manifiestan localmente como cambios en la profundidad de la termoclina y en el grado de intrusión de AESS en la plataforma continental. Una inspección de las series de tiempo de anomalía de TSM en el área de estudio y en la región El Niño 1+2, junto con los perfiles de anomalías en propiedades hidrográficas y físico-químicas de la columna de agua, sugiere una conexión en estos aparentes cambios en el régimen de variabilidad local y forzamiento físico remoto. La falta de ventilación de la columna de agua durante los últimos inviernos podría obedecer al efecto combinado de cambios en el régimen local de forzamiento atmosférico de la mezcla vertical sobre la plataforma, y a un desplazamiento de la termoclina – forzado remotamente – que aumente la frecuencia de intrusión de AESS más densas y con menor oxígeno.

Otra tendencia interanual potencialmente relacionada con estos cambios es la disminución sostenida en las concentraciones de silicato cerca del fondo, que a comienzos de la serie de tiempo (primavera 2003) superaban los 30 μM a 40 m y alcanzaban los 20 μM en superficie, y que durante el último año no superaron los 10 μM en la capa fótica y fueron < 30 μM cerca del fondo. Los perfiles verticales de concentraciones de sílice medidas a lo largo de la transecta 3 (que incluye a la Estación 18) y sobre el resto de la grilla de muestreo durante el crucero de Enero 2009, sugieren

que esta baja en las concentraciones medidas mensualmente en la Estación 18 responde a un fenómeno de mayor escala espacial, y cuya naturaleza y potencial impacto sobre la respuesta biológica a la surgencia costera y flujos biogeoquímicos sobre la plataforma continental es necesario estudiar en detalle. Por ejemplo, durante el período de monitoreo mensual correspondiente al presente proyecto se detectó un importante cambio en la estructura de tamaños del fitoplancton. La biomasa fitoplanctónica presentó valores altos en relación con temporadas anteriores, con máximas concentraciones de clorofila total en Octubre 2008 (ca. 50 mg m^{-3}). En promedio, un 71% de esta biomasa correspondió a la fracción nanoplanctónica ($< 20 \text{ um}$). Las concentraciones de clorofila observadas para esta fracción de tamaños durante la primavera-verano de 2008 son los valores más altos hasta ahora observados en la serie de tiempo, con un máximo de 24 mg m^{-3} que es sustancialmente mayor que lo observado en años previos. Estas altas concentraciones cubrieron un rango de profundidades de 30 m desde la superficie, y persistieron durante toda la primavera y el verano, con un patrón de distribución muy similar a la clorofila total. De persistir en el tiempo, este cambio en la estructura de tamaños del fitoplancton sobre la plataforma continental de Chile central podría afectar la estructura de las tramas tróficas, los flujos de energía, y eventualmente el reclutamiento de especies de peces e invertebrados costeros.

La biomasa del zooplancton en la Estación 18 varió en forma consistente con el patrón estacional de bajos valores en invierno y un aumento hacia finales de verano. Sin embargo, el promedio anual durante el periodo cubierto por este proyecto tuvo el mayor valor registrado en la serie de tiempo entre Agosto 2004 y Junio 2009. Este cambio en el patrón de abundancia del zooplancton en la Estación 18 podría estar conectado con el cambio en la estructura de tamaños del fitoplancton indicado más arriba, el que a su vez podría estar forzado por los cambios en la ventilación y/o disponibilidad de sílice en la columna de agua. Estudios recientes en esta región han indicado que las fluctuaciones estacionales de la biomasa de zooplancton parecen estar fuertemente asociadas a cambios en la profundidad de la OMZ, y que bajo condiciones de surgencia más intensa se observaría una mayor agregación del zooplancton en la zona costera (Escribano et al., 2007). El análisis de las observaciones colectadas durante el crucero de Enero 2009 indicó además que cambios en la profundidad de la OMZ podrían determinar cambios

espacio-temporales en la diversidad del zooplancton a lo largo la región de estudio (ver Hidalgo et al. en Anexo 2).

En términos de ictioplancton, durante el periodo de estudio la abundancia de huevos de las 3 especies objetivo (*Engraulis ringens*, *Strangomera bentincki* y *Merluccius gayi*) revelaron una marcada estacionalidad en sus épocas de máxima abundancia así como una relativa coherencia en sus tiempos de aparición en el plancton, centrados todos en los meses entre fines de invierno a inicios de primavera. Sin embargo, sobre un período más largo (2004-2009) es evidente la disminución progresiva en las abundancias de huevos y larvas de estas especies, sobre todo en los dos últimos años de observación. Es difícil determinar en qué medida esta disminución en abundancia del ictioplancton se relaciona con cambios en las condiciones bio-oceanográficas en la región durante los últimos años, debido a que las abundancias y periodos de mayor abundancia de ictioplancton resultan del efecto combinado de múltiples factores. Entre ellos está el cambio interanual en los periodos reproductivos de los peces adultos, el efecto de las pesquerías sobre los peces adultos, y los procesos oceanográficos que operan para determinar las condiciones advectivas y la oferta alimenticia mientras el ictioplancton se encuentra presente en la columna de agua. Investigaciones recientes en las costas de California (Rykaczewski y Checkley 2008) indican que cambios en el patrón de viento costero durante las últimas décadas pueden explicar las variaciones registradas en abundancia de sardinas (*Sardinops sagax*), a través de cambios en la estructura de tamaños del fitoplancton generados por cambios en la importancia relativa de la surgencia costera y de aquella generada por bombeo de Ekman. Un cambio interanual en el forzamiento atmosférico del océano costero en Chile centro-sur, y en el timing de la surgencia costera en la región de estudio (ver Montecinos y Gomez 2010) podría ser uno de los factores detrás de la disminución sostenida en abundancias de larvas de sardina común, anchoveta y merluza en la región de estudio.

Finalmente, el análisis de la variabilidad espacio-temporal en TSM y clorofila aquí presentado confirma que la Estación 18 se encuentra sobre una zona fuertemente influenciada por la surgencia costera. Resultados aún no publicados y derivados del análisis conjunto de este set de imágenes satelitales, mediciones de viento en Pta. Hualpén, y mediciones *in situ* de la serie de tiempo en la Estación 18 (Tapia et al. en

preparación, ver Anexo 2), indican que las condiciones físico-químicas y biológicas en el área responden al viento favorable a la surgencia sobre escalas de hasta 15 días, y que el patrón espacio-temporal de respuesta de la clorofila superficial está fuertemente determinado por la batimetría, y restringido a una zona que incluye a la Estación 18 y que abarca la plataforma continental entre los cañones submarinos de BioBio e Itata.

El monitoreo de condiciones ambientales en zonas costeras por medio de sensoramiento remoto presenta desafíos y dificultades, sobre todo en términos de resolución espacial cerca de la costa, y de la baja resolución temporal que resulta del necesario proceso de elaborar imágenes con promedios semanales para minimizar los problemas de cobertura por nubes. La consistencia entre las mediciones *in situ* de temperatura en la Estación 18 y los valores de TSM obtenidos desde imágenes semanales MODIS para el área indica que es posible complementar la serie de tiempo mensual con series de tiempo remotas que tienen mayor cobertura espacial y frecuencia de muestreo. Por otro lado, la discrepancia observada entre la serie de tiempo de clorofila superficial obtenida desde MODIS y las mediciones *in situ* realizadas en la Estación 18 es probablemente una consecuencia del alto grado de heterogeneidad espacial en esta variable. Entre los 9 píxeles que fueron promediados para obtener cada valor de la serie de tiempo de clorofila, el coeficiente de variación llegó a valores máximos de 177% y en promedio fue de un 43%. El mismo cálculo para las imágenes de TSM entrega un máximo de 7% y un promedio de 1.3%. Esta diferencia en niveles de variabilidad espacial sugieren que las mediciones puntuales de clorofila superficial *in situ* pueden no ser tan buen indicador de las condiciones generales sobre la plataforma continental como aquellas obtenidas promediando un grupo de píxeles costeros en las imágenes satelitales.

Los análisis de escalas de variabilidad aquí presentados son un avance en el proceso de incorporar esta información remota a la interpretación y síntesis del cúmulo de información sobre mediciones *in situ* que ha generado la serie de tiempo de la Estación 18 durante los últimos años.

8. CONCLUSIONES

8.1. Crucero oceanográfico de Enero 2009

Durante el crucero de monitoreo de Enero 2009 se observaron condiciones de surgencia activa, reflejadas en las distribuciones horizontales y verticales de la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, así como en los patrones de variabilidad detectados por imágenes satelitales para TSM, clorofila, y anomalía del nivel del mar. Las distribuciones horizontales y verticales de variables químicas medidas en la columna de agua indicaron la presencia de niveles de oxígeno, nutrientes, salinidad y temperatura propios de Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (AESS) en las estaciones costeras.

Se observó un marcado gradiente térmico en dirección perpendicular a la costa, con un frente térmico proyectándose hacia el norte de Punta Lavapié en dirección paralela al quiebre de la plataforma, con presencia de meandros y filamentos que se extendieron en dirección costa-océano, y cuyo origen está asociado a los principales promontorios y accidentes topográficos de la línea de costa. La estructura hidrográfica y perfiles de oxígeno disuelto observados a lo largo de la transecta al norte de Punta Lavapié indicaron la presencia de un núcleo con características típicas del AESS, entre profundidades de 100 y 400 m y ubicado sobre el quiebre de la plataforma continental. Asociado a dicha estructura, se observó un aumento en las concentraciones de clorofila-a en superficie y disminuciones en las concentraciones superficiales de nitrato y sílice. Al mismo tiempo se observó una franja con altas concentraciones de clorofila en toda la zona costera, principalmente al interior del Golfo de Arauco y sobre el área flanqueada por los cañones submarinos de BioBio e Itata (i.e. terraza del Itata).

Las concentraciones superficiales de nutrientes inorgánicos variaron entre 5 y 27 μM para nitrato, 0.01 y 1 μM para nitrito, 0.1 y 3 μM para fosfato y 0.4 y 18 μM para silicato, con distribuciones espaciales que fueron consistentes entre sí y con los patrones hidrográficos ya descritos. Las más altas concentraciones superficiales se encontraron sobre una banda que se proyecta hacia el norte desde Pta. Lavapié y en las estaciones costeras frente a Pta. Nugurne. Se observó un déficit sostenido de nitrógeno respecto del

fosfato, que sugiere la influencia de procesos biológicos asociados a aguas pobres en oxígeno disuelto (e.g. desnitrificación).

El fitoplancton estuvo compuesto en un 77% por diatomeas, principalmente de los géneros *Thalassiosira*, *Skeletonema* y *Chaetoceros*, que tuvieron una biomasa integrada promedio de 298.4 mgC m⁻² y se concentraron mayoritariamente sobre las estaciones de plataforma continental. La clorofila total estuvo concentrada mayoritariamente entre 0 y 40 m de profundidad, con los mayores valores observados en las estaciones costeras. Un promedio de 40 ± 29 % de la clorofila total en superficie correspondió a la fracción nano-planctónica, que junto al pico-plancton presentó mayores concentraciones en estaciones ubicadas sobre el quiebre de la plataforma continental.

El microzooplancton (>20 µm), estuvo compuesto principalmente por dinoflagelados tecados y ciliados loricados, con un 86 y 14% de la biomasa total. Las larvas nauplii de crustáceos se concentraron preferentemente en el sector del quiebre de la plataforma continental y en estaciones más oceánicas de la grilla estudiada. La biomasa integrada de pellets fecales de zooplancton tuvo un promedio de 52.1 mgC m⁻², y estuvo compuesta principalmente por pellets de eufáusidos y copépodos.

La biomasa de zooplancton mostró una tendencia a aumentar sobre una franja costera y en el estrato de 0-50 m. Las mayores agregaciones fueron observadas cerca de la desembocadura del río Itata y en el Golfo de Arauco, y estuvieron dominadas numéricamente por copépodos (> 70%) y poliquetos (> 23%). Los copépodos se distribuyeron sobre toda el área estudiada, pero presentaron mayores concentraciones en las 2 transectas de más al norte y en las estaciones al interior del Golfo de Arauco.

En el ictioplancton, las especies más abundantes en el estado huevo fueron el mote (*Normanichthys crockeri*) con 49.3 huevos / 100 m³ y el pampanito (*Stromateus stellatus*) con 35.3 huevos / 100 m³, con ambas abundancias promedio registradas en el estrato 0-200m. Las especies más abundantes en estado de larva fueron *Protomyctophum chilensis* (74.6 larvas/100m³) seguido de *Hypsoblennius sordidus* y *Merluccius gayi* con 35.5 y 35.1 larvas/100m³, respectivamente. En cuanto a las especies objetivo, se encontraron huevos de anchoveta (*Engraulis ringens*) en bajas concentraciones (1 – 3 h/100m³) y en sólo 1 estación costera del extremo norte del área de muestreo. Las larvas de esta especie se concentraron en estaciones costeras al sur de Pta. Lavapié, en

abundancias de 0.5 – 27.5 larvas/100m³. En la misma zona se concentraron larvas de sardina común (*Strangomera bentincki*). Los huevos de merluza común (*Merluccius gayi*) se encontraron cerca de la costa en el extremo norte del área (transectas 1 y 3) y en concentraciones de 0.5 – 9.7 h/100m³. Las larvas de esta especie aparecieron en el extremo sur del área de estudio y en concentraciones de 1 – 69.1 larvas/100m³. Las bajas concentraciones de huevos en relación a las larvas son esperables dado el desfase del crucero con la época de máximo reproductivo de las especies objetivo.

8.2. Serie de tiempo

Las condiciones oceanográficas observadas en la Estación 18, sobre la plataforma continental de Chile central, mostraron que durante los inviernos de 2008 y 2009 se reestablecieron parcialmente las condiciones observadas con anterioridad al invierno anómalamente frío y seco que se registró en 2007. Durante la primavera-verano 2008-2009 se observaron condiciones típicamente esperadas para la época de surgencia activa, con un incremento en la temperatura superficial a valores de 14-15°C y el concurrente ascenso de la isoterma de 11.5°C hasta ca. 20 m de la superficie. Un ascenso similar se observó para isohalinas e isopicnas características del Agua Ecuatorial SubSuperficial, con concentraciones de oxígeno disuelto <2 mL L⁻¹.

El oxígeno disuelto y nutrientes mostraron una marcada estacionalidad con una columna de agua bien oxigenada en invierno y un empobrecimiento en primavera-verano, así como una disminución de nutrientes en otoño-invierno y un aumento en primavera-verano, debido a eventos de surgencia costera que llevan AESS a la superficie. No obstante lo anterior, se verificó una disminución sostenida en las concentraciones de sílice – en relación a las observadas al inicio de la serie de tiempo en 2003-2004 – tanto en superficie como en aguas cercanas al fondo. Al mismo tiempo, las concentraciones de clorofila-a en la fracción nano-planctónica (< 20 µm) durante la primavera-verano de 2008 alcanzaron los valores más altos hasta ahora observados en la serie de tiempo, representando un 71% de la biomasa fitoplanctónica durante el máximo detectado en Octubre 2008 (ca. 50 mg m⁻³). Estas altas concentraciones cubrieron un rango de profundidades de 30 m desde la superficie, y persistieron durante toda la primavera y el

verano, con un patrón de distribución muy similar a la clorofila total. Por otro lado, la abundancia total de diatomeas se incrementó a inicios de la primavera de 2008 (Octubre), alcanzó su máximo en Enero 2009 con 7.6×10^6 células L^{-1} en superficie, y luego disminuyó en forma gradual para alcanzar valores mínimos en Mayo 2009.

Los principales componentes del microzooplancton fueron los dinoflagelados y ciliados lorizados, que en su conjunto representaron más del 85% de las abundancias totales registradas en todo el período de estudio. La abundancia de microzooplancton mostró una clara variación estacional, con un marcado aumento a inicios de primavera (Octubre 2008) y una disminución gradual hasta alcanzar un mínimo en otoño (Mayo 2009). Estos cambios fueron más abruptos en superficie que en el estrato de 10 m de profundidad.

La biomasa zooplanctónica en la Estación 18 ha mostrado un incremento sostenido desde Agosto 2004 (2.16 mg C m^{-2}) hasta Junio 2009 (6.25 mg C m^{-2}), y alcanzó valores máximos en Octubre 2008 y Enero 2009, períodos en que se intensificaron los vientos favorables a la surgencia. El zooplancton está dominado numéricamente por copépodos (>90%), principalmente *Paracalanus cf. indicus* (>50%), *Oithona similis* (>20%) y *Calanoides patagoniensis* (> 10%), especies estrechamente asociadas a la zona costera y a los centros de surgencia.

En cuanto al ictioplancton, las abundancias de huevos y larvas de las tres especies objetivo (*Engraulis ringens*, *Strangomera bentincki* y *Merluccius gayi*) fueron muy bajas en relación a años anteriores. Su aparición en el plancton tuvo una marcada estacionalidad y varió en forma sincrónica para huevos de anchoveta y merluza común, y para larvas de las 3 especies a inicios de primavera (Octubre-Noviembre 2008). Adicionalmente, se observó que los máximos larvales ocurrieron con posterioridad a los períodos en que se espera el mayor desove, lo cual concordaría con los resultados del crucero de enero en que se encontró mayor abundancia de larvas de las especies objetivo. Los valores integrados de Producción Primaria (PP) y Respiración Comunitaria (RC) mostraron una marcada estacionalidad, con una tasa máxima de PP en Septiembre 2009 ($11.55 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). A diferencia de años anteriores, la RC fue mayor que la PP durante gran parte del período, reflejando condiciones de heterotrofia en el sistema.

El flujo total de carbono biogénico varió entre un mínimo de $358 \text{ mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ en Abril 2009 y un máximo de $2048 \text{ mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ en Diciembre 2008. Más de un 90% de este material correspondió a pellets fecales. Un 57% de este material fecal correspondió a pellet fecales de eufáusidos y apendicularia.

El análisis de la variabilidad superficial de TSM, clorofila (CLA), y anomalía del nivel del mar (ANM) a partir de imágenes satelitales indicó el predominio de la surgencia costera como proceso modulador de las condiciones físico-químicas y biológicas sobre la plataforma continental. La Estación 18 se encuentra dentro de un área directamente influenciada por la variabilidad de mesoescala inducida por la surgencia costera.

Las escalas de variabilidad características sobre la plataforma continental al norte de Pta. Lavapié fueron de ca. 50 días para la TSM y ANM, y 20 días o menos para la clorofila. En esta región se observaron temperaturas anómalamente altas en Diciembre de 2008, seguidas por altas concentraciones de clorofila en Enero 2009, mes en que se realizó el crucero de monitoreo bio-oceanográfico, y luego un período de altas concentraciones en Marzo 2009.

Los desembarques mensuales de sardina y anchoveta en la región del BioBio, utilizados como indicadores de actividad pesquera, mostraron un marcada estacionalidad y variabilidad interanual que, en el caso de la sardina, se correlacionó significativamente con la variabilidad en TSM. Una correlación de $r=-0.35$ ($p<0.01$) para 6 meses de rezago de los desembarques de sardina con respecto a la anomalía de TSM, sugiere que primaveras frías (i.e. con surgencia intensa) darían lugar a mayores capturas durante el otoño siguiente.

8.3. Conclusión general

Las observaciones realizadas durante el crucero de monitoreo de Enero 2009 y durante el monitoreo mensual en las estaciones costeras frente a Bahía Coliumo indican que los patrones de variabilidad en condiciones hidrográficas y físico-químicas de la columna de agua sobre la plataforma continental están determinados principalmente por la surgencia costera. Los accidentes batimétricos y cambios abruptos en la topografía costera de la región parecen tener un fuerte efecto sobre los flujos costeros forzados por la surgencia, y sobre la distribución de biomasa fitoplanctónica, zooplancton y larvas de pequeños peces

pelágicos que históricamente han sido detectados sobre la plataforma continental de la región. No obstante lo anterior, la mayor abundancia de larvas fue observada fuera del Golfo de Arauco, lo que podría deberse a exportación de las mismas desde aguas interiores del golfo – que anteriormente ha sido señalada anteriormente como potencial área de crianza y retención durante el verano –, o a su transporte desde la zona costera más al sur (cercañas de Isla Mocha) que en proyectos anteriores ha sido señalada como una zona importante de desove de sardinas y anchovetas. Las bajas abundancias de huevos en relación con las abundancias de larvas detectadas en el crucero de Enero 2009 serían normales para la fecha de muestreo, dado que la estación reproductiva principal de anchoveta y sardina común corresponde a invierno-inicios de primavera, y en merluza común ocurre a inicios de primavera.

Además del marcado patrón estacional que característicamente han mostrado las abundancias de huevos y larvas de las tres especies objetivo en la Estación 18, las observaciones realizadas durante el monitoreo mensual de este proyecto confirman que ha habido una disminución sostenida en la abundancia de huevos y larvas durante los últimos dos años. Aunque es difícil determinar en qué medida este cambio obedece a cambios en las condiciones bio-oceanográficas en la región – versus el efecto de las pesquerías sobre los peces adultos y su reproducción – los cambios concurrentes que se observaron en la disponibilidad de sílice y en la estructura de tamaños del fitoplancton en la Estación 18 podrían corresponder a una manifestación local de cambios de mayor escala en el régimen de forzamiento físico en la región. Es necesario investigar el potencial impacto ecológico y biogeoquímico de dichos cambios.

9. REFERENCIAS

- Ahumada, R. 1989. Producción y destino de la biomasa fitoplanctónica en un sistema de bahías en Chile central: una hipótesis. *Biología Pesquera* **18**:53-66.
- Alvarez-Salgado, X. A., J. Aristegui, E. D. Barton, y D. A. Hansell. 2007. Contribution of upwelling filaments to offshore carbon export in the subtropical Northeast Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography* **52**:1287-1292.
- Arcos, D., L. A. Cubillos, y S. P. Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-98 effects off Chile. *Progress in Oceanography* **49**:597-617.
- Arcos, D. y N. Navarro. 1986. Análisis de un índice de surgencia para la zona de Talcahuano, Chile (lat. 37°S). *Investigación Pesquera* **33**:91-98.
- Arcos, D., S. P. Núñez, y A. Acuña. 1996. Variabilidad de pequeña escala en la zona nerítica del sistema de surgencia de Talcahuano (Chile central): identificación y dinámica de áreas de retención larval. *Gayana Oceanológica* **4**:21-58.
- Arcos, D. y R. E. Wilson. 1984. Upwelling and distribution of Chl-a within the bay of Concepción, Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **18**:25-35.
- Arntz, W. E. y E. Fahrbach. 1996. El Niño: Experimento Climático de la Naturaleza. Fondo de Cultura Económica, México, DF.
- Atkinson, L. P., A. Valle-Levinson, D. Figueroa, R. De Pol-Holz, V. A. Gallardo, W. Schneider, J. L. Blanco, y M. Schmidt. 2002. Oceanographic observations in Chilean coastal waters between Valdivia and Concepcion. *Journal of Geophysical Research* **107**:1029/2001.
- Barber, R. T. y R. L. Smith. 1981. Coastal upwelling ecosystems. Pages 31-68 in A. R. Longhurst, editor. *Analysis of Marine Ecosystems*. Academic Press.
- Brandhorst, W. 1971. Condiciones oceanográficas estivales frente a la costa de Chile. *Revista de Biología Marina* **14**:45-84.
- Cáceres, M. y D. F. Arcos. 1991. Variabilidad en la estructura espacio-temporal de un área de surgencia frente a la costa de Concepción, Chile. *Investigación Pesquera (Chile)* **36**:27-38.
- Campbell, L., H. A. Nolla, y D. Vaultot. 1994. The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the Central of Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography* **39**:954-961.
- Castro, L., A. Llanos, J. L. Blanco, E. Tarifeño, R. Escribano, y M. Landaeta. 2002. Latitudinal variations in spawning habitat characteristics: influence on the early life history traits of the anchoveta, *Engraulis ringens*, off northern and central Chile. *GLOBEC Report* **16**:42-45.
- Correa-Ramirez, M. A., S. Hormazabal, y G. Yuras. 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29°-39°S). *Geophysical Research Letters* **34**:doi:10.1029/2007GL029541.
- Daneri, G., V. Dellarossa, R. Quiñones, B. Jacob, P. Montero, y O. Ulloa. 2000. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Marine Ecology Progress Series* **197**:41-49.
- Dugdale, R. C. y F. P. Wilkerson. 1986. The use of ¹⁵N to measure nitrogen uptake in eutrophic oceans; experimental considerations. *Limnology and Oceanography* **31**:673-689.
- Edler, L. 1979. Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea phytoplankton and chlorophyll. *Baltic Marine Biology Publications* **5**:1-38.
- Escribano, R. y P. Hidalgo. 2000. Spatial distribution of copepods during coastal upwelling in a northern area of the Eastern Boundary Humboldt Current. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **80**:283-290.

- Escribano, R., P. Hidalgo, H. González, R. Giesecke, R. Riquelme-Bugueño, y K. Manríquez. 2007. Seasonal and inter-annual variation of mesozooplankton in the coastal upwelling zone off central-southern Chile. *Progress in Oceanography* **75**:470-485.
- Escribano, R. y W. Schneider. 2007. The structure and functioning of the coastal upwelling system off central/southern Chile. *Progress in Oceanography* **75**:343-347.
- Farías, L., M. Graco, y O. Ulloa. 2004. Nitrogen cycling in continental shelf sediments of the upwelling ecosystem off central Chile. *Deep-Sea Research II* **51**:2491-2505.
- Faúndez, P. B., C. E. Morales, y D. Arcos. 2001. Variabilidad espacial y temporal en la hidrografía invernal del sistema de bahías frente a la VIII región (Chile centro-sur). *Revista Chilena de Historia Natural* **74**:817-831.
- Fernández, C., P. Raimbault, N. Garcia, P. Rimmelin, y G. Caniaux. 2005. An estimation of annual new production and carbon fluxes in the northeast Atlantic Ocean during 2001. *Journal of Geophysical Research* **110**:doi 10.1029/2004JC002616.
- Fonseca, T. y M. Farías. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. *Investigacion Pesquera (Chile)* **34**.
- Fossing, H., V. A. Gallardo, B. B. Jorgensen, M. Huttel, L. P. Nielsen, H. Schulz, D. A. Canfield, S. Forster, R. N. Glud, J. K. Gundersen, J. Kuver, N. B. Ramsing, A. Teske, B. Thamdrup, y O. Ulloa. 1995. Concentration and transport of nitrate by the mat-forming sulphur bacterium *Thioploca*. *Nature* **374**:713-715.
- González, H. E., G. Daneri, J. L. Iriarte, B. Yannicelli, E. Menschel, C. Barría, S. Pantoja, y L. Lizárraga. 2009. Carbon fluxes within the epipelagic zone of the Humboldt Current System off Chile: The significance of euphausiids and diatoms as key functional groups for the biological pump. *Progress in Oceanography* **83**:217-227.
- Gonzalez, H. E., E. Menschel, C. Aparicio, y C. Barria. 2007. Spatial and temporal variability of microplankton and detritus, and their export to the shelf sediments in the upwelling area off Concepción, Chile (36°S), during 2002–2005. *Progress in Oceanography* **75**:435-451.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Grasshoff, K., M. Ehrhardt, y K. Kremling. 1983. Determination of nutrients. Page 143 *Methods of Seawater Analysis*.
- Hidalgo, P. y R. Escribano. 2001. Succession of pelagic-copepod species during the period 1996/1998 in northern Chile: the influence of the 1997-98 El Niño. *Hydrobiologia* **453**:153-160.
- Hidalgo, P. y R. Escribano. 2007. Coupling of life cycles of the copepods *Calanus chilensis* and *Centropages brachiatus* to upwelling induced variability in the central-southern region of Chile. *Progress in Oceanography* **75**:501-517.
- Hormazábal, S., G. Shaffer, y O. Leth. 2004. Coastal transition zone off Chile. *Journal of Geophysical Research* **109**:doi:10.1029/2003JC001956.
- Isaaks, E. H. y R. M. Srivastava. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press.
- Kana, T. y O. M. Glibert. 1987. Effect of irradiances up to 2000 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ on marine *Synechococcus* WH 7803-I. growth, pigmentation and cell composition. *Deep-Sea Research* **34**:479-516.
- Knap, A. H., A. Michaels, R. Dow, R. Johnson, K. Gundersen, J. Sorensen, A. Clos, F. Howse, M. Hammer, N. Bates, A. Doyle, y T. Waterhouse. 1993. U.S. Joint Global Flux Study, Bermuda Atlantic Time- Series Study. *Bats Method Manual Version 3*:108 pp.
- Landaeta, M. F. y L. R. Castro. 2006. Spawning and larval survival of the Chilean hake *Merluccius gayi* under late summer conditions in the Gulf of Arauco, central Chile. *Fisheries Research* **77**:115-121.
- Lee, S. y J. Fuhrman. 1987. Relationship between biovolume and biomass of naturally-derived marine bacterioplankton. *Applied and Environmental Microbiology* **53**:1298-1303.

- Legendre, P. y L. Legendre. 1998. Numerical Ecology. 2nd edition. Elsevier Science, Amsterdam.
- Letelier, J., O. Pizarro, y S. Nuñez. 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research* **114**:doi:10.1029/2008JC005171.
- Lluch-Belda, D., R. Crawford, T. Kawasaky, A. MacCall, R. A. Parrish, R. A. Schwartzlose, y P. E. Smith. 1989. World-wide fluctuationsof sardine and anchovy stocks: the regime problem. *South African Journal of Marine Science* **8**:195-205.
- Lutjeharms, J. R. E., F. A. Shillington, y C. M. Duncmbe-Rae. 1991. Observation of extreme upwelling filaments in the southeast Atlantic Ocean. *Science* **253**:774-776.
- Manly, B. F. J. 2005. Multivariate statistical methods: a primer. 3rd edition. Chapman & Hall.
- Montecinos, A. y F. Gomez. 2010. ENSO modulation of the upwelling season off southern-central Chile. *Geophysical Research Letters* **37**:doi:10.1029/2009GL041739.
- Morales, C. E., H. E. Gonzalez, S. Hormazabal, G. Yuras, J. Letelier, y L. Castro. 2007. The distribution of chlorophyll-a and dominant planktonic components in the coastal transition zone off Concepción, central Chile, during different oceanographic conditions. *Progress in Oceanography*:<http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2007.1008.1026>.
- Parada, C. E., M. A. Sobarzo, D. Figueroa, y L. Castro. 2001. Circulacion del Golfo de Arauco en un periodo de transicion estacional : un nuevo enfoque. *Investigaciones Marinas, Valparaiso* **29**:11-23.
- Parsons, T. R., Y. Maita, y C. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York.
- Peterson, W. T., D. Arcos, G. Mcmanus, H. Dam, D. Bellantoni, T. Johnson, y P. Tiselius. 1988. The nearshore zone during coastal upwelling: daily variability and coupling between primary and secondary production of central Chile. *Progress in Oceanography* **20**:1-40.
- Pizarro, O. 1999. Low frequency fluctuations in the eastern boundary current off South America: remote and local forcing. Ph.D. Goteborg University, Goteborg, Sweden.
- Rykaczewski, R. R. y D. M. Checkley. 2008. Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* **105**:1965-1970.
- Shaffer, G., S. Hormazabal, O. Pizarro, y S. Salinas. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature over the slope of central Chile. *Journal of Geophysical Research* **104**:29951-29961.
- Shaffer, G., O. Pizarro, L. Djurfeldt, S. Salinas, y J. Rutlant. 1997. Circulation and low-frequency variability near the chilean coast: remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. *Journal of Physical Oceanography* **27**:217-234.
- Silva, N. 1983. Masas de agua y circulación en la región norte de Chile (latitud 18°S-32°S). *Ciencia y Tecnología del Mar. (Valparaiso)* **7**:47-84.
- Silva, N. y S. Neshyba. 1979. On the southernmost extension of the Peru-Chile undercurrent. *Deep-Sea Research* **26**:1387-1393.
- Slawyk, G. y P. Raimbault. 1995. Simple procedure for simultaneous recovery of dissolved inorganic and organic nitrogen in ¹⁵N-tracer experiments and improving the isotopic mass balance. *Marine Ecology Progress Series* **124**:289-299.
- Slawyk, G., P. Raimbault, y N. Garcia. 1998. Measuring gross uptake of ¹⁵N-labeled nitrogen by marine phytoplankton without particulate matter collection: Evidence of low ¹⁵N losses to the dissolved organic nitrogen pool. *Limnology and Oceanography* **43**:1734-1739.
- Sobarzo, M. 1998. Surgencia costera sobre una plataforma continental limitada por cañones submarinos, Concepción Chile Central. Ph.D. Universidad de Concepción, Concepción.
- Sobarzo, M. y L. Djurfeldt. 2004. Coastal upwelling process on a continental shelf limited by submarine canyons, Concepcion, central Chile. *Journal of Geophysical Research* **109**:doi:10.1029/2004JC002350.

- Sobarzo, M., B. Yannicelli, L. R. Castro, M. Landaeta, y W. Schneider. 2005. Topographic control of the larval Clupeiform distribution in the coastal upwelling area off Concepción, Central Chile. Pages 26-27 *in* L. Castro, P. Freon, C. van der Lingen, y A. Uriare, editors. Report of the SPACC Meeting on Small Pelagic Fish Spawning Habitat and Dynamics and the Daily Egg Production Method (DEPM). GLOBEC.
- Strickland, D. y T. R. Parsons. 1968. A practical handbook of seawater analysis. Pigment analysis. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada **167**:311 pp.
- Strub, P. T., J. M. Mesías, V. Montecino, J. Rutlant, y S. Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. Pages 273-313 *in* A. R. Robinson y K. H. Brink, editors. The Sea. John Wiley & Sons, New York.
- UNESCO. 1983. Chemical methods for use in marine environmental monitoring. Intergovernmental Oceanographic Commission. Manual and Guides **12**.
- Utermöhl, H. 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. Mitteilungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie **9**:1-39.
- Williams, P. I. y N. W. Jenkinson. 1982. A transportable microprocessor controlled precise Winkler titration suitable for field station and shipboard use. Limnology and Oceanography **27**:576-584.

10. ANEXO 1 – Personal participante

Composición del equipo profesional y técnico y sus responsabilidades. Los investigadores principales estuvieron involucrados directamente en todas las actividades del proyecto, incluidas la elaboración de la propuesta metodológica, planificación de crucero, planificación de análisis de distintas variables, y en la elaboración informe final.

Nombre	Institucion	Responsabilidad
Fabián Tapia, Ph.D.	UdeC	Jefe de proyecto, coordinación general, elaboración propuesta metodológica, planificación de crucero, jefe de crucero estacional. Análisis de variabilidad TSM, CLA, ANM. Elaboración informe final.
Leonardo Castro, Ph.D.	UdeC	Elaboración propuesta metodológica, Planificación de crucero Planificación de análisis Ictioplancton. Elaboración de informe final.
Giovanni Daneri, Ph.D.	CIEP	Elaboración propuesta metodológica, Planificación de crucero Planificación de análisis Producción primaria. Elaboración informe final
Camila Fernández, Ph.D.	UdeC	Elaboración propuesta metodológica, Planificación de crucero. Planificación de análisis de nutrientes. Crucero estacional. Elaboración informe final.
Humberto González, Dr.	UACH	Elaboración propuesta metodológica, Planificación de crucero Planificación de análisis Flujos verticales, microplancton. Elaboración informe final. Elaboración informe final.
Pamela Hidalgo, Ph.D.	UdeC	Elaboración propuesta metodológica, Planificación de crucero Planificación de análisis Meso- y macro-zooplancton. Elaboración informe final.
Ruben Escribano, Ph.D.	UdeC	Planificación de crucero. Planificación análisis meso- y macro-zooplancton. Crucero estacional.
Carmen Morales, Ph.D.	UdeC	Elaboración propuesta metodológica, Planificación de crucero Planificación de análisis Nano- y pico-plancton, y clorofila-a in situ. Elaboración informe final.
Oscar Pizarro, Dr.	UdeC	Elaboración propuesta metodológica, Planificación de crucero Planificación de análisis Oceanografía Física, data satelital, data meteorológica. Elaboración informe final.
Marcelo Fuentes, Biol. Mar.	UdeC	Crucero estacional. Bases de datos, boletines.
Valeria Anabalón, Biol. Mar.	UdeC	Crucero estacional. Análisis de DOC, POC
Loreto Torreblanca, Biol Mar	UdeC	Crucero estacional. Pico-, nano-, fitoplancton
Elda Riquelme, Biol Mar	UdeC	Crucero estacional. Clorofila fraccionada.
Susana Giglio, Oceanogr.	UdeC	Crucero estacional. CTD-Roseta
Nadin Ramirez, Oceanogr.	UdeC	Crucero estacional. CTD-Roseta
Oscar Vergara	PUCV	Crucero estacional. CTD-Roseta
Cecilia Torres, Biol Mar	UACH	Crucero estacional. Fitoplancton, POC, microzooplancton
Francisca Muñoz, Biol Mar	UACH	Crucero estacional. Fitoplancton, POC, microzooplancton
Katty Donoso, Biol Mar	UdeC	Crucero estacional. Muestreo zoo- e ictioplancton
Odette Vergara, Biol Mar	UdeC	Crucero estacional. Muestreo zoo- e ictioplancton
Lorena Lizárraga, Biol Mar	UdeC	Crucero estacional. Oxígeno disuelto, curvas P/I
Oscar Chiang, Biol Mar	UdeC	Crucero estacional. Oxígeno disuelto, curvas P/I
Ma. Estrella Alcamán, Biol Mar	UdeC	Crucero estacional. Gases, nutrientes, isótopos naturales

11. ANEXO 2 – Manuscritos

21 **Abstract**

22

23 This study assessed the structure of the copepod community in the upper 200 m of the
24 coastal upwelling region off central-southern Chile in late summer 2009. Vertically
25 stratified zooplankton samples and hydrographic variables were obtained at 42 stations
26 over the continental shelf and oceanic areas. The survey took place during active
27 upwelling, reflected in a cold upwelling plume extending up to 150 km offshore. A total
28 of 62 species were found. Of these, *Oithona similis* and *Paracalanus* cf. *indicus*
29 accounted for ca. 60% of the whole community. Species richness (R) and the Shannon-
30 Wiener diversity index (H') were estimated and the latter was additionally modified to
31 incorporate the effect of copepod size on diversity ($H's$). Samples were analyzed for
32 two depth strata (0-50, 50-200 m) and for day vs. night conditions. Significant effects of
33 day vs. night and strata on R , H' , and $H's$ indicated that diel vertical migration between
34 these two layers was an important source of variation in the zooplankton community.
35 $H's$ seemed to represent copepod diversity better than R and H' over the spatial scale.
36 $H's$ was also closely linked to colder upwelled water and the depth of the oxygen
37 minimum zone after a principal component analysis. A positive relationship was even
38 detected between depth of the oxygen minimum zone and $H's$ when strata and day/night
39 effects were excluded. Our findings suggested that the coastal upwelling process could
40 be an important driver of copepod diversity in this region, with one of the underlying
41 mechanisms being changes in the depth of the oxygen minimum zone (driven by
42 upwelling); these changes impact the community composition based upon species-
43 dependent tolerances to low oxygen water.

44 **Keywords:** copepod diversity, community structure, Humboldt Current, oxygen,
45 upwelling

46

47 **1. Introduction**

48

49 Copepods are the dominant component of the zooplankton community in the coastal
50 waters of Chile's eastern boundary Humboldt Current System (Escribano and Hidalgo,
51 2000; Hidalgo and Escribano, 2001; Escribano et al., 2007). Despite this, studies on the
52 diversity of the copepod community and the processes modulating its diversity patterns
53 in this ecosystem are very scarce (Heinrich, 1973; Escribano et al., 2003). The lack of
54 knowledge on copepod diversity in this region may critically limit our baseline
55 diagnosis of the state of the marine ecosystem since zooplankton biodiversity and its
56 controlling factors are widely considered to be key issues in terms of the impact of
57 climate variability on marine ecosystems (Beaugrand et al., 2002; Richardson and
58 Schoeman, 2004; Duffy and Stachowicz, 2006; Hooff and Peterson, 2006). Thus, basic
59 knowledge on copepod diversity in this region could prove to be extremely relevant for
60 understanding how highly productive upwelling regions may respond to ongoing
61 climate change.

62 In central/southern Chile, the upwelling process is driven by seasonal winds that give
63 rise to an annual regime characterized by an active upwelling season (spring-summer)
64 and a period of either absent or suppressed upwelling (autumn and winter) (Sobarzo et
65 al., 2007). The dominant copepods do not show a strong seasonal signal in abundance
66 and composition associated with the seasonal upwelling regime; rather, they seem to
67 reproduce and grow throughout the year (Escribano et al., 2007; Hidalgo and Escribano,
68 2007). Therefore, copepod diversity seems to be stable during the yearly cycle
69 (Escribano et al., submitted).

70 Over the spatial scale, coastal upwelling causes substantial heterogeneity in the
71 physical, chemical, and biological environment of the coastal and oceanic regions off

72 central-southern Chile, as revealed by satellite images and in situ measurements of
73 temperature, oxygen, and chlorophyll-a (Chl-a) concentrations (Morales et al., 2007).
74 Copepods can also exhibit large variations in their spatial distribution in this area
75 (Castro et al., 1993), such that species may be distributed differently according to
76 oceanographic variability, as shown by Escribano and Hidalgo (2000) for northern
77 Chile and as seen in other upwelling areas (Peterson et al., 1979; Hutchings, 1985). It is,
78 therefore, likely that upwelling conditions over a spatial meso-scale may impose critical
79 constraints on copepod populations, although their responses are species-dependent. If
80 this is true, then upwelling variations should be considered to be a key factor
81 modulating the species diversity of copepod communities in upwelling zones.
82 Nevertheless, studies dealing with spatial patterns of copepod composition in this region
83 are too scarce and limited to a few species (Castro et al., 1993; Morales et al., 2007).

84 Lately, knowledge on the copepod species inhabiting central/southern Chile has
85 increased (Escribano et al., 2007; Escribano et al., submitted), allowing more complete
86 studies of the whole community. In this regard and in addition to basic knowledge on
87 species diversity, the link between pelagic processes and changing biodiversity appears
88 to be the most relevant factor for understanding ecosystem changes when faced with
89 environmental disturbances (Duffy and Stachowicz, 2006). Coastal upwelling could be
90 one such process modulating variations in biodiversity. Upwelling can cause drastic
91 changes in the physical, chemical, and biological environment of the coastal zone
92 (Hutchings et al., 1995; Marín et al., 2001), and these variables may strongly influence
93 copepod populations (Peterson, 1998; Giraldo et al., 2002), hence causing changes in
94 the species composition (Escribano and Hidalgo, 2000).

95 In the present study, we use data and samples from an oceanographic survey carried
96 out in summer 2009 to assess the spatial variability of oceanographic conditions along

97 with changes in the structure of the copepod community. Since size-distribution has
98 been suggested as an important factor influencing the structure and functioning of the
99 zooplankton community (Irigoiien et al., 2004; Manríquez et al., 2009), we propose an
100 approach that incorporates the influence of copepod body size on species diversity.
101 Thus, we attempt to understand how prevailing upwelling conditions affect the observed
102 spatial patterns of copepod diversity.

103

104

105 **2. Methods**

106

107 *2.1. Study area*

108

109 The upwelling region of central-southern Chile (Fig. 1) has remarkably high primary
110 production (Montero et al., 2007) supported by a strongly seasonal upwelling regime
111 (Sobarzo et al., 2007) and sustaining an important fishery industry based on both
112 pelagic and demersal fishes (Arcos et al., 2001). As part of the Humboldt Current
113 System, this region is also subjected to large interannual variability driven mostly by
114 warm and cold phases of the ENSO (El Niño Southern Oscillation) cycle (Escribano et
115 al., 2004).

116 In 2004, the COPAS center initiated an annual spatial survey of oceanographic
117 conditions in the region so as to assess the spatial scales of variation within the
118 upwelling zone during the upwelling season (spring-summer). The 2009 oceanographic
119 cruise was carried out on board the R/V AGOR Vidal Gormaz from 8 to 20 January
120 2009 (summer). The sampling design consisted of a grid on which 42 stations were
121 distributed along five cross-shelf transects, ranging from about 2 km from the shore to

122 180 km offshore, covering both the coastal area (more influenced by upwelling) and
123 part of the coastal transition zone (Fig. 1). The whole cruise about took 13 days to
124 complete and included zooplankton sampling and oceanographic surveys at each
125 station.

126

127 *2.2. Hydrographic data*

128

129 At each station shown in Figure 1, an oceanographic Carousel sampler SeaBird 32C
130 equipped with a SeaBird-25 CTD was deployed down to 1,000 m and near the bottom at
131 shallow stations. The CTD was equipped with a calibrated SeaPoint Fluorometer and an
132 oxygen sensor. Rosette bottles were used to obtain water samples for Chl-a
133 measurements by fluorometry and dissolved oxygen by the Winkler method, applying
134 standard WOCE protocols. Water samples were obtained at 12 and at least five depths
135 at deep and shallow stations, respectively.

136

137 *2.3. Zooplankton sampling and laboratory procedures*

138

139 Zooplankton samples were obtained using a 1-m² Tucker Trawl equipped with three
140 200 µm mesh-size nets, a calibrated digital flowmeter, and an opening-closing
141 mechanism. The net was towed at an average speed of 0.5 m s⁻¹, integrating the 0-200 m
142 layer with the first net, and then obtaining stratified samples for the 200-50 m layer and
143 the upper 50-0 m layer with the second and third nets, respectively. At a few shallow
144 stations, the whole water column was sampled and only the 0-50 m depth layer could be
145 stratified. Samples were preserved in 10% neutralized formalin solution for later
146 analysis.

147 In the laboratory, all copepods were sorted from the samples and separated for
148 detailed analysis. In order to assess the diversity in the two different habitats, only the
149 vertically stratified samples (0-50, 50-200 m) were analyzed. Samples that were too
150 dense were previously split and analyzed by fractions. All copepodids were identified to
151 the species levels based on adult characteristics and resemblance to adults. Some adult
152 females were measured for prosome and total body lengths (to the nearest 0.01 mm) for
153 the species presenting adult stages.

154

155 *2.4. Data analysis*

156

157 The numerical abundance of each species was standardized to individuals per cubic
158 meter (ind m^{-3}) and the relative abundance (%) with respect to the total sample was
159 calculated in order to determine the dominant species. To examine the copepod size
160 distribution, data on species abundances were split into five size-classes: <1, 1-2, 2-3, 3-
161 4, and > 5 mm body length. Copepod and adult total lengths were assessed from our
162 own measurements and, in some cases, using lengths provided in the literature.

163 In order to assess species diversity, the species richness (R), defined as the
164 number of species at each sampled station, was determined. Thereafter, the
165 Shannon-Wiener diversity index (H') was estimated as:

166

$$167 \quad H' = -\sum_i^n p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

168

169 where H' represents the diversity of each species at the station and p_i is the
170 proportion of each species at the station, i.e., n_i/N , where n_i is the abundance of
171 species i and N is the total copepod abundance.

172 In order to incorporate a body size effect on (H'), the abundance of each species
173 n_i was modified such that:

174

$$175 \quad n_i = n_i * BL^3 \quad (2)$$

176

177 where BL is the body length (mm) of adult copepods. Once this size effect was
178 incorporated into the species abundances n_i , the Shannon-Wiener index H' was
179 recalculated and denoted as $H's$. Both indexes were thus compared. The presence
180 of species assemblages and associations among species were assessed by applying
181 a cluster analysis using the Euclidean distance as joining criteria.

182 Since the cruise included sampling at night as well as during the day, the day vs.
183 night condition was considered to be a factor likely to influence species
184 composition, as was vertical layering. A two-way ANOVA was applied to the log-
185 transformed community descriptors R , H' , and $H's$ in order to test the effects of
186 day vs. night and depth strata on these parameters.

187 Oceanographic data were processed to describe the prevailing upwelling
188 conditions and the physical and chemical patterns over the spatial scale.
189 Temperature, salinity, dissolved oxygen, and depth of the oxygen minimum zone
190 (OMZ), defined as the depth of 1 mL O₂ L⁻¹, were selected to represent upwelling
191 conditions. These variables were linked to species abundances by applying linear
192 models after the log-transformation of n_i and also by means of a principal
193 component analysis (PCA) used to elucidate eventual patterns linking the diversity
194 indexes and oceanographic conditions. The PCA was applied on the correlation
195 matrix, with varimax rotation and tested for two and three factors.

196

197 3. Results

198

199 3.1. Oceanography conditions

200

201 Table 1 summarizes the general oceanographic conditions during the survey. Despite
202 a summer situation, the average temperature in the upper layer remained relatively low
203 ($<15\text{ }^{\circ}\text{C}$), differing slightly ($<3\text{ }^{\circ}\text{C}$) from subsurface temperatures and indicating a deep
204 mixing layer and little thermal stratification. Oxygen levels varied extensively in the
205 surface layer and minimal values in the subsurface layer fell well below $1\text{ mL O}_2\text{ L}^{-1}$,
206 suggesting the presence of the OMZ within the 200 m layer. Depth values for the upper
207 boundary of the OMZ confirmed its presence in the subsurface waters. Salinity also
208 varied, although in a narrower range. Low salinity values were observed mostly in
209 surface waters, whereas increasing values were associated with deeper waters.

210 Figure 2 shows the spatial distribution of surface variables. All the variables indicated
211 the occurrence of coastal upwelling during the cruise despite the late summer
212 conditions, when southerly winds tend to diminish (Sobarzo et al., 2007). Recently
213 upwelled waters were clearly evident in the cold plume extending from the coastline to
214 about 150 km offshore (Fig. 2a). The cold plume was associated with greater salinity
215 (Fig. 2b) and low surface oxygen (Fig. 2c). Phytoplankton biomass, as reflected in the
216 fluorescence distribution, was strongly aggregated in a well localized and inshore zone
217 (Fig. 2d).

218 In order to examine the vertical structure of the water column, cross-shelf
219 sections of oceanographic variables were constructed for each one of the transects
220 (Fig. 3). The thermal structure of the water column along each section evidenced
221 rising isotherms near the coast, indicating that the source of the upwelled water

222 was about 100 m depth (Fig. 3a). Salinity also showed the ascent of saltier waters
223 from below 100 m to the surface layer along the coastal band (Fig. 3b). Low
224 oxygen water remained deep (>150 m) in the offshore region and entered the
225 upper 50 m in the coastal band, although this was highly variable among the cross-
226 shelf sections (Fig. 3c). Finally, phytoplankton pigments appeared to be largely
227 concentrated at the surface (Fig. 3d).

228

229 3.2. Copepod community composition and diversity

230

231 A total of 36 zooplankton samples were analyzed from the two depth strata (50-0,
232 200-50 m). The copepod community consisted of 62 species: 60 were identified to the
233 species level and two to the genus level. These species belonged to four suborders and
234 23 families. The order Calanoida was the most represented, with 51 species (>80% of
235 total species). The orders Poecilostomatoida, Cyclopoida, and Harpacticoida constituted
236 8%, 5%, and 5%, respectively, of the total identified species.

237 Many of the species shown in Table 2 should be considered to be rare given
238 their very low abundances and frequencies in the samples. Indeed, as shown in
239 Table 3, more than 90% of the total community was represented by less than 10
240 species. The most common and abundant species were *Oithona similis* and
241 *Paracalanus* cf. *indicus*, which had respective densities exceeding 1,000 and
242 2,000 ind m⁻³ and together represented ca. 60% of the total copepod abundance.
243 *Calanoides patagoniensis* and *Rhincalanus nasutus* should also be mentioned with
244 the abundant species; because of their relatively larger size (>3 mm in length),
245 they may be important contributors to the copepod biomass. *Calanus chilensis* has
246 also been cited as an abundant copepod in the Chilean coastal zone (Escribano et

247 al., 2007), but it does not seem to be a dominant copepod this late in summer.

248 Table 3 includes only the species averaging over 0.05% in relative abundance.

249 These species were thereafter considered for further analyses related to

250 oceanographic variability.

251 Adult body length was obtained from the literature and our measurements of the

252 species reported in Table 2 and ranged from 0.55 to 7.6 mm. Small-sized

253 copepods were *P. cf. indicus*, *O. similis*, *Clausocalanus pergens*, *Microcalanus*

254 *pigmeus*, *Clytemnestra rostrata*, *Vetтория granulosa*, *P. denudatus*, *Calocalanus*

255 *styliremis*, *O. nana*, *Oncaea media*, and *Microsetella norvegica*, whereas the

256 largest copepods were *Paraeuchaeta weberi*, *Eucalanus hyalinus*, *E. inermis*,

257 *Rhincalanus nasutus*, and *Arrietelus plumifer* (Table 2).

258 According to the species' size distribution and abundances, the small size

259 fraction (<1 m) was numerically dominant. This size class contributed more than

260 3,600 ind m⁻³ in some occasions, i.e., more than 60% of the total copepods,

261 although the variation in abundance for this group was remarkably high (Fig. 4).

262 Larger-sized classes also varied widely and their abundances gradually decreased

263 with size, reflecting the size spectrum expected for a zooplankton community

264 from this region (Manruez et al., 2009).

265 Estimates of the community descriptors, separated by depth strata and day vs.

266 night conditions, are shown in Table 4. Species richness (*R*) was greater in the

267 deeper stratum and seemed to be higher at night as well. The estimated diversity

268 index (*H'*) and the size-structured index (*H's*) followed a similar pattern (Table 4).

269 A two-way ANOVA revealed significant day vs. night effects on *H'* and *H's* but

270 not on *R*. On the other hand, the depth strata significantly affected *R* and *H'* but

271 not H' 's. There was also a significant interaction between day vs. night and stratum
272 for H' 's (Table 5).

273

274 3.3. Spatial patterns and oceanographic variation

275

276 The most abundant species (*O. similis*, *P. cf. indicus*) were widely distributed
277 over the whole sampled area, although with greater abundances towards the
278 northern part of the grid (Fig. 5). Species that were less abundant albeit dominant
279 components tended to be distributed mainly within the upwelling zone, i.e., in the
280 coastal band, except for *C. arcuicornis*, which showed some aggregations offshore
281 and in the southernmost part of the study area (Fig. 5).

282 The application of a cluster analysis yielded four major species assemblages
283 based on abundance and distribution (Fig. 6). Group A contained the most
284 specious assemblage and seemed to be composed by less abundant species. Group
285 B appeared to represent more oceanic species, i.e., outside of the upwelling zone
286 (>50 km offshore). Group C, on the other hand, included the species distributed
287 within the upwelling zone (<50 km from shore), or those most related to upwelled
288 waters. Finally, group D was comprised by the two numerically dominant species
289 distributed in the entire region (Fig. 6).

290 The spatial distribution of the community descriptors revealed interesting
291 patterns of copepod diversity (Fig. 7). The distribution of H' was slightly different
292 between depth strata and the cross-shelf trend was unclear, except for the presence
293 of greater values in a mid-region (Fig. 7a, 7b). R was very different between depth
294 strata. In the upper 50 m, R increased offshore in the southern zone, but also had
295 the lowest value offshore near the northern zone (Fig 7c), whereas in the deep

296 stratum, greater values of R seemed to be related to the upwelling zone (Fig. 7d).

297 It seemed that H 's exhibited the most consistent spatial pattern of diversity; it
298 increased from the inshore to the offshore region and was negatively associated
299 with upwelled waters at the surface (Fig. 7e) and in the deep stratum (Fig. 7f).

300 The stepwise regression of the community descriptors as a function of the
301 oceanographic variables failed to show any significant correlations ($P < 0.05$).
302 Therefore, we decided to use an exploratory approach to elucidate the links, if
303 any, between diversity and oceanographic variation. For this, PCA was applied to
304 the matrix containing the abundance of the dominant species, estimated
305 community descriptors for each sampling station (Table 2), and the oceanographic
306 variables. Only abundances from the upper 50 m were included to eliminate the
307 stratum effect and the oceanographic variables considered were surface
308 temperature, salinity, oxygen, fluorescence, and OMZ depth. The PCA revealed
309 three significant factors that explained 51% of the total variance. Factor 1 showed
310 strong correlations with the most abundant species and Factor 2 with some
311 oceanic and less abundant species. Factor 3 was mostly related to oceanographic
312 variables and was most strongly correlated ($r > 0.75$) with surface temperature
313 (SST), dissolved oxygen (DO), and OMZ depth. When plotting the three factors,
314 the diversity indexes R and H 's fell close to SST, OMZ, and DO, along with some
315 species (Fig. 8). This exploratory analysis suggested that R and H 's were closely
316 linked to upwelling conditions characterized by the dynamics of the OMZ and
317 SST. Moreover, H ' did not seem to follow the pattern of R and H 's, possibly
318 indicating that body size influenced the spatial pattern of species diversity.

319 The relationship between diversity and upwelling dynamics can also be
320 examined by plotting the community descriptors as a function of a single

321 oceanographic variable reflecting upwelling conditions. In doing so, OMZ depth
322 was the only variable that exhibited an association with the community
323 descriptors. However, only *H*'s had a significant correlation with OMZ depth.
324 This correlation was found when considering only samples obtained at night and
325 from the upper 50 m (Fig. 9).

326

327

328 **4. Discussion**

329

330 The biogeographic patterns of pelagic communities have not been studied with much
331 detail in many regions of the world ocean (Angel, 1993). The work of Longhurst (2006)
332 is no doubt the most complete assessment of large-scale oceanic biogeography of
333 pelagic communities. The biome of the eastern South Pacific has been suggested to be
334 mostly comprised of subantarctic species (subpolar biome) with some influence from
335 the equatorial region (Escribano et al., 2003). Indeed, although many of the species
336 inhabiting central-southern Chile can be found off Ecuador and Peru, other dominant
337 species such as *Rhincalanus nasutus* and *Eucalanus hyalinus* increase their frequency
338 and abundance towards the austral region, whereas still other species seem to be much
339 better represented in the waters of northern Chile and Peru (Hidalgo et al., 2005; Ayón
340 et al., 2008). This apparent interaction between the equatorial and the circumpolar
341 regions may not only give rise to mixed fauna along the Chilean coast, but could also
342 explain the latitudinal gradients in biogeographic patterns found in these waters. Such
343 latitudinal patterns have been described for intertidal communities (Fernández et al.,
344 2000), but have yet to be determined for the pelagic system (Escribano et al.,
345 submitted).

346 Body size has long been recognized as an ecological feature playing a fundamental
347 role in structuring biological communities (Peters, 1983; White et al., 2007). This
348 function is also reflected in the relationship between species abundance and how these
349 species can share the total community biomass (size effect) (Irigoiien et al., 2004; Hooff
350 and Peterson, 2006). Therefore, the inclusion of a size effect in any species diversity
351 index seems recommendable. In our study, we used the cubed body length as an index
352 of species size in an attempt to account for body volume, although it would certainly be
353 more desirable to have direct estimates of species biomass. The development of
354 automated methods for zooplankton analysis (Culverhouse et al., 2006) might provide,
355 in the near future, species-distributed biomasses of samples, which may yield a more
356 precise description of the community diversity. However, it should be noted that our
357 size-structured estimate of copepod diversity seemed to better represent the expected
358 spatial pattern for a diversity index. For example, even though copepod abundances
359 were greater in the coastal area (upwelling zone), diversity may increase towards
360 offshore regions, yielding a negative relationship between abundance and biodiversity
361 (Angel, 1993; Escribano et al., 2003; Irigoien et al., 2004). A similar trend is expected
362 with depth, i.e., lower abundances and greater diversity values are expected in deep
363 water compared to the upper layer, as recently reported in the upwelling zone off Chile
364 (Escribano et al., 2009). As shown in Figure 7, H' 's seems to better represent the
365 expected cross-shelf diversity trend. In contrast, ANOVA did not detect significant
366 differences in H' 's between strata, although interactions between day vs. night and strata
367 effects were highly significant, indicating that diel vertical migrations (DVMs) are an
368 important component that must be taken into account when comparing these two layers.

369 Although many oceanographic variables are linked to coastal upwelling, the
370 ecological role of the upper OMZ boundary must be considered. Several works have

371 shown that the OMZ depth has a major influence on the vertical distribution and DVMS
372 of copepods and other zooplankton (Judkins, 1980; Ulloa et al., 2001; Hidalgo et al.,
373 2005; Escribano et al., 2009). The effect of the OMZ depth can certainly alter the
374 community composition, given the variable tolerance of different species to low oxygen
375 waters (Flint et al., 1991). In fact, we found a positive correlation between OMZ depth
376 and H' s, suggesting that more species or a more equally shared community can be
377 expected when the OMZ is deeper. Alternatively, it can be inferred that diversity
378 increases with OMZ depth because the OMZ is deeper in offshore regions where
379 diversity is higher. However, when using data from the upper 50 m and night samples,
380 we found no direct correlation between distance to shore and H' s ($F_{1,10} = 2.4$, $P = 0.15$).
381 Therefore, it seems that changes in the upper boundary of the OMZ, i.e., the oxycline,
382 driven by variations in upwelling can have a significant impact on the structure of the
383 zooplankton community. Variations in OMZ depth have already been suggested to
384 influence the size structure of the zooplankton community in this upwelling system on
385 the temporal scale (Manríquez et al., 2009). Our findings suggest that the ecological role
386 of the OMZ can go beyond its impact on size structure and could also be considered to
387 be a driving force for biological diversity in the planktonic system.

388

389

390 **Acknowledgements**

391

392 This work was funded by the FONDAP Program of CONICYT through the COPAS
393 Center and by FIP (Fishery Research Fund of Chile) grant FIP 2008-20. Additional
394 support for the field study was provided by Fondecyt 1080037.

395

396 **References**

397

398 Angel, M.V., 1993. Biodiversity of the pelagic ocean. Blackwell Publishing.

399 Conservation Biology, 7, 760-772.

400 Arcos, D.F., Cubillos, L.A., Núñez, S., 2001. The jack mackerel fishery and El Niño

401 effects off Chile. Progress in Oceanography 49, 597-617.

402 Ayón, P., Criales-Hernandez, M.I., Schwamborn, R., Hirche, H-J., 2008. Zooplankton

403 research off Peru: A review. Progress in Oceanography 79, 238-255.

404 Beaugrand, G., Reid, P.C., Ibanez, F., Lindley, J.A., Edwards, M., 2002. Reorganization

405 of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. Science 296, 1692-

406 1694.

407 Castro, L.R., Bernal, P.A., Troncoso, V.A., 1993. Coastal intrusion of copepods:

408 mechanisms and consequences on the population biology of *Rhincalanus*

409 *nasutus*. Journal of Plankton Research 15, 501-515.

410 Culverhouse, P., Williams, R., Benfield, M., et al., 2006. Automatic image analysis of

411 plankton: future perspectives. Marine Ecology Progress Series 312, 297-309.

412 Duffy, J.E. and Stachowicz, J.J., 2006. Why biodiversity is important to oceanography:

413 potential roles of genetic, species, and trophic diversity in pelagic ecosystem

414 processes. Marine Ecology Progress Series 311, 179-189.

415 Escribano, R. and Hidalgo, P., 2000. Spatial distribution of copepods during coastal

416 upwelling in a northern area of the Eastern Boundary Humboldt Current. Journal

417 of the Marine Biological Association U.K. 80 (2), 283-290.

418 Escribano, R., Fernández, M., Aranís, A., 2003. Physical-chemical processes and

419 patterns of diversity of the Chilean eastern boundary pelagic and benthic marine

420 ecosystem: an overview. Gayana 67, 190-205.

421 Escribano, R., Daneri, D., Farías, L., et al., 2004. Biological and chemical consequences
422 of the 1997-98 el niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis.
423 Deep-Sea Research Part II. 51, 2389-2411.

424 Escribano, R., Hidalgo, P., González, H.E., Giesecke, R., Riquelme-Bugueño, R.,
425 Manríquez, K., 2007. Interannual and seasonal variability of metazooplankton in
426 the central/south upwelling region off Chile. Progress in Oceanography 75, 470-
427 485.

428 Escribano, R., Hidalgo, P., Krautz, C. 2009. Zooplankton associated with the oxygen
429 minimum zone system in the northern upwelling region of Chile during March
430 2000. Deep Sea Research, Part II, The Oceanography of the eastern South
431 Pacific. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.09.015

432 Escribano, R., Hidalgo, P., Vergara, O., Jorquera, E., Mendoza, P., submitted. Patterns
433 of copepod diversity in the Chilean coastal upwelling system. Deep-Sea
434 Research Part II.

435 Fernández, M., Jaramillo, E., Marquet, P.A., Moreno, C.A., Navarrete, S.A., Ojeda,
436 F.P., Valdovinos, C.R., Vásquez, J.A., 2000. Diversity, dynamics and
437 biogeography of Chilean benthic nearshore ecosystems: an overview and
438 guidelines for conservation. Revista Chilena de Historia Natural 73, 797-830.

439 Flint, M.V., Drits, A.V., Pasternak, A.F., 1991. Characteristic features of body
440 composition and metabolism in some interzonal copepods. Marine Biology 111,
441 199-205.

442 Giraldo, A., Escribano, R., Marin, V., 2002. Spatial distribution of *Calanus chilensis* off
443 Mejillones Peninsula (northern Chile): ecological consequences upon coastal
444 upwelling. Marine Ecology Progress Series 230, 225-234.

- 445 Heinrich, A.K., 1973. Horizontal distribution of copepods in the Peru current region.
446 Oceanology 13, 97-103.
- 447 Hidalgo, P. and Escribano, R., 2001. Succession of pelagic-copepod species during the
448 period 1996/1998 in northern Chile: the influence of the 1997-98 El Niño.
449 Hydrobiologia 453/454, 153-160.
- 450 Hidalgo, P. and Escribano, R., 2007. The coupling of life cycles of the copepods
451 *Calanus chilensis* and *Centropages brachiatus* to upwelling variability in the
452 Central-South upwelling region off Chile. Progress in Oceanography 75, 501-
453 517.
- 454 Hidalgo, P., Escribano, R., Morales, C.E., 2005. Ontogenetic vertical distribution and
455 diel migration of the copepod *Eucalanus inermis* in the oxygen minimum zone
456 off northern Chile. Journal of Plankton Research 27, 519-529.
- 457 Hooff, R.C. and Peterson, W.T., 2006. Copepod biodiversity as an indicator of changes
458 in ocean and climate conditions of the northern California current ecosystem.
459 Limnology and Oceanography 51, 2607-2620.
- 460 Hutchings, L., 1985. Vertical distribution of mesozooplankton at an active upwelling
461 site in the southern Benguela Current, December 1969. Investigational Report,
462 Sea Fisheries Research Institute (South Africa) 129, 67 pp.
- 463 Hutchings, L., Pitcher, G.C., Probyn T.A., et al., 1995. The chemical and biological
464 consequences of coastal upwelling. In: Summerhayes, C.P., Emeis, K.-C.,
465 Angel, M.V., Smith, R.L., Zeitzschel, B. (Eds.), Upwelling in the Ocean:
466 Modern Processes and Ancient Records. John Wiley & Sons, New York. pp. 65-
467 82.
- 468 Irigoien, X., Huisman, J., Harris, R.P., 2004. Global biodiversity patterns of marine
469 phytoplankton and zooplankton. Nature 429, 864-867.

470 Judkins, D.C., 1980. Vertical distribution of zooplankton in relation to the oxygen
471 minimum off Peru. *Deep-Sea Research* 27, 475-487.

472 Longhurst, A., 2006. *Ecological Geography of the Sea*. 2nd Edition, Academic Press,
473 London, 398 pp.

474 Manríquez, K., Escribano, R., Hidalgo, P., 2009. The influence of coastal upwelling on
475 the mesozooplankton community structure in the coastal zone off
476 Central/Southern Chile as assessed by ZooImage analysis. *Journal of Plankton*
477 *Research*. doi:10.1093/plankt/fbp053.

478 Marín, V.H., Escribano, R., Delgado, L.E., Olivares, G., Hidalgo, P., 2001. Nearshore
479 circulation in a coastal upwelling site off the northern Humboldt Current
480 System. *Continental Shelf Research* 21,1317-1329.

481 Montero, P., Daneri, G., Cuevas, L.A., et al., 2007. Productivity cycles in the coastal
482 upwelling area off Concepcion: The importance of diatoms and bacterioplankton
483 in the organic carbon flux. *Progress in Oceanography* 75, 518-530.

484 Morales, C.E., González, H.E., Hormazabal, S., Yuras, G., Letelier, J., Castro, L.R.,
485 2007. The distribution of chlorophyll-a and dominant planktonic components in
486 the coastal transition zone off Concepción, central Chile, during different
487 oceanographic conditions. *Progress in Oceanography* 75, 452-469.

488 Peters, R., 1983. *The ecological implications of body size*. Cambridge University press,
489 Cambridge.

490 Peterson, W., 1998. Life cycle strategies of copepods in coastal upwelling zones.
491 *Journal of Marine Systems* 15, 313-326.

492 Peterson, W.T., Miller, C.B., Hutchinson, A., 1979. Zonation and maintenance of
493 copepod populations in the Oregon upwelling zone. *Deep-Sea Research* 26, 467-
494 494.

495 Sobarzo, M., Bravo, L., Donoso, D., Garcés-Vargas, J., Schneider, W., 2007. Coastal
496 upwelling and seasonal cycles that influence on the water column on the
497 continental shelf off Central Chile. *Progress in Oceanography* 75, 363-382.

498 Richardson, A. and Schoeman, D., 2004. Climate impact on plankton ecosystems in the
499 Northeast Atlantic. *Science* 305, 1609-1612.

500 Ulloa, O., Escribano, R., Hormazabal, S., Quiñones, R.A., Ramos, M., González, R.R.,
501 2001. Evolution and biological effects of the 1997-98 El Niño in northern Chile.
502 *Geophysical Research Letters* 28 (8), 1591-1594.

503 White, E.P., Morgan Ernest, S.K., Kerkhoff, A.J., et al., 2007. Relationships between
504 body size and abundance in ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 22, 323-
505 330.

506

507 Figure captions

508

509 Figure 1. The coastal upwelling region of central/southern Chile, illustrating the
510 sampling grid for the hydrographic survey and zooplankton sampling in summer 2009.

511

512 Figure 2. Spatial distribution of surface oceanographic variables measured in summer
513 2009, off central-southern Chile.

514

515 Figure 3. The vertical structure of the water column off central-southern Chile in
516 summer 2009, as shown by cross-shelf sections at five latitudes. Ten stations per
517 transect and at least five depths were sampled with a CTD.

518

519 Figure 4. Relative and numerical abundance of copepod size-classes found off central-
520 southern Chile in summer 2009.

521

522 Figure 5. Spatial distribution of dominant copepod species (ind m^{-3}) found off central-
523 southern Chile in summer 2009.

524

525 Figure 6. Cluster analysis of the copepod community found off central-southern Chile in
526 summer 2009. A, B, C, and D represent four distinct assemblages of species.

527

528 Figure 7. Spatial distribution of community descriptors for the copepod community
529 found off central-southern Chile in summer 2009, with two depth strata: 50-0 m and 50-
530 200 m depth. H' =Shannon-Wiener diversity index, R =species richness, and $H's$ =size-
531 structured species diversity index.

532

533 Figure 8. Principal component analyses (PCA) applied to associate the copepod
534 community with the community descriptors and oceanographic variables: SST =sea
535 surface temperature, DO =dissolved oxygen, Sal =surface salinity, Fluor =fluorescence,
536 OMZ =depth of the oxygen minimum zone. H' =Shannon-Wiener diversity index, R
537 =species richness, and $H's$ =size-structured species diversity index.

538

539 Figure 9. The relationship between copepod community descriptors from the upwelling
540 region of central-southern Chile in the summer 2009, and the depth of the oxygen
541 minimum zone (OMZ). H' =Shannon-Wiener diversity index, R =species richness, and
542 $H's$ =size-structured species diversity index.

Acceptedo en Progress in Oceanography

1 Table 1. Oceanographic conditions (mean \pm SD of variables) in summer 2009, for
 2 central-southern Chile. SST =sea surface temperature ($^{\circ}$ C); T10 =temperature at 10 m
 3 depth; T50-0 =temperature of the 50 m layer; T50-200 =temperature of the 50-200 m
 4 layer; OMZ =depth of the upper boundary of the oxygen minimum zone ($1 \text{ mL O}_2 \text{ L}^{-1}$);
 5 DO0 =dissolved oxygen (mL L^{-1}) at 0 m depth; OX50-0 =dissolved oxygen of the 50 m
 6 layer; OX200-50 =dissolved oxygen of the 200-50 m layer; SAL0 =salinity at 0 m
 7 depth; SAL50-0 =salinity of the 50 m layer; and SAL200-50 =salinity of the 200-50 m
 8 layer.

9

10

11	Variables	Mean	Min	Max	sd	n
14	SST	13.33	11.44	16.78	1.305	38
15	T10	13.10	10.77	16.77	1.372	39
16	T50-0	12.35	10.56	16.15	1.150	39
17	T200-50	10.38	9.78	14.46	0.230	32
18	DO0	4.66	1.74	6.26	0.929	38
19	OX50-0	3.88	0.76	5.24	1.207	39
20	OX200-50	1.45	0.56	2.36	0.655	32
21	OMZ	101.2	11	171	48.52	39
22	SAL0	34.143	33.808	34.499	0.223	38
23	SAL50-0	34.2070	33.9077	34.5237	0.1977	39
24	SAL200-50	34.4224	34.2753	34.5271	0.0938	32

25

26

27 Table 2. Copepod species found in summer 2009 in the coastal upwelling zone of
 28 central-southern Chile.

29		
30		80
31	CALANOIDA	81 <i>Euchirella pulcra</i> (Lubbock, 1856)
32	CLAUSOCALANIDAE	82 <i>Euchirella amoena</i> (Giesbrecht, 1888)
33	<i>Clausocalanus arcuicornis</i> (Dana, 1849)	83 <i>Gaetanus brevispinus</i> (Sars, 1900)
34	<i>Ctenocalanus vanus</i> (Giesbrecht, 1888)	84 EUCHAETIDAE
35	<i>Clausocalanus pargens</i> (Farran, 1926)	85 <i>Paraeuchaeta weberi</i> (Scott, 1909)
36	<i>Clausocalanus jobei</i> (Frost-Fleminger, 1968)	86 <i>Euchaeta marina</i> (Prestandrea, 1833)
37	<i>Clausocalanus ingens</i> (Frost-Fleminger, 1968)	87 HETERORHABBIDAE
38	<i>Microcalanus pygmaeus</i> (Sars, 1900)	88 <i>Heterorhabdus lobatus</i> (Bradford, 1971)
39	<i>Drepanopus forcipatus</i> (Giesbrecht, 1888)	89 <i>Heterorhabdus spinifrons</i> (Claus, 1863)
40	<i>Mesocalanus tenuicornis</i> (Dana, 1849)	90 <i>Heterorhabdus papilliger</i> (Claus, 1863)
41	ARCIIDAE	91 SCOLECITHRICHIDAE
42	<i>Acartia tonsa</i> (Dana, 1849)	92 <i>Scolecithrix bradyi</i> (Giesbrecht, 1888)
43	<i>Acartia negligens</i> (Dana, 1849)	93 <i>Scolecithrix danae</i> (Lubbock, 1853)
44	CALANIDAE	94 <i>Scolecithricella abyssalis</i> (Giesbrecht, 1888)
45	<i>Calanus chilensis</i> (Brodsky, 1959)	95 <i>Scaphocalanus curtus</i> (Farran, 1926)
46	<i>Calanus australis</i> (Brodsky, 1959)	96 MECYNOCERIDAE
47	<i>Calanoides patagoniensis</i> (Brady, 1883)	97 <i>Mecynocera clausi</i> (Thompson, 1888)
48	<i>Neocalanus gracilis</i> (Dana, 1852)	98 CANDACIIDAE
49	<i>Nannocalanus minor</i> (Claus, 1863)	99 <i>Candacia pachidactyla</i> (Dana, 1849)
50	PARACALANIDAE	100 AUGAPTILIDAE
51	<i>Paracalanus cf. indicus</i> (Wolfenden, 1905)	101 <i>Augaptilus glacialis</i> (Sars, 1900)
52	<i>Paracalanus denudatus</i> (Sewell, 1929)	102
53	<i>Calocalanus styliremis</i> (Giesbrecht, 1888)	103
54	<i>Calocalanus tenuis</i> (Farran, 1926)	104 CYCLOPOIDA
55	ARIETELLIDAE	105 OITHONIDAE
56	<i>Arietellus plumifer</i> (Sars, 1905)	106 <i>Oithona similis</i> (Claus, 1866)
57	SPINOCALANIDAE	107 <i>Oithona setigera</i> (Dana, 1852)
58	<i>Spinocalanus</i> sp. (Giesbrecht, 1888)	108 <i>Oithona nana</i> (Giesbrecht, 1893)
59	CENTROPAGIDAE	109
60	<i>Centropages brachiatus</i> (Dana, 1849)	110
61	RHINCALANIDAE	111 POECILOSTOMATOIDA
62	<i>Rhincalanus nasutus</i> (Giesbrecht, 1888)	112 ONCAEIDAE
63	EUCALANIDAE	113 <i>Triconia conifera</i> (Giesbrecht, 1891)
64	<i>Eucalanus hyalinus</i> (Claus, 1866)	114 <i>Oncaea venusta</i> (Philippi, 1843)
65	<i>Eucalanus inermis</i> (Giesbrecht, 1893)	115 <i>Oncaea media</i> (Giesbrecht, 1891)
66	LUCICUTIIDAE	116 SAPPHIRINIDAE
67	<i>Lucicutia flavicornis</i> (Claus, 1863)	117 <i>Sapphirina</i> sp. (Thompson, 1830)
68	<i>Lucicutia longicornis</i> (Giesbrecht, 1889)	118 <i>Vetoria granulosa</i> (Giesbrecht, 1891)
69	METRIDINIDAE	119
70	<i>Metridia lucens</i> (Boeck, 1865)	120
71	<i>Metridia longa</i> (Lubbock, 1854)	121 HARPACTICOIDA
72	<i>Metridia brevicaudata</i> (Giesbrecht, 1889)	122 CLYTEMNESTRIDAE
73	<i>Pleuromamma abdominalis</i> (Lubbock, 1856)	123 <i>Clytemnestra rostrata</i> (Brady, 1883)
74	<i>Pleuromamma gracilis</i> (Claus, 1863)	124 <i>Clytemnestra scutellata</i> (Dana, 1849)
75	<i>Pleuromamma quadrangulata</i> (Dalh, F 1893)	125 ECTINOSOMIDAE
76	<i>Pleuromamma xiphias</i> (Giesbrecht, 1889)	126 <i>Microsetella norvegica</i> (Boeck, 1863)
77	AETIDEIDAE	127
78	<i>Aetideus armatus</i> (Boeck, 1872)	128
79	<i>Euchirella rostrata</i> (Claus, 1866)	

131 Table 3. Dominant copepods (mean abundance >0.05 ind m^{-3}) found in summer 2009 in
 132 the coastal upwelling zone of central-southern Chile. N =mean abundance (ind m^{-3}),
 133 relative abundance (%). Adult body sizes were obtained from the literature and
 134 measurements in this study.

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

SPECIES	Code	N	%	Adult size (mm)		
				Mean	min	max
<i>Oithona similis</i>	Os	68.184	43.7	0.94	0.68	1.20
<i>Paracalanus cf. indicus</i>	Pi	39.780	25.5	0.95	0.70	1.20
<i>Clausocalanus arcuicornis</i>	Ca	12.450	8.0	1.36	1.10	1.62
<i>Centropages brachiatus</i>	Cb	9.306	6.0	2.25	1.50	3.00
<i>Calanoides patagoniensis</i>	Cp	7.026	4.5	2.415	2.08	2.75
<i>Oithona setigera</i>	Ose	6.679	4.3	1.58	1.12	2.04
<i>Acartia tonsa</i>	At	3.784	2.4	1.345	0.90	1.79
<i>Rhincalanus nasutus</i>	Rn	3.155	2.0	5.80	4.90	6.70
<i>Pleuromamma gracilis</i>	Pg	1.395	0.9	2.025	1.50	2.55
<i>Ctenocalanus vanus</i>	Cv	1.314	0.8	1.255	0.81	1.70
<i>Metridia lucens</i>	Ml	0.563	0.4	2.95	1.90	4.00
<i>Aetideus armatus</i>	Aa	0.486	0.3	1.79	1.33	2.25
<i>Neocalanus gracilis</i>	Ng	0.332	0.2	3.1	1.80	4.40
<i>Mesocalanus tenuicornis</i>	Mt	0.230	0.1	2.45	1.50	3.40
<i>Oncaea venusta</i>	Ov	0.172	0.1	1.27	0.84	1.70
<i>Drepanopus forcipatus</i>	Df	0.164	0.1	2.065	1.39	2.74
<i>Pleuromamma abdominalis</i>	Pa	0.146	0.1	3.45	2.40	4.50
<i>Triconia conifera</i>	Tc	0.119	0.1	1.11	0.72	1.50
<i>Calanus chilensis</i>	Cc	0.089	0.1	3.1	2.60	3.60
<i>Clausocalanus jobei</i>	Cj	0.073	<0.1	1.285	1.01	1.56

165

166 Table 4. Summary (mean \pm SD) of descriptors of the copepod community found in
167 summer 2009 off central/southern Chile. H' =Shannon-Wiener diversity index, R
168 =species richness, and $H's$ =size-structured index of species diversity. Daytime and
169 nighttime conditions and stratum denote the origin of the samples.

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

Condition	Stratum	n	R	H'	$H's$
Daytime	Upper	12	14 \pm 4.1	0.55 \pm 0.19	0.50 \pm 0.20
	Deep	9	15 \pm 4.9	0.65 \pm 0.14	0.54 \pm 0.21
Nighttime	Upper	8	15 \pm 6.2	0.62 \pm 0.19	0.29 \pm 0.1
	Deep	5	20 \pm 1.6	0.86 \pm 0.2	0.66 \pm 0.2

190 Table 5. Two-way ANOVA to test the effects of day vs. night conditions and depth
 191 strata on the copepod community descriptors. H' =Shannon-Wiener diversity index, R
 192 =species richness, $H's$ =size-structured diversity index.

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

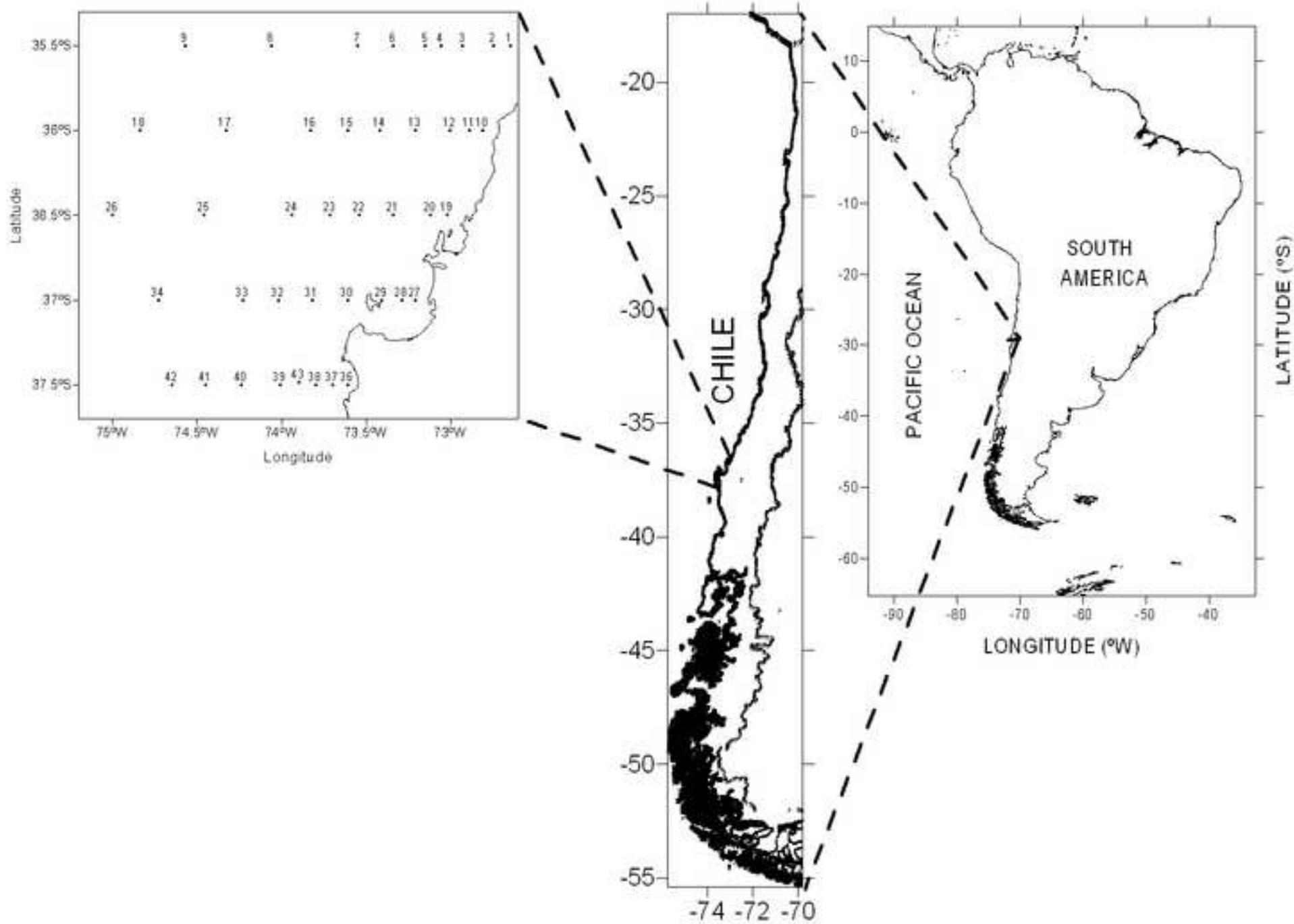
216

217

218

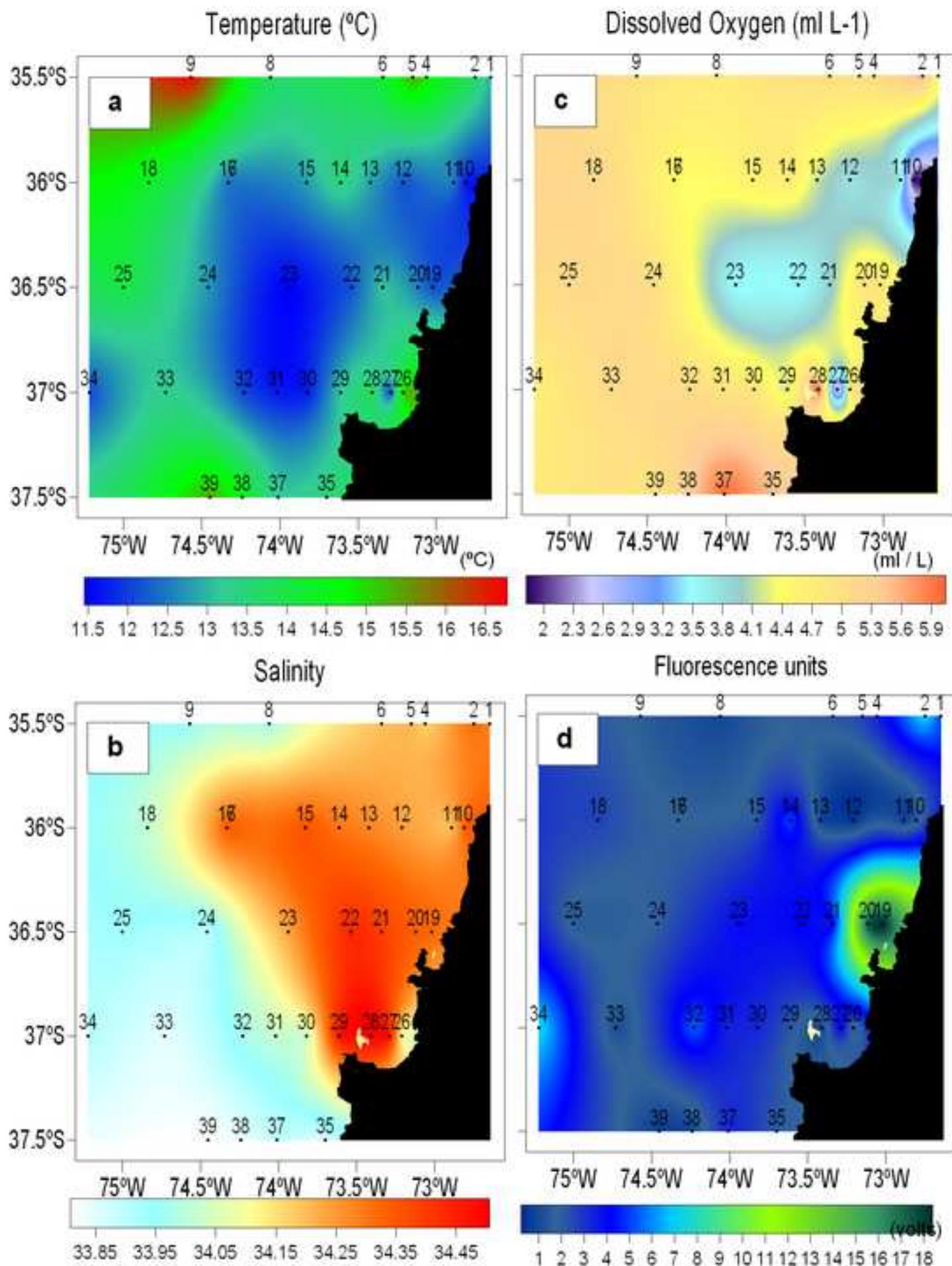
Source of variation	R			H'		$H's$	
	d.f.	F	P	F	P	F	P
Day-night factor	1	3.5	0.07	6.8	0.01**	9.2	0.005**
Error	30						
Stratum factor	1	4.0	0.05**	4.5	0.04**	0.6	0.46
Error	30						
Day-night x stratum	1	1.5	0.24	0.9	0.35	5.6	0.03**

Figure
[Click here to download high resolution image](#)



Figure

[Click here to download high resolution image](#)



Figure

[Click here to download high resolution image](#)

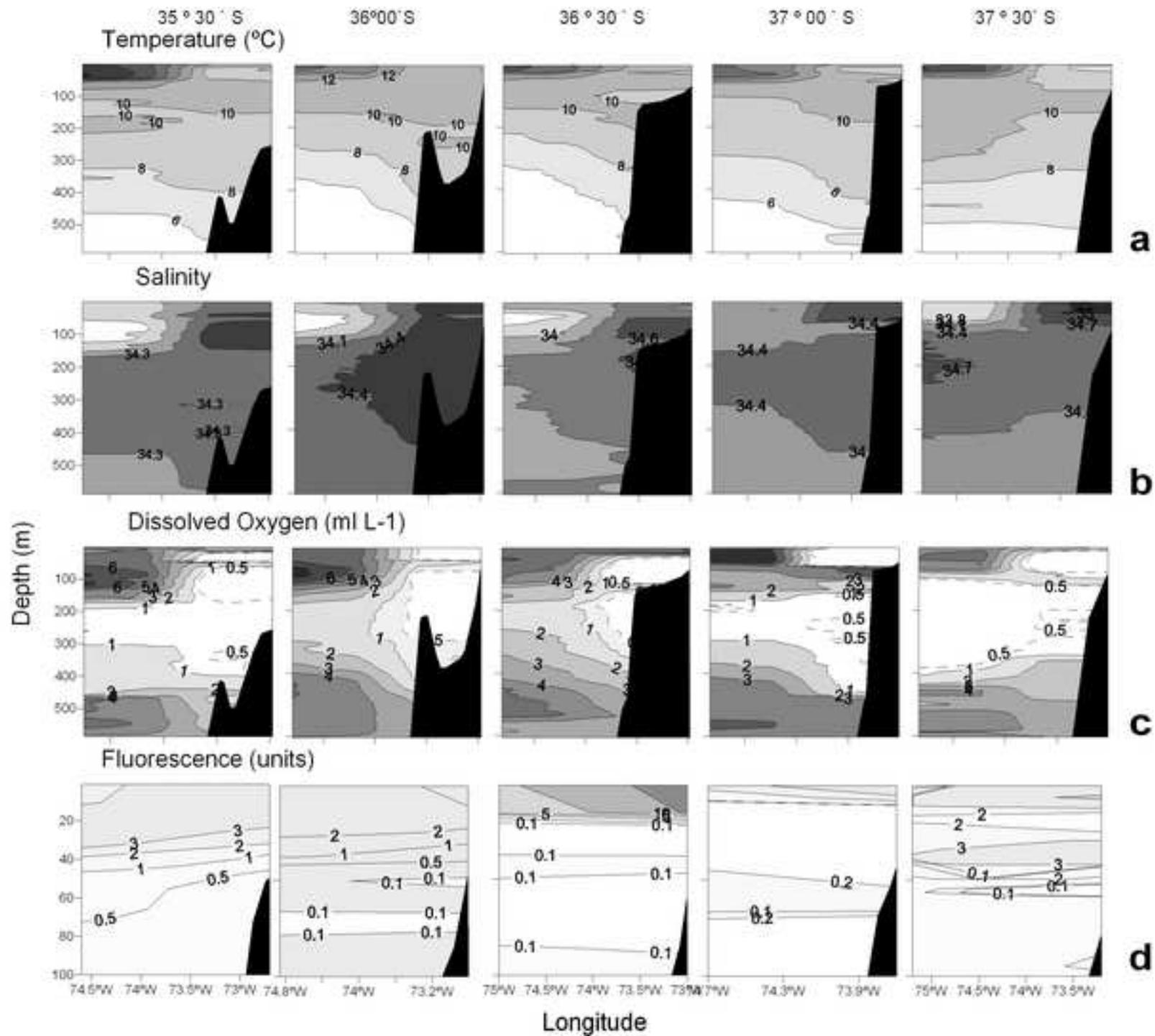
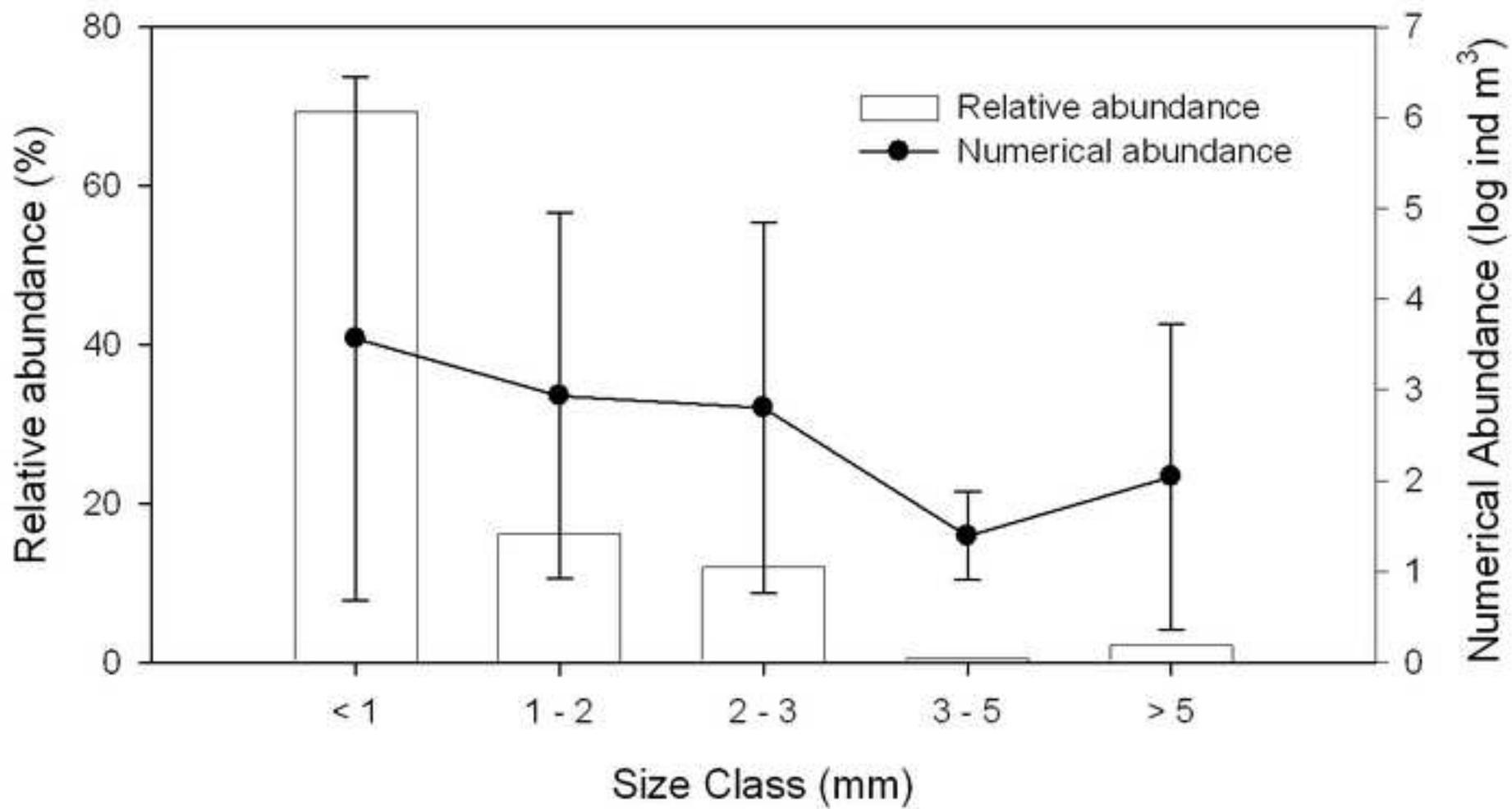
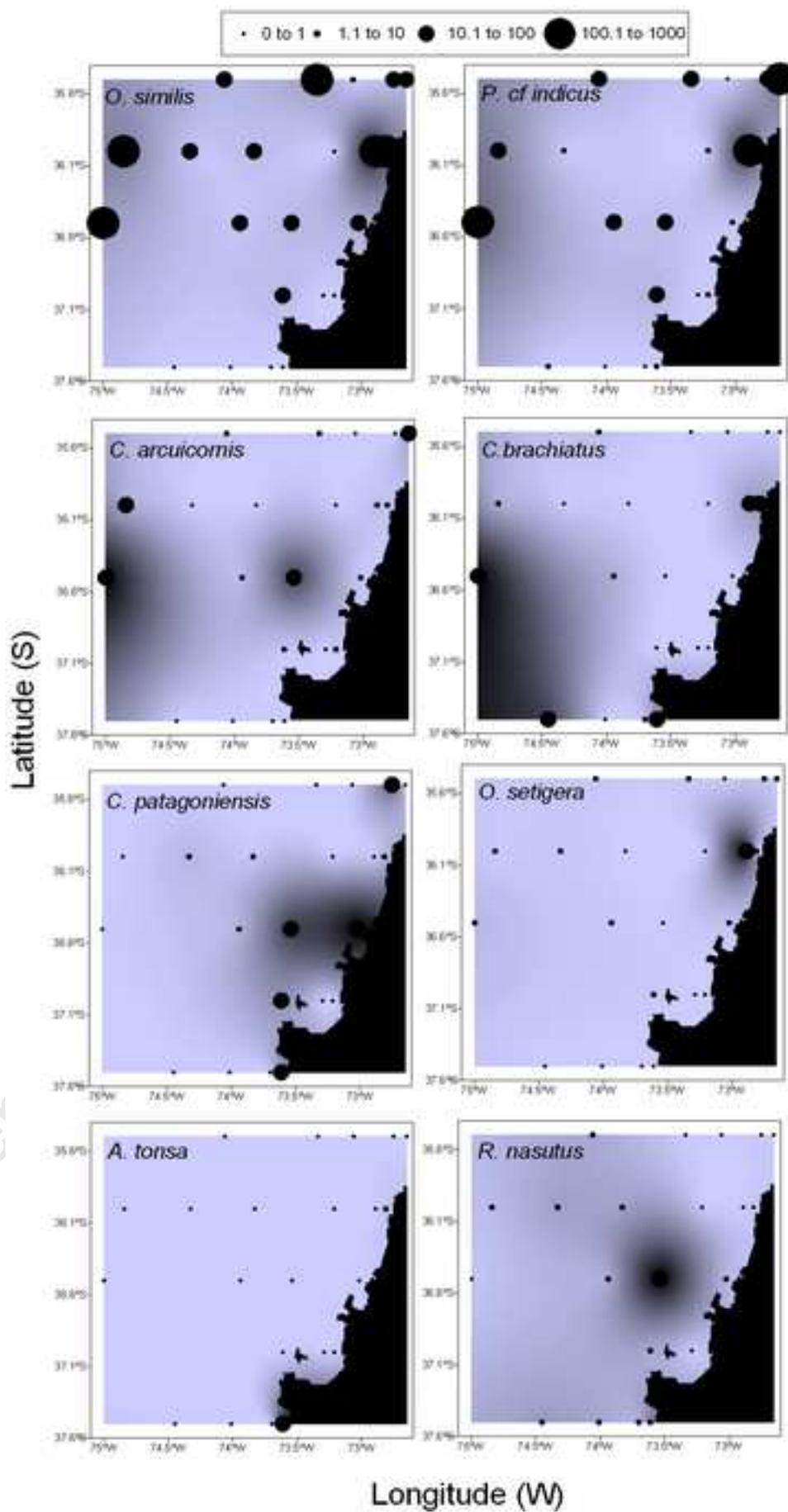


Figure
[Click here to download high resolution image](#)



Figure

[Click here to download high resolution image](#)



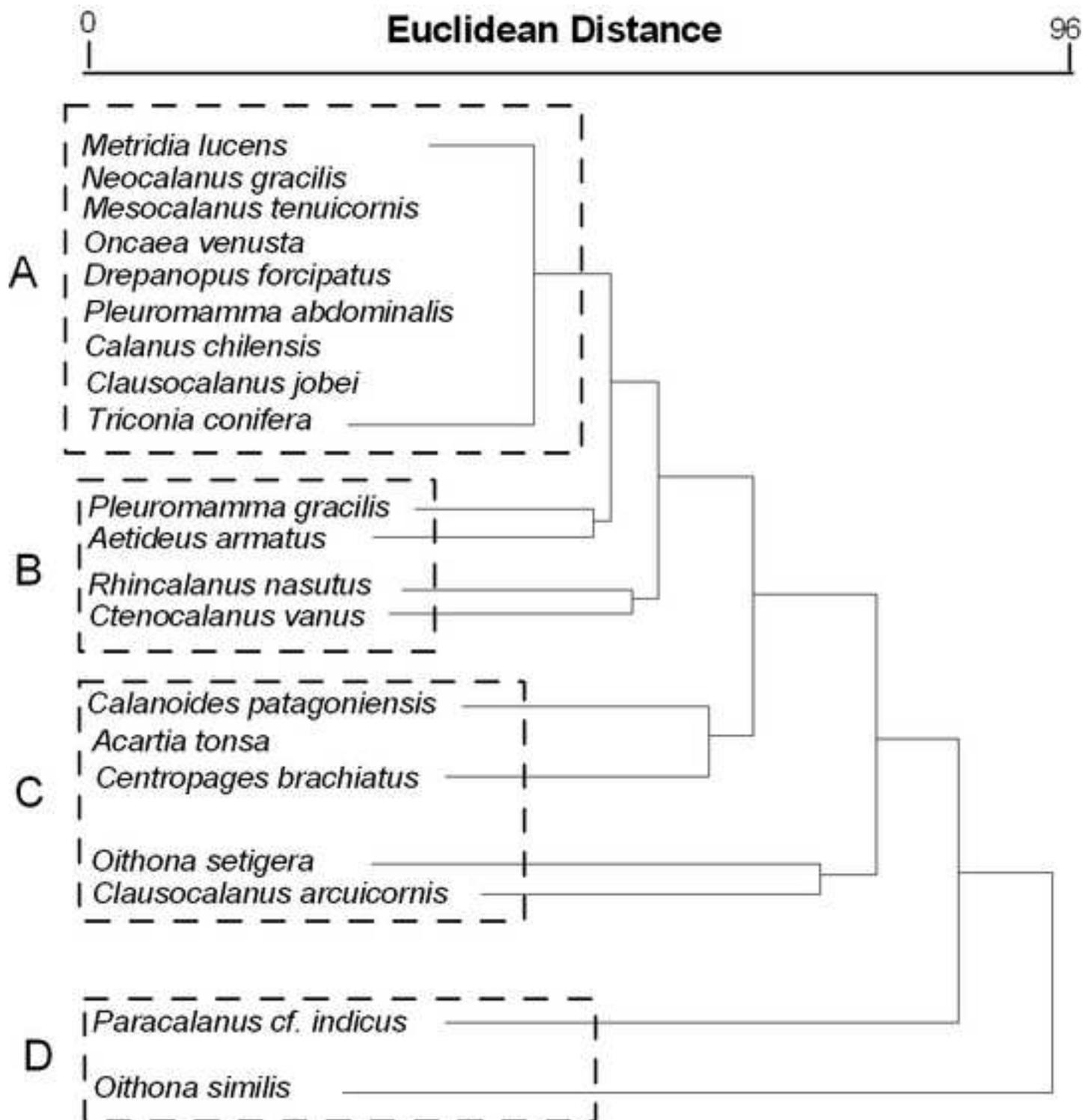
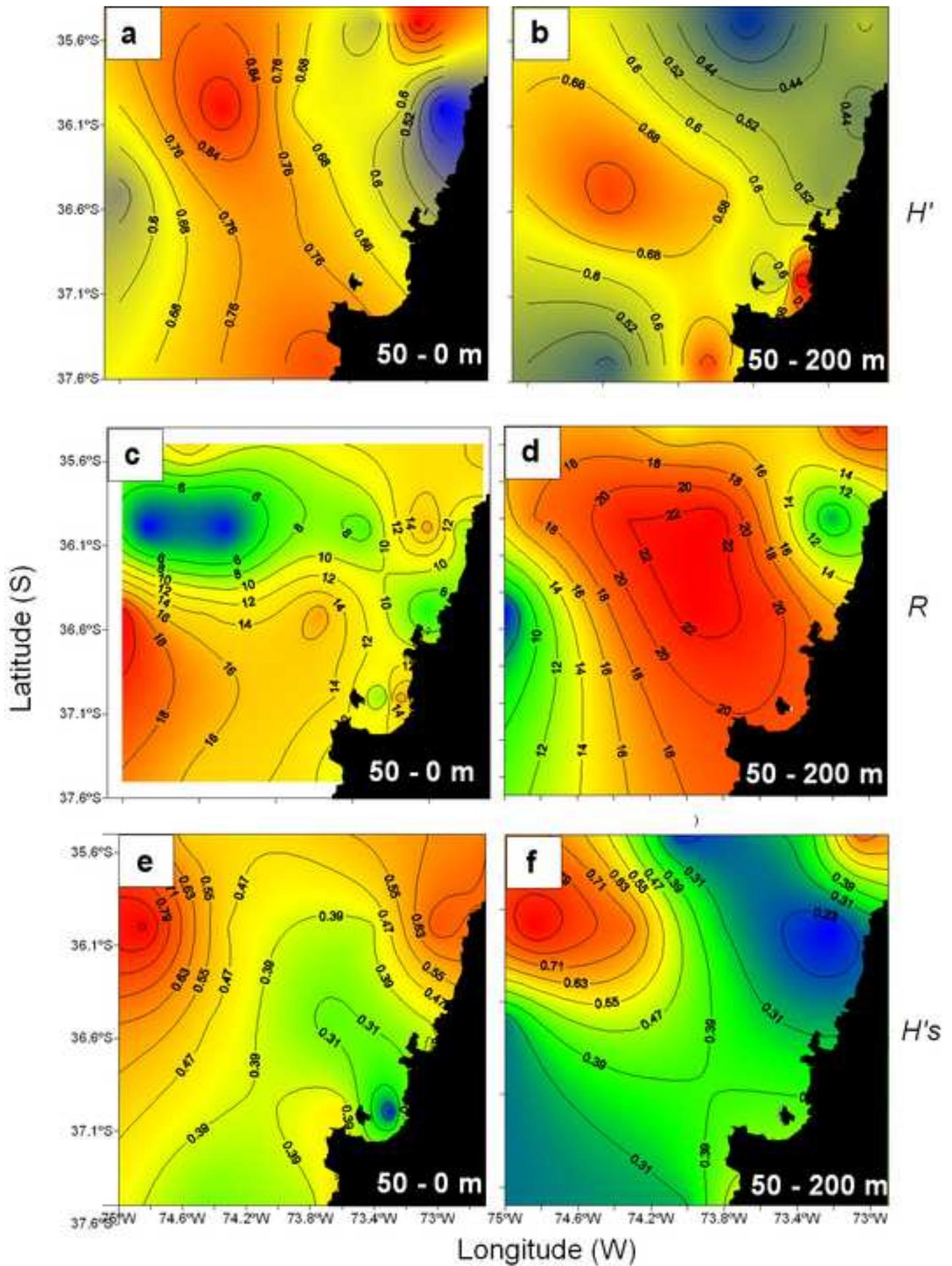


Figure
[Click here to download high resolution image](#)



Figure

[Click here to download high resolution image](#)

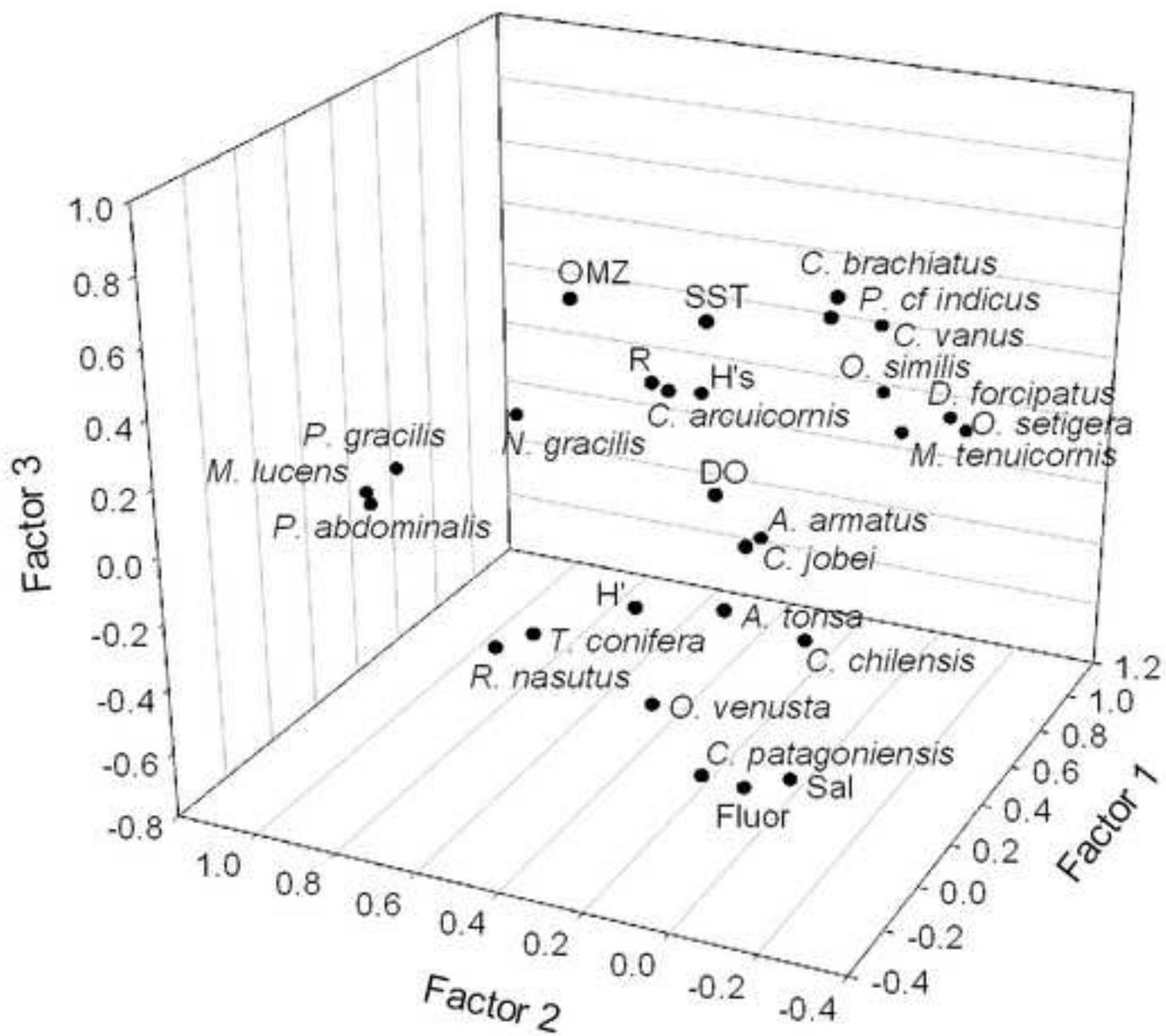
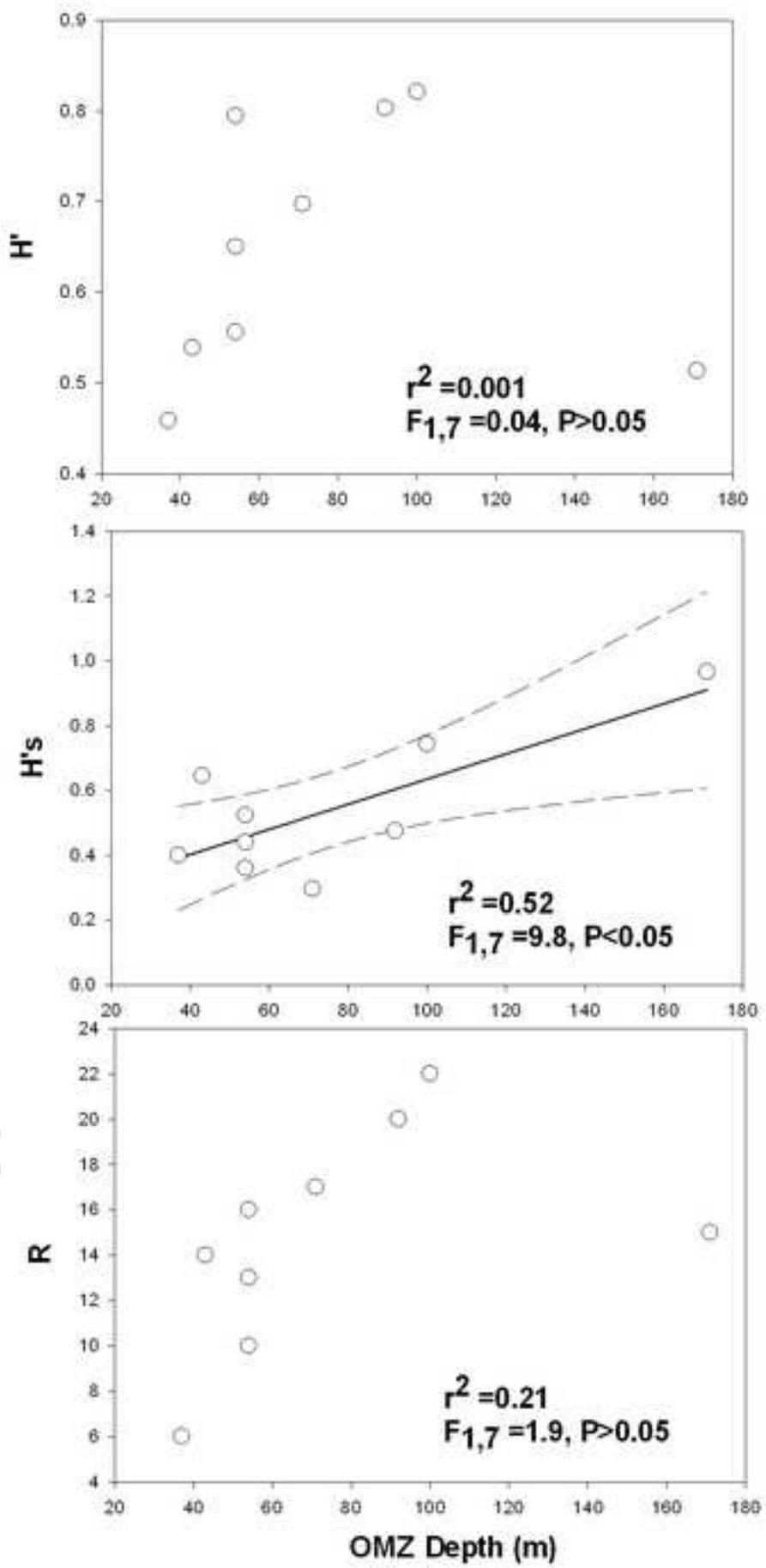


Figure
[Click here to download high resolution image](#)



EDITORIAL

Surface conditions and scales of response to wind forcing in the coastal ocean off Concepción, central Chile

Fabián Tapia¹, Carlos Moffat² & Marcus Sobarzo²

¹Centro COPAS, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción

²Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción

Upwelling systems are among the most productive coastal regions of the world oceans. They support important pelagic and benthic fisheries that account for over 20% of world catches, and harbor ecosystems that may be a key for biogeochemical mass balances and fluxes into deep-ocean waters. One such system is found on the continental shelf off Concepción, in central Chile (36°30' S), where rates of primary production during austral spring months can be as high as 6 gC d⁻¹ (Daneri et al., 2000). This area has been the focus of increasing scientific efforts in the past few decades, with an emphasis on coastal upwelling and its effects on hydrography, circulation, nutrient dynamics, primary production and biogeochemical fluxes in the coastal ocean (Morales & Lange, 2004; Escribano & Schneider, 2007 and references therein).

Since August 2002, the Center for Oceanographic Research in the eastern South Pacific (COPAS) Center has occupied an oceanographic time series station located at 90 m depth on the continental shelf (Station 18, 36°30.8' S 73°7.8' W), ca. 80 km NE of Pt. Lavapié and ca. 15 km NW of the Bay of Concepción (Fig. 1). This effort has yielded a monthly record of hydrographic and chemical measurements such as dissolved oxygen, nutrients, and chlorophyll, and has made it possible to characterize the annual cycle in hydrographic, physical-chemical and biological conditions on the continental shelf (Escribano et al., 2007; Montero et al., 2007; Sobarzo et al., 2007). Also, it has provided the background information and a logistical platform for a number of process studies on food web dynamics (Böttjer & Morales, 2007) and biogeochemical fluxes (e.g. Fariás & Cornejo, 2007; González et al., 2007).

The mesoscale physical processes that drive coastal upwelling in this and other areas are well understood (e.g. Strub et al., 1998). At smaller scales, however, the interaction between wind patterns and shoreline and bathymetric features may generate a great deal of small-scale variability in upwelling intensity (Figuerola & Moffat, 2000) and add complexity to the resulting patterns of shelf circulation (Sobarzo & Djurfeldt, 2004). The continental shelf along this region is both wide (ca. 60 km from shore to 200 m depth) and topographically complex. Two submarine canyons, corresponding to the Biobío and Itata rivers (see Fig. 1), flank an extensive area of gently sloping bottom known as the Itata terrace. The shoreline is complex and characterized by a series of nested embayments (Gulf of Arauco and bays of San Vicente, Concepción, and Coliumo) and conspicuous topographic features such as Pt. Lavapié (Fig. 1). In this context, it is pertinent to ask whether – and over what scales – these complex wind-topography interactions result in consistent spatial-temporal patterns of surface conditions along the coastal fringe north of Pt. Lavapié. It is particularly relevant at this point to identify specific areas along the region where

primary production is more strongly affected and/or modulated by upwelling-induced physical variability.

Here we combine seven years of *in situ* measurements at Station 18 with coastal wind data and satellite imagery on surface properties (sea surface temperature and chlorophyll-a concentration) along the region to (1) determine the spatial and temporal scale of response in surface conditions to upwelling-favorable coastal winds, and (2) assess the degree to which the mesoscale ‘upwelling signal’ is reflected by water column conditions measured at Station 18.

We characterized surface properties on the continental shelf of central Chile (35-37.5°S 72-75°W) using 4x4 km weekly composites of MODIS-Aqua imagery ([ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub](http://podaac.jpl.nasa.gov/pub)) for Sea Surface Temperature (SST, °C) and surface chlorophyll-a concentration (chl-a, mg m⁻³) collected between July 2002 and August 2009. Long-term means and monthly climatologies were computed for both SST and chl-a, and then subtracted from the original data to obtain weekly anomaly fields.

Coastal wind velocities were measured at the Carriel Sur airport (36°46.4'S, 73°03.8'W) between 2002 and 2009. Wind stress was computed from daily velocities, as in Smith (1988). To study the correlation between surface conditions (i.e. SST and chl-a) and coastal wind forcing, as well as its time dependency, cumulative alongshore stress was calculated over periods that varied between 8 and 30 days prior to the center date of each weekly satellite image. Correlations were then computed between these series of cumulative stress and the weekly time series of SST and chl-a anomalies obtained for each 4x4 km pixel over the region. We produced maps with correlation coefficients and their significance, outlining areas where correlation was high ($r < -0.5$ for SST vs. wind and $r > 0.35$ for chl-a vs. wind) and significant ($p=0.01$). For each variable, we studied the change in this “response area” as a function of wind integration period by calculating the fraction of pixels within the area [36-37°S, 74-72.5°W] (see Fig. 2, blue line) that complied with the above indicated criteria.

Finally, to study the response of surface conditions to wind forcing at a local scale, we used *in situ* hydrographic, chlorophyll, and nutrient data from 60 of the 83 oceanographic cruises to the coastal St 18 (www.copas.udec.cl/eng/research/serie/) conducted by the COPAS Center between 20 August 2002 and 16 April 2009. All of these cruises took place at times when upwelling-favorable winds had been blowing persistently for periods that ranged between 1 and 10 days. We grouped cruises according to this “wind history” (i.e. number of days with persistent equatorward wind) and within each group calculated average surface concentrations of nitrate, dissolved oxygen and chlorophyll, as well as temperature and salinity at 2 m depth.

The seven-year (July 2002 to August 2009) average fields of SST and surface chl-a derived from MODIS-Aqua imagery (Fig. 1) showed that cold water and high chl-a concentrations are consistently found near to the coast and, particularly, associated with prominent capes (Fig. 1). While the offshore limit of both cold waters (<13.5°C) and high chl-a concentrations (>5 mg m⁻³) closely tracks the shelf break, areas with higher chl-a values (>10 mg m⁻³) are typically located inshore of the 100 m isobath and downwind from the three main capes in the region: Pt. Lavapié, Pt. Tumbes (SW of Dichato), and Pt. Carranza (Fig. 1b).

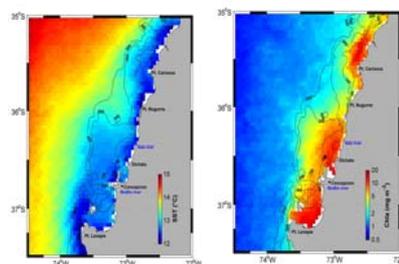


Fig. 1. Long-term average Sea Surface Temperature (left) and surface chlorophyll-a concentration (right) relative to the major topographic features and bathymetry (black contours) over the continental shelf off central Chile. Averages were calculated from weekly composites of MODIS-Aqua images (4 km resolution) collected between July 2002 and August 2009. The position of COPAS Station 18, west of Dichato, is indicated by an asterisk.

The SST response to wind forcing was detected throughout the region and spanned the width of the continental shelf over time scales of up to 16 days (Fig. 2a, 2c). The chl-a response to wind stress, on the other hand, appeared to take place over a much smaller area between the Biobío and Itata river canyons (Fig. 2b), and over longer time scales (up to 20 days, Fig. 2d).

Sorting of the COPAS cruises with respect to their “wind history” revealed that in 46 instances St. 18 was occupied after upwelling-favorable winds had been blowing persistently for 1 to 6 days, and that fewer cruises (between 2 and 4) were conducted after 7 to 10 days of persistent equatorward winds (Fig. 3a). Relative to this “wind history”, mean surface conditions showed a persistent increase in salinity (from <33.5 to ca. 34.5 psu) accompanied by a significant drop in SST between 2-3 and 8 days of equatorward wind forcing (Fig. 3b). Surface nitrate concentrations increased slightly from 1 to 7 days of persistent equatorward winds, and decreased substantially for periods ≥ 8 days (Fig. 3c). These changes in surface nitrate were mirrored by oxygen concentrations, which decreased from 1 to 7 days of upwelling-favorable winds and increased abruptly for 8 or more days (Fig. 3c). Finally, mean surface chlorophyll concentrations indicated a delayed biological response to wind-forced changes in surface conditions, with a detectable change in chl-a after 5 days of persistent equatorward winds, and a sustained increase in both mean and inter-cruise variance up to 10 days of wind forcing (Fig. 3d).

We have found substantial differences in the time scale, spatial pattern, and extent of the area over which surface temperature and chl-a appear to respond to coastal wind forcing along the continental shelf off central Chile. While a drop in SST can be detected after 2-3 days of persistent upwelling-favorable winds, it takes ca. 5 days for a change in

Contents

- Editorial pages 1 and 2
- Research Activities and New Projects pages 2 and 3
- Outreach and Capacity Building page 3
- News and Upcoming events page 4
- Recent Scientific Publications page 4

surface chlorophyll concentration to be detected. Over scales of up to 8 days, the drop in SST was accompanied by increased surface salinity and nitrate, and lower dissolved oxygen concentrations, all of which are consistent with the advection of cold, nutrient-rich deep water as a result of wind-driven coastal upwelling. A significant biological response to this change in surface conditions appeared with a lag of 2-3 days and, according to our analyses of satellite-derived data, was strongly influenced by bathymetry.

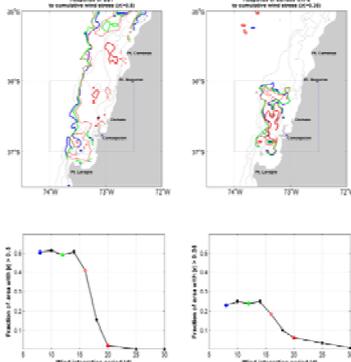


Fig. 2. Fields of correlation (A, B) between surface conditions and cumulative alongshore wind stress. Anomalies of (A) SST and (B) surface chlorophyll-a were computed from weekly composites of MODIS data. Colored contours correspond to areas with significant zero-lag correlations between surface conditions and wind stress integrated over 8 (blue), 12 (green), 16 (pink), and 20 (red) days prior to the center date of each weekly satellite image. The blue line in (A) and (B) shows the area over which the fraction of pixels with significant correlations was calculated for each wind-integration period (C, D). Colored symbols in (C) and (D) correspond to contours with matching colors in (A) and (B).

The results indicate that SST is well correlated with the integrated forcing of the local winds, particularly north of Pt. Lavapié and extending at least 200 km north of Concepción, an indication of the large-scale coherence of the wind patterns over this region and its ocean response. Although Chl-a was also highly correlated with local winds, the correlations were typically smaller and decayed faster than those for the temperature, a likely indication of the higher complexity involved in the biological response to upwelling.

While the area with high and significant SST vs. wind correlations spanned the continental shelf along the entire region, significant correlations for chl-a vs. cumulative wind were consistently found over a smaller area limited by the shelf break to the west, and by two river canyons to the north and south (Itata and BioBio, respectively). Over this terrace, the area with highly significant correlations between chl-a and cumulative wind decreased gradually and persisted for up to 20 days of wind integration. The area with a significant SST response to wind, on the other hand, decreased much more abruptly for >15 days of wind integration.

Fields of correlation between SST/chl-a anomalies and time-integrated wind highlighted the distinct spatial scales of physical versus biological responses to upwelling on the continental shelf of central Chile. The coarse temporal resolution (8 days) of satellite data used in our analyses, however, precluded the direct estimation of response times to wind in the region. Instead, we classified in situ observations gathered at Station 18 over 7 years according to their

individual "wind history". This novel approach allowed to partially bridge the information gap and characterize response times in surface conditions and primary production.

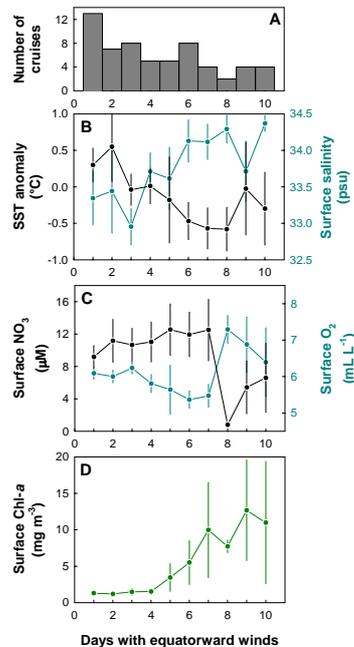


Fig. 3. Variability of surface conditions measured at Station 18 relative to the "wind history" (i.e. number of days with persistent equatorward wind) prior to each oceanographic cruise. (A) Number of cruises within each category; (B) change in mean SST (black) and surface salinity (blue); (C) change in surface nitrate (black) and dissolved oxygen concentration (blue); and (D) change in mean surface chlorophyll-a concentration.

Our estimates of spatial and temporal scales of response are consistent with recent studies based on high-frequency in situ observations (Aguilera et al., 2009) and the combination of satellite-derived and cruise data (Letelier et al., 2009). Offshore limits of the coastal band over which SST responded to wind forcing agreed with those found for the upwelling front by Letelier et al. (2009). A 5-day time scale of biological response, on the other hand, is comparable to the 3-5 days estimated by Aguilera et al. (2009) from daily observations conducted over 6-8 day periods at two shelf stations off northern Chile (23°S and 21°S).

Overall, the results indicate that surface hydrographic and biogeochemical properties in the coastal ocean respond in varying temporal and spatial scales to upwelling-favorable winds, and that the COPAS Station 18 is well located to monitor this variability. Nevertheless, the results also indicate a wealth of small-scale along- and across-shelf variability in need of further exploration. More details on the spatial patterns of variability of the ocean properties explored here, and their potential modulation by surface forcing will be presented elsewhere (Tapia et al., in prep).

This research was funded by the COPAS Center. We are thankful to the COPAS Time Series team and the R/V Kay Kay (II) crew for valuable help during the field work. Coastal wind data at Pt. Hualpen were gathered with support from FONDECYT grant 1070501 to M. Sobarzo. Carriel Sur wind data were

provided by the PIMEX research program at the University of Concepcion.

Cited References

Aguilera, V., R. Escribano, & L. Herrera. 2009. Journal of Marine Systems 78:124-135.
 Böttjer, D., & C. E. Morales. 2007. Progress in Oceanography 75:415-434.
 Daneri, G., V. Dellarossa, R. Quiñones, B. Jacob, P. Montero, & O. Ulloa. 2000. Marine Ecology Progress Series 197:41-49.
 Escribano, R., P. Hidalgo, H. González, R. Giesecke, R. Riquelme-Bugueño, & K. Manríquez. 2007. Progress in Oceanography 75:470-485.
 Escribano, R., & W. Schneider. 2007. Progress in Oceanography 75:343-347.
 Farías, L., & M. Comejo. 2007. Progress in Oceanography 75:561-575.
 Figueroa, D., & C. Moffat. 2000. Geophysical Research Letters 27:3905-3908.
 Gonzalez, H. E., E. Menschel, C. Aparicio, & C. Barria. 2007. Progress in Oceanography 75:435-451.
 Letelier, J., O. Pizarro, & S. Nuñez. 2009. Journal of Geophysical Research 114:doi: 10.1029/2008JC005171.
 Montero, P., G. Daneri, L. A. Cuevas, H. E. González, B. Jacob, L. Lizárraga, & E. Menschel. 2007. Progress in Oceanography 75:518-530.
 Morales, C. E., & C. B. Lange. 2004. Deep-Sea Research II 51:2345-2348.
 Smith, S. D. 1988. Journal of Geophysical Research 93:15467-15472.
 Sobarzo, M., L. Bravo, D. Donoso, J. Garces-Vargas, & W. Schneider. 2007. Progress in Oceanography 75:363-382.
 Sobarzo, M., & L. Djurfeldt. 2004. Journal of Geophysical Research 109: doi: 10.1029/2004JC 002350.
 Strub, P. T., J. M. Mesías, V. Montecino, J. Rutlant, & S. Salinas. 1998. Pages 273-313 in A. R. Robinson & K. H. Brink, editors. The Sea. John Wiley & Sons, New York.

RESEARCH ACTIVITIES AND NEW PROJECTS

Zooplankton production in the upwelling system of Chile. Project Fondecyt 11090146 has recently been awarded to **Dr. Pamela Hidalgo**, who became a COPAS Associate Researcher of Research Program 3 of the Center in 2009. This study started in January 2010 and will focus on growth rates and life cycles of dominant zooplankton from the upwelling zone of Chile. The project proposes the comparison of biomass, production rates and efficiency of production (P/B ratio) of dominant copepods species from two upwelling sites with very distinct annual regimes, Antofagasta and Concepción.

The approach consists in a combination of experimental and field work to assess production rates of the dominant copepod species, and to examine changing upwelling conditions. The study will be based on: 1) time series observational studies focused on temporal variability in copepod biomass, composition and their contribution to total zooplankton biomass, and 2) seasonal intensive experimental work conducted to estimate growth and production rates of dominant species by simulating conditions at the time of sampling. Both field observations and sampling and seasonal experimental work will be performed along with observations of upwelling variation at the locations. Proxies for upwelling intensity, as well as physical, chemical and