



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**Biomasa fitoplanctónica y su relación con la hidrografía en otoño,
en la Bahía de La Paz.**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

PRESENTA:

Torres Martínez Carlos Mauricio

TUTOR(A) O TUTORES PRINCIPALES:

Dr. Erik Coria Monter

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM)

Dra. María Adela Monreal Gómez

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM)

COMITÉ TUTOR:

Dr. Martín Merino Ibarra

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM)

Dr. Luis Alberto Oseguera Pérez

(FES Iztacala-UNAM)

Dr. Sergio Cházaro Olvera

(FES Iztacala-UNAM)

MÉXICO, CD. MX., SEPTIEMBRE, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**Biomasa fitoplanctónica y su relación con la hidrografía en otoño,
en la Bahía de La Paz.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO(A) EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**PRESENTA:
NOMBRE COMPLETO DEL ALUMNO**

TUTOR(A) O TUTORES PRINCIPALES:

Dr. Erik Coria Monter
(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM)
Dra. María Adela Monreal Gómez
(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM)

COMITÉ TUTOR:

Dr. Martín Merino Ibarra
(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM)
Dr. Luis Alberto Oseguera Pérez
(FES Iztacala-UNAM)
Dr. Sergio Cházaro Olvera
(FES Iztacala-UNAM)

MÉXICO, CD. MX., SEPTIEMBRE, 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres Juan Luis Torres Trujano e Inés Martínez Fierros, a mis hermanos Daniel Torres e Iván Torres por todo el apoyo y cariño que me ofrecieron para poder lograr mis metas, sé que fue difícil para todos, pero muchas gracias por su paciencia y comprensión, se que con su apoyo todos podremos conseguir más metas.

A la magnífica mujer que siempre me ha acompañado en cada paso, Ana Montoya muchas gracias por decidir estar conmigo, fue complicado este proceso, pero nunca me dejaste solo, lo cual agradeceré y atesorare por el resto de mi vida. Sabes que siempre podrás contar con mi apoyo y mi corazón.

De igual manera agradezco al Dr. Erik Coria, Dra. Adela Monreal, Dr. David Salas y Dra. Elizabeth Durán, por ser los mejores mentores que pude haber deseado, por toda la sabiduría que me han transmitido, y finalmente por permitirme tener las mejores experiencias, entre ellas el COLACMAR 2023, las campañas oceanográficas a bordo de los buques, las practicas de campo, los congresos, etc.

Agradecer a la UNAM por todas las oportunidades que me han ofrecido y por todo el desarrollo que he logrado gracias a sus aulas y profesores.

Al Dr. Pablo Hernández Alcantará por su apoyo con los análisis estadísticos presentados en este trabajo, y al Hidrobiólogo Sergio Castillo Sandoval por el apoyo técnico en la determinación de nutrientes y clorofila-a.

Al CONACYT por la beca otorgada del periodo de agosto 2021 a julio de 2023. CVU: 1148640

El muestreo y obtención de datos provienen de las campañas PALEOMAR-I y PALEOMAR-II realizadas a bordo de B/O El Puma de la UNAM. El financiamiento para el tiempo de buque fue cubierto por la UNAM

El presente trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto DGAPA-PAPIIT-UNAM #IG100421 "Análisis de las interacciones entre aguas continentales y marinas en el Golfo de California bajo el enfoque de la fuente al mar como base para su gestión sustentable"

Tabla de contenido

Resumen	1
CAPÍTULO I: Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema y justificación	2
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Hipótesis	5
1.5 Preguntas de investigación	6
1.6 Área de estudio	6
CAPÍTULO II: Materiales y métodos	7
CAPITULO III: Resultados.....	10
3.1 Masas de agua	10
3.2 PALEOMAR-I (noviembre de 2014).....	11
3.2.1 Hidrografía	11
3.2.1.2 <i>Distribución horizontal de temperatura, salinidad, densidad, Chl-a y oxígeno disuelto</i>	15
3.2.2 <i>Nutrimientos</i>	17
3.2.2.1 <i>Distribución vertical de nutrientes</i>	17
3.3 PALEOMAR-II (noviembre de 2016)	24
3.3.1 Hidrografía	24
3.3.1.2 <i>Distribución horizontal de temperatura, salinidad, densidad, Chl-a y oxígeno disuelto</i>	28
3.3.2 <i>Nutrimientos</i>	32
3.3.2.1 <i>Distribución vertical de nutrimentos</i>	32
3.4 Imágenes de satélite	38
3.5 Series de tiempo de vientos.....	40
3.6 Análisis estadístico.....	40
3.7 Proporción de nutrimentos, nutriente limitante y Chl-a acumulativa	42
CAPÍTULO IV: Discusión.....	43
Conclusiones.....	48
Referencias	48

Resumen

La Bahía de La Paz es el cuerpo de agua costero más grande del Golfo de California y es una región reconocida por su elevada producción biológica, incluida la fitoplanctónica. El presente trabajo analiza la distribución tridimensional de los nutrientes y de la biomasa fitoplanctónica, expresada como concentración de clorofila-*a* (Chl-*a*), en dos épocas de otoño (2014 y 2016) y se analiza el papel del forzamiento físico. Se realizaron dos cruceros de investigación a bordo del B/O El Puma de la UNAM en donde se adquirieron datos hidrográficos mediante una sonda CTD y se colectaron muestras de agua a diferentes profundidades para la determinación de nutrientes y Chl-*a* mediante espectrofotometría. Los resultados mostraron la presencia de cuatro masas de agua en ambos muestreos, tres de ellas al interior de la bahía y la otra al exterior de Boca Grande. La concentración de nutrientes se incrementó con la profundidad, sin embargo, se observaron diferencias entre ambos años, tanto en la proporción de masas de agua, como en las concentraciones de los nutrientes y de la Chl-*a*. Mientras que en 2014 la concentración de Silicio Reactivo Soluble fue de hasta 152.4 μM , en 2016 fue de solo 23.63 μM . La Chl-*a* presentó diferencias importantes, principalmente en los niveles subsuperficiales. Las diferencias podrían estar relacionadas con eventos de El Niño, en particular con el evento extremo del año 2015-2016, ya que de acuerdo con el Índice Multivariado ENOS (MEI, por sus siglas en inglés), 2014 fue un año neutro. Los resultados evidencian la influencia que tienen algunos procesos de gran escala en las condiciones hidrográficas de la columna de agua y en la concentración de nutrientes y biomasa fitoplanctónica en regiones reconocidas por su elevada biodiversidad, en este caso la Bahía de La Paz.

Palabras clave: fitoplancton, clorofila-*a*, hidrografía, nutrientes, El Niño, Bahía de La Paz. Golfo de California.

CAPÍTULO I: Introducción

El fitoplancton comprende un conjunto heterogéneo de microorganismos distribuidos en la capa eufótica del océano, son responsables de más del 45% de la producción primaria neta del planeta (Simon et al., 2009), representa la base de la cadena trófica, lo que contribuye a sustentar pesquerías de alto valor comercial en el mundo (Coria-Monter et al., 2014).

También, el fitoplancton juega un papel fundamental en la mitigación del cambio climático y el calentamiento global al reducir los niveles globales de CO₂ (Vajravelu et al., 2017).

Como uno de los pigmentos fotosintéticos presentes en todos los organismos que integran al fitoplancton, la Chl-*a* es actualmente reconocida como uno de los mejores indicadores de la biomasa fitoplanctónica en el ambiente marino (Cullen, 2015) y la medición de su emisión de fluorescencia se ha convertido en una técnica estándar para evaluar el rendimiento fotosintético, ya que representa una técnica sensible y no invasiva.

Es ampliamente conocido que la variación de las concentraciones de Chl-*a* está estrechamente relacionada con la presencia de procesos hidrodinámicos en el océano, los cuales también modifican la disponibilidad de nutrientes para el fitoplancton (Falkowski, 2012).

La distribución vertical y horizontal de la biomasa del fitoplancton es heterogénea y responde a diferentes mecanismos biológicos de agregación; sin embargo, aunque el fitoplancton ha desarrollado estrategias para permanecer en la capa eufótica, su distribución está fuertemente influenciada por procesos hidrodinámicos que tienen lugar en la columna de agua a diferentes escalas espacio-temporales, que están directamente vinculados al suministro de nutrientes (nitratos, fosfatos, silicatos, etc.) hacia la capa eufótica y determinan las tasas de producción del fitoplancton. Entre estos procesos hidrodinámicos destacan las ondas internas, frentes y vórtices (McGillicuddy et al., 2007; McGillicuddy, 2015; McGillicuddy, 2016; Mahadevan, 2016). Además, la distribución de la biomasa fitoplanctónica ha sido estrechamente relacionada con la presencia de procesos a gran escala que ocurren debido a la interacción océano-atmósfera, como los eventos de El Niño/La Niña. En particular, los eventos de El Niño han sido relacionados con una disminución en los niveles de la biomasa fitoplanctónica en el Océano Pacífico, y regiones adyacentes (McPhaden et al., 2021).

1.1 Planteamiento del problema y justificación

Los patrones de distribución horizontal y vertical de la biomasa fitoplanctónica, expresada como concentración Chl-*a*, tienen fuertes implicaciones en las redes tróficas pelágicas, particularmente en el zooplancton herbívoro. La disponibilidad de alimento para este grupo de herbívoros es diferente cuando el fitoplancton está concentrado en una capa delgada, pero en cantidades elevadas, que cuando está disperso en un espesor amplio y en bajas cantidades. Además, no es lo mismo si la mayor concentración de Chl-*a* está en un solo máximo o bien

la distribución vertical muestra varias crestas o es homogénea (Duran-Campos et al., 2019a). El zooplancton herbívoro y filtrador tiene que acoplarse a dichos patrones para disponer, en cada caso, del alimento requerido (Gallager et al. 2004), lo que permite el buen funcionamiento de la “bomba biológica o de carbono” (Richardson, 2008). Por otra parte, el análisis de la distribución de la biomasa fitoplanctónica permite identificar ciertas regiones y épocas productivas y, por lo tanto, proponer estrategias para un adecuado manejo de los recursos marinos de la región.

1.2 Antecedentes

En la última década han aparecido en la literatura científica algunos trabajos que han relacionado el patrón de circulación presente en la Bahía de La Paz con la distribución vertical y horizontal de la biomasa fitoplanctónica, expresada como Chl-*a*.

A pesar de que estos trabajos han permitido dilucidar la relación que existe en esta interfaz física-biología, la gran mayoría de estos trabajos corresponden a los meses más cálidos del año (junio-septiembre), por lo que aún existen controversias acerca de cuál es el papel de la hidrografía en la distribución del fitoplancton en los meses de transición entre las épocas cálida y fría.

Entre los trabajos que se han realizado a la fecha destaca el de Coria-Monter et al. (2014) quienes documentaron, en el mes de agosto, la presencia de un vórtice ciclónico confinado al interior de la Bahía de La Paz que influye en la distribución del fitoplancton, generando una distribución diferencial desde el centro hasta la periferia del vórtice, con una predominancia de dinoflagelados en su centro, y de diatomeas en su periferia.

Asimismo, se ha reportado que la presencia de este vórtice ciclónico provoca un bombeo de nutrimentos hacia la capa superficial, lo que fertiliza la capa eufótica y favorece a la biomasa fitoplanctónica de la región, durante el mes de junio (Coria-Monter et al., 2017).

Más recientemente, se documentó que la presencia de un vórtice dipolo (ciclónico-anticiclónico) durante el mes de septiembre induce la formación de un frente termo-halino, lo cual genera una elevada biomasa fitoplanctónica al interior de la Bahía de La Paz (Durán-Campos et al., 2019b). También, se ha documentado que la presencia de los vórtices al interior de la bahía durante la época de verano, condicionan la distribución de las variables hidrográficas (particularmente temperatura y densidad), y la concentración de nutrimentos y,

por ende, repercute en la distribución de la biomasa fitoplanctónica (Sánchez-Mejía et al., 2020).

Además, se ha reportado el impacto del fenómeno de El Niño al interior del Golfo de California, en el cual la distribución habitual de los silicoflagelados se vio afectada por la presencia del fenómeno de El Niño de 1983; este fenómeno se caracterizó por la incursión del agua “Ecuatorial-Tropical” la cual ingresa agua cálida, inhibiendo la influencia de agua fría de la Corriente de California, lo cual ocasionó la disminución de población de silicoflagelados en la boca del golfo (Pérez-Cruz & Molina-Cruz, 1988). También, se ha documentado que la variabilidad anual de la Chl-*a* en el Golfo de California y regiones adyacentes, incluida la Bahía de La Paz, está fuertemente relacionada con el fenómeno de El Niño (1997-2006) (Herrera-Cervantes et al., 2010).

La variabilidad interanual de la Chl-*a* ha sido documentada por Guevara-Guillen et al. (2018) quienes reportaron que esta variabilidad presenta un patrón estacional e interanual dentro de la bahía, con valores promedio mínimos en invierno que se relacionaron con procesos de mezcla producidos por vientos del noroeste y valores máximos a principios de otoño y verano asociados con una mayor irradianza (Cervantes-Duarte et al., 2021).

Durante el año 2015-2016, se presentó un evento extremo de El Niño, el cual, por su intensidad y duración, fue nombrado El Niño “Godzilla”. Dicho evento fue señalado por ejercer fuertes implicaciones en la producción primaria del Océano Pacífico, comparándose con los eventos ocurridos durante 1982-1983, y 1997-1998 (Schiermeier, 2015).

Como primera aproximación de la relación de Chl-*a* satelital (Chl-*a*SAT), de la temperatura superficial del mar (TSM) y de la intensidad de los vientos en la superficie del mar, Herrera-Cervantes et al. (2020) relacionaron estas variables en una función exponencial ajustada, mostrando patrones de dispersión coherentes en la superficie. Durante las fases ENSO fría, neutra y cálida, los patrones de dispersión mostraron diferentes pendientes para las curvas asociadas con los meses de La Niña y El Niño y con diferentes niveles de respuesta de la Chl-*a*SAT (~1 mg/m³). Herrera-Cervantes et al. (2023) documentaron baja TSM (~20.5-21.5 °C) para los periodos de invierno de 2016-2017 y 2017-2018 en la bahía y con concentraciones elevadas de Chl-*a*SAT (~4.0-6.0 mg/m³), lo cual correspondía a una condición neutra y un fenómeno moderado de La Niña, según el Índice Oceánico de el Niño (ONI, por sus siglas en inglés).

El fenómeno de El Niño también genera cambios importantes en la hidrografía de la columna de agua, un ejemplo es lo documentado en la Bahía de La Paz por Obeso-Nieblas et al. (2004) para El Niño de 1997-1998, quienes observaron un aumento en la temperatura de hasta 4.2 °C, mientras que para enero de 1998 se observó una disminución de salinidad y la desaparición de la haloclina; el fitoplancton también responde a temperaturas cálidas y condiciones de bajo contenido de nutrimentos, lo cual ha repercutido en la reducción de la Chl-*a* superficial asociada con las aguas cálidas y sin nutrimentos de las condiciones de El Niño (Ladah, 2003).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Determinar la distribución, vertical y horizontal, de la biomasa fitoplanctónica al interior de la Bahía de La Paz y su relación con la hidrografía durante la época de otoño.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar las diferentes masas de agua al interior de la Bahía de La Paz.
- Determinar la distribución vertical y horizontal de las variables hidrográficas (temperatura, salinidad y densidad), químicas (oxígeno disuelto, nitratos, nitritos, fosfatos y silicatos) y de la biomasa fitoplanctónica, expresada como concentración de Chl-*a*.
- Determinar la relación entre las variables ambientales y la distribución de la biomasa fitoplanctónica.
- Identificar el posible efecto de eventos ENSO en las variables físicas, químicas y biológicas al interior de la Bahía de La Paz.

1.4 Hipótesis

La concentración de los nutrimentos y la biomasa fitoplanctónica, expresada como Chl-*a*, al interior de la Bahía de La Paz durante la época de otoño estará influenciada por la presencia de eventos de El Niño/La Niña. La concentración de dicha biomasa presentará cambios por la advección de masas de agua con diferentes propiedades físicas y químicas como resultado de dichos eventos.

1.5 Preguntas de investigación

¿Cómo fue la distribución de los nutrientes al interior de la Bahía de La Paz durante la época de otoño de 2014 y 2016?

¿Cómo fue la distribución de la biomasa fitoplanctónica, expresada como Chl-*a*, al interior de la Bahía de La Paz durante la época de otoño de 2014 y 2016?

¿Cómo influyó la estructura hidrográfica de la columna de agua en la biomasa fitoplanctónica de la región?

¿Existió algún impacto de eventos ENSO sobre la concentración de la biomasa fitoplanctónica?

1.6 Área de estudio

La Bahía de La Paz se localiza en la costa peninsular del Golfo de California entre los 24.15° y 24.97° de latitud Norte y 110.30° y 110.75° de longitud Oeste, con un área cercana a los 4500 km² (Fig. 1). Presenta dos comunicaciones con el Golfo de California: una al norte, denominada Boca Grande, la cual es ancha y profunda, y la segunda al sur, llamada Canal de San Lorenzo, la cual es angosta y poco profunda. La bahía presenta una profundidad máxima de 420 m en la Cuenca Alfonso, localizada en la parte central de la bahía. La evaporación (300 mm/año) excede a la precipitación (180 mm/año) (Jiménez-Illescas, 1983) y la descarga de ríos es prácticamente inexistente.

El patrón de vientos de la región varía estacionalmente, con vientos intensos del noroeste (>10 m/s) durante el invierno y vientos débiles (<5 m/s) del sureste o noreste, asociados con calmas frecuentes, durante el verano (Monreal-Gómez et al., 2001). El patrón de circulación está dominado por la presencia de un vórtice ciclónico cuasi permanente, el cual modifica la estructura hidrográfica de la columna de agua y regula el abastecimiento de nutrientes hacia la capa eufótica, lo que genera cambios importantes en el ecosistema planctónico (Coria-Monter et al., 2014; 2017).

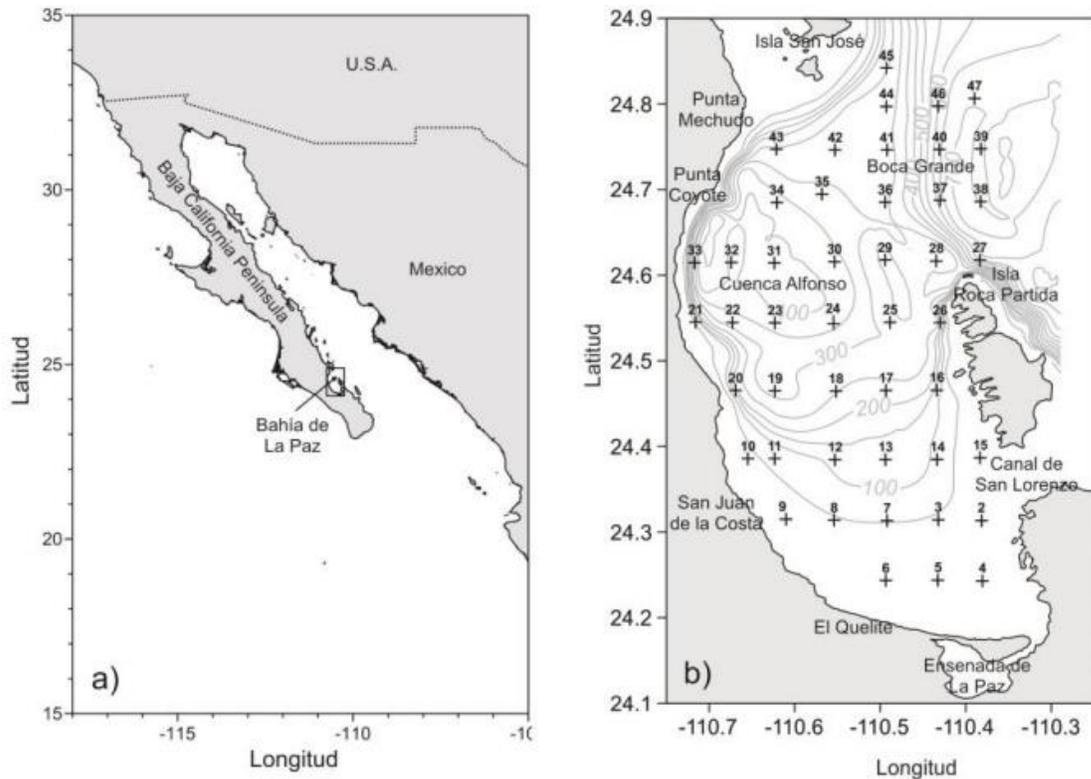


Figura 1. Área de estudio. a) Golfo de California, b) Bahía de La Paz. El símbolo + representa las estaciones hidrográficas en los cruceros PALEOMAR-I y PALEOMAR-II.

CAPÍTULO II: Materiales y métodos

La información presentada en este proyecto incluye datos hidrográficos de alta resolución adquiridos mediante una sonda CTD (Conductividad, Temperatura, Profundidad) SeaBird 19 plus, datos de un perfilador de fluorescencia de Chl-*a* Eco-Wet Labs y datos de oxígeno disuelto de un sensor SeaBird SBE 43, que se obtuvieron en dos cruceros oceanográficos que se realizaron en la Bahía de La Paz durante el mes de noviembre de 2014 (PALEOMAR-I) y noviembre de 2016 (PALEOMAR-II).

Durante dichos cruceros se adquirieron datos de temperatura, conductividad, presión y fluorescencia, en un total de 34 estaciones hidrográficas en el interior de la bahía en el crucero PALEOMAR-I y 44 estaciones hidrográficas en el crucero PALEOMAR-II, que cubrieron la bahía y la conexión con el Golfo de California (Fig. 1b). La red de estaciones consistió en una malla equidistante, con una separación de aproximadamente 5 millas náuticas entre cada una.

Además, en cada estación hidrográficase utilizó una roseta oceanográfica General Oceanics equipada con botellas Niskin de 10 L para coleccionar agua a diferentes profundidades (2, 10, 30, 50, 75 m) para la determinación de nutrimentos (nitratos, nitritos, silicatos y fosfatos) y Chl-*a*. Inmediatamente después de la colecta, submuestras de ~100 ml fueron filtradas a través de filtros de jeringa de acetato de celulosa de 0.45 y 0.22 μm de apertura de poro (Merck Millipore Company, MA, EE. UU.), las cuales fueron guardadas en recipientes de polipropileno, almacenadas en congelación a ~20 °C hasta su análisis. En el laboratorio, las muestras fueron analizadas inmediatamente después de los cruceros. La concentración de los nutrimentos se determinó con un analizador de flujo segmentado (Skalar San Plus) siguiendo los métodos sugeridos por Grasshoff et al. (1983) y los circuitos propuestos por Kirkwood (1994). Con este sistema y técnica se lograron resoluciones de 0.1 μM para nitrato, de 0.02 μM para nitrito, de 0.04 μM para fosfatos y de 0.1 μM para silicatos. Para la determinación de Chl-*a*, submuestras de ~3 L fueron filtradas al vacío a través de filtros de membrana de nitrocelulosa con un tamaño de poro de 0.45 μm y 47 mm de diámetro (Merck Millipore Company, MA, EE. UU.), utilizando un sistema de vacío de acero inoxidable a una presión menor de 10 psi. Después de la filtración, se colocaron los filtros en tubos de centrifuga de plástico (cubiertos con papel aluminio para evitar los efectos negativos de la luz), posteriormente se almacenaron en condiciones de oscuridad a -20 °C antes del procesamiento. Durante el filtrado, se tomaron precauciones a bordo para trabajar en condiciones de poca luz para evitar cualquier posible degradación de las muestras. En el laboratorio, la Chl-*a* fue extraída con acetona al 90% por 24 horas en condiciones de oscuridad y se congeló a -20 °C (Strickland y Parson, 1972; Parsons et al., 1984). Una vez transcurrido el tiempo de extracción, las muestras se centrifugaron a 4500 rpm (centrifuga Eppendorf 5840) durante 30 minutos. A continuación, se midieron tres réplicas de absorbancia, siguiendo los protocolos de Strickland y Parson (1972), a 750, 664, 647 y 630 nm con un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Scientific). Durante todo el proceso de análisis se mantuvieron condiciones de poca luz en el laboratorio para evitar la degradación de las muestras.

Los datos obtenidos del CTD fueron inicialmente procesados siguiendo las rutinas del fabricante (software SBE Data Processing v2), promediándolos verticalmente a 1 db; posteriormente los datos de temperatura conservativa (°C) y salinidad absoluta (g/kg) fueron

derivados a partir de los algoritmos TEOS-10 (IOC et al., 2010). Los datos de fluorescencia fueron procesados y convertidos a unidades de Chl-*a* (mg/m³) con base en el archivo nominal de calibración del fabricante. Una vez limpios y promediados, los datos fueron usados para el análisis de las características hidrográficas de la columna de agua, que incluyó la realización de diagramas T-S para la identificación de las masas de agua.

Se realizaron perfiles verticales de las diferentes variables hidrográficas, de la concentración de nutrientes y de la concentración de Chl-*a* para cada estación hidrográfica. Asimismo, se realizaron mapas de distribución horizontal de las variables mencionadas a diferentes profundidades. Además, se obtuvieron imágenes satelitales de la TSM y de Chl-*a* para los días en los cuales se realizó el crucero de investigación, del espectro-radiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés), con el objetivo de establecer una comparación entre los datos medidos *in-situ* y los obtenidos mediante el satélite. El procesamiento de dichas imágenes se realizó siguiendo los protocolos descritos por Coria-Monter et al. (2018; 2019a).

En este proyecto se analizaron datos de viento, proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los datos provienen de la estación meteorológica de la ciudad de La Paz, localizada a 24.12861°N, y 110.32055 °O, a una altitud de 24 msnm, y fueron obtenidos para el mes de noviembre de 2014 y 2016, fechas en las que se realizaron ambos cruceros oceanográficos. Los datos incluyen registros de la magnitud (m/s) y dirección del viento cada 15 min, expresados en el sistema de referencia meteorológico (ángulo respecto al norte, creciendo en sentido de las manecillas del reloj), los cuales se transformaron a un sistema de coordenadas trigonométricas para representarlos en forma de astillas. Con el fin de eliminar las altas frecuencias se realizó un promedio móvil de 24 h.

También, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) el cual explica la estructura de las varianzas y covarianzas de un conjunto de variables (en este caso, temperatura, salinidad, Chl-*a*, nitratos, silicatos y fosfatos), mediante combinaciones lineales, llamadas componentes principales. Estos componentes principales no están correlacionados entre sí, y cada uno maximiza su varianza. El ACP es una técnica que reduce o simplifica los datos y facilita su análisis e interpretación (Hernández-Rodríguez, 1998). Los datos se normalizaron y finalmente se graficaron en los componentes que representen el

mejor porcentaje de información, el cual brindó un panorama de las zonas (Boca Grande, Zona Somera y Cuenca Alfonso) que fueron influenciadas en mayor medida por dichas variables a diferentes niveles de profundidad (1= superficie, 2= 10 m, 3=30 m, 4= 50 m y 5= 75 m). Las rutinas para obtener los diagramas se realizaron con el programa PRIMER v7. Finalmente se realizó un análisis en las proporciones de los nutrimentos, en donde se calcularon las proporciones de N:P, Si:P y Si:N con base en el radio de Redfield, el cual presenta una proporción de N:Si:P = 16:15:1; este análisis se realizó para identificar cual fue el elemento limitante en la Bahía de La Paz durante la época de los muestreos.

CAPITULO III: Resultados

3.1 Masas de agua

Los diagramas T-S difieren entre ambos cruceros hasta la capa superior de los 75 m de profundidad, con mayor salinidad durante noviembre de 2016, lo cual muestra una mayor proporción de Agua del Golfo de California (AGC), mientras que, en otoño de 2014, la menor salinidad se asocia a mayor cantidad de Agua Tropical Superficial (ATS). En la capa intermedia (75-400 m) se presenta el Agua Subtropical Subsuperficial (AStSs). Por debajo de los 400 m se encuentra la capa más profunda determinada por el Agua Intermedia del Pacífico (AIP) (Fig. 2)

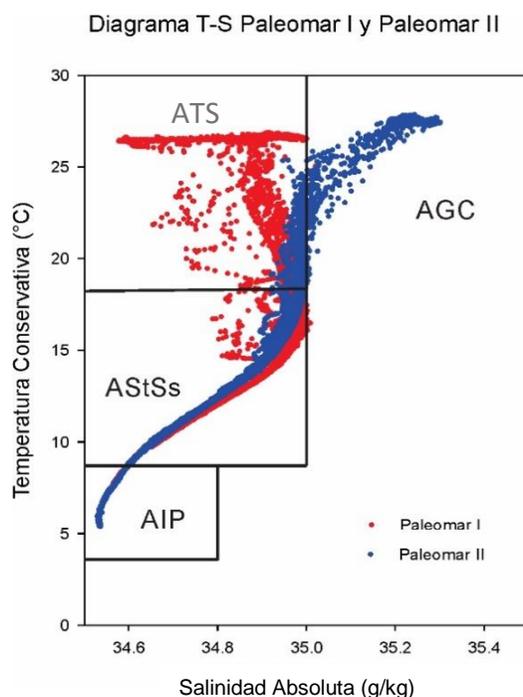


Figura 2. Diagrama T-S para la identificación de las masas de agua en los cruceros PALEOMAR-I (Rojo) y PALEOMAR-II (Azul).

3.2 PALEOMAR-I (noviembre de 2014)

3.2.1 Hidrografía

3.2.1.1 Perfiles de temperatura, salinidad, densidad, Chl-*a* y oxígeno disuelto

En la región sur de la bahía los perfiles verticales mostraron una columna de agua bien mezclada, sin embargo, a profundidades mayores a 50 m se presentó una capa de diferente temperatura y densidad con valores de 26 °C y $\sim 22 \text{ kg/m}^3$, respectivamente; el oxígeno mostró valores de 6 mg/L, mientras que las concentraciones de Chl-*a* alcanzaron valores $\sim 3 \text{ mg/m}^3$. Las estaciones hidrográficas pertenecientes a la porción central de la bahía, en la Cuenca Alfonso, muestran las clinas desde los 40 m hasta los 50 m de profundidad. La termoclina con valores de 26 °C, en la capa de mezcla se presentan los niveles más altos de oxígeno de la región (6 mg/L), la distribución vertical de Chl-*a* mostró valores máximos de $\sim 2.7 \text{ mg/m}^3$ dentro de la capa de mezcla. Para la zona de Boca Grande los perfiles verticales mostraron una marcada capa de mezcla con valores de Chl-*a* y oxígeno; $>2 \text{ mg/m}^3$ y 6 mg/L, respectivamente. Por debajo de la cual a excepción de la estación 34 se ubicaron las clinas a los 100 m de profundidad, con una marcada estratificación. La extracción de Chl-*a* mostraron varios picos de alta concentración que concuerda con los datos obtenidos con el CTD, sin embargo, se presentaron altas concentraciones en la zona de Cuenca Alfonso con valores $\sim 3 \text{ mg/m}^3$ ubicados por encima de la termoclina. En la zona somera la máxima concentración fue de $\sim 2 \text{ mg/m}^3$ a lo largo de la columna de agua (Fig. 3).

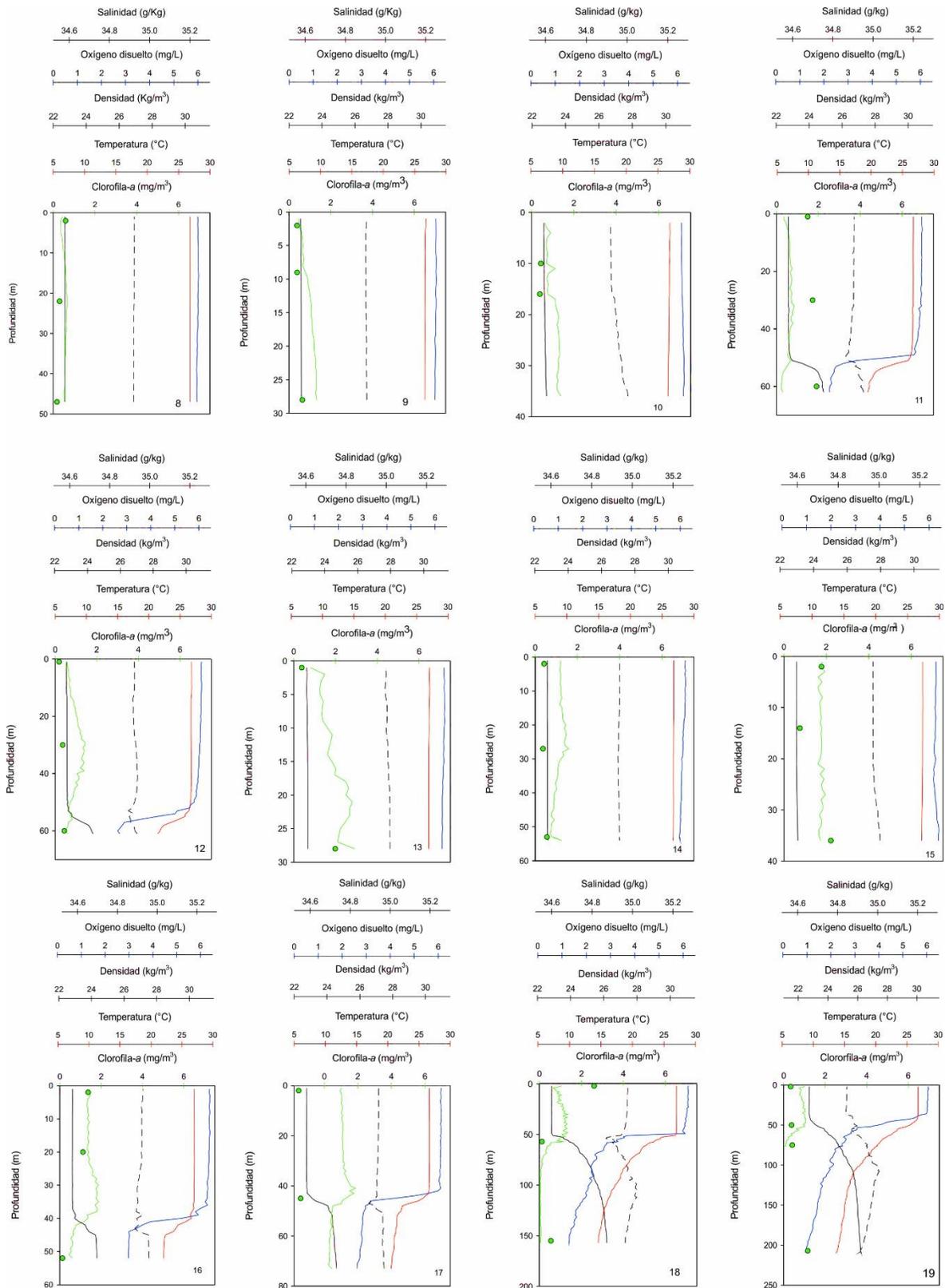


Figura 3. Perfiles de temperatura °C (línea roja), salinidad g/kg (línea negra punteada), densidad kg/m³ (línea negra), Chl-a mg/m³ (CTD-línea verde, extracción-puntos verdes) y oxígeno disuelto mg/L (línea azul), durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

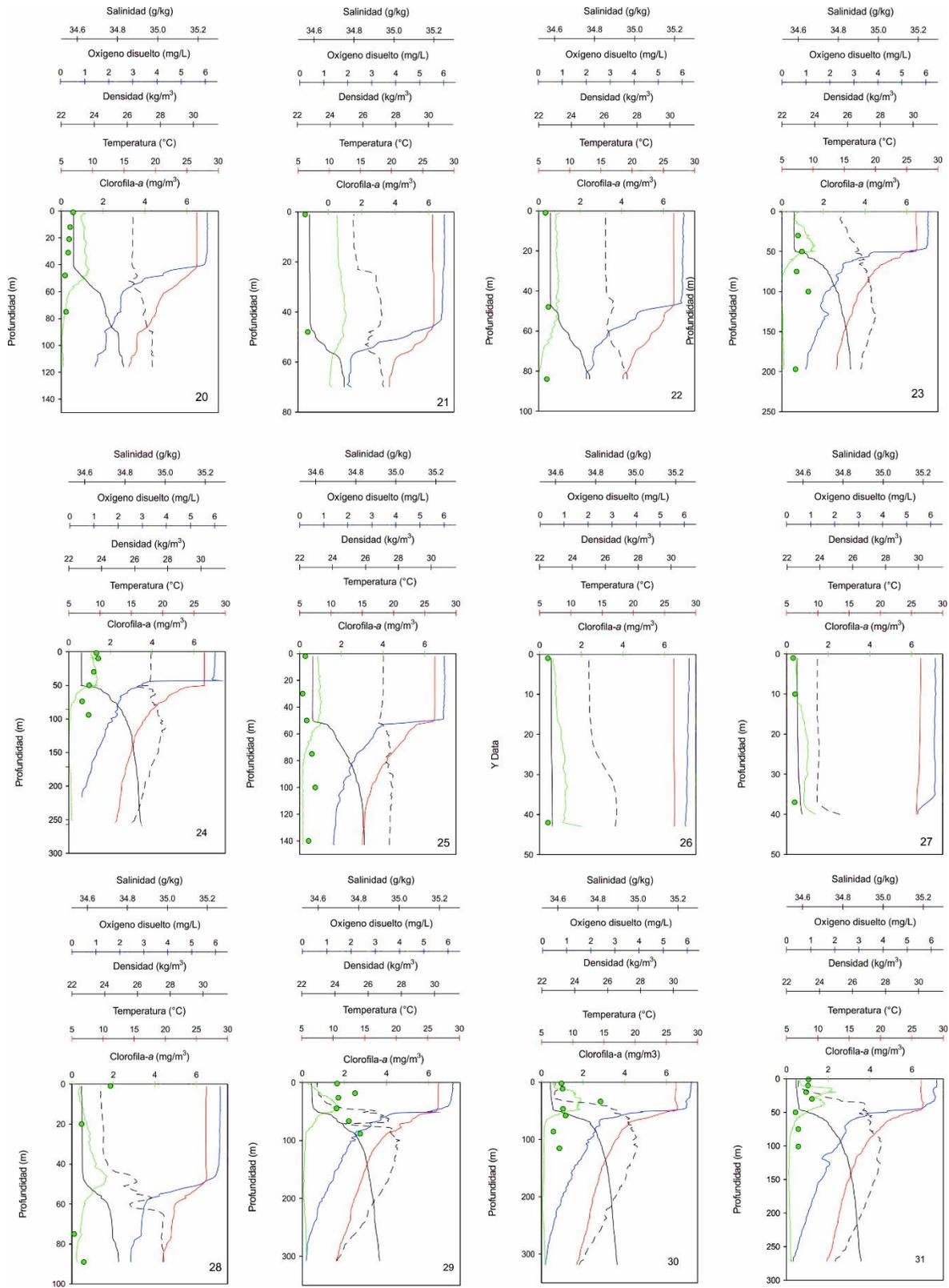


Figura 3. (Continuación) Perfiles de temperatura °C (línea roja), salinidad g/kg (línea negra punteada), densidad kg/m³ (línea negra), Chl-a mg/m³ (CTD-línea verde, extracción-puntos verdes) y oxígeno disuelto mg/L (línea azul), durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

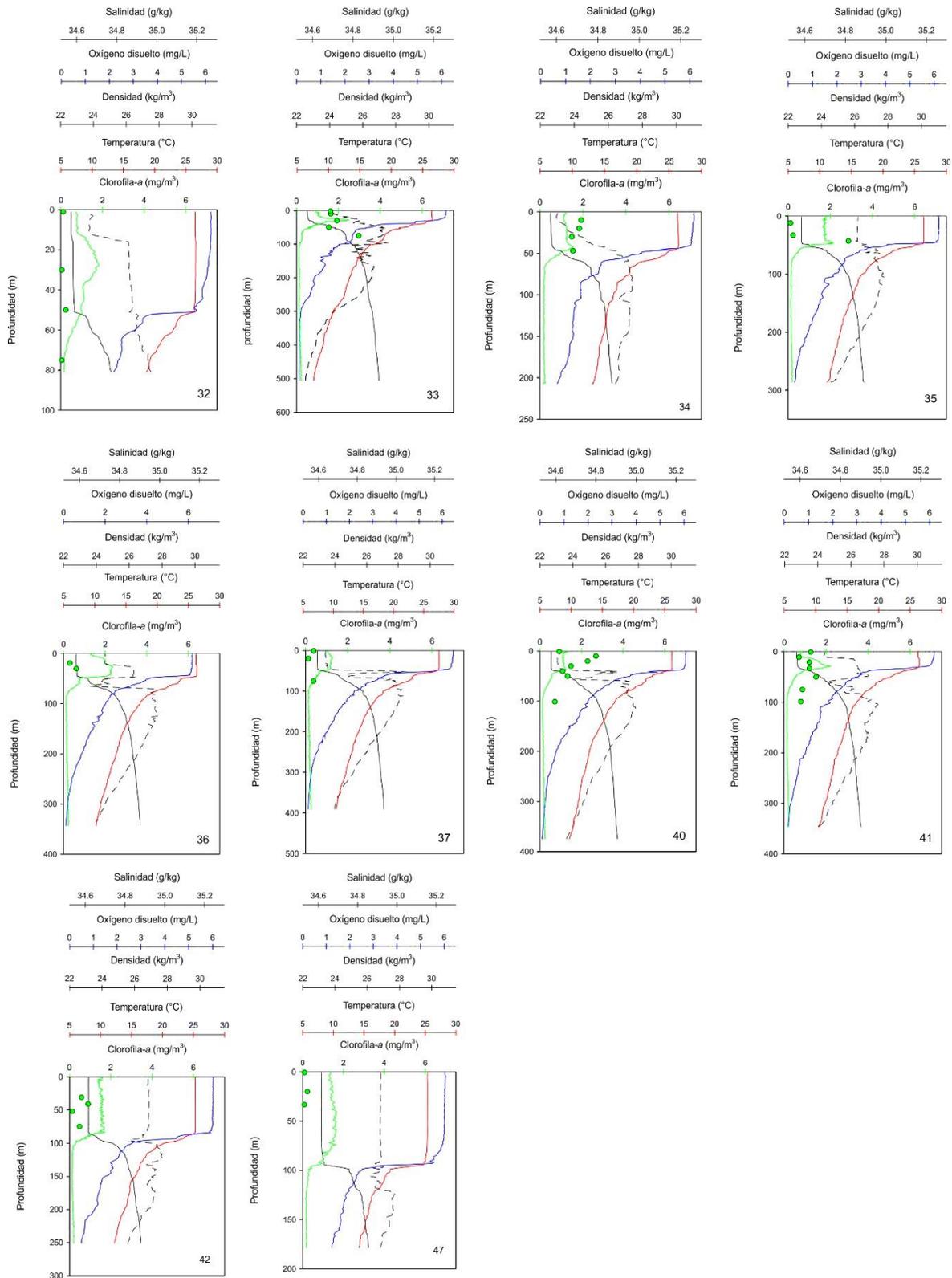


Figura 3. (Continuación) Perfiles de temperatura °C (línea roja), salinidad g/kg (línea negra punteada), densidad kg/m³ (línea negra), Chl-a mg/m³ (CTD-línea verde, extracción-puntos verdes) y oxígeno disuelto mg/L (línea azul), durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

3.2.1.2 Distribución horizontal de temperatura, salinidad, densidad, Chl-a y oxígeno disuelto

La distribución horizontal de temperatura en la superficie fue uniforme con valores alrededor de 27 °C. La salinidad mostró valores de 34.68 g/kg a 34.77 g/kg en la zona de Boca Grande y Cuenca Alfonso, la cual coincide con los valores mínimos de densidad en superficie.

La distribución horizontal de temperatura a 10 m de profundidad mostró un incremento desde Boca Grande hacia el interior de la bahía, con valores de 25.00 a 26.75 °C. La salinidad mostró zonas de alta salinidad en la porción sur y en la zona de Boca Grande con valores máximos de 35 g/kg, mientras que entre ellas existe una zona de baja salinidad localizada en la Cuenca Alfonso con valores de 34.6 g/kg; la densidad mostró un decremento hacia el interior con valores de 23.5 kg/m³ a 23 kg/m³.

A 30 m de profundidad, la temperatura mostró valores menores a 26 °C en la zona de Boca Grande. La salinidad presentó un incremento en la región sur con valores máximos de 35 g/kg y mínimos en la Cuenca Alfonso de 34.5 g/kg. La densidad presentó un gradiente de mayor densidad hacia Boca Grande con valores de 22.75 kg/m³ a 23 kg/m³.

La distribución a 50 m mostró la mayor variación de temperatura con valores de 23.4 °C a 26.2 °C, presentó dos núcleos fríos, uno en la zona somera al sur y otro en la región norte de la Cuenca Alfonso. La salinidad presentó un núcleo de baja concentración en la región de Cuenca Alfonso con valores 34.77 g/kg. La densidad mostró dos núcleos de alta densidad que coinciden con las bajas temperaturas de la zona con valores <24 kg/m³.

La temperatura a 75 m de profundidad mostró valores mayores a 22 °C en la zona de Boca Grande, mientras que en la zona este de Cuenca Alfonso se presentaron los valores mínimos de 19.2 °C. La salinidad presentó valores de 34.95 g/kg y dos núcleos con menor salinidad en Cuenca Alfonso. La densidad presentó valores <24.6 kg/m³ en la región centro y sur, mientras que la zona de Boca Grande se presentaron valores de baja densidad (Fig. 4).

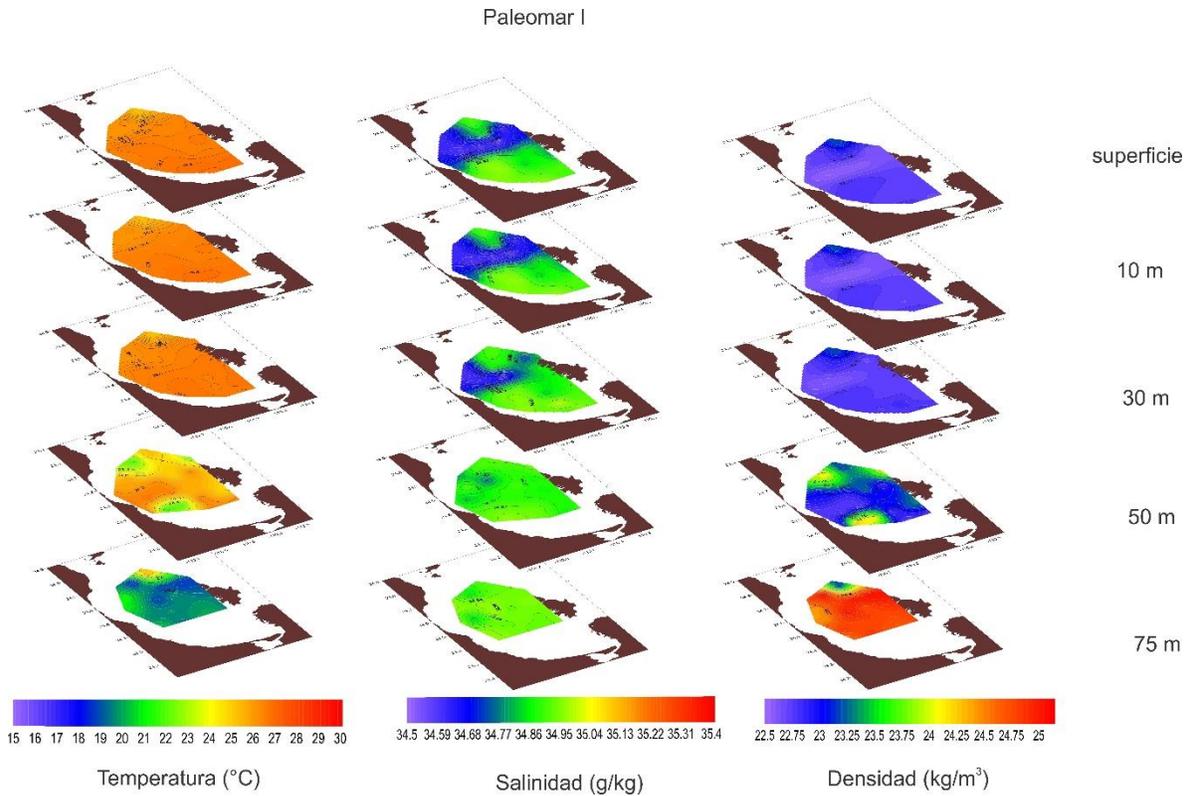


Figura 4. Distribución horizontal de temperatura (°C), salinidad (g/kg) y densidad (kg/m³) a profundidad de superficie, 10 m, 30 m, 50 m y 75 m durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

La distribución de Chl-*a* en superficie y a los 10 m de profundidad mostró valores menores a 1.1 mg/m³, en la zona de Boca Grande se observó un pequeño núcleo de alta concentración con valores máximos de 1.7 mg/m³. El oxígeno tuvo una concentración homogénea de 6.2 mg/L la cual se presentó hasta los 30 m de profundidad, donde la Chl-*a* mostró un núcleo de alta concentración en la parte norte, cercana a Boca Grande y próxima a la Cuenca Alfonso con valores máximos de 2 mg/m³. A 50 m de profundidad, la concentración de Chl-*a* disminuyó nuevamente a valores máximos de 1.1 mg/m³ y el oxígeno presentó las mayores variaciones de la zona con valores menores a 3.8 mg/L en Cuenca Alfonso y en la zona somera y valores máximos que superan los 5.4 mg/L en la región sur de Cuenca Alfonso y cercana a la isla Roca Partida. A 75 m de profundidad las concentraciones de Chl-*a* presentaron valores mínimos de 0.1 mg/m³ y la máxima concentración se observó en Boca

Grande con valores de 1.1 mg/m^3 , esto coincide con los valores máximos de oxígeno en la zona, el cual presenta un gradiente de alta concentración en la zona de Boca Grande (Fig. 5).

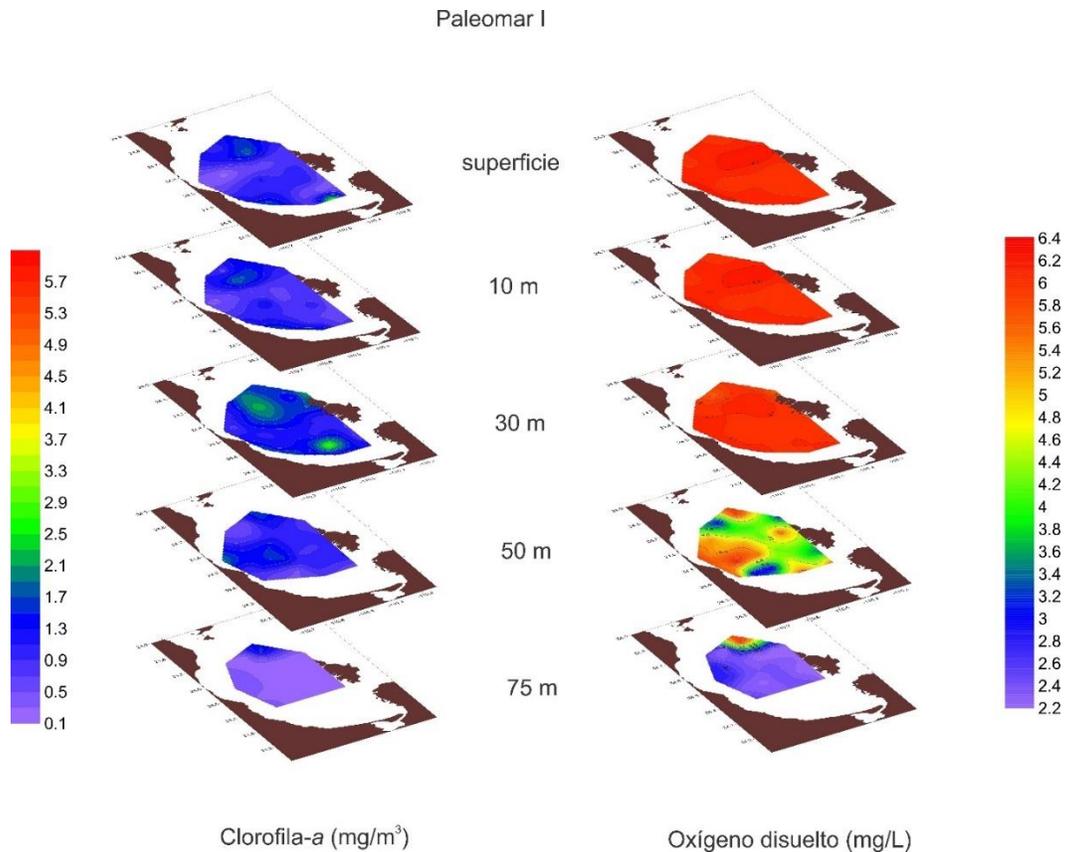


Figura 5. Distribución horizontal de Chl-a (mg/m^3) y oxígeno disuelto (mg/L) a profundidades de superficie, 10 m, 30m, 50 m y 75 m durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

3.2.2 Nutrientes

3.2.2.1 Distribución vertical de nutrientes

La distribución vertical de los nutrientes mostró una capa uniforme que superó los 50 m de profundidad. Los fosfatos presentaron la máxima concentración con valores de $\sim 5 \mu\text{M}$ a una profundidad mayor a 300 m presente en la estación 30 ubicada en Cuenca Alfonso. La concentración de fosfatos fue uniforme hasta aproximadamente los 50 m de profundidad. Los silicatos presentan concentraciones mayores a $100 \mu\text{M}$ por debajo de los 100 m de profundidad, alcanzando un máximo de $150 \mu\text{M}$ en las estaciones ubicadas en Boca Grande. Los nitritos presentan un pico máximo en la estación 40 con valores $\sim 1 \mu\text{M}$ ubicado en la región de Boca Grande, mientras que su concentración máxima se presenta a 50 m y en

algunas estaciones hasta los 100 m. Los nitratos presentan una gran variación en la columna de agua con valores $>20 \mu\text{M}$ desde los 80 m de profundidad en las estaciones ubicadas en la zona de Cuenca Alfonso y Boca Grande (Fig. 6).

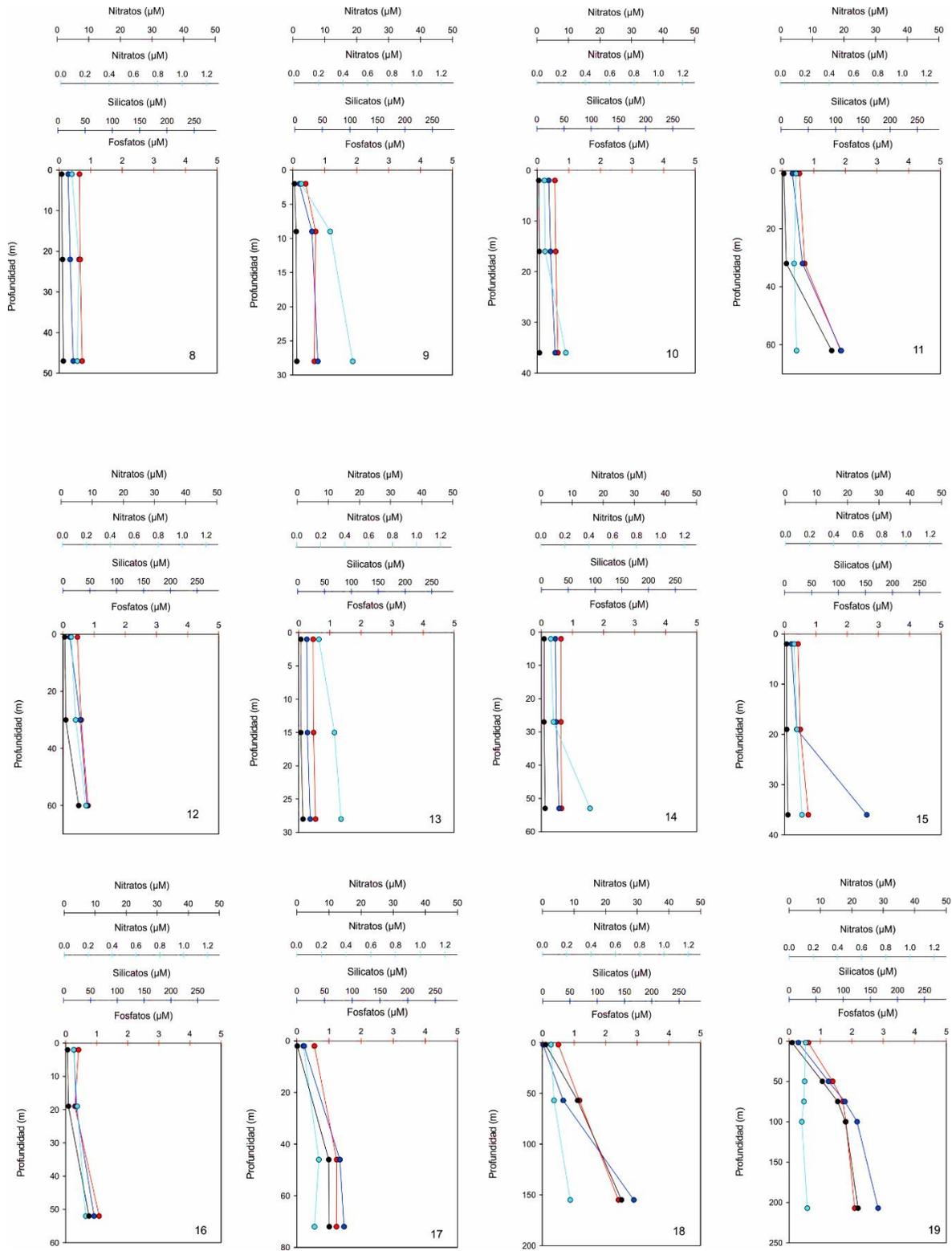


Figura 6. Perfiles verticales de Fosfatos (línea roja), Silicatos (línea azul), Nitritos (línea celeste) y Nitratos (línea negra) durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

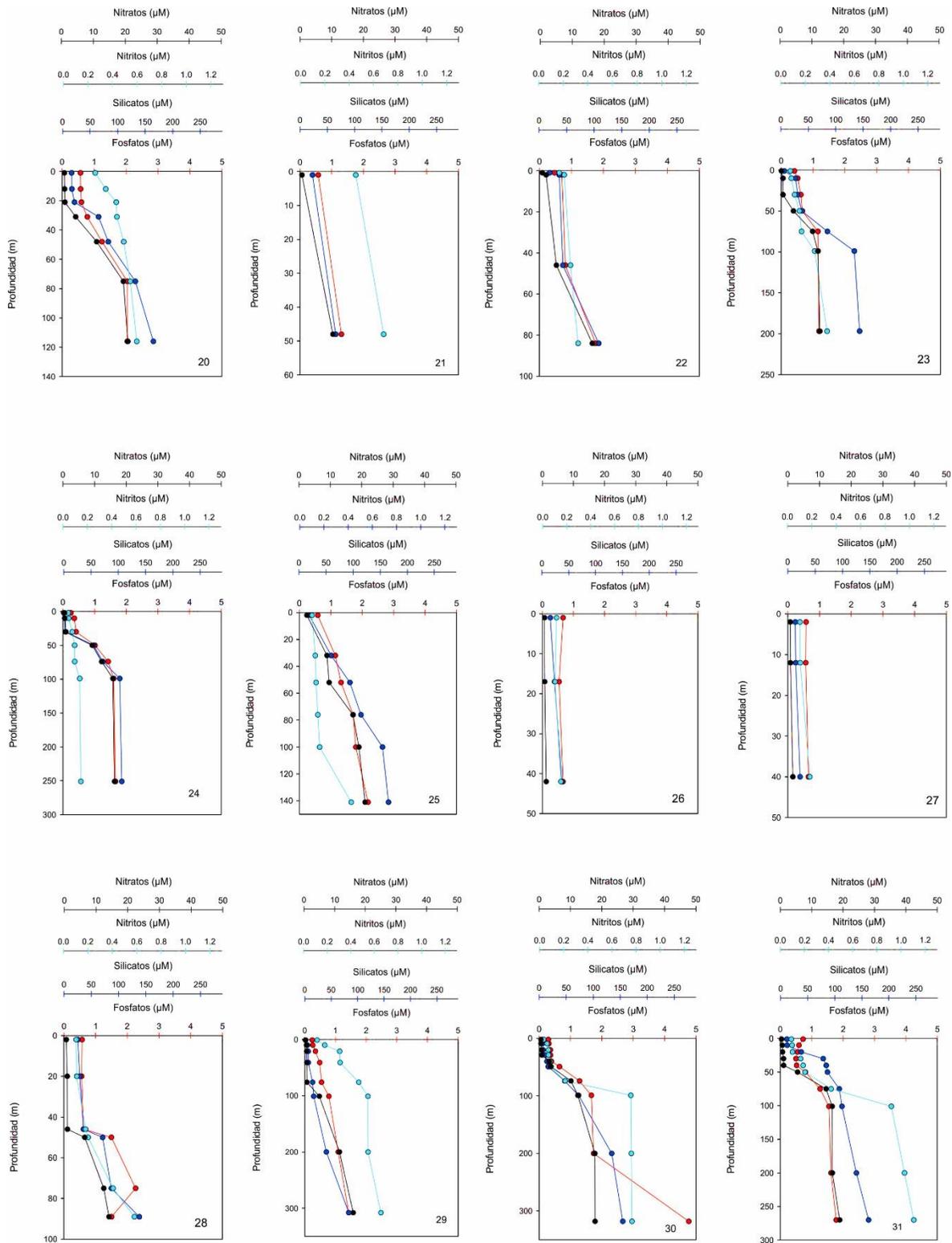


Figura 6. (Continuación) Perfiles verticales de Fosfatos (línea roja), Silicatos (línea azul), Nitritos (línea celeste) y Nitratos (línea negra) durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

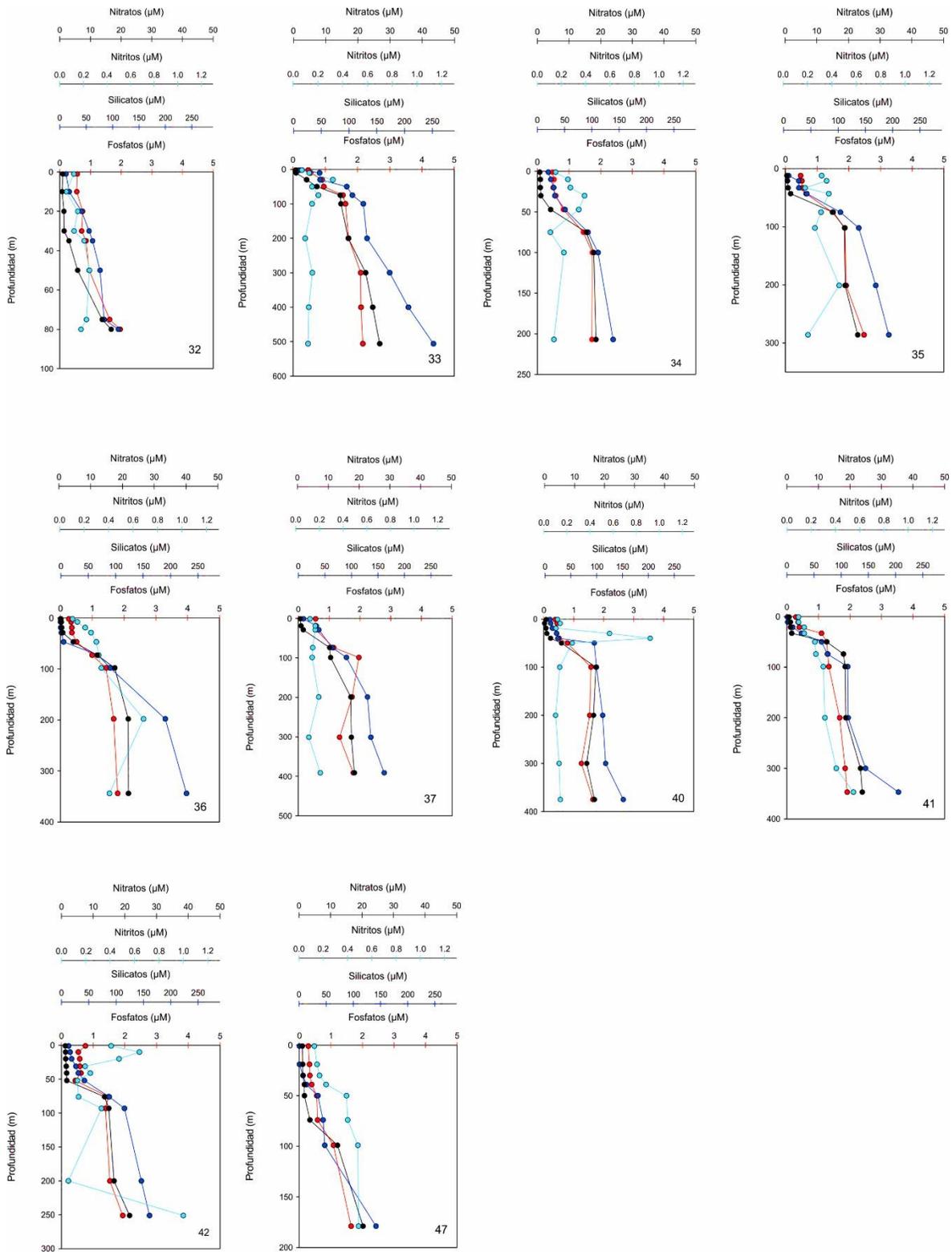


Figura 6. (Continuación) Perfiles verticales de Fosfatos (línea roja), Silicatos (línea azul), Nitritos (línea celeste) y Nitratos (línea negra) durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

3.2.2.2 *Distribución horizontal de nutrimentos*

Los nitratos en superficie y a 10 m de profundidad presentaron valores máximos de $1 \mu\text{M}$ mientras que a 30 m de profundidad se presenta un núcleo de alta concentración, con valores mayores a $5 \mu\text{M}$ en la región oeste de la bahía. A 50 m de profundidad, los nitratos presentan valores mínimos de $2.5 \mu\text{M}$ y máximos que superan los $13 \mu\text{M}$ en la región somera y un núcleo de alta concentración en la zona de Cuenca Alfonso. Los nitratos a 75 m de profundidad presentaron la mayor concentración con valores que superan los $14 \mu\text{M}$ en la región de las bocas, tanto en Boca Grande como en el Canal de San Lorenzo, y presenta un núcleo de baja concentración con valores menores a $5 \mu\text{M}$.

Los nitritos por su parte en la superficie presentan dos núcleos de alta concentración con valores máximos de $0.4 \mu\text{M}$, uno en Boca Grande, y el otro en el canal de San Lorenzo, mientras que los valores mínimos son menores a $0.1 \mu\text{M}$. A 10 m de profundidad permanecen los mismos núcleos de alta concentración, sin embargo, aumentan sus valores hasta $0.6 \mu\text{M}$ en el núcleo presente en Boca Grande. A 30 m de profundidad, se observa un núcleo en la zona norte de Cuenca Alfonso con valores de $0.4 \mu\text{M}$. Los nitritos a 50 m de profundidad presentan su concentración mayor, con valores máximos de $0.7 \mu\text{M}$ en el Canal de San Lorenzo mientras que en Boca Grande y en Cuenca Alfonso se presentaron valores de $0.3 \mu\text{M}$. Para los 75 m los nitritos presentaron valores de $0.2 \mu\text{M}$ a $0.4 \mu\text{M}$.

La distribución de silicatos en superficie presenta un intervalo de concentración desde $5 \mu\text{M}$ a $15 \mu\text{M}$, donde las menores concentraciones se presentaron en la zona norte-centro y se extendió hasta la zona sur de la bahía, mientras que las mayores se presentaron en Boca Grande, esto coincidió a 10 m de profundidad. Para la distribución de silicatos a 30 m de profundidad en la zona de la Isla Roca Partida se presentaron valores de $50 \mu\text{M}$ y valores de $25 \mu\text{M}$ en las regiones adyacentes. A 50 m de profundidad la zona de Cuenca Alfonso presentó valores de $25 \mu\text{M}$ los cuales fueron los mínimos a esta profundidad, y los máximos fueron valores superiores a $75 \mu\text{M}$. A 75 m de profundidad, se observó un núcleo de concentración menor a $50 \mu\text{M}$, mientras que los valores máximos superan los $75 \mu\text{M}$.

Los fosfatos presentaron una distribución superficial con valores de $0.34 \mu\text{M}$ a $0.54 \mu\text{M}$, donde los valores de menor concentración se observaron en la región de Boca Grande. A 10 m de profundidad, los fosfatos presentaron la misma concentración que en superficie, sin embargo, con los valores máximos de $0.44 \mu\text{M}$. A 30 m de profundidad se presentan dos

núcleos de alta concentración que alcanzan valores de $1 \mu\text{M}$ en la región de Cuenca Alfonso y en la porción suroeste de la bahía. A 50 m de profundidad la región sur de la bahía presentó valores superiores a $1.24 \mu\text{M}$ mientras que en la porción norte se presentaron valores menores a $0.7 \mu\text{M}$ y se observó un núcleo de alta concentración con valores mayores a $1 \mu\text{M}$. A 75 m de profundidad se presentaron los valores más altos de fosfatos de $1.44 \mu\text{M}$, se presenta un núcleo de baja concentración en el sur de Cuenca Alfonso con valores menores a $1.04 \mu\text{M}$ (Fig. 7)

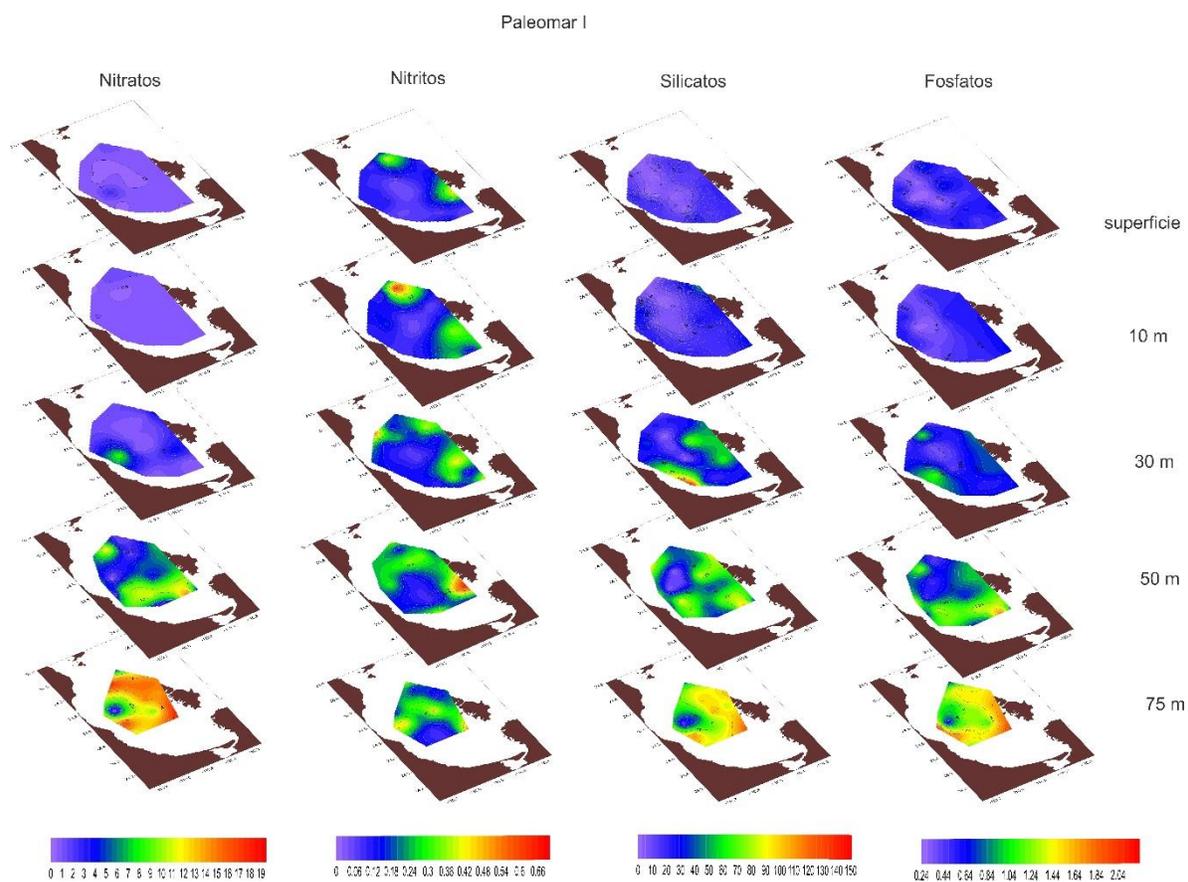


Figura 7. Distribución horizontal de nitratos, nitritos, silicatos y fosfatos a las profundidades de superficie, 10 m, 30, 50 m y 75 m, durante el crucero PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

3.3 PALEOMAR-II (noviembre de 2016)

3.3.1 Hidrografía

3.3.1.1 *Perfiles de temperatura, densidad, Chl-a y oxígeno disuelto.*

Las estaciones en la región sur de la bahía mostraron una capa de mezcla con valores de temperatura >27 °C, la densidad con valores de ~ 22.5 kg/m³, el oxígeno ~ 6 mg/L, mientras que la concentración de Chl-*a* varió entre 1.6 mg/m³ y 3 mg/m³ (Fig. 8). Para la región de Cuenca Alfonso las clinas se presentaron desde los 40 m hasta los 50 m de profundidad, en la termoclina se presentaron 28 °C; las concentraciones de Chl-*a* mostraron los picos máximos con valores de 7.4 mg/m³ asociados con la termoclina; las concentraciones de oxígeno fueron <6 mg/L. Las estaciones correspondientes a Boca Grande mostraron las clinas por encima de los 50 m de profundidad con valores para la temperatura de ~ 27 °C, la Chl-*a* mostró valores superiores a 4 mg/m³ asociados a la termoclina, mientras que el oxígeno presentó valores >6 mg/L. La concentración de Chl-*a* mostró un valor muy uniforme con concentraciones >4 mg/m³ hasta la termoclina en la zona sur de Cuenca Alfonso, en general la concentración de Chl-*a* se mostró homogénea por encima de las clinas, lo cual indica la gran influencia de los vientos, mientras que por debajo de las clinas aún se presenta concentración que es considerablemente menor que en la superficie (Fig. 8).

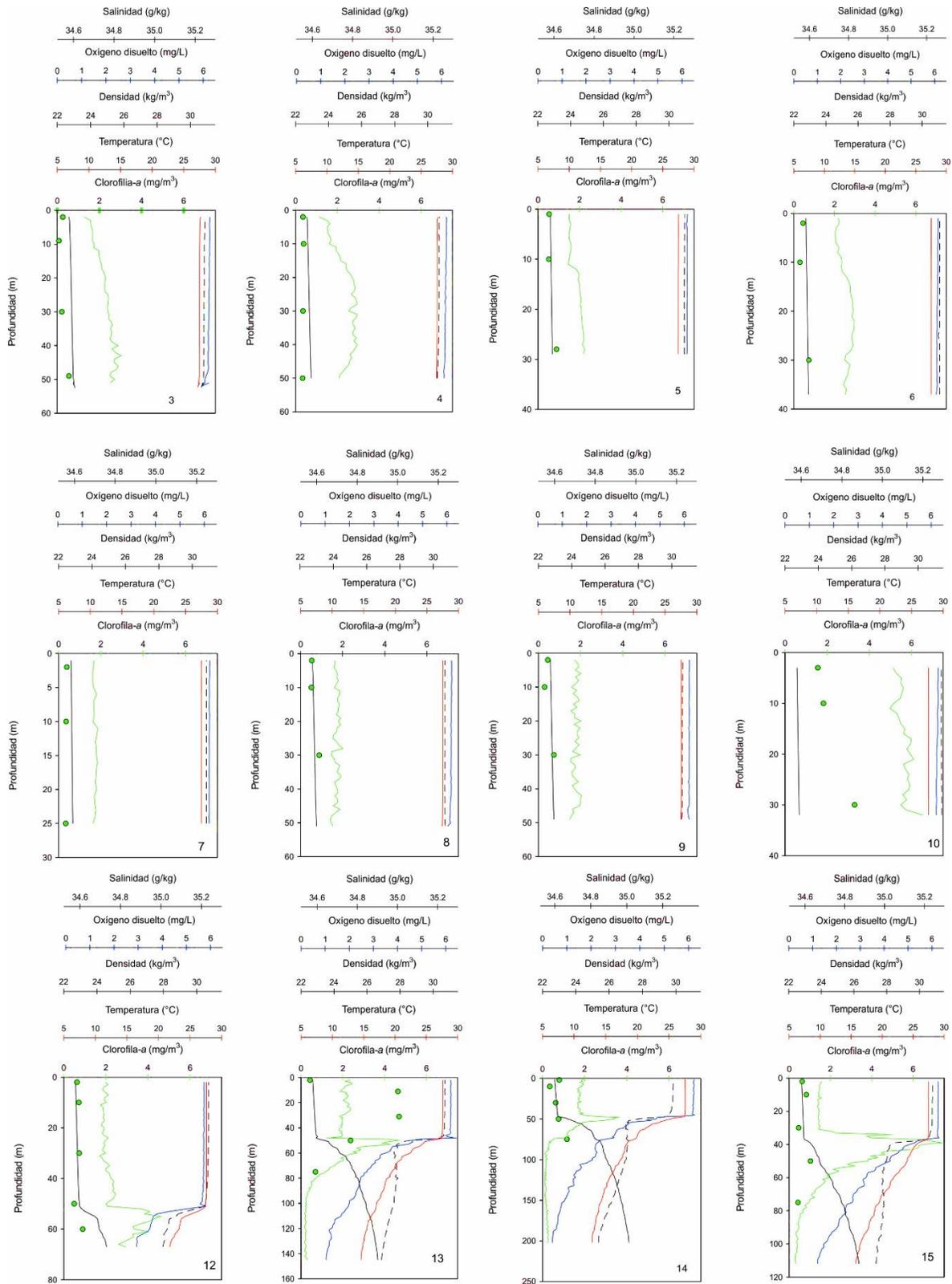


Figura 8. Perfiles de temperatura °C (línea roja), salinidad g/kg (línea negra punteada), densidad kg/m³ (línea negra), Chl-a mg/m³ (CTD-línea verde, extracción-puntos verdes) y oxígeno disuelto mg/L (línea azul), durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

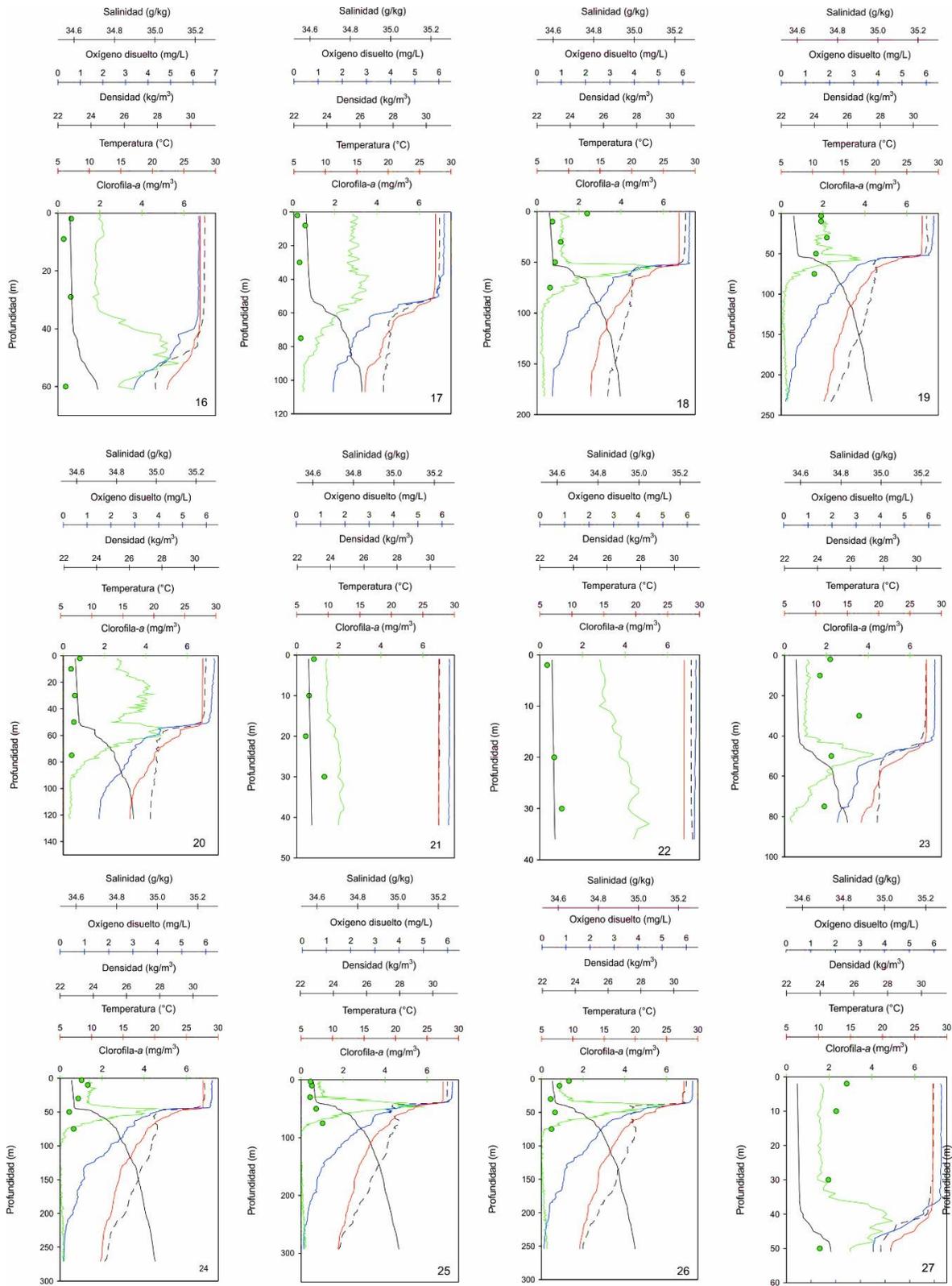


Figura 8. (Continuación) Perfiles de temperatura °C (línea roja), salinidad g/kg (línea negra punteada), densidad kg/m³ (línea negra), Chl-a mg/m³ (CTD-línea verde, extracción-puntos verdes) y oxígeno disuelto mg/L (línea azul), durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

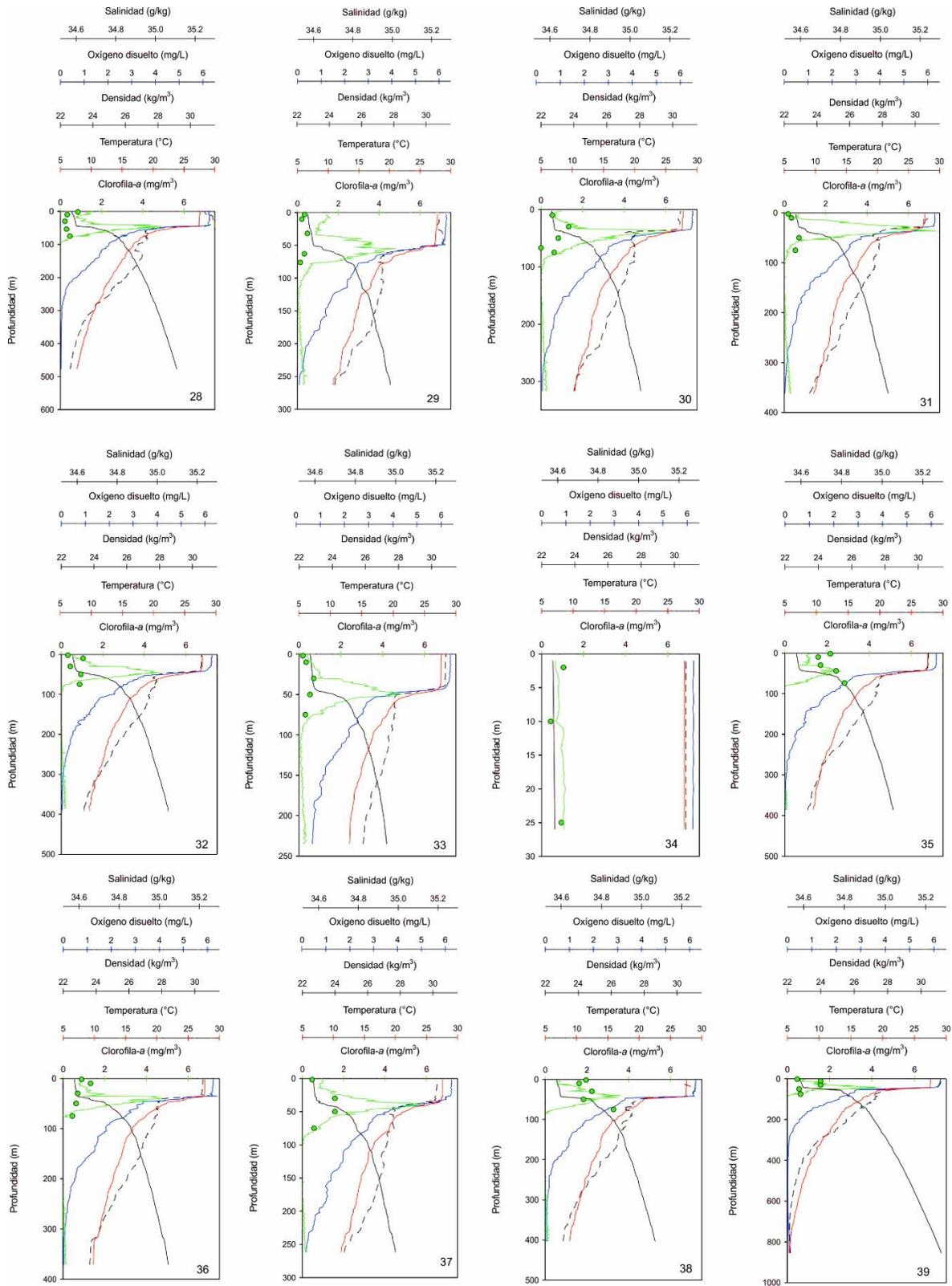


Figura 8. (Continuación) Perfiles de temperatura $^{\circ}\text{C}$ (línea roja), salinidad g/kg (línea negra punteada), densidad kg/m^3 (línea negra), Chl-a mg/m^3 (CTD-línea verde, extracción-puntos verdes) y oxígeno disuelto mg/L (línea azul), durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

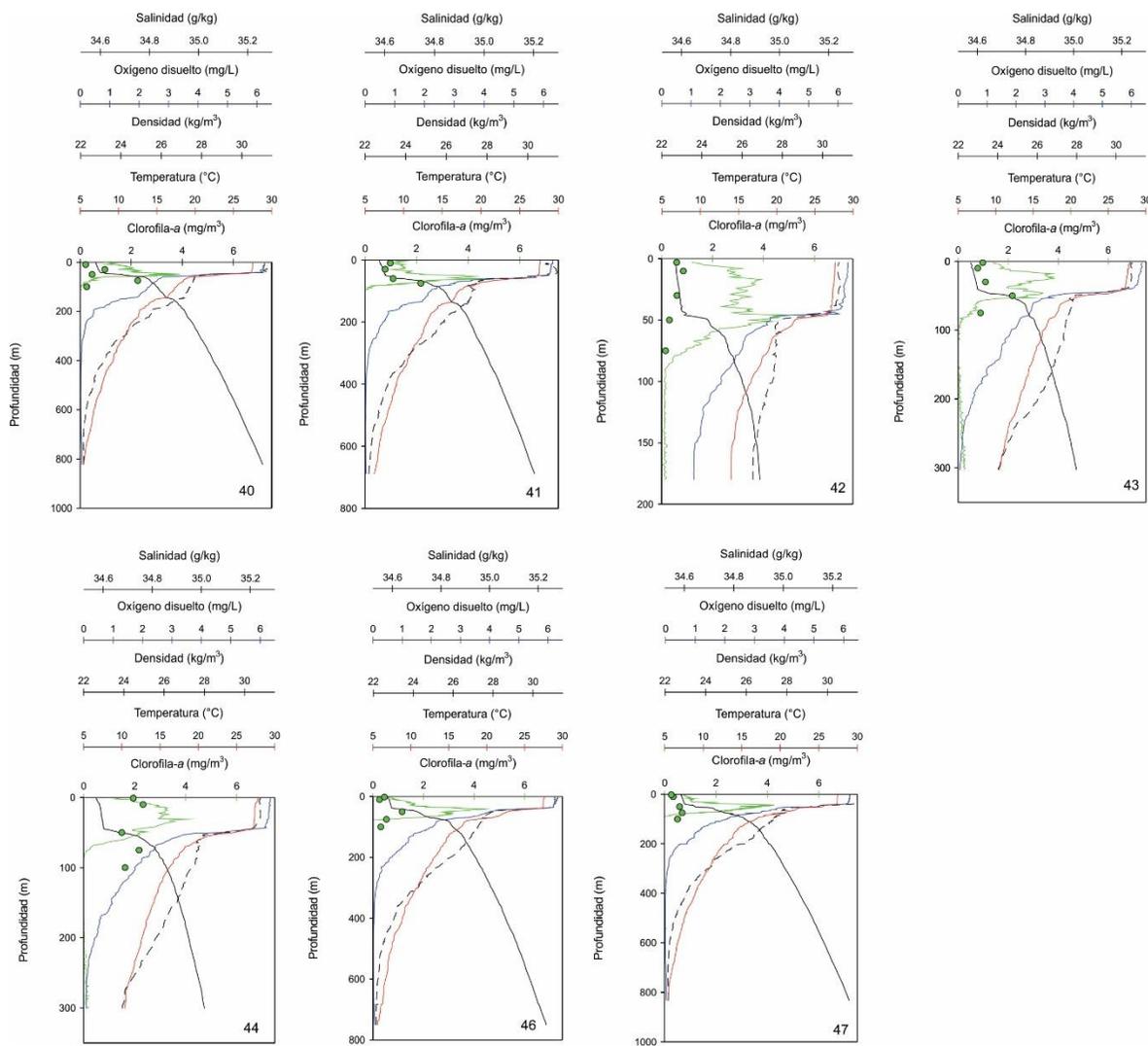


Figura 8. (Continuación) Perfiles de temperatura °C (línea roja), densidad kg/m³ (línea negra), clorofila-a mg/m³ (CTD-línea verde, extracción-puntos verdes) y oxígeno disuelto mg/L (línea azul), durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

3.3.1.2 Distribución horizontal de temperatura, salinidad, densidad, Chl-a y oxígeno disuelto

La distribución horizontal de temperatura en la capa superficial fue uniforme con valores de 27.6 °C. La salinidad mostró valores de 35.22 g/kg a 35.24 g/kg, con variación de solamente 0.02 g/kg. La densidad, al igual que la temperatura y salinidad también fue homogénea en la capa superficial con un valor de 22.65 kg/m³. La distribución de las variables hidrográficas

a 10 m de profundidad no presenta cambios con respecto a la superficie. Con lo cual demuestra que la capa superficial de 10 m fue homogénea.

La distribución a 30 m de profundidad mostró un núcleo de baja temperatura con valores de 27 °C en la zona de Cuenca Alfonso, la temperatura máxima fue de 27.6 °C. La salinidad presentó un núcleo de baja salinidad con valores de 35.14 g/kg mientras que la máxima fue de 35.24 g/kg. La densidad presentó un núcleo que coincidió con el de temperatura y salinidad en la zona de Cuenca Alfonso, con valores de $\sim 23 \text{ kg/m}^3$.

A 50 m de profundidad, la distribución de temperatura mostró valores máximos de 27 °C en la zona sur, mientras que en la Cuenca Alfonso la temperatura mostró valores menores a 23 °C. La salinidad coincidió con la temperatura, con valores de 35.2 g/kg en la zona sur y menores a 35 g/kg en Cuenca Alfonso. La densidad reveló la relación con las variables de temperatura y salinidad con una baja densidad en la zona sur con valores menores a 23.4 kg/m^3 y en la zona de Cuenca Alfonso mayores a 24.3 kg/m^3 .

La distribución de temperatura a 75 m de profundidad tuvo valores mínimos de 18.6 °C y máximas de ~ 20 °C. La salinidad presentó un núcleo de baja salinidad con valores menores a 34.96 g/kg en la zona de Boca grande. La densidad mostró valores elevados de 25.35 kg/m^3 a 25.5 kg/m^3 (Fig. 9).

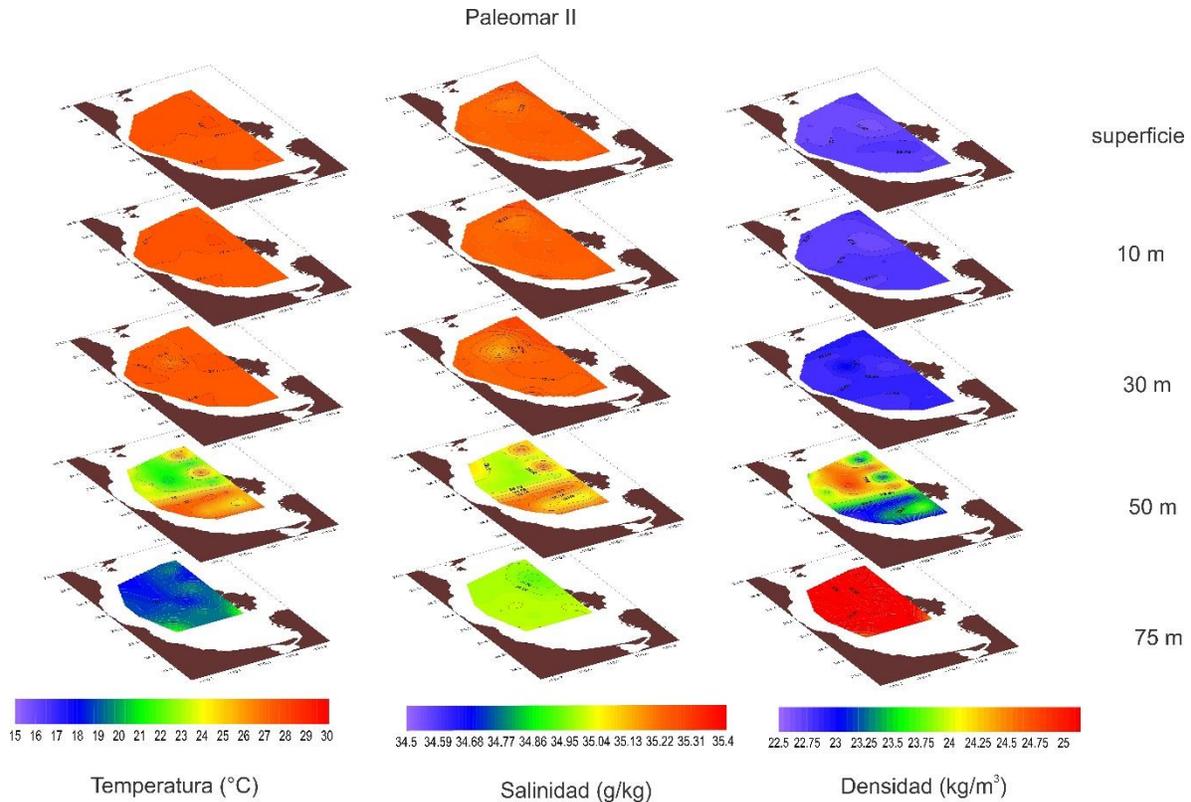


Figura 9. Distribución horizontal de temperatura (°C), salinidad (g/kg) y densidad (kg/m³) a profundidades de superficie, 10 m, 30 m, 50 m y 75 m, durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

La distribución de Chl-*a* en la superficie reveló dos núcleos de alta concentración con valores de >3.1 mg/m³ en la zona sur de la bahía y en la zona de la Isla Roca Partida, mientras que en la zona norte se presentaron valores de 1.1 mg/m³. El oxígeno mostró una capa homogénea con valores de 6.3 mg/L, lo cual se presentó de la misma forma a 10 m de profundidad. La Chl-*a* mostró un núcleo más con respecto a su anterior distribución el cual se presentó en Boca Grande con valores >3.1 mg/m³.

La distribución de Chl-*a* a 30 m de profundidad mostró un núcleo de alta concentración en la zona de Cuenca Alfonso con valores >2.9 mg/m³. El oxígeno presentó un núcleo de baja concentración con valores <6 mg/L. A 50 m de profundidad las concentraciones de Chl-*a* mostraron una gran variación, en la zona de Boca Grande y en la zona central de la bahía se presentaron valores ~3.1 mg/m³, en la zona sur se presentó un núcleo de baja concentración con valores <2.1 mg/m³. El oxígeno presentó bajas concentraciones en Cuenca Alfonso con

valores <3.5 mg/L, en Boca Grande se presentaron dos núcleos con valores de ~ 4.6 mg/L, en la zona sur se presentó la mayor concentración con valores de 5.7 mg/L.

A 75 m de profundidad, la Chl-*a* presentó valores de >1.1 mg/m³ en la mayor parte de la bahía, mientras que en la zona somera y en el canal de San Lorenzo presentaron valores <2 mg/m³. El oxígeno presentó valores >2.8 mg/L (Fig. 10).

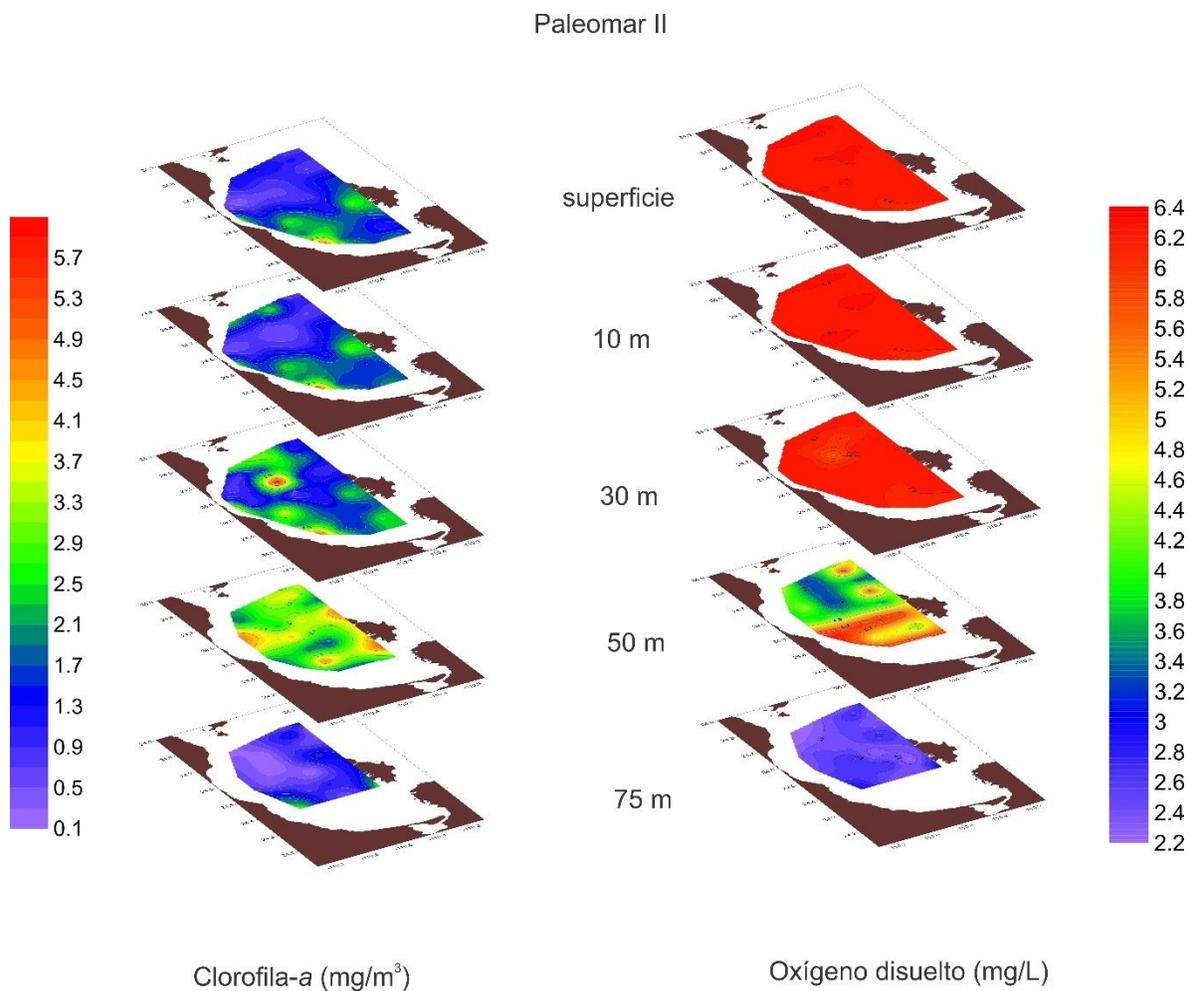


Figura 10. Distribución horizontal de Chl-*a* (mg/m³) y oxígeno disuelto (mg/L) a profundidad superficie, 10 m, 30 m, 50 m y 75 m, durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

3.3.2 *Nutrientes*

3.3.2.1 *Distribución vertical de nutrientes*

La distribución de nutrientes en la zona somera presentó una columna de agua homogénea. Los fosfatos presentaron valores $<2 \mu\text{M}$ en la región somera, mientras que en la zona de Cuenca Alfonso y Boca Grande la clina de fosfatos se presentó aproximadamente a los 50 m de profundidad con valores $>1.8 \mu\text{M}$. El pico máximo en la concentración de fosfatos fue de $\sim 3 \mu\text{M}$ en Boca Grande. Los Silicatos presentaron una concentración considerablemente menor comparada con noviembre de 2016 debido a que el máximo fue de $\sim 100 \mu\text{M}$ a una profundidad mayor de los 700 m en la región de Boca Grande. Los nitritos en la zona sur presentaron picos de alta concentración a ~ 45 m de profundidad con valores de $0.6 \mu\text{M}$. Los nitratos en la zona sur mostraron valores máximos de $23 \mu\text{M}$ a una profundidad >100 m. En la región de Boca Grande las estaciones mostraron concentraciones mayores a $30 \mu\text{M}$ (Fig. 11).

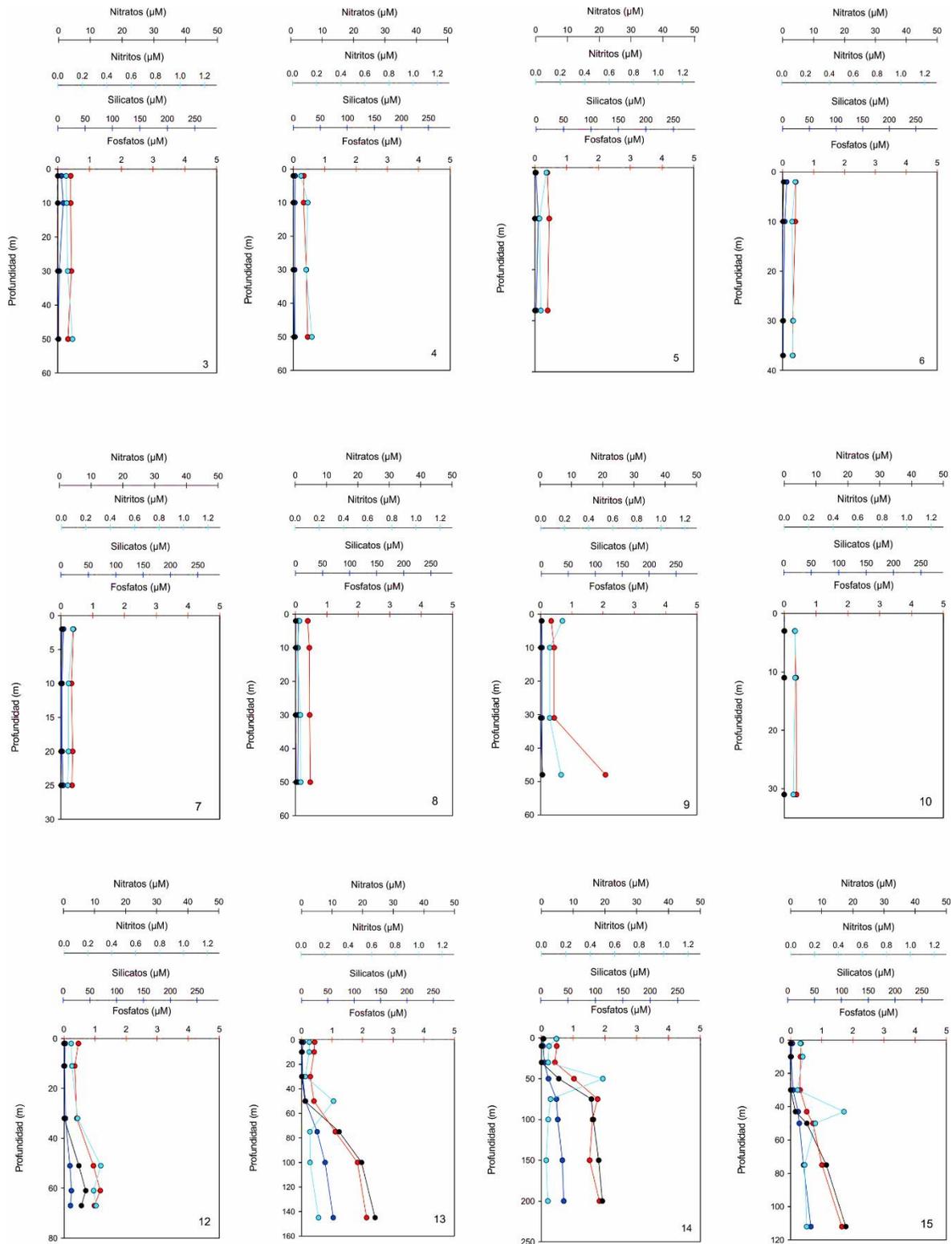


Figura 11. Perfiles verticales de Fosfatos (línea roja), Silicatos (línea azul), Nitritos (línea celeste) y Nitratos (línea negra) durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

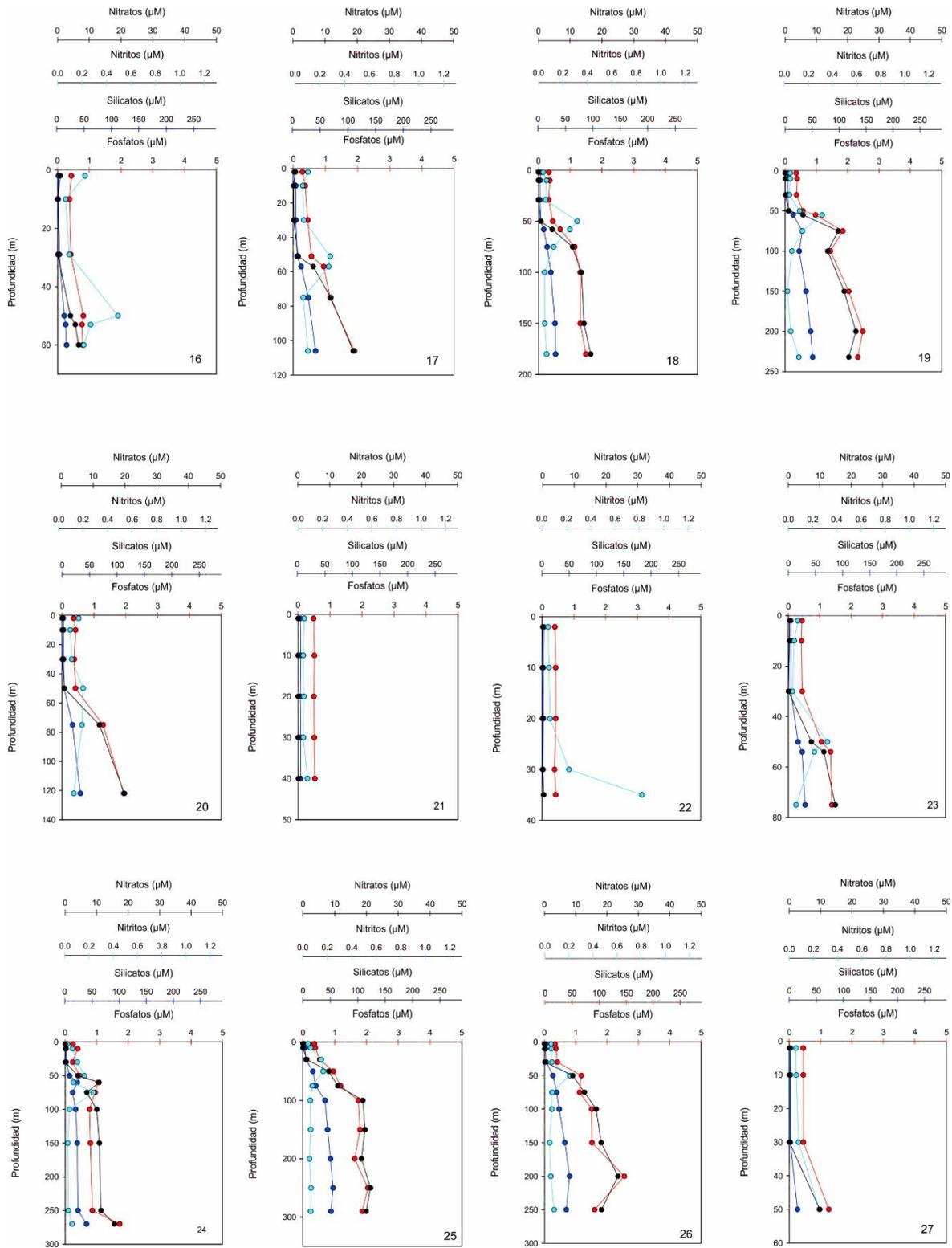


Figura 11. Continuación. Perfiles verticales de Fosfatos (línea roja), Silicatos (línea azul), Nitritos (línea celeste) y Nitratos (línea negra) durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

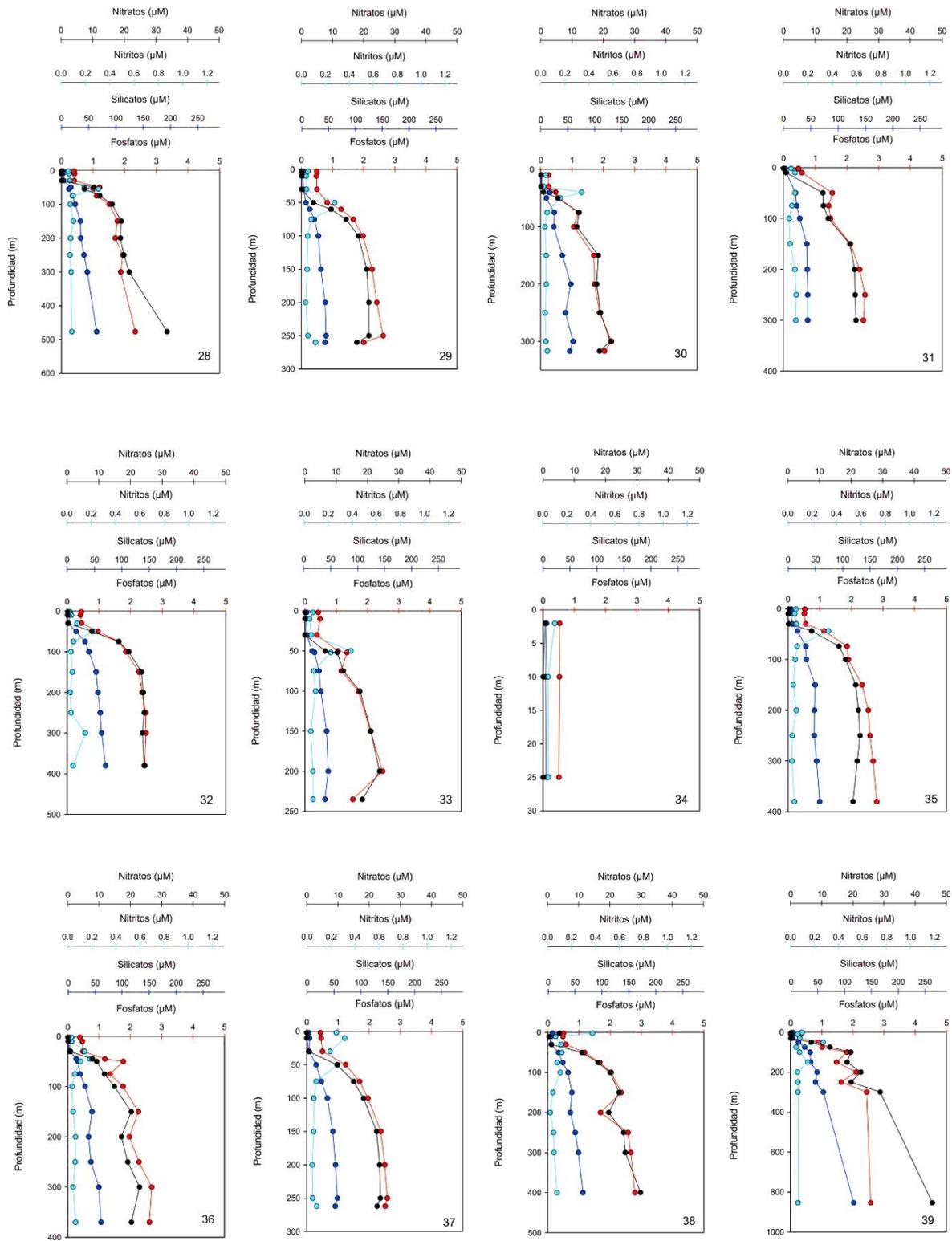


Figura 11. Continuación. Perfiles verticales de Fosfatos (línea roja), Silicatos (línea azul), Nitritos (línea celeste) y Nitratos (línea negra) durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

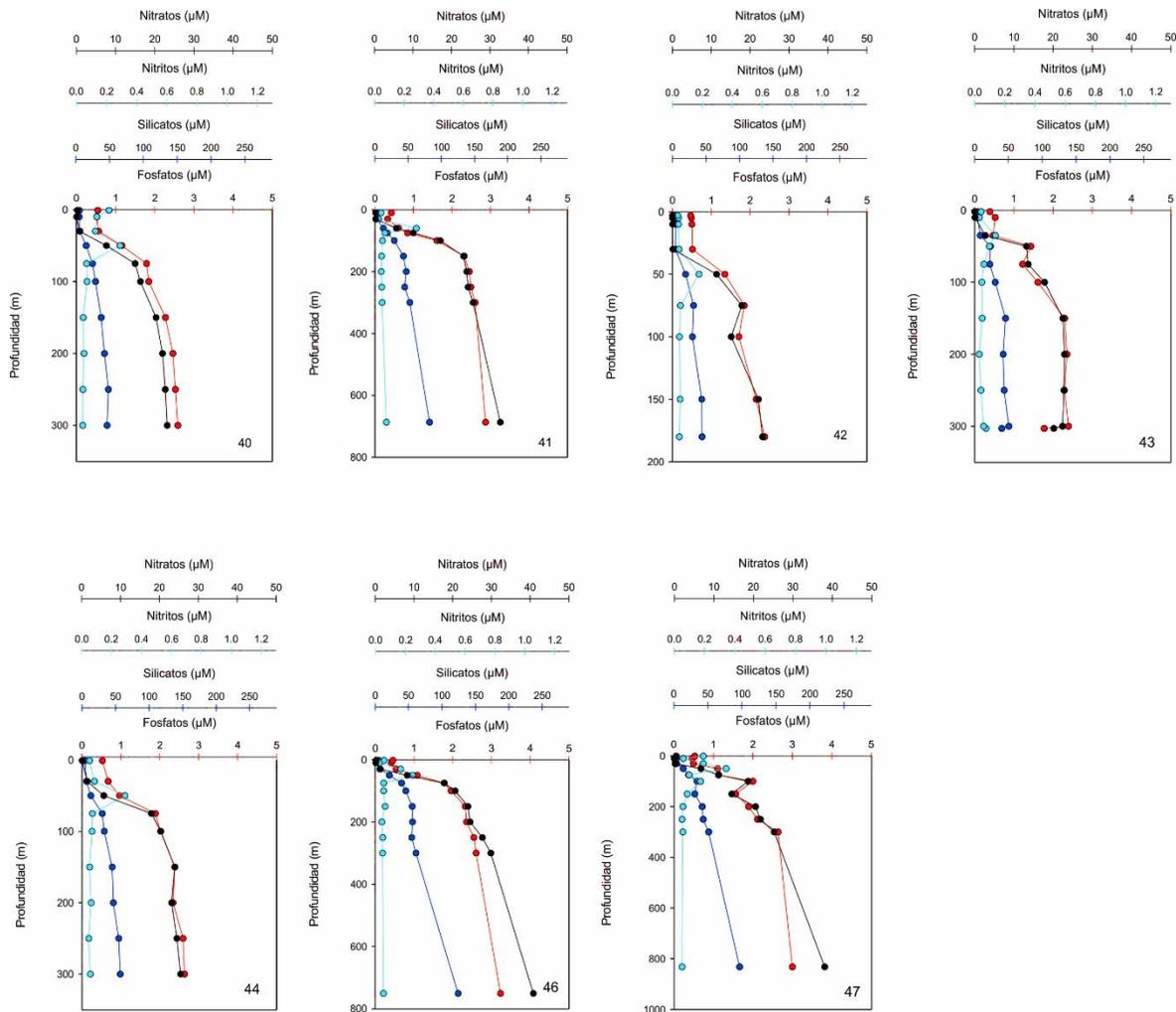


Figura 11. Continuación. Perfiles verticales de Fosfatos (línea roja), Silicatos (línea azul), Nitritos (línea celeste) y Nitratos (línea negra) durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

3.3.2.2 Distribución horizontal de nutrientes

La distribución horizontal de nitratos, nitritos y silicatos en superficie presentaron un núcleo de alta concentración ubicado en Boca Grande con valores $>1.3 \mu\text{M}$, $>0.3 \mu\text{M}$ y $6 \mu\text{M}$ respectivamente. La concentración de fosfatos en la zona sur mostró valores de $0.39 \mu\text{M}$, mientras que en Cuenca Alfonso y Boca Grande se observaron valores de $0.44 \mu\text{M}$.

La distribución de nitratos a 10 m de profundidad presentó un núcleo de alta concentración en Cuenca Alfonso con un valor de $\sim 0.3 \mu\text{M}$. Los nitritos presentaron un núcleo de alta concentración con un valor de $\sim 0.18 \mu\text{M}$ entre Boca Grande y Cuenca Alfonso. La concentración de silicatos con valores de $1 \mu\text{M}$ a $5 \mu\text{M}$ en la zona sur y norte,

respectivamente. La distribución de fosfatos en la zona norte de la bahía presentó un valor de $0.49 \mu\text{M}$ y en la zona centro-sur valores de $0.39 \mu\text{M}$.

La distribución horizontal de nitratos a 30 m reveló un núcleo de alta concentración en el norte de Cuenca Alfonso con valores superiores a $1 \mu\text{M}$, mientras que en la zona centro se presentó un núcleo con valor máximo de $1 \mu\text{M}$. Los nitritos presentaron una gran variación, con valores de $0.06 \mu\text{M}$ a $0.18 \mu\text{M}$ en Boca Grande. La concentración de silicatos mostró una variación de $3 \mu\text{M}$ a $7 \mu\text{M}$ de la zona centro y hacia el norte de la bahía. Los fosfatos variaron en concentración de $0.34 \mu\text{M}$ a $0.44 \mu\text{M}$.

La distribución horizontal de nitratos a 50 m mostró en la zona sur los valores mínimos $2.5 \mu\text{M}$, mientras que en la zona norte se presentaron concentraciones $<7.5 \mu\text{M}$, con dos núcleos de alta concentración $\sim 10 \mu\text{M}$ y un núcleo de baja concentración con valores de $\sim 7.5 \mu\text{M}$. Los nitritos presentaron valores $>0.2 \mu\text{M}$ en la zona de Cuenca Alfonso, mientras que en la zona somera se presentó un valor de $\sim 0.3 \mu\text{M}$. Los silicatos mostraron valores mínimos de $6 \mu\text{M}$ en el sur de la bahía, mientras que en Cuenca Alfonso se presentaron los valores máximos $>18 \mu\text{M}$. La distribución de fosfatos coincide con la de nitratos, con valores menores en la zona sur con un valor de $\sim 0.74 \mu\text{M}$; en Cuenca Alfonso se presentó un núcleo de alta concentración ($>1.19 \mu\text{M}$) y un núcleo de baja concentración ($<0.99 \mu\text{M}$) en Boca Grande. Los nitratos a 75 m presentaron la mayor concentración con valores superiores a $15 \mu\text{M}$ en la zona norte y un núcleo en la zona sur. La concentración de nitritos fue alta en la zona suroeste con valores $>0.12 \mu\text{M}$. La concentración de silicatos mostró un rango de sur a norte entre $21 \mu\text{M}$ y $30 \mu\text{M}$. Las altas concentraciones de fosfatos se localizaron en la zona norte y un núcleo en la zona sur con valores $>1.24 \mu\text{M}$ (Fig. 12).

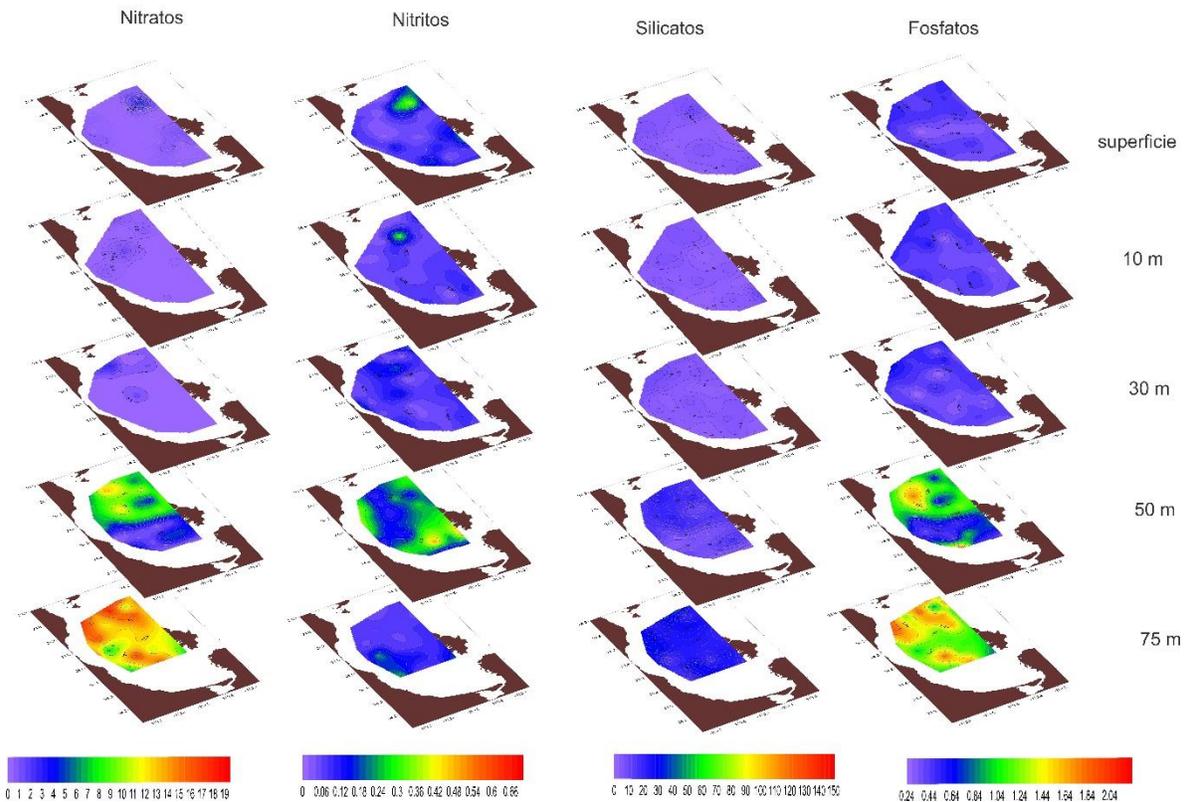


Fig. 12 Distribución horizontal de nitratos, nitritos, silicatos y fosfatos a las profundidades de superficie, 10 m, 30, 50 m y 75 m, durante el crucero PALEOMAR-II, en noviembre de 2016.

3.4 Imágenes de satélite

La TSM muestra una diferencia entre ambos cruceros, para noviembre de 2014 presentó temperaturas máximas de $\sim 26^{\circ}\text{C}$ en el centro de la bahía, mientras que en la región de Boca Grande la temperatura fue de 25°C ; la Chl-*a* presentó valores de $\sim 0.5\text{ mg/m}^3$ en el interior de la bahía, se presentó un núcleo de alta concentración de Chl-*a* en la región de Boca Grande con valores máximos de 1 mg/m^3 .

En noviembre de 2016 la temperatura superficial mostró valores de 28°C en el interior de la bahía, y alcanzó las temperaturas máximas ($>29^{\circ}\text{C}$) en la zona somera cercana a la costa. La concentración de Chl-*a* al interior de la bahía presentó valores máximos de 0.5 mg/m^3 , mientras que en la región somera y cercanas a la línea de costa se presentaron las concentraciones más elevadas con valores $>1\text{ mg/m}^3$.

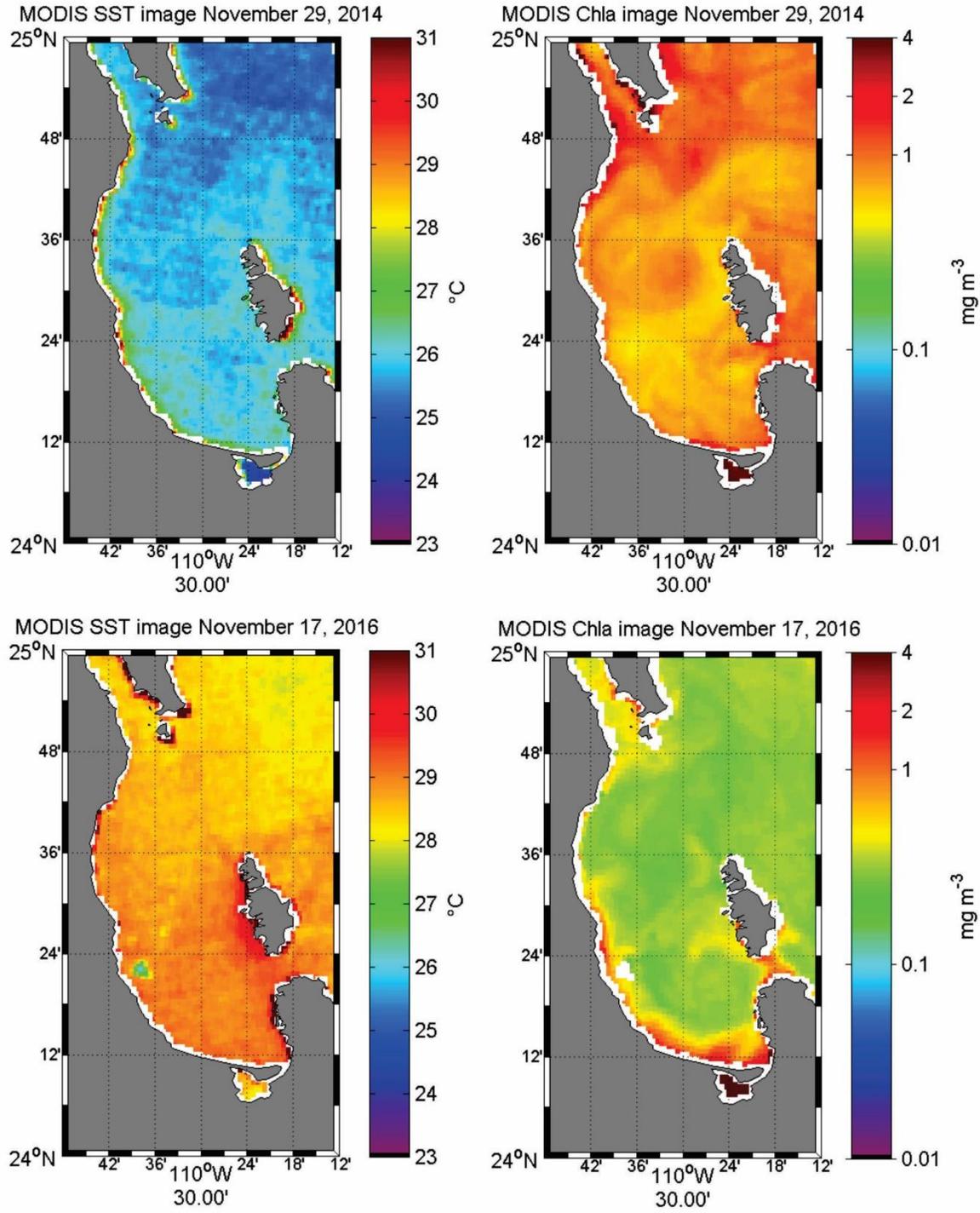


Figura 13. Imágenes Satelitales de la temperatura superficial del mar (°C) y Chl-a (mg/m³) para noviembre de 2014 y noviembre de 2016.

3.5 Series de tiempo de vientos

Durante noviembre de 2014 los vientos predominantes fueron del noreste, con presencia de vientos del suroeste en intervalos cortos a lo largo del mes (Fig. 14a). Durante noviembre de 2016 la predominancia de estos vientos del noreste fue más notoria y solo en lapsos cortos los vientos fueron del suroeste con intensidades muy pequeñas (Fig. 14b). En este caso, la magnitud del viento fue más constante que durante 2014.

En las fechas del 22 al 27 de noviembre de 2014 en las que se llevó a cabo el crucero PALEOMAR-I, el viento fue de noreste con velocidades mayores a 5 m/s (Fig. 14a). Durante el crucero PALEOMAR-II con fechas del 15 al 21 de noviembre de 2016 los vientos predominantes fueron del noreste con velocidades menores a 5 m/s. La intensidad del viento fue menor respecto a las del crucero de 2014 (Fig. 14b).

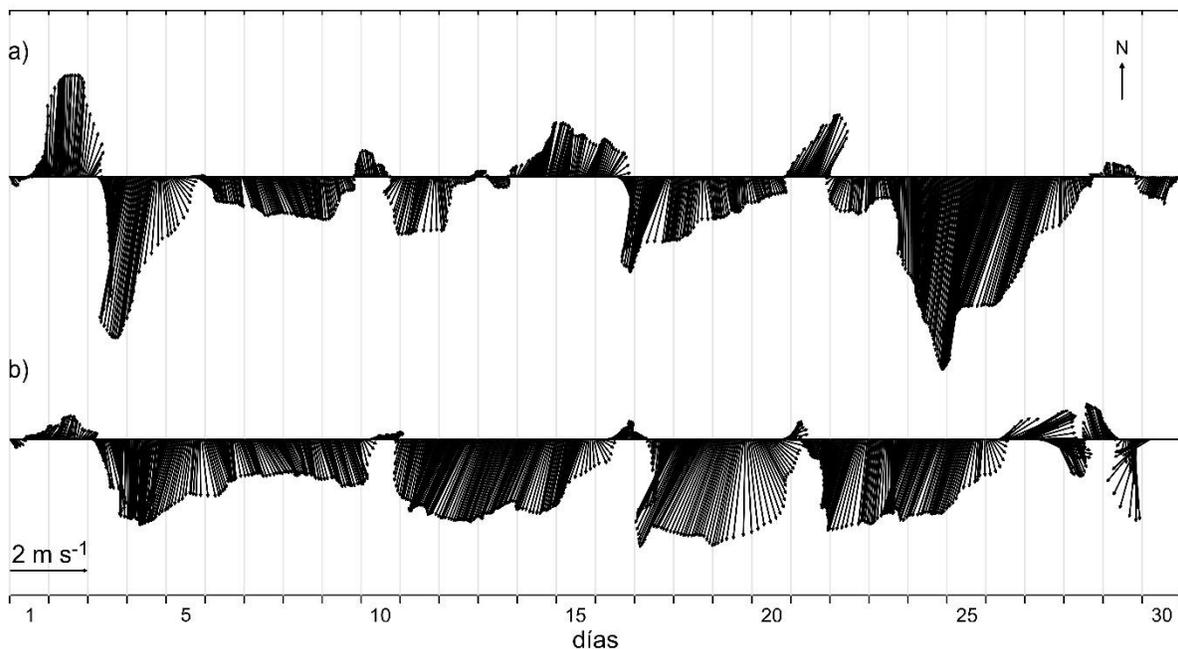


Fig. 14 Serie de tiempo de vientos: a) crucero PALEOMAR-I noviembre 2014; b) crucero PALEOMAR-II noviembre 2016.

3.6 Análisis estadístico

Las condiciones ambientales en el crucero PALEOMAR-I presentó cambios en la columna de agua ya que los niveles ubicados en la capa de mezcla de los 30 m (nivel 1-3) presentaron una mayor influencia con la temperatura, y los niveles inferiores (nivel 4 y 5) fueron

influenciados principalmente por los nutrientes (Fig. 15a). El análisis de componentes principales (ACP) para el crucero PALEOMAR-II mostró que las variables ambientales de temperatura y salinidad dominaron en la capa superficial y hasta el nivel 3 que representaron los 30 m de profundidad, por debajo de dicha profundidad (nivel 4 y 5) los nutrientes son los que mejor determinan las condiciones ambientales. La Chl-*a* es la variable que dominó el eje Y o el componente 2 (PC2), por lo que se puede afirmar que estadísticamente la Chl-*a* es independiente de las variables hidrográficas y de los nutrientes (Fig. 15b), por lo cual el aumento en las concentraciones no depende de la variación en las condiciones hidrográficas.

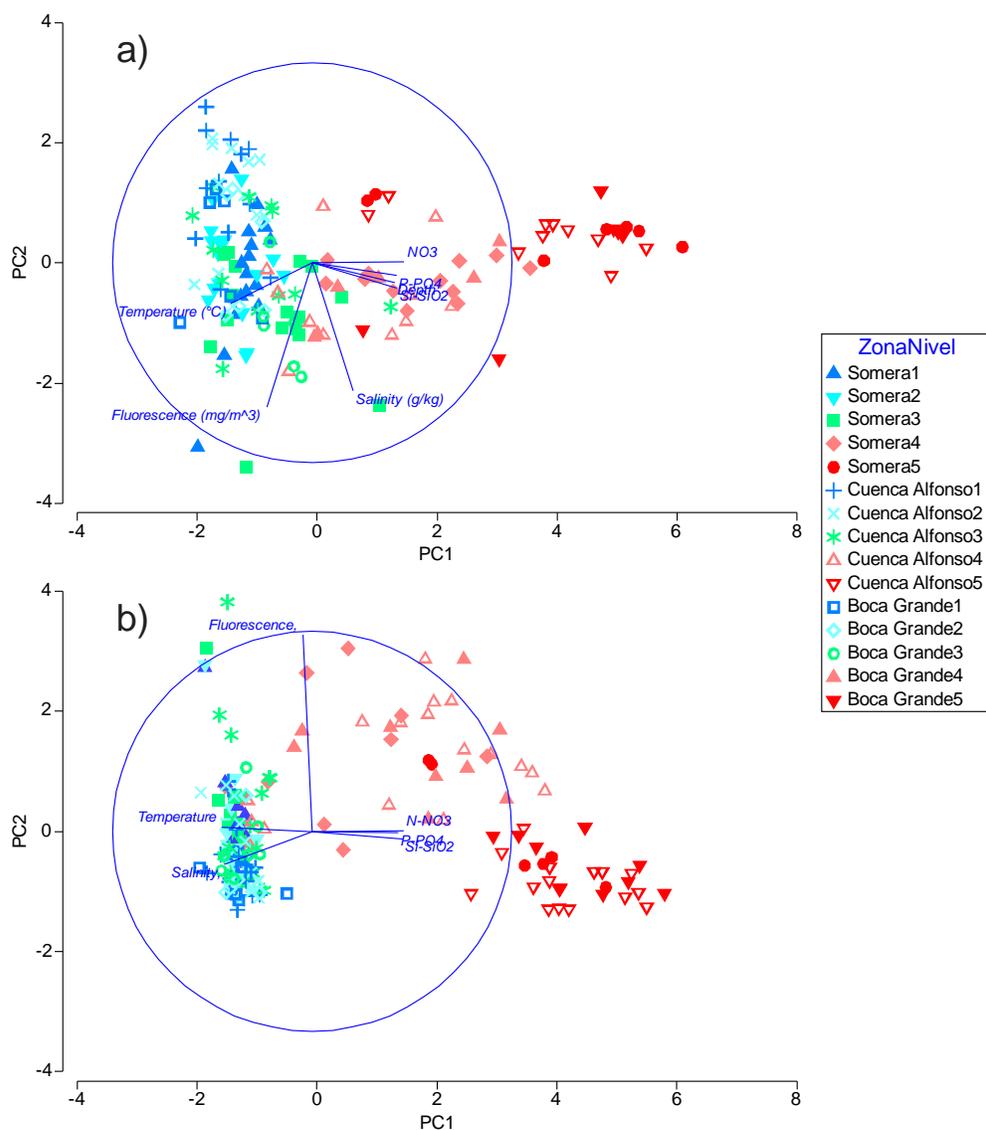


Fig. 15 Análisis de componentes principales (ACP): a) crucero PALEOMAR-I noviembre 2014; b) crucero PALEOMAR-II noviembre 2016.

3.7 Proporción de nutrimentos, nutriente limitante y Chl-*a* acumulativa

La proporción de nutrimentos al interior de la bahía en noviembre de 2014 fue considerablemente elevada con respecto a noviembre de 2016. Por un lado, en otoño de 2014 la proporción de N:P en la capa superficial fue menor a 16, por lo tanto se podría considerar al Nitrógeno como el elemento limitante, sin embargo por debajo de dicha capa, la proporción aumenta y el elemento limitante fue el Fosforo; la proporción Si:N para que se encuentren en equilibrio debería ser 0.93, por lo que los valores de noviembre de 2014 están por arriba lo que nos indica que el elemento limitante es el N. Finalmente, la proporción Si:P en equilibrio es 15 por lo que los datos sobrepasan este valor ampliamente, por lo tanto el elemento limitante es el Fosforo.

En noviembre de 2016 la proporción N:P sobrepasa el valor de 16 hasta los 50 m de profundidad, por lo que el elemento limitante sería el Fosforo, y a 75 m es menor a 16 por lo que tiene mayor influencia en los procesos químicos la disponibilidad de Nitrógeno; la proporción Si:N es menor a 0.93 lo cual indica que el elemento limitante fue el Silicio hasta los 50 m de profundidad, y a los 75 m de profundidad vuelve a ser el Nitrógeno; y finalmente la proporción Si:P muestra que el elemento limitante fue el Silicio hasta los 50 m de profundidad y por debajo el elemento limitante fue el Fosforo (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación en CHL-*a*, temperatura, salinidad y en las proporciones de los nutrimentos entre noviembre de 2014 y noviembre de 2016.

	Paleomar-I					
	Clorofila- <i>a</i>	Temperatura	Salinidad	N:P	Si:N	Si:P
Superficie	0.9±0.5	26.5±0.3	34.8±0.1	15.5±8.9	2.2±2.7	24.17±12.9
10 m	0.98±0.37	26.48±0.35	34.8±0.1	18.54±8.5	1.8±1	33.8±21.54
30 m	1.3±0.4	26.4±0.3	34.84±0.1	21.8±6.4	2.7±2	56.6±41.9
50 m	0.9±0.34	25.2±1.5	34.89±0.04	20.9±4.9	2.8±1.1	58.84±25.65
75 m	0.36±0.37	20.23±1.7	34.9±0.03	18.56±3.4	3.25±0.6	60.19±14.02
	Paleomar-II					
	Clorofila- <i>a</i>	Temperatura	Salinidad	N:P	Si:N	Si:P
Superficie	1.5±0.68	27.6±0.1	35.24±0.02	22.1±9.15	0.41±0.07	9.06±3.6
10 m	1.56±0.86	27.58±0.09	35.24±0.02	20.2±10.2	0.42±0.06	8.46±4
30 m	2.04±1.18	27.5±0.09	35.24±0.05	22.11±9	0.42±0.09	9.15±3.18
50 m	3.12±0.97	24.44±2.3	35.08±0.1	17.5±8.6	0.9±0.3	13.90±3.9
75 m	0.8±0.5	19.16±0.9	34.98±0.01	15.02±5.7	1.35±0.34	18.75±3.4

La Chl-*a* acumulativa presentó diferencias entre ambos cruceros, en noviembre de 2014 se observó el máximo valor promedio de $\sim 1.6 \text{ mg/m}^3$ a una profundidad de 30 m con un límite mayor de 2 mg/m^3 . En noviembre de 2016 el máximo promedio de $\sim 3 \text{ mg/m}^3$ y con el límite mayor de 4.5 mg/m^3 a una profundidad de 40 m (Fig. 16).

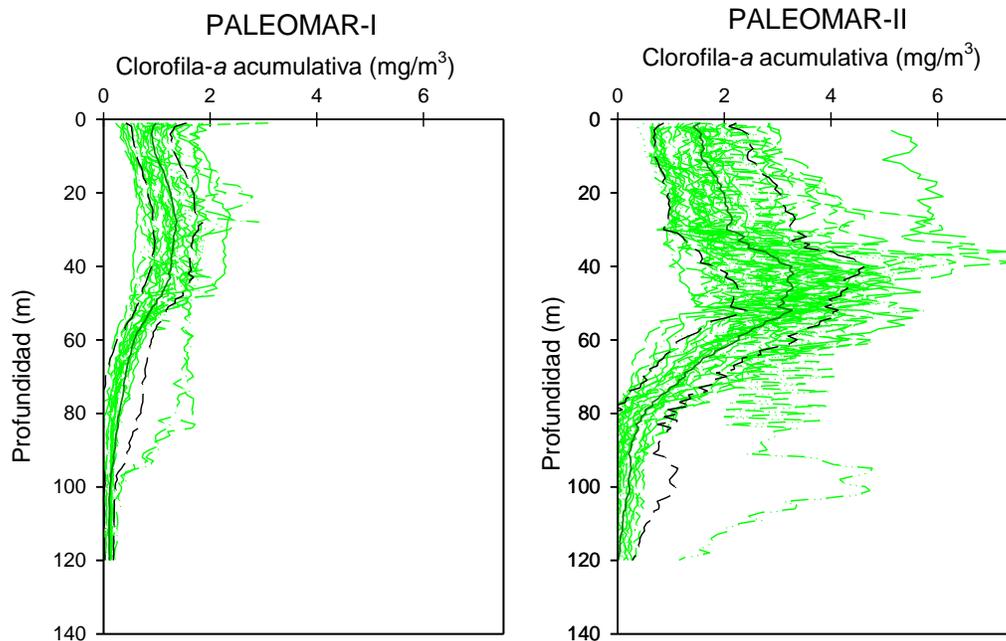


Fig. 16 Perfiles verticales acumulativos de Chl-*a* promedio de la distribución vertical de Chl-*a* (línea negra continua) y desviación estándar (líneas punteadas) en noviembre de 2014 y noviembre de 2016.

CAPÍTULO IV: Discusión

La distribución de las masas de agua al interior de la bahía mostró una mayor proporción del Agua del Golfo de California para otoño de 2016, esto coincide con lo reportado por Portela et al. (2016) para la zona del Golfo de California, sin embargo, en otoño de 2014 se presenta una mayor proporción del Agua Tropical Superficial, la cual es indicadora del fenómeno de El Niño (Monreal-Gómez et al., 2001).

De acuerdo con el índice multivariado ENSO versión 2 (MEI.v2) en noviembre de 2014 con un valor de 0.3, el cual representa condiciones “normales” o “neutras”, el cual fue anterior a un Niño intenso, mientras que para noviembre de 2016 se presenta un valor de -0.3 que

igualmente es considerado “normal”, sin embargo, este último viene precedido por un año con valores máximos de 2.1 vinculado con un evento extremo de El Niño. Por otro lado, el índice ONI para noviembre de 2014 presenta valores de 0.6, lo cual representa condiciones de El Niño, para noviembre de 2016 el índice muestra valores de -0.7, este valor quiere decir que hay presencia de La Niña (Fig. 17). Sin embargo, este estudio se basará en el índice MEI.v2 ya que considera tanto variables oceánicas como atmosféricas.

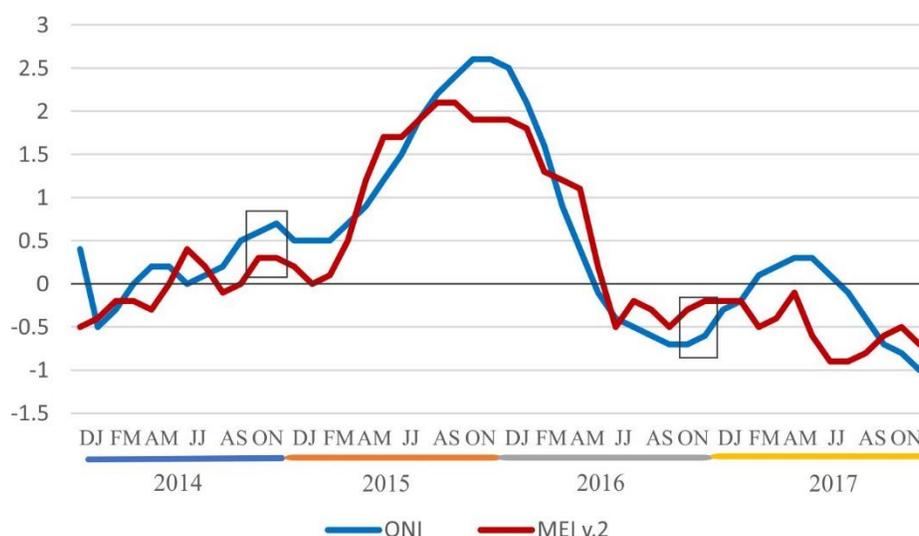


Fig. 17 Valores del Índice Multivariado ENSO versión 2 (línea roja) y el Índice Oceánico El Niño (línea azul).

Los perfiles verticales mostraron que la termoclina y la piconclina se presenta de 40 m a 50 m y se desplaza hasta los 100 m en la zona de Boca Grande; este patrón se presenta en noviembre de 2014 y noviembre de 2016, lo cual coincide con lo reportado por Obeso-Nieblas et al. (2004) y Monreal-Gómez et al. (2001) para el periodo de El Niño de 1997-1998, el cual inhibió la mezcla de la columna de agua generando una baja concentración de Chl-*a*, sin embargo, para agosto de 2017 las clinas se presentaron a 30 m de profundidad (Sánchez-Mejía et al., 2020). Este desplazamiento hacia la superficie es influenciado por varios procesos como el vórtice ciclónico presente en Cuenca Alfonso, sin embargo, en este estudio se asocia el desplazamiento de las clinas debido a la intensidad de los vientos.

El pico máximo de Chl-*a* en noviembre de 2014 estuvo asociado con los nutrientes de aguas subsuperficiales, para noviembre de 2016 el pico máximo de Chl-*a* fue relacionado con las clinas de ~40 m de profundidad, ya que la intensidad de los vientos en 2014 sugiere

que penetró hasta el fondo y en 2016 hundió las clinas. En agosto de 2009, Durán-Campos et al. (2019a) reportaron un máximo de 3.03 mg/m^3 de Chl-*a* en un intervalo de 20 a 40 m de profundidad igualmente relacionado con las clinas y estrechamente ligado con la nutriclina. Los mapas de distribución horizontal de temperatura y salinidad en noviembre de 2014 mostraron una capa de mezcla hasta los 30 m de profundidad con valores $>26 \text{ }^\circ\text{C}$ y $<34.9 \text{ g/kg}$, respectivamente; mientras que en 2016 presentó la capa de mezcla con temperaturas $>27 \text{ }^\circ\text{C}$; en agosto de 2017, cuando se presentó el fenómeno de La Niña. Sánchez-Mejía et al. (2020) registraron temperaturas similares ($26 \text{ }^\circ\text{C}$) a noviembre de 2014, sin embargo, presentaron salinidad $>35.4 \text{ g/kg}$. Cervantes-Duarte et al. (2021) documentaron temperaturas promedio de $16\text{-}32 \text{ }^\circ\text{C}$ y valores de salinidad promedios de 35.5 g/kg en la bahía. Si bien la temperatura puede ser un indicador de las condiciones ambientales, la salinidad parece haber estado influenciadas por la presencia de El Niño Godzilla en la zona superficial en noviembre de 2014, el cual a su vez condicionó la disponibilidad de nutrientes hacia la capa superficial.

El Niño Godzilla tuvo una fuerte influencia en diferentes regiones del mundo, no obstante, en el Golfo de California y en La Bahía de La Paz no tuvo un impacto sobre la concentración de Chl-*a* (Coria-Monter et al. 2019b). Las observaciones en las concentraciones superficiales de Chl-*a* en noviembre de 2014 son menores a noviembre de 2016, estas diferencias de concentraciones pueden ser asociadas al fenómeno de El Niño presente en la capa superficial de 2014, mientras que en 2016 las concentraciones son elevadas debido a que tiende a presentarse el fenómeno de La Niña y también a que la zona superficial es altamente dinámica. Herrera-Cervantes et al. (2023) reportaron que en invierno y en presencia de El Niño la concentración de Chl-*a* disminuye en promedio $\sim 0.9 \text{ mg/m}^3$ debido a las condiciones extremas de temperatura y salinidad en la superficie.

La disponibilidad de nutrientes hacia la capa superficial se vio afectada por la presencia del fenómeno de El Niño, mientras que en noviembre de 2014 la zona subsuperficial presenta concentraciones de $50 \text{ } \mu\text{M}$ a $75 \text{ } \mu\text{M}$ de Silicatos, en noviembre de 2016 las concentraciones fueron de $16 \text{ } \mu\text{M}$, estos valores son menores a lo reportado por Sánchez-Mejía et al. (2020) y Rocha-Díaz et al. (2021) para un periodo donde se presenta el fenómeno de La Niña y relacionado con un vórtice ciclónico ($30 \text{ } \mu\text{M}$ y $26 \text{ } \mu\text{M}$, respectivamente).

Por otro lado, en junio de 2004 Coria-Monter et al. (2017) presentó valores de $18 \mu\text{M}$ de Silicio en una temporada de condiciones “normales”, por lo tanto, las condiciones superficiales en noviembre de 2014 fueron afectadas por el fenómeno de El Niño, sin embargo, la capa subsuperficial no está alterada por dicho fenómeno; no obstante, otoño de 2016 presenta una capa superficial altamente dinámica y con tendencia hacia el fenómeno de La Niña, mientras que la capa subsuperficial al ser menos dinámica se vuelve más estable y se refleja aun el impacto que tuvo El Niño “Godzilla”.

Las características de la columna de agua en presencia del fenómeno de La Niña fueron presentadas por Sánchez-Mejía et al. (2020) y Rocha-Díaz et al. (2021) donde se observó una masa de agua fría y con alta salinidad característica del Agua del Golfo de California, con alta concentración de *Chl-a* hasta los 50 m de profundidad.

Se cuenta con observaciones de nutrimentos por encima de la termoclina (30 m) y por debajo de ella (50 m) donde se observa una concentración menor de nitratos, fosfatos y silicatos ($30 \mu\text{M}$), y elevada por debajo. En presencia del fenómeno de El Niño Coria-Monter et al. (2014) y Cervantes-Duarte et al. (2021) presentaron condiciones hidrográficas diferentes, donde se observa una masa de agua cálida con bajas salinidades características del Agua Tropical Superficial y de la presencia del fenómeno de El Niño, se presentan bajas concentraciones de *Chl-a* hasta los 50 m de profundidad y un pico de máxima concentración en relación con la termoclina. Los nutrimentos mostraron un máximo de silicatos de $10 \mu\text{M}$ por encima de la termoclina, mientras que los fosfatos aumentaron como característica de El Niño. Finalmente, en época “neutra” Coria-Monter et al. (2017) observaron características hidrográficas muy parecidas a las presentes en el evento de La Niña, sin embargo, se identificó una disminución considerable en los nutrimentos, con valores máximos de silicio de $18 \mu\text{M}$ y de nitratos de $17 \mu\text{M}$, concentraciones intermedias entre las diferentes etapas del ENSO. Estos tres eventos muestran condiciones específicas de las diferentes fases, en noviembre de 2014 las características hidrográficas de la columna de agua coinciden con los del inicio de un evento de El Niño, mientras que los nutrimentos son considerablemente superiores, principalmente los Silicatos por debajo de la termoclina. En noviembre de 2016 las características hidrográficas muestran similitud a la fase fría debido a la salinidad que es la que definió la estructura de la columna de agua, mientras que en la concentración de los

nutrimentos se observa que aún presentan una influencia del fenómeno de El Niño, ya que la concentración de nutrimentos es menor en la zona subsuperficial (Tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de variables hidrográficas, Chl-*a*, temperatura, salinidad y nutrimentos reportados en diferentes trabajos ante fenómenos de: El Niño (rojo), La Niña (azul) y “neutros” (blanco).

MEI.v2	Año	Profundidad (m)	Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	Temperatura (°C)	Salinidad (g/kg)	Nitratos (μM)	Silicatos (μM)	Fosfatos (μM)	Autor
0.8	nov-02	10 m	0.5	27	35.33	0.9		0.7	Cervantes-Duarte et al. (2021)
0.5	ago-09	25 m	1.5*	25		12	10	4	Coria-Monter et al. (2014)
		50 m	0.5	<25		15			
0.3	nov-14	10 m	1.7	26.75	34.6-35	1	15	0.44	Este trabajo
		30 m	2	26	34.77	5	50	1	
		50 m	1.1	23.4	35	13	75	1.24	
0	jun-04	20 m	0.9	17-19		16	18	1.6	Coria-Monter et al. (2017)
		30 m	<0.5	16-17		17	15	2	
-0.3	nov-16	10 m	3.1	27.6	35.24	0.3	5	0.49	Este trabajo
		30 m	5.2	27	35.14	1	7	0.44	
		50 m	4.1	23	35	10	18	1.19	
-0.6	feb-06	30 m		19.5	35.4	4	14	1	Rocha-Díaz et al. (2021)
		50 m		16.5-18.5	35.3	12	26	1.5	
-0.9	ago-17	30 m	>2.8	19.5-26	35.06	>15	15		Sánchez-Mejía et al. (2020)
		50 m	<1	18-22	34.95	10	30		

*Alta concentración ligada a un vórtice ciclónico

Las imágenes satelitales mostraron diferencias en la temperatura y Chl-*a* entre noviembre de 2014 y noviembre de 2016. En 2014 cuando se observó la influencia en la capa superficial del fenómeno de El Niño la Chl-*a* fue >1 mg/m³, mientras que en noviembre de 2016 fue <1 mg/m³. Herrera-Cervantes et al. (2020) reportaron que la concentración media de Chl-*a* en invierno de 2008 fue >3 mg/m³ en el cual estuvo presente el fenómeno de La Niña, mientras que para invierno de 2015 donde se presentó un evento extremo de El Niño la concentración

de Chl-*a* fue $<2.5 \text{ mg/m}^3$, por lo que podemos observar que la presencia de estos fenómenos altera la concentración de la Chl-*a*.

Conclusiones

- La mayor proporción del Agua Tropical Superficial observada en noviembre de 2014 sugiere la presencia del fenómeno de El Niño; en noviembre de 2016 la dominancia del Agua del Golfo de California sugiere el posible inicio del fenómeno de La Niña.
- En 2014, la tendencia hacia el fenómeno de El Niño impactó la zona superficial, sin embargo, por debajo de la termoclina no se observaron cambios importantes. Para noviembre de 2016, la capa superficial tiende al fenómeno de La Niña, mientras que la zona subsuperficial aún presenta influencia del evento extremo que fue El Niño “Godzilla”.
- La distribución de Chl-*a* estuvo influenciada por el fenómeno ENSO en sus diferentes fases, ya que se alteró la disponibilidad de nutrientes hacia la capa superficial. Cuando hay tendencia al fenómeno de El Niño la concentración de Chl-*a* es menor y cuando tiende al fenómeno de La Niña hay una mayor concentración de Chl-*a*.
- En noviembre de 2014 el elemento limitante en la capa superficial fue el Nitrógeno, mientras que por debajo fue el Fosforo y presentó concentraciones similares a 2016. Sin embargo, en noviembre de 2016 el elemento limitante fue el Silicio el cual presentó concentraciones significativamente menores a otoño de 2014, esto se puede relacionar con el incremento de las concentraciones de Chl-*a* observadas en 2016.
- Los resultados obtenidos sugieren que la Bahía de La Paz si es influenciada por fenómenos como El Niño y La Niña, al presentar cambios en las variables hidrográficas durante las temporadas en la que los fenómenos están presentes, sin embargo, estos resultados muestran que en otoño la bahía sigue siendo una zona altamente productiva y dinámica.

Referencias

- Cervantes-Duarte, R., González-Rodríguez, E., Funes-Rodríguez, R., Ramos-Rodríguez, A., Torres-Hernández, M.Y., Aguirre-Bahena, F., 2021. Variability of net primary productivity and associated biophysical drivers in Bahía de la Paz (México). *Remote Sensing* 13: 1644. <https://doi.org/10.3390/rs13091644>

- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Aldeco-Ramírez, J., Merino-Ibarra, M. 2014. Differential distribution of diatoms and dinoflagellates in a cyclonic Eddy confined in the Bay of La Paz, Gulf of California. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 119: 6258-6268.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Durán-Campos, E. 2018. Impact of the “Godzilla El Niño” event of 2015-2016 on sea surface temperature and chlorophyll-a in the southern Gulf of California, Mexico, as evidenced by satellite and in situ data. *Pacific Science* 72(4): 411-422.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Durán-Campos, E., 2019b. Water masses and chlorophyll-a distribution in a semi-enclosed bay of the southern Gulf of California, Mexico, after the “Godzilla El Niño”. *Arabian Journal of Geosciences*. 12 (15): 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4636-1>.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, Merino-Ibarra, M., Durán-Campos, E. 2017. Wind driven nutrient and subsurface chlorophyll-a enhancement in the Bay of La Paz, Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 196: 290-300.
- Coria-Monter, E., Salas de León, D.A., Monreal-Gómez, M.A., Durán-Campos, E. 2019a. Satellite observations of the effect of the "Godzilla El Niño" on the Tehuantepec upwelling system in the Mexican Pacific. *Helgoland Marine Research* 73:3.
- Cullen, J.J., 2015. Subsurface chlorophyll maximum layers: enduring enigma or mystery solved? *Annual Review in Marine Sciences* 7: 207–239.
- Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Coria-Monter, E. 2019a. Impact of a dipole on the phytoplankton community in a semi-enclosed basin of the southern Gulf of California, Mexico. *Oceanologia* 61: 331-340.
- Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Coria-Monter, E. 2019b. Chlorophyll-a vertical distribution patterns during summer in the Bay of La Paz, Gulf of California, Mexico. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 45: 109-115.
- Falkowski, P. 2012. Ocean science: the power of plankton. *Nature* 483:17–20.

- Gallagher, S.M., Yamazaki, H., Davis, C. 2004. Contribution of fine-scale vertical structure and swimming behavior to formation of plankton layers on Georges Bank. *Marine Ecology Progress Series* 267: 27-43.
- Grasshoff, K., Ehrhardt, M., Kremling, K. 1983. *Methods of Seawater Analysis*. 577 pp. Verl. Chem., Weinheim, Germany.
- Guevara-Guillén, C., Shirasago-Germán, B., Pérez-Lezama, E.L. Obeso-Nieblas, M. 2018. Variability of Chlorophyll a Concentration and Halocline Depth in La Paz Bay (Gulf of California, Mexico) and the Relationship to Pacific Large-Scale Climatic Phenomena, *Journal of Coastal Research*. 34(4): 920-927. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00228.1>
- Hernández-Rodríguez, O. 1998. *Temas de análisis estadístico multivariado*. 9 pp. San José. Costa Rica.
- Herrera-Cervantes, H. Gutiérrez de Velasco, G., Zaytsev, O., Desmond Barton, E., Gilcoto, M. 2023. Anomalous thermal and winds condition drove low Surface chlorophyll-a in La Paz Bay during the 2015-2016 El Niño event. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 284: 108280. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108280>
- Herrera-Cervantes, H., Lluch-Cota, S.E., Lluch-Cota, D.B., Gutiérrez de Velasco, G., Lluch-Belda, D. 2010. ENSO influence on satellite-derived chlorophyll trends in the Gulf of California. *Atmósfera*, 23(3): 253–262.
- Herrera-Cervantes, H., Lluch-Gota, S.E., Cortés-Ramos, J., Farfán, L., Morales-Aspeitia, R. 2020. Interannual variability of Surface satellite-derived chlorophyll concentration in the bay of La Paz, Mexico, during 2003-2018 period: The ENSO signature. *Continental Shelf Research* 209: 104254. doi.org/10.1016/j.csr.2020.104254
- IOC, SCOR, IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater – 2010. Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manual and Guides No. 56, UNESCO.
- Jiménez-Illescas, A.R., 1983. Aplicación de un modelo hidrodinámico numérico a la Ensenada de La Paz, B.C.S. Tesis de Maestría, CICESE. Ensenada, B.C., México.
- Kirkwood, D.S. 1994. *SanPlus Segmented Flow Analyzer and Its Applications Seawater Analysis*, 51 pp., Skalar, Amsterdam.

- Ladah, L.B. 2003. The shoaling of nutrient-enriched subsurface waters as a mechanism to sustain primary productivity off Central Baja California during El Niño winters. *Journal of Marine Systems* 42: 145–152.
- Mahadevan, A. 2016. The impacts of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annual Review of Marine Sciences* 8: 161-184.
- McGillicuddy J.R., Anderson, D.J., L.A., Bates, N.R., Bibby, T., Buesseler, K.O., Carlson, C., Davis, C.S., Ewart, C., Falkowski, P., Goldthwait, S.A., Hansell, D.A., Jenkins, W.J., Johnson, R., Kosnyrev, V., Ledwell, J.R., Li, Q.P., Siegel, D.A., Steinberg, D.K. 2007. Eddy/Wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms. *Science* 316: 1021-1026.
- McGillicuddy J.R., D.J., 2015. Formation of intrathermocline lenses by eddy-wind interaction. *Journal of Physical Oceanography* 45: 606–612.
- McGillicuddy, J.R., Anderson, D.J. 2016. Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale. *Annual Review of Marine Sciences* 8: 125-159.
- McPhaden, M.J., Santoso, A., Cai, W. 2021. El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. Geophysical Monograph 253. American Geophysical Union. John Wiley & Sons, Inc., USA, 502 p.
- Monreal-Gómez, M.A., Molina-Cruz, A., Salas de León, D.A. 2001. Water masses and cyclonic circulation in Bay of La Paz, Gulf of California, during June 1998. *Journal of Marine Systems* 30 (3): 305-315.
- Obeso-Nieblas, M., Shirasago, B., Sánchez-Velazco, L., Gaviño-Rodríguez, J.H. 2004. Hydrographic variability in Bahía De La Paz, B.C.S, México, during the 1997-1998 El Niño. *Deep-Sea Research II*. 51: 689-710. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.05.005>
- Pérez-Cruz, L.L., Molina-Cruz, A. 1988. El Niño 1983: Efectos sobre la distribución de los silicoflagelados del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 14(3): 9-38. <https://doi.org/10.7773/cm.v14i3.606>
- Portela, E., Beier, E., Barton, E. D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fiedler, P. C., Sánchez-Velasco, L., Trasviña. A. 2016. Water masses and circulation

in the tropical pacific off central Mexico and surrounding areas. *Journal of physical oceanography* 46: 3069-3081. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0068.1>

- Richardson, A.J. 2008. In hot water: zooplankton and climate change. *Ices. Journal of Marine Science* 65 (3): 279- 295.
- Rocha-Díaz, F.A., Monreal-Gómez, M.A., Coria-Monter, E., Salas de León, D.A., Durán-Campos, E., Merino-Ibarra, M. 2021. Copepod abundance distribution in relation to a cyclonic eddy in a coastal environment in the southern Gulf of California. *Continental Shelf Research*. 222: 104436. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104436>.
- Sánchez-Mejía, J.M., Monreal-Gómez, M.A., Durán-Campos, E., Salas de León, D.A., Coria-Monter, E., Contreras-Simuta, M.G., Merino-Ibarra, M. 2020. Impact of a Mesoscale Cyclonic Eddy on the Phytoplankton Biomass of Bay of La Paz in the Southern Gulf of California. *Pacific Science* 74(4): 331-344.
- Schiermeier Q. 2015. Hunting the Godzilla El Niño. *Nature* 526: 490–1.
- Simon, N., Cras, A. L., Foulon, E., Lemée, R. 2009. Diversity and evolution of marine phytoplankton. *Comptes Rendus Biologies* 332: 159-170.
- Vajravelu, M., Martin, Y., Ayyappan, S., Mayakrishnan, M. 2017. Seasonal influence of physic-chemical parameters on phytoplankton diversity, community structure and abundance at Parangipettai coastal waters, Bay of Bengal, south east coast of India. *Oceanologia* 60 (2): 114-127.