



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

**DISTRIBUCIÓN DE LA BIOMASA FITOPLANCTÓNICA Y SU RELACIÓN CON LA
HIDROGRAFÍA EN LA BAHIA DE LA PAZ, GOLFO DE CALIFORNIA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO:

BIÓLOGA

PRESENTA:

JOSELYN MIDORI SÁNCHEZ MEJÍA

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ELIZABETH DURÁN CAMPOS



Los Reyes Iztacala, Estado de México, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

**EL PRESENTE TRABAJO FUE REALIZADO
EN EL LABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA
FÍSICA DEL INSITITUTO DE CIENCIAS DEL
MAR Y LIMNOLOGÍA, DE CIUDAD
UNIVERSITARIA**



*Dedicado a mi familia y amigos, en especial a
mi mamá Emília y a mi hermana Perla,
gracias por su apoyo*

Agradecimientos

Hay tantas personas a las que quiero agradecer por estar conmigo y brindarme todo su apoyo, no solo en lo académico sino también en lo personal.

Primero quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México, por el financiamiento para la realización de la campaña oceanográfica "Paleomar III" realizada a bordo del B/O "El Puma", así como a los miembros de la tripulación y de la tripulación científica que realizó el trabajo durante la campaña.

También quiero agradecer a la Dra. Elizabeth Durán Campos, por todo su apoyo para la realización de este proyecto y haber fungido como directora del mismo y como mi tutora de mi Lic. Así también agradecer al Dr. Erik Coria Monter, por todo su apoyo en la realización de este proyecto y a lo largo de mi estancia en el laboratorio para la realización de mi Lic.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. David Salas de León y a la Dra. Adela Monreal Gómez por permitirme realizar este proyecto en el laboratorio de Oceanografía Física, y el acceso a los datos utilizados en este proyecto.

También quiero agradecer a Sergio Castillo Sandoval quien brindó apoyo técnico durante los análisis de laboratorio.

Un sincero agradecimiento al Dr. Diego Chaparro Herrera, a la Dra. Roció Fernández y al Dr. Luis Alberto Oseguera, por haber participado como parte de mi comité evaluador y sus comentarios que enriquecieron este proyecto.

Sobretudo quiero agradecer a mi familia por su apoyo a lo largo de toda la licenciatura y por haber confiado en mí.

Amigos de la carrera gracias por todo su apoyo en cada semestre, en cada práctica de campo, por sus consejos y por todo su cariño, gracias, Isaac Cruz, Octavio Trejo. Pero en especial quiero agradecer a Enrique Suarez por no solo ser un excelente compañero, sino ser un amigo muy especial que siempre me dio su apoyo desde el día uno, y por todo su cariño. También quiero agradecer a Roberto Rodríguez por su amistad y apoyo a lo largo de varios años, creer siempre en mí.

Y al final, pero no menos importante quiero agradecer a Alberto Huerta por ser mi mejor amigo y siempre creer en mí, apoyarme y sus buenos deseos para cumplir este sueño.

Índice

Agradecimientos.....	i
Índice de figuras.....	ii
Resumen.....	1
Introducción.....	2
Justificación.....	4
Antecedentes.....	5
Área de estudio.....	7
Objetivo general.....	9
Objetivos particulares.....	9
Hipótesis.....	9
Materiales y Métodos.....	10
<i>Datos hidrográficos</i>	10
<i>Imágenes satelitales</i>	10
<i>Determinación de clorofila-a</i>	11
Resultados.....	13
<i>Masas de agua</i>	13
<i>Distribución horizontal de temperatura</i>	15
<i>Distribución horizontal salinidad</i>	17
<i>Distribución horizontal densidad</i>	19
<i>Distribución horizontal de la isoterma de 20° C</i>	21
<i>Corrientes geostróficas</i>	23
<i>Distribución horizontal de clorofila-a</i>	25
<i>Imágenes satelitales</i>	27
<i>Perfiles verticales</i>	29
<i>Región sur</i>	29
<i>Región centro</i>	31
<i>Región norte</i>	34
Discusión.....	38
Conclusiones.....	45
Literatura citada.....	46

Índice de figuras

Figura 1. Área de estudio: Bahía de La Paz y estaciones de muestreo.....	8
Figura 2. Diagrama T-S obtenido para la Bahía de la Paz en el mes de agosto de 2017.....	14
Figura 3. Distribución de la temperatura a diferentes profundidades.....	16
Figura 4. Distribución de la salinidad a diferentes profundidades.....	18
Figura 5. Distribución de la densidad a diferentes profundidades.....	20
Figura 6. Distribución horizontal de la isoterma de 20°C.....	21
Figura 7. Distribución vertical de temperatura (a) y densidad (b) en el transecto A-B que cruza al vórtice ciclónico.....	22
Figura 8. Mapa de corrientes geostroficadas a diferentes profundidades.....	24
Figura 9. Distribución de clorofila-a a diferentes profundidades.....	26
Figura 10. Imágenes satelitales obtenidas de MODIS-AQUA para el día 5 de agosto de 2017.	28
Figura 11. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m ³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m ³) en la porción sur de la Bahía de La Paz.	30
Figura 12. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m ³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m ³) en la porción central (E 12-19).	32
Figura 13. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m ³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m ³) en la porción central (E 20-27).	33
Figura 14. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m ³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m ³) en la porción central (E 28-31).	35
Figura 15. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m ³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m ³) en la porción central (E 36-43).	36
Figura 16. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m ³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m ³) en la porción central (E 44-47).	37

Resumen

El presente trabajo se analiza la distribución de la biomasa fitoplanctónica, expresada como concentración de clorofila-*a*, en relación con la hidrografía en la Bahía de La Paz, Golfo de México, durante la época de verano de 2017. Con un CTD Seabird 19, se midió la temperatura, salinidad y conductividad, con lo cual se obtuvo el diagrama de las masas de agua, el patrón de corrientes geostróficas y se analizó la estructura física de la columna de agua, así como la distribución horizontal de los parámetros físicos (temperatura, salinidad y densidad). Se obtuvieron imágenes satelitales mediante el espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS-AQUA, por sus siglas en inglés), las imágenes disponibles se obtuvieron del navegador de datos de la NASA para el día 5 de agosto de 2017. Respecto a la determinación de clorofila-*a*, se obtuvieron muestras de agua con ayuda de botellas Niskin, y se realizó la extracción y análisis mediante espectrofotometría, además, se analizaron de datos de fluorescencia para determinar biomasa fitoplanctónica obtenidos mediante un sensor ECO-Wet Labs sujeto al CTD.

Los resultados obtenidos mostraron la presencia de tres masas de agua: el Agua Intermedia del Pacífico, el Agua Subtropical Subsuperficial y el Agua del Golfo de California. El patrón de corrientes estuvo dominado por la presencia de un vórtice ciclónico al norte de la bahía, en las proximidades de Boca Grande y Cuenca Alfonso, el cual presentó una influencia desde la superficie hasta los 100 m de profundidad. Además, se presentó una columna de agua estratificada con una termoclina alrededor de los 20 m.

Respecto a la distribución de la biomasa fitoplanctónica, esta presentó una mayor concentración de clorofila-*a* al norte de la bahía (1.7 mg/m^3), debido a la influencia del vórtice ciclónico identificado en esta misma región, ya que este permitió el afloramiento de aguas subsuperficiales ricas en nutrimentos, mientras que al sur de la bahía se registraron bajas concentraciones de clorofila-*a* (0.7 mg/m^3) en comparación con la región norte de la bahía. En cuanto a la distribución vertical, las máximas concentración de clorofila-*a* ($>3 \text{ mg/m}^3$) se identificaron por debajo de la termoclina, alrededor de los 20 m de profundidad.

Palabras clave: clorofila-*a*, fitoplancton, vórtice ciclónico, Bahía de la Paz.

Introducción

El fitoplancton (diatomeas, dinoflagelados, cocolitoforidos, silicoflagelados, etc.) comprende un conjunto heterogéneo de organismos autótrofos que se distribuyen en el océano, representa la base de la cadena trófica, desempeña un papel fundamental en el ecosistema marino y el ciclo global del carbono por medio de la fotosíntesis y el suministro de energía a otros organismos, (Falkowski y Woodhead, 1992; Vajravelu et al., 2017;). El fitoplancton, al ser base de la cadena trófica, puede afectar directamente la abundancia y distribución de otras comunidades marinas, mediante la fuerza bottom-up, por lo cual, ha sido considerado como un regulador ecológico y ser uno de los principales participantes en los ciclos biogeoquímicos en el océano (Sun, 2011; Findlay et al., 2015).

El fitoplancton, al ser organismos autótrofos, contiene diversos pigmentos que les ayudan a absorber diferentes longitudes de onda del espectro de luz. Siendo la clorofila-a el principal pigmento fotosintético presente en todo el fitoplancton. Su determinación ha sido considerado como un indicador de la producción primaria, de la biomasa y composición de las comunidades fitoplanctónicas, tanto de aguas epicontinentales como marinas (Henson et al., 2010; Davies et al., 2018). Gran cantidad de la energía absorbida por la clorofila-a es utilizada para la fotosíntesis, mientras que la porción de energía que no es utilizada, es emitida en forma de calor y de fluorescencia (Banks, 2018).

La distribución del fitoplancton en el océano es heterogénea, tanto vertical como horizontalmente, y se ha asociado con las condiciones de mezcla o estratificación de la columna de agua, la cual afecta el abastecimiento de nutrientes hacia la zona eufótica (Yacobi et al., 1995; Klausmeier y Litchman, 2001). Sin embargo, muchas especies del fitoplancton han desarrollado diferentes estrategias que les permitan regular su posición en la columna de agua y permanecer en la zona eufótica, permitiendo realizar la fotosíntesis, por ejemplo, por medio de movimientos natatorios gracias a flagelos, al ajuste de su flotabilidad como las cianobacterias o regulando su velocidad de sedimentación como lo hacen las diatomeas (Muggli et al., 1996).

A pesar de las estrategias que el fitoplancton ha desarrollado, su distribución y abundancia está determinada por diversos procesos hidrodinámicos que se presentan en la columna de agua a diferentes escalas espacio-temporales, los cuales, a su vez, están relacionados con la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica, tales como, surgencias, ondas internas, frentes, vórtices, entre otros (Lohrenz, et al., 1999; McGillicuddy, 2016).

Los vórtices de mesoescala (10-100 km) son estructuras altamente energéticas que juegan un papel fundamental en el océano. Por ejemplo, participan en el transporte de energía;

ejercen cierta influencia sobre los ciclos biogeoquímicos a través de la advección horizontal y la mezcla de las masas de agua, además participan en el transporte vertical debido a las inestabilidades de submesoscala forzada por los vientos, así como, en el transporte de nutrimentos en la columna de agua. Todos estos procesos pueden afectar la distribución del fitoplancton y, por ende, de la clorofila-*a* (Bakun, 2006; McGillicuddy et al., 2007; Ledwell et al., 2008; Liu et al., 2013; Gaube et al., 2013; McGillicuddy et al., 2016).

A la fecha, se conocen tres tipos de vórtices en el océano: ciclónico, “mode-water” y anticiclónico. Los vórtices ciclónicos y “mode-water” contribuyen significativamente al transporte de nutrimentos que determinan, tanto la distribución horizontal como vertical del fitoplancton (McGillicuddy et al., 2007), mientras que los vórtices anticiclónicos están relacionados con una reducción de la productividad primaria, debido a que inducen movimientos convergentes que hundan masas de agua superficiales por debajo de la zona eufótica (McGillicuddy y Robinson 1997).

El presente proyecto tiene como objetivo determinar la variabilidad espacial de la biomasa fitoplanctónica, expresada como clorofila-*a*, y su relación con la hidrografía en la Bahía de La Paz, Golfo de California durante la época de verano, con datos y muestras colectadas en una campaña oceanográfica a bordo del Buque Oceanográfico “El Puma” de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Justificación

El estudio de sistemas marinos resulta de gran importancia, ya que son sistemas en los que llevan a cabo una serie de procesos, tanto físicos como biológicos, los cuales pueden presentarse en diferentes escalas espacio-temporales.

Estudiar los aspectos físicos de los sistemas marinos, permite entender la estrecha relación entre estos y los aspectos biológicos. Es por ello que comprender cómo un vórtice ciclónico puede afectar la distribución del fitoplancton, además de influenciar en el transporte de nutrimentos desde zonas profundas hacia la capa eufótica, resulta de gran importancia.

El estudio de la distribución del fitoplancton y, por ende, de la clorofila-a resulta de gran importancia por diversos puntos. Uno de estos, es conocer los patrones espacio-temporales de la biomasa fitoplanctónica y su relación con la dinámica de las masas de agua, lo que permite detectar zonas y épocas ricas en plancton, ya que al presentarse gran abundancia de plancton, genera un efecto de cascada (tipo bottom-up) favoreciendo la abundancia del resto de los organismos de la red trófica y en consecuencia, inferir estrategias para un mejor aprovechamiento de los recursos marinos. Otro punto importante, es el proceso de la bomba biológica que ocurre en los océanos, gracias a la fijación de carbono por medio de la fotosíntesis, siendo el fitoplancton el principal protagonista en dicho proceso, dando como resultado la transferencia de materia a otros organismos de los eslabones superiores de las redes tróficas(Gallager et al., 2004).

Antecedentes

Diversos estudios han analizado el patrón de circulación dentro de la Bahía de La Paz y a la fecha se ha tratado de integrar la información del ambiente físico y las respuestas biológicas dentro de la misma. Monreal-Gómez et al. (2001), analizaron la circulación en la bahía, la cual fue dominada por la presencia de un vórtice ciclónico con influencia en los primeros 150 m de profundidad. Recientemente, se observó una distribución diferencial del fitoplancton asociada al vórtice ciclónico de la Bahía de La Paz, de manera que el centro estuvo dominado por dinoflagelados, mientras que la periferia estuvo dominada por diatomeas, lo cual fue asociado con diferentes procesos que incluyen: 1) el bombeo de nutrientes por parte del vórtice fertilizando la zona eufótica a lo que el fitoplancton responde, 2) el sistema natatorio por parte de algunos dinoflagelados en contraste con la poca o nula movilidad de las diatomeas y 3) el pastoreo por parte de algunos dinoflagelados (Coria-Monter et al., 2014). También, se ha observado que la presencia de este vórtice ciclónico retiene una composición de los grupos funcionales del zooplancton marcadamente diferente desde el centro a su periferia, lo que muestra un patrón de cambios progresivos relacionados con diversos mecanismos que incluyen: 1) los hábitos alimentarios de cada grupo, el zooplancton herbívoro responde a la elevada abundancia de dinoflagelados, mientras que el omnívoro, a la gran abundancia de diatomeas y 2) los mecanismos de movilidad por parte del zooplancton asegura su migración hacia regiones con abundante alimento (Durán-Campos et al., 2015).

Estudios relacionados con la concentración de la clorofila-*a* en el interior de la Bahía de la Paz señalan que ésta presenta cambios estacionales muy marcados, con un comportamiento estacional inverso a la temperatura y a la transparencia del agua, es decir, a mayor temperatura menor concentración de clorofila-*a*, como resultado de la fuerte estratificación de la columna de agua que no permite el transporte de nutrientes hacia la capa superficial. Las mayores concentraciones de clorofila-*a* se presentan en la época fría asociadas con los procesos de mezcla de la columna de agua y probablemente con la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica (Martínez-López et al., 2001).

Los principales factores que controlan la producción primaria en la Bahía de La Paz durante un ciclo anual fueron analizados por Cervantes-Duarte et al. (2005) quienes realizaron perfiles verticales de temperatura, luz y fluorescencia natural de la clorofila-*a* partir de los cuales estimaron la producción primaria. Estos autores reportan que la distribución vertical de la temperatura mostró, de junio a septiembre, una columna de agua estratificada y de noviembre a febrero una columna bien mezclada. Consideran como meses de estabilización de la columna de agua de marzo a mayo y confirman la existencia de dos épocas en el ciclo

estacional de la productividad primaria: de alta productividad, de septiembre a febrero y de baja producción, de marzo a agosto.

Estudios realizados para la época de verano en la Bahía de La Paz documentaron la presencia de una columna de agua estratificada, así como la de un vórtice ciclónico en el centro de la bahía, identificando concentraciones de clorofila-*a* de entre 0.1 a 2.53 mg/m³ asociadas al bombeo de nutrientes derivado del vórtice ciclónico en la bahía (Coria-Monter, 2010).

Mojica-Ramírez (2008), analizó la estructura de la comunidad del zooplancton en la Bahía de La Paz durante la época de verano, identificando la presencia de un vórtice ciclónico en el centro de la bahía, además de identificar una elevada concentración de nutrientes asociados al vórtice; los fosfatos presentaron concentraciones de entre 1 y 4 µM, los nitratos de entre 1 y 19 µM con mayores concentraciones conforme incrementa la profundidad, y los silicatos de entre 5 y 24 µM.

Estudios recientes en la Bahía de La Paz, registran la presencia de un vórtice dipolo (ciclónico-anticiclónico) y un frente termohalino, el cual genera un impacto en la distribución y abundancia de los diferentes grupos del fitoplancton, así como las concentraciones de clorofila-*a* (Durán-Campos, et al., 2019). Estos autores reportan que los dinoflagelados fueron los organismos más abundantes registrados en el frente generado por el dipolo, seguidos de las diatomeas, mientras que los silicoflagelados fueron los menos abundantes. En cuanto a la concentración de clorofila-*a*, reportan máximos de clorofila al sur de la bahía.

Área de estudio

La Bahía de La Paz se ubica en el margen suroriental de la península de Baja California, entre los 24.15° y los 24.97° N y los 110.30° y los 110.75° W; es la cuenca más grande dentro del Golfo de California (Figura 1). Presenta una forma ovalada, con un eje menor de 33 km y un eje mayor de 81 km. Se comunica con el Golfo de California mediante dos bocas: Boca Grande, al noreste y el Canal de San Lorenzo, al sureste. El límite sureste de Boca Grande se encuentra en la Isla Roca Partida. La batimetría muestra una región profunda con un máximo de 420 m, sobre Cuenca Alfonso. Hacia el sur disminuye la profundidad gradualmente hasta llegar a una parte somera con una pendiente suave y playas extensas. El Canal de San Lorenzo tiene una profundidad de aproximadamente 20 m. Un rasgo importante es la presencia de un umbral batimétrico de alrededor de 250 m de profundidad a lo largo de Boca Grande, lo que aísla parcialmente a la bahía del golfo (Monreal-Gómez et al., 2001).

En esta región se presentan un clima semidesértico, con lluvias en verano, con una precipitación de 180 mm año⁻¹ y una evaporación de 300 mm año⁻¹. El máximo de precipitación se presenta en septiembre con 60 mm, mientras que en el resto del año la precipitación promedio mensual no excede los 20 mm (Jiménez-Illescas, 1996). En el interior de la bahía no se presenta aporte de agua continental, lo que genera una mayor salinidad en esta zona que en el resto del Golfo de California.

En la época de primavera y verano, se presenta un patrón de vientos proveniente del suroeste con baja intensidad (5 m s⁻¹), mientras que para la época de otoño e invierno, el patrón de vientos se modifica, proviniendo del noroeste con velocidades que van de los 8 m s⁻¹ a los 12 m s⁻¹ (Monreal-Gómez et al., 2001).

La dinámica de los vientos y el intercambio de agua entre el Golfo de California y la bahía, desempeñan un papel fundamental para la determinación de la estructura termohalina, permitiendo así, una variación estacional muy marcada en dicha estructura (Salinas-González et al., 2003). Esta característica que se presenta en la bahía, representa un rasgo importante para la producción primaria, ya que esta muestra una relación inversa a la estratificación de la columna de agua, dando como consecuencia una mayor producción en la época de otoño-inverno y una menor producción en primavera-verano (Reyes-Salinas et al., 2003; Cervantes-Duarte et al., 2005).

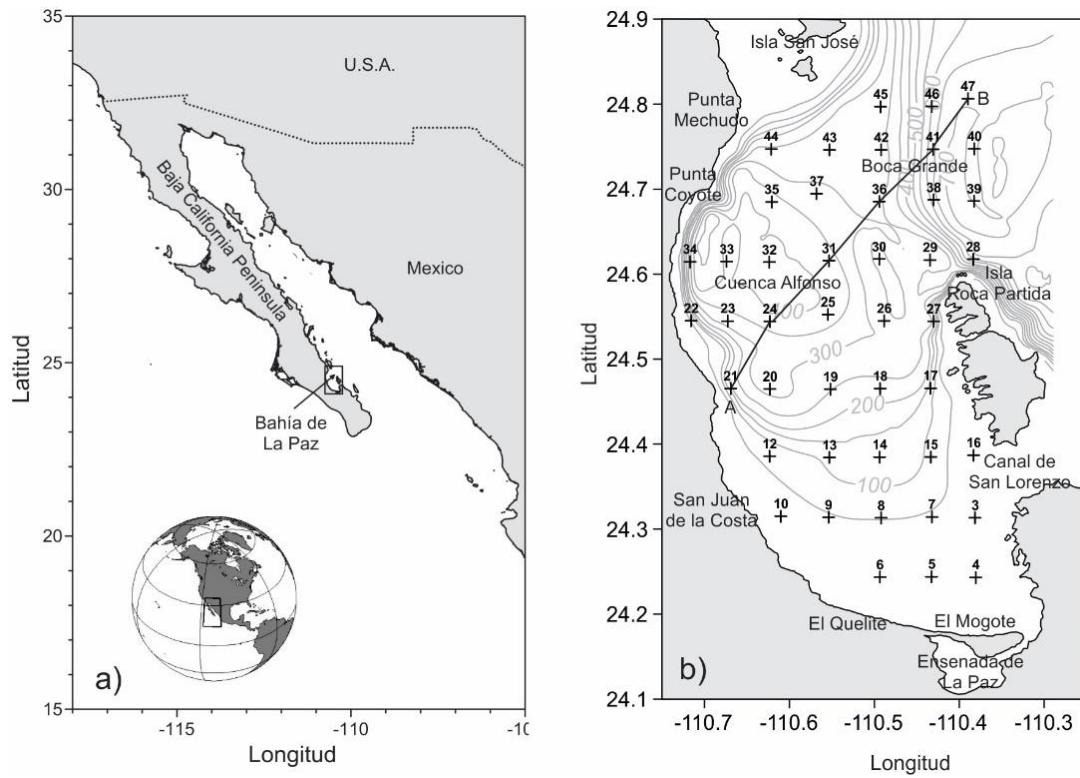


Figura 1. Área de estudio: Bahía de La Paz y estaciones de muestreo (+). Líneas en color gris representan la batimetría (m). La línea continua representa un transecto que cruza el giro.

Objetivos

General:

Determinar la distribución de la biomasa fitoplanctónica, expresada como concentración de clorofila-a, y su relación con la hidrografía en la Bahía de La Paz durante la época de verano.

Particulares

- Determinar la distribución de las masas de agua
- Determinar el patrón de corrientes en la bahía
- Determinar la relación entre la hidrografía y la biomasa fitoplanctónica

Hipótesis

La distribución de la biomasa fitoplanctónica, expresada como clorofila-a, presentará cambios espaciales respecto al efecto del patrón de circulación presente en la bahía.

Materiales y Métodos

Información de alta resolución fue obtenida durante la campaña oceanográfica “Paleomar III” realizada a bordo del B/O El Puma de la UNAM en la Bahía de La Paz durante el mes de agosto de 2017, en un total de 44 estaciones que cubren la totalidad de la bahía, así como la conexión con el Golfo de California (Figura 1).

Datos hidrográficos

Mediante la utilización de un CTD Seabird 19, se obtuvo el registro de la temperatura, presión y conductividad en cada una de las estaciones hidrográficas. Para analizar la dinámica oceanográfica en el área de estudio, la salinidad y densidad se calcularon a partir de la conductividad, de la temperatura y de la presión. Los datos fueron inicialmente procesados siguiendo las rutinas y subrutinas del fabricante, con ayuda del software SDE Data Processing v7.23.2. Con el objetivo de eliminar datos de mala calidad, los datos fueron filtrados, promediados a cada metro (1db) y finalmente derivados con la Thermodynamic Equation of SeaWater 2010 (TEOS-10).

El análisis de la distribución de las masas de agua se realizó a partir de un diagrama T-S, con base en el criterio de Lavín et al. (2009). Se analizó la distribución horizontal de temperatura, densidad y salinidad a diferentes profundidades. Para identificar la estructura vertical de la columna de agua, se realizaron perfiles verticales de temperatura, densidad y salinidad.

Para obtener el patrón de circulación de la bahía, se realizó el cálculo de las velocidades geostroficadas relativas al fondo mediante análisis estándar (Pond y Pickard, 1983). El patrón de corrientes obtenido, se comparó con la topografía de las isotermas en la cuales se identificó la termoclina.

Imágenes satelitales

Se obtuvieron imágenes satelitales de la temperatura de la superficie del mar (SST) y la clorofila-a para la fecha en la que se realizó el crucero de investigación. Las imágenes fueron obtenidas del espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS-AQUA, por sus siglas en inglés), el cual fue lanzado en 2002 y se encuentra aún en funcionamiento. Las imágenes disponibles se obtuvieron del navegador de datos de la

NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl>) para el día 5 de agosto de 2017. Las imágenes, con una resolución espacial de 1 km por pixel fueron procesadas de la siguiente manera: primero, utilizando el Nivel 2 (MODIS L2), se extrajeron los valores de ambas variables con el software SeaDAS versión 7.4 y algoritmos estándar. Con el objetivo de filtrar los datos de baja calidad, se aplicaron los filtros (flags/masks) LAND, CLDICE, HILT y STRAYLIGHT. LAND y CLDICE se aplica a todos los productos de MODIS L2. HILT se aplica cuando alguna de las bandas o detectores alcanza la saturación de luz, mientras que STRAYLIGHT se aplica para indicar la influencia del brillo de los píxeles adyacentes en el valor de reflectancia máxima (Pieri et al., 2015). Una vez obtenidos los valores limpios para cada variable, se generaron mapas con Matlab versión 2011 (Mathworks, Inc. 2011).

Determinación de clorofila-a

En el presente proyecto, la cuantificación de la biomasa fitoplanctónica se realizó a partir de dos métodos: 1) la extracción y análisis mediante espectrofotometría, y 2) por la adquisición de datos de fluorescencia mediante un sensor ECO-Wet Labs sujeto al CTD.

Para la extracción y análisis mediante espectrofotometría, la toma de muestras de agua a diferentes profundidades, se realizó con una roseta oceanográfica General Oceanics equipada con botellas Niskin con capacidad de 10 L. Inmediatamente después de la colecta, se obtuvieron submuestras de 3 L, las cuales fueron filtradas (presión menor 10 psi) a través de filtros de membrana de nitrocelulosa de 47 mm de diámetro con un tamaño de poro de 0,45 μm (Millipore Corp., Bedford, MA, USA). Inmediatamente después de la filtración, los filtros se almacenaron en tubos plásticos cubiertos con papel aluminio para evitar el efecto de la luz, los cuales se mantuvieron en congelación a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta su análisis en el laboratorio.

En el laboratorio, la extracción de la clorofila-a se realizó con acetona al 90% como solvente durante un periodo mayor a 12 h en condiciones de oscuridad, manteniendo las muestras en congelación a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, siguiendo los métodos de procesamiento y protocolos descritos en Parsons et al. (1984). La absorbancia, por triplicado, se midió a 750, 664, 647 y 630 nm en un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Scientific). Finalmente, los cálculos finales de la clorofila-a, expresada en mg/m^3 , se realizaron de acuerdo con Strickland y Parsons (1972).

A partir de las concentraciones obtenidas mediante la extracción de clorofila, se elaboraron mapas de distribución horizontal a diferentes profundidades para evaluar la distribución horizontal de la clorofila-a en la bahía.

Mediante la utilización del sensor de fluorescencia ECO-Wet Labs, el cual va equipado al CTD, se obtuvo el registro de la fluorescencia para cada una de las estaciones, con lo cual se realizaron perfiles verticales.

Resultados

Masas de agua

Con base en el criterio propuesto por Lavin et al. (2009), el diagrama T-S obtenido a partir de las mediciones de temperatura, conductividad y presión, mostró la presencia de tres masas de agua: el Agua Intermedia del Pacífico (AIP), el Agua Subtropical Subsuperficial (AStSss) y el Agua del Golfo de California (AGC), como masa de agua predominante. Cabe resaltar que el AIP se encontró en las estaciones que se localizan en la conexión con el Golfo de California (Figura 2). Las características termohalinas de las masas de agua observadas son las siguientes: AIP, $34.5 < S < 34.8$ y $4 \leq T \leq 9$ °C, el AStSss: $34.5 < S < 34.9$ y $9 \leq T \leq 18$ °C, mientras que el AGC: $S > 34.9$ y $T \geq 12$ °C.

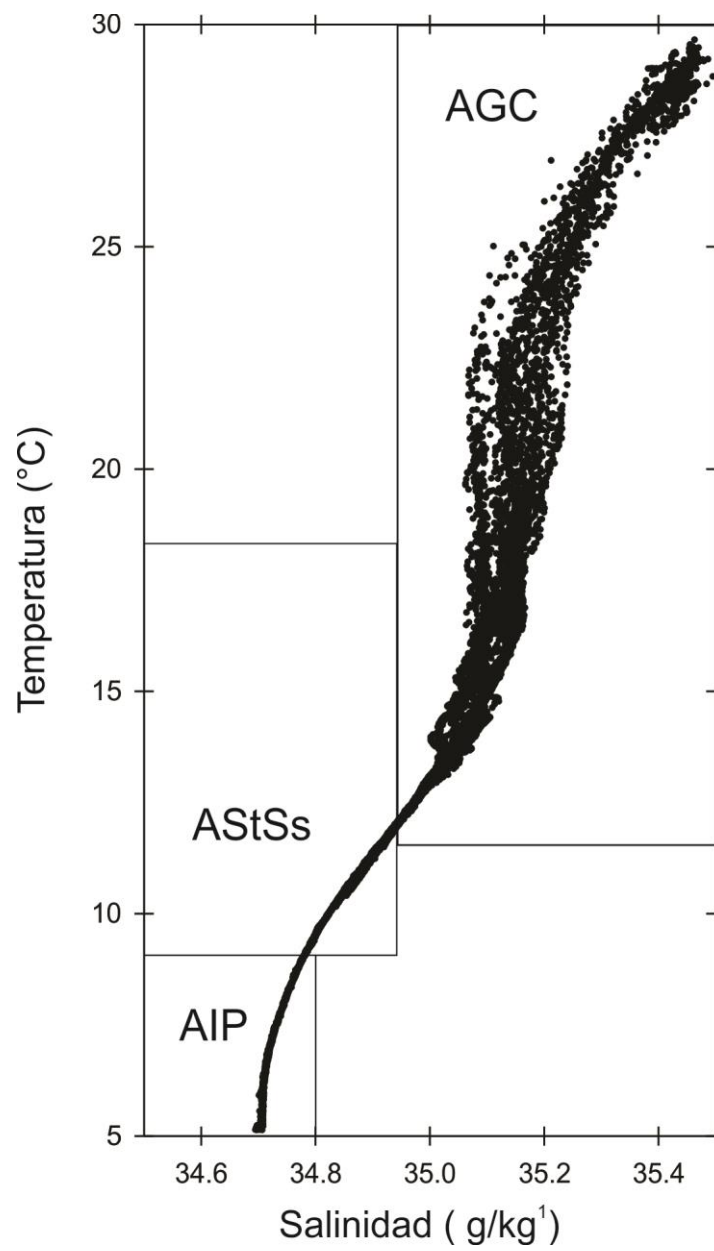


Figura 2. Diagrama T-S obtenido para la Bahía de la Paz durante el mes de agosto de 2017.

Distribución horizontal de temperatura, salinidad y densidad.

Temperatura

La distribución horizontal de la temperatura a diferentes profundidades se muestra en forma de isolíneas. En la capa superficial (2 m), la temperatura mostró una estabilidad a lo largo de toda la bahía con un valor de 29.05°C (Figura 3A). A los 10 m de profundidad, la temperatura mostró una variación con un intervalo que va de los 27.6 °C a los 28.6 °C, presentándose el valor más alto cercano a Isla Roca Partida, Boca Grande y el Canal de San Lorenzo, mientras que el valor más bajo se presentó cercano la costa y Cuenca Alfonso (Figura 3B). A 30 m (Figura 3C), se observó una disminución significativa de la temperatura con 21° C como mínima, presente en el centro de un núcleo frío cercano a Boca Grande, con 24°C como máxima en la periferia, dicho núcleo frío se presentó de igual manera a los 50 m (Figura 3D) con un valor mínimo de 18.4 °C en el centro, y un valor máximo de 20.4°C hacia la periferia. A los 100 m de profundidad (Figura 3E), la temperatura presentó una homogeneidad, tanto en el centro del núcleo como en la periferia, con un valor de 16.1°C. El núcleo frío observado cerca de Boca Grande, se puede asociar a la presencia de un vórtice ciclónico, ya que este tipo de estructuras provocan una disminución de temperatura en su centro, tal como se observa en la Figura 3 C-E.

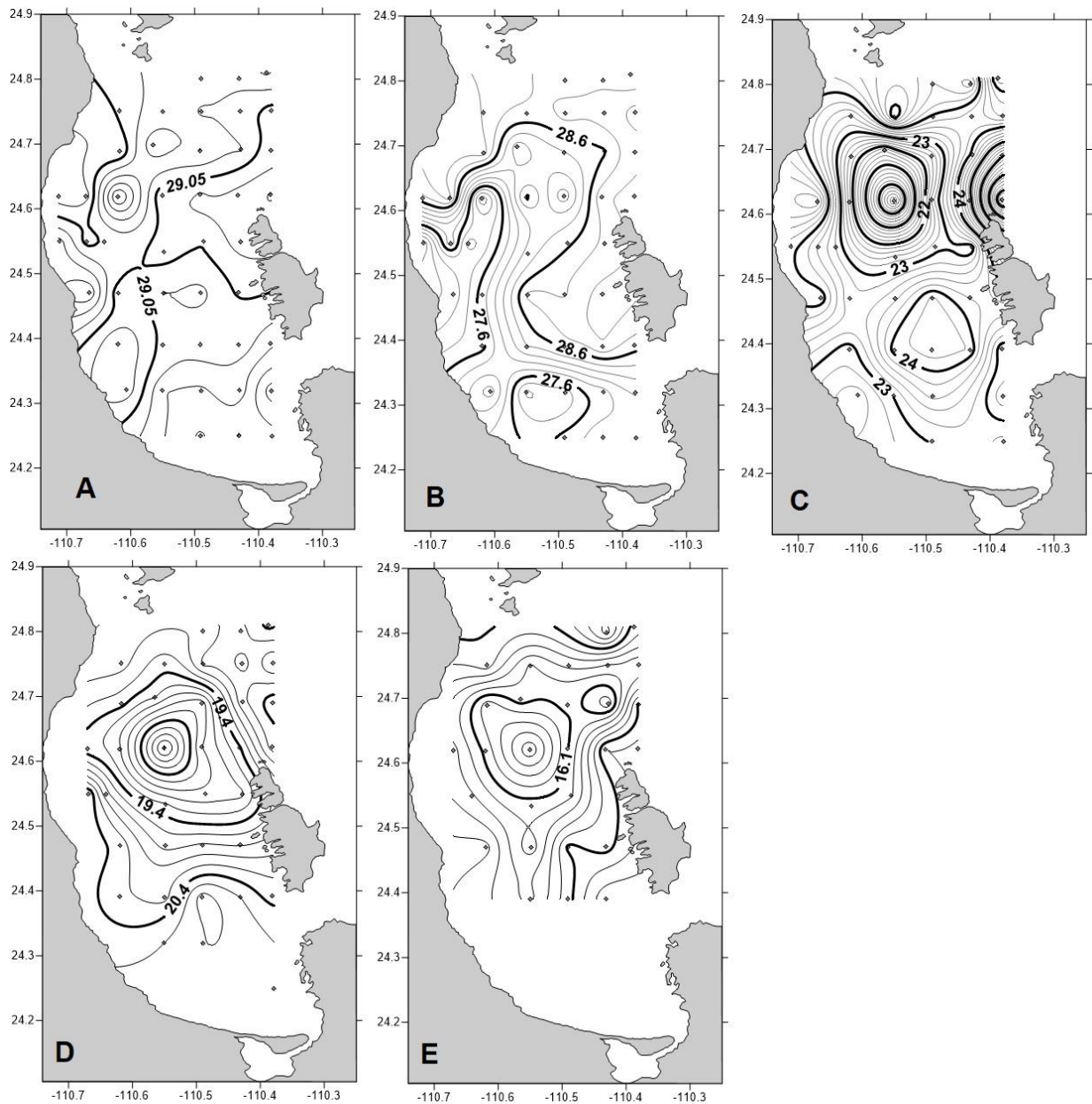


Figura 3. Distribución horizontal de la temperatura a diferentes profundidades: A) superficie, B) 10 m, C) 30 m D) 50 m, E) 100 m, en la Bahía de la Paz, durante el mes de agosto de 2017.

Salinidad

La distribución horizontal de la salinidad se representa con isolíneas a diferentes profundidades. En la capa superficial (2 m), se presentó una homogeneidad en toda la bahía con un valor de 35.435 g/kg (Figura 4A). A los 10 m, la salinidad presentó ligeras variaciones con un valor máximo de 35.41 g/kg cercano a Boca Grande, mientras que en la zona sur de la bahía se presentó el valor mínimo de 35.36 g/kg (Figura 4B). Para los 30 m, la salinidad fue homogénea en toda la bahía, presentando un valor de 35.18 g/kg, lo cual indica que la salinidad va disminuyendo conforme la profundidad (Figura 4C). A los 50 m, se presentó un valor mínimo de 35.12 g/kg cercano a Boca Grande, mientras que al suroeste de la bahía se registró un valor máximo de 35.17 g/kg (Figura 4D). Finalmente, a los 100 m la salinidad se observó de manera homogénea a lo largo de toda la bahía con un valor de 35.11 g/kg (Figura 4E).

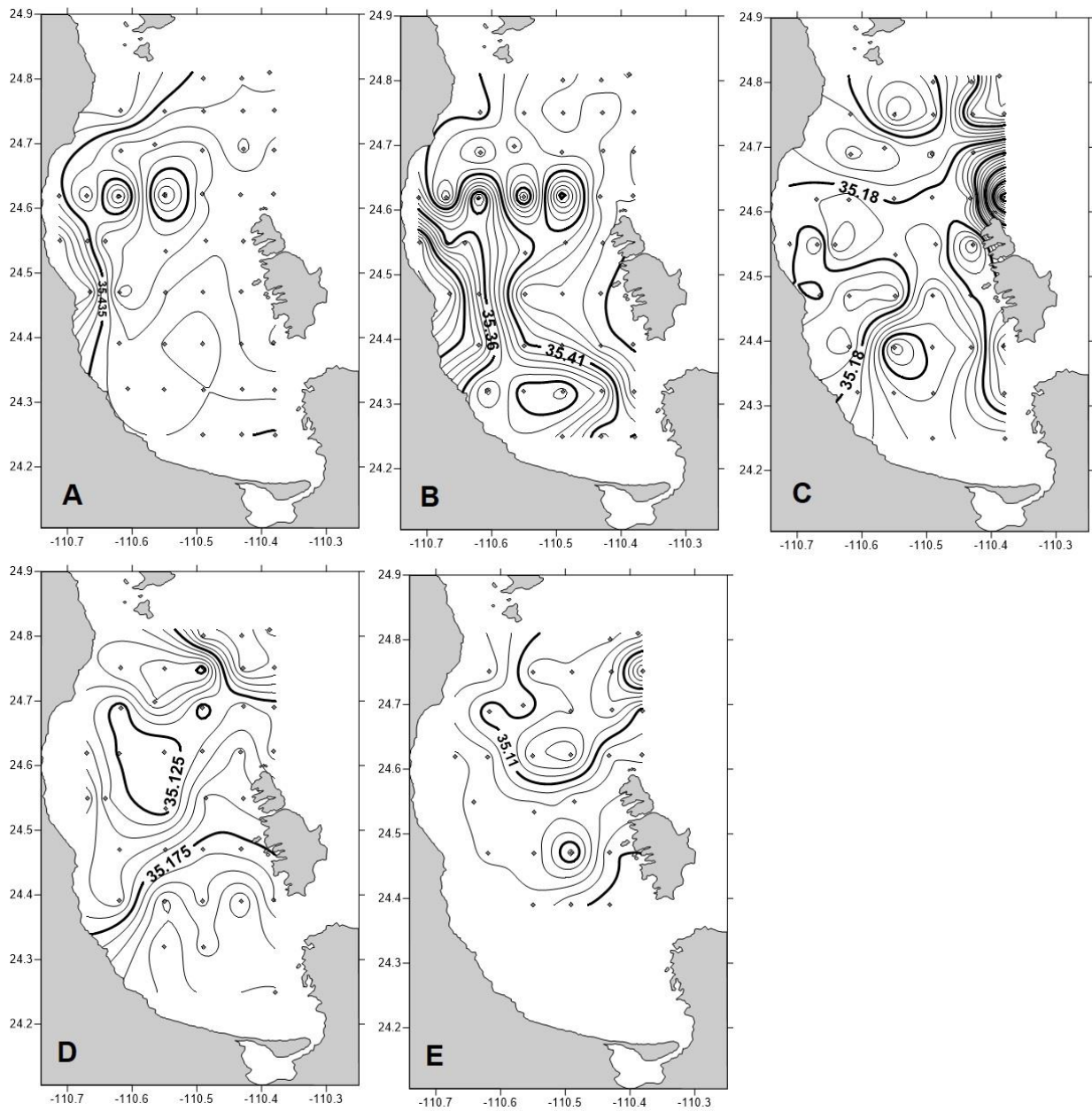


Figura 4. Distribución horizontal de la salinidad a diferentes profundidades (m): A) superficial, B) 10, C) 30, D) 50, E) 100, en la Bahía de la Paz en el mes de agosto de 2017.

Densidad

La distribución horizontal de la densidad está representada por isolíneas a diferentes profundidades tal como se observa en la Figura 5. En la superficie (2 m), se observó una homogeneidad en los valores de la densidad, con un valor de 22.32 kg/m^3 (Figura 5A). A los 10 m, la densidad presentó ligeras variaciones, 22.4 kg/m^3 como valor mínimo y 22.6 kg/m^3 como valor máximo, presentando los valores más bajos cerca de Boca Grande y cercanos a la costa (Figura 5B). A los 30 m, se registró un incremento en la densidad con 24.3 kg/m^3 como valor máximo, dicho valor se localiza cercano a Boca Grande y en el centro del giro ciclónico, mientras que en la periferia de este, se presentó un decremento de la densidad con un valor mínimo de 23.7 kg/m^3 (Figura 5C). A los 50 m de profundidad, la densidad incrementó, con un valor de 24.95 kg/m^3 en el centro del vórtice ciclónico, mientras que en la periferia se registró un ligero decremento con valor de 24.75 kg/m^3 (Figura 5D). A los 100 m, la densidad incrementó considerablemente, sin embargo, presentó una homogeneidad con un valor de 25.68 kg/m^3 (Figura 5E).

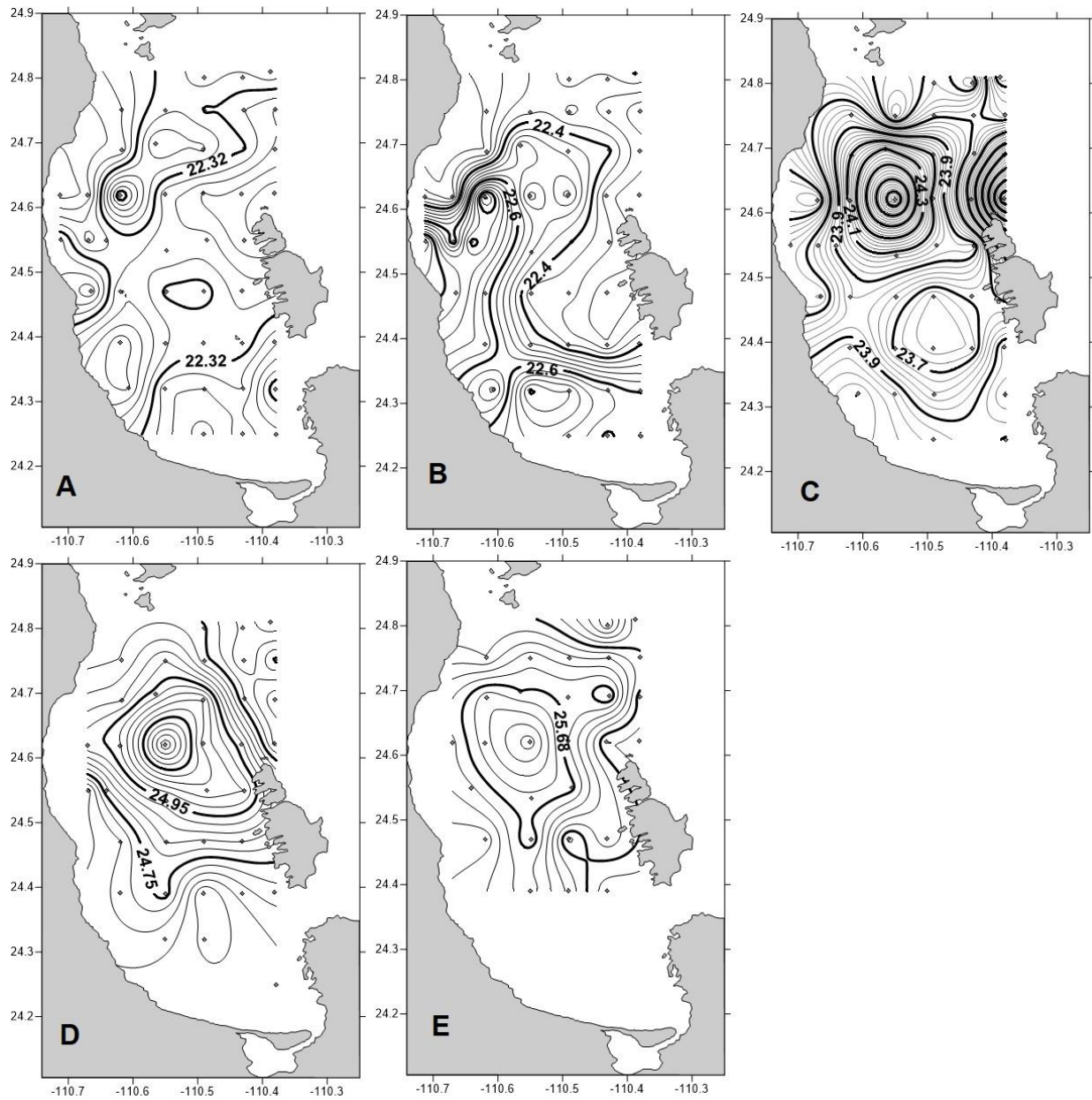


Figura 5. Distribución horizontal de la densidad a diferentes profundidades (m): A) Superficie, B) 10, C) 30, D) 50, E) 100, en la Bahía de la Paz en el mes de agosto de 2017.

Distribución horizontal de la isoterma de 20°C

La distribución horizontal de la isoterma de 20°C se representa por medio de isólinas (Figura 6). Se observó una distribución en el norte de la bahía en forma de domo, con influencia desde los 48 m de profundidad, hasta los 30 m, en coincidencia con la distribución horizontal de la temperatura mostrada en la Figura 3. Dicho domo cruzó por Boca Grande y Cuenca Alfonso, mientras que en la distribución vertical en el transecto A-B que cruza por el vórtice ciclónico identificado, se observa una elevación de la isoterma de 20°C desde los 75 m de profundidad hasta los primeros 25 m, abarcando las estaciones 21, 24, 31, 36, 41 y 47 (Figura 7a). La distribución de la densidad (Figura 7b) presentó un patrón similar en su distribución que la isoterma de 20°C, indicando la estrecha influencia de la temperatura sobre la densidad.

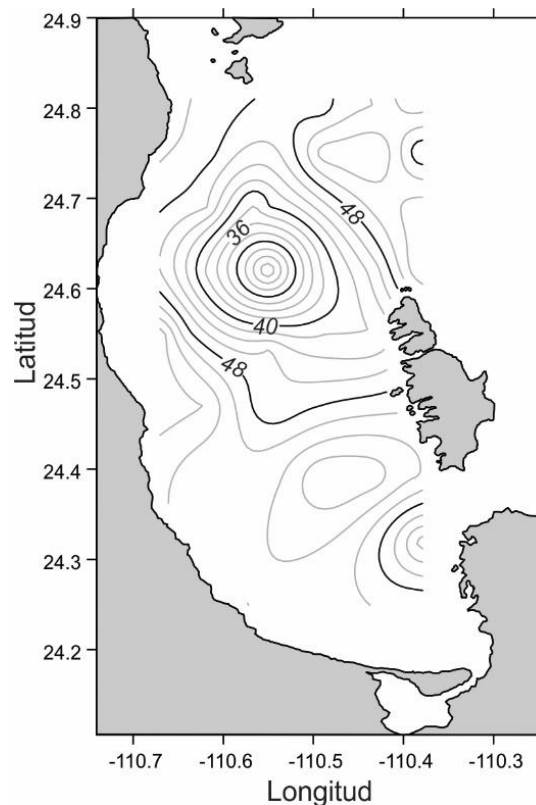


Figura 6. Distribución horizontal de la isoterma de 20°C, en la Bahía de la Paz, durante el mes de agosto de 2017.

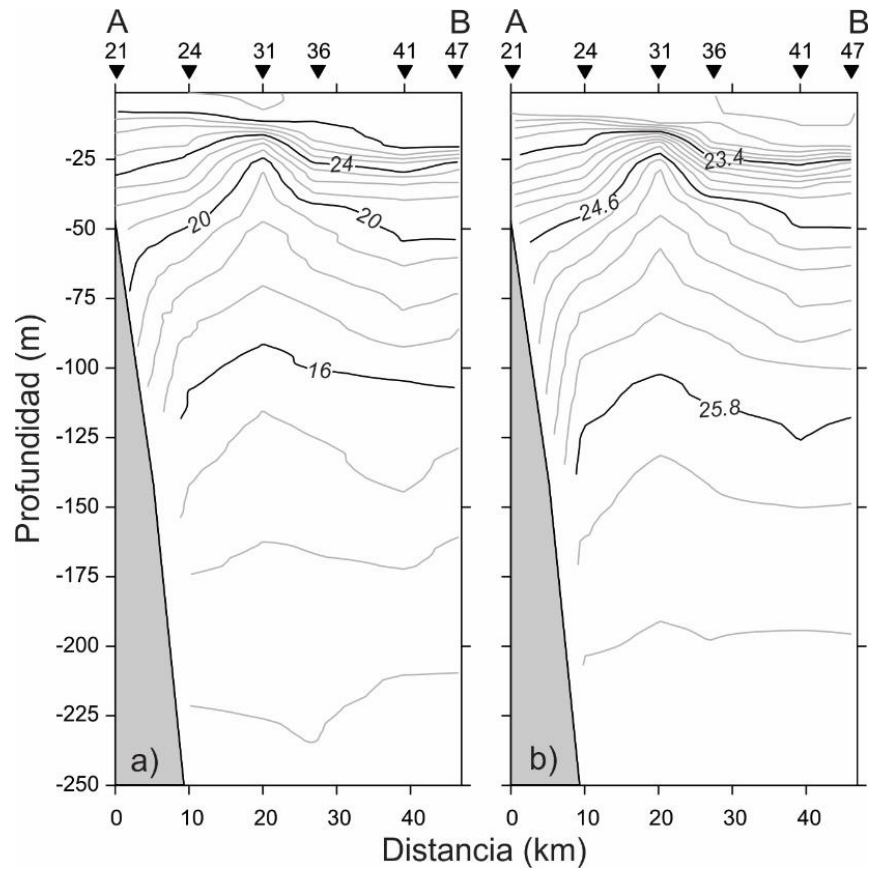


Figura 7. Distribución vertical de: a) temperatura y (b) densidad en el transecto A-B que cruza al vórtice ciclónico, en la Bahía de la Paz, durante el mes de agosto de 2017.

Corrientes geostróficas

El mapa de corrientes geostróficas calculadas a diferentes profundidades, mostró un patrón de circulación en contra de las manecillas del reloj, lo cual es indicativo de la presencia de un gran vórtice ciclónico, localizado al norte de la bahía entre 24.7 N, -110.5 W, cercano a la Cuenca Alfonso y Boca Grande (Figura 8). El vórtice localizado presentó una velocidad máxima de 1 m s^{-1} desde la superficie hasta 30 m de profundidad, debido a la fuerza que impone el viento, sin embargo la velocidad presenta una disminución conforme incrementa la profundidad debido a la poca o nula influencia del viento.

El vórtice se mostró bien definido desde la superficie hasta los 100 m, en forma de embudo, con una mayor amplitud desde la superficie hasta los 10 m de profundidad.

Además, se observó un flujo de salida de la bahía hacia el golfo, al norte de Isla Roca Partida, el cual fue evidente en las diferentes profundidades.

Cercano a isla Roca Partida (24.4 N, -110.4 W) se observó un pequeño patrón de circulación a favor de las manecillas del reloj, indicativo de un giro anticiclónico, sin embargo este giro solo presentó una influencia en los primeros 10 m de profundidad, con velocidades de 1 m s^{-1} (Figuras 8A y 8B).

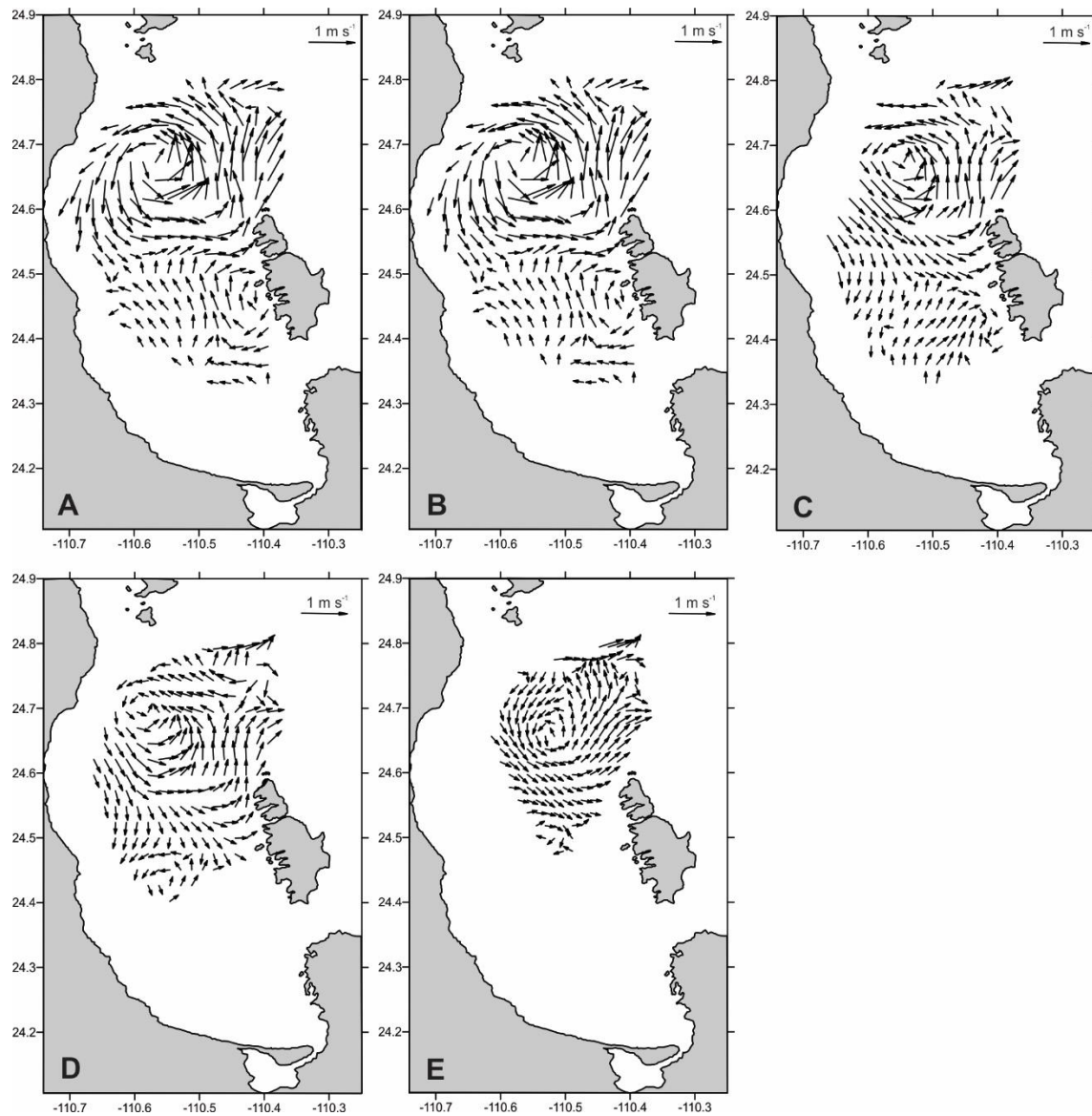


Figura 8. Mapa de corrientes geostroficas a diferentes profundidades (m): A) Superficie, B) 10 m, C) 30 m, D) 50 m, E) 100 m, en la Bahía de la Paz durante el mes de agosto de 2017.

Distribución horizontal de la clorofila-a

La distribución horizontal de clorofila-a, extraída y analizada espectrofotométricamente, se representa por medio de isolíneas. En la superficie (2 m), la clorofila-a presentó un valor máximo de 1.1 mg/m³ cercano a Boca Grande y Punta Mechudo, mientras que el valor mínimo, con una concentración de 0.6 mg/m³, se localizó en la parte centro de la bahía y al noreste de la misma (Figura 9A). A los 10 m, se observaron dos núcleos en forma de domo cercana a Isla Roca Partida, con una concentración alta, del orden de 1.6 mg/m³, seguido de 1.1 mg/m³ y en la periferia de estos, se registró una concentración de 0.6 mg/m³; cercano a Boca Grande se presentó un pequeño núcleo con una concentración de 0.6 mg/m³ (Figura 9B). A los 20 m de profundidad, se presentó un núcleo de concentración importante, con valor de 1.7 mg/m³ y en la periferia de este se observó una ligera disminución en la concentración con un valor de 1.2 mg/m³, dicho núcleo se localizó cercano a Boca Grande; en el centro de la bahía se presentan una concentración de 0.6 mg/m³, mientras que cercano a Isla Roca Partida se localizó otro núcleo con un comportamiento similar al de Boca Grande (Figura 9C). La distribución horizontal a los 30 m (Figura 9D), fue similar a la observada a los 20 m, con un valor máximo de 1.7 mg/m³ en la porción norte de la bahía y mínimos de 0.7 mg/m³ en dos regiones, uno cercano a la costa suroeste y otro cercano a la isla Roca Partida (Figura 9D). A los 50 m, los mayores valores de concentración de clorofila-a (1.7 y 1.2 mg/m³) se observaron próximos al norte de la bahía, en la región de la Boca Grande (Figura 9E), mientras que al suroeste, centro y la zona cercana a Isla Roca Partida, se presentaron las más bajas concentraciones de clorofila-a, con un valor de 0.7 mg/m³; sin embargo, en la parte sureste de la bahía se localizó un centro de alta concentración (>3 mg/m³).

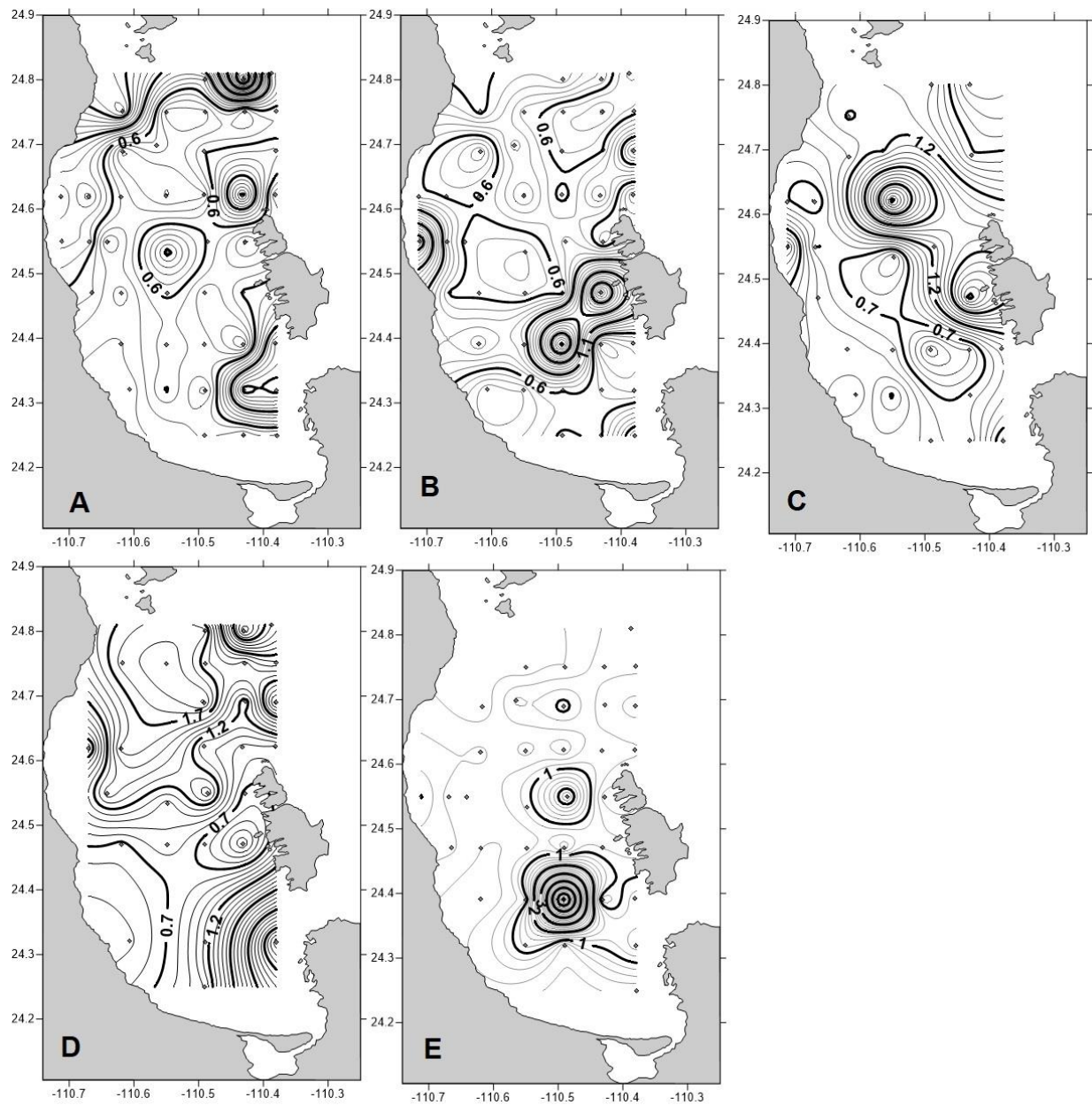


Figura 9. Distribución de clorofila-a a diferentes profundidades (m): A) Superficie, B) 10, C) 20, D) 30, E) 50 en la Bahía de la Paz durante el mes de agosto de 2017.

Imágenes satelitales de la temperatura superficial del mar (°C) y clorofila-a (mg/m³)

Las imágenes satelitales obtenidas para el periodo del crucero de investigación coincidieron con las mediciones *in-situ* realizadas. La distribución de temperatura superficial se observó en un intervalo entre 29 °C y 31 °C, con dos núcleos de menor temperatura, uno localizado en la porción central de la bahía que alcanza la conexión con el Golfo de California y otro núcleo de menor tamaño en la porción sur de la bahía, próximo al canal de San Lorenzo (Figura 10a). De la misma manera, la distribución de clorofila-a en la superficie, coincide con los valores obtenidos a partir de las mediciones *in-situ*, con valores que oscilan entre 0.1 y 1.2 mg/m³ (Figura 10b); su distribución horizontal mostró que las mayores concentraciones se localizaron cerca de la costa y en la porción norte de la bahía, en la Isla San José, sin embargo, se observaron máximos secundarios (~ 0.5 mg/m³) en la porción central de la bahía, asociados con el vórtice ciclónico presente al momento del muestreo.

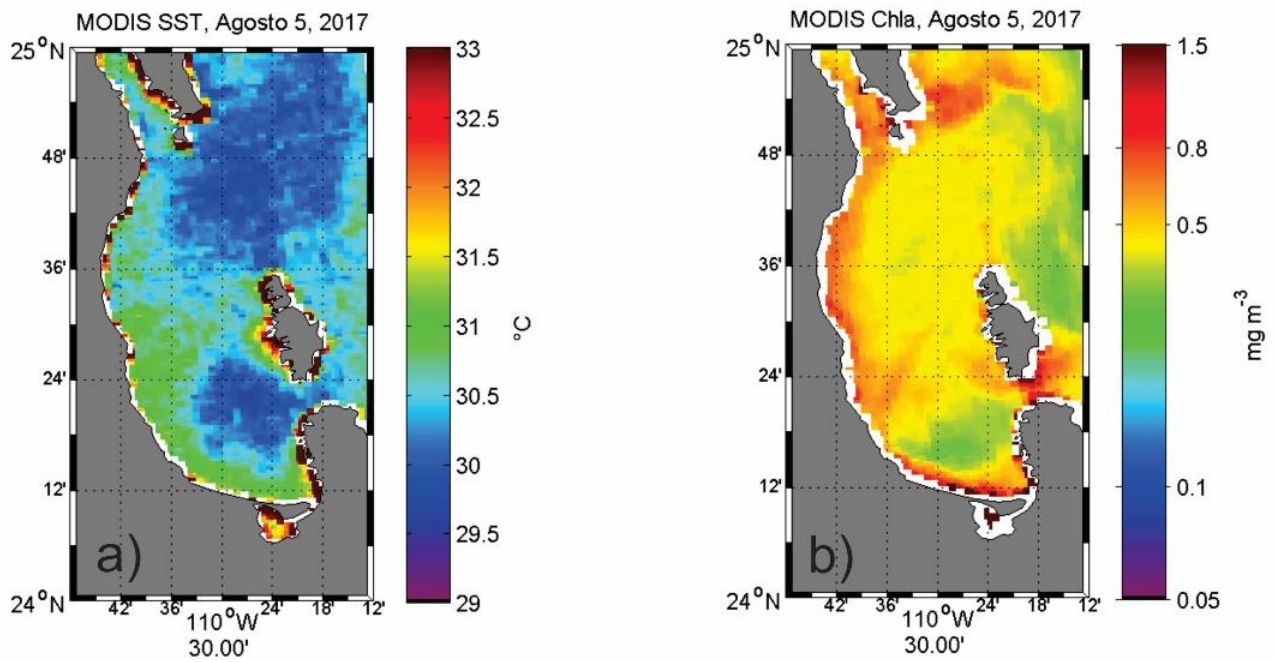


Figura 10. Imágenes satelitales obtenidas de MODIS-AQUA para el día 5 de agosto de 2017: a) Temperatura superficial del mar (SST, °C) y b) clorofila-a (mg m^{-3}).

Perfiles verticales

Con el objetivo de determinar la estructura vertical de la columna de agua y su relación con la biomasa fitoplanctónica en cada estación, se realizaron perfiles verticales de las variables físicas y la fluorescencia de la clorofila-a obtenida mediante el sensor sujeto al CTD.

Debido a que la zona de estudio presenta gradientes batimétricos intensos y por lo tanto las escalas de cada variable cambia, se dividieron las estaciones en tres grandes regiones: la porción sur, que incluye a las estaciones 3 a la 10; la porción central que incluye a las estaciones 12 a la 27, y la región norte, que incluye de la estación 28 a la 47. Cabe señalar que las escalas utilizadas son diferentes entre cada una de las tres regiones.

Región sur

Los perfiles verticales de la porción sur de la bahía, que incluyen las estaciones 3 a la 10 se muestran en la Figura 11. Todas las estaciones de esta región fueron someras, con una profundidad máxima de 60 m y en todo el grupo de estaciones de esta región, se observó una temperatura superficial de 28.5 °C, con una termoclina que osciló entre los 12 a los 20 m de profundidad. La distribución vertical de la densidad coincidió con la de temperatura, con una picnoclina presente entre los 12 y 20 m de profundidad. La distribución vertical de la clorofila-a mostró variaciones interesantes, con el máximo que alcanzó concentraciones importantes ($> 3 \text{ mg/m}^3$) a una profundidad por debajo de la termoclina y de la picnoclina. Debido a que son estaciones someras, el perfil de la salinidad fue homogéneo.

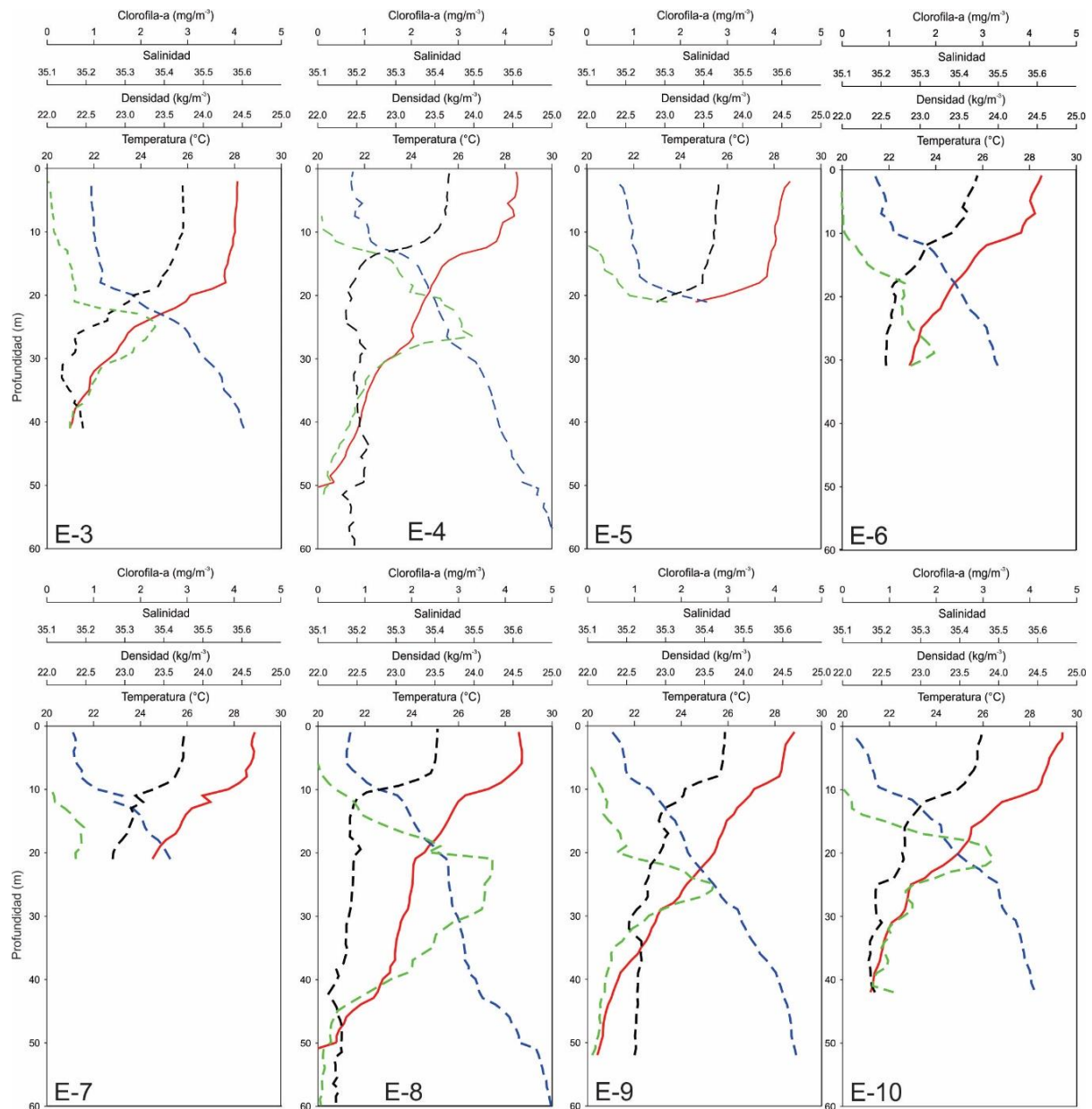


Figura 11. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m³) en la porción sur de la Bahía de La Paz durante el mes de agosto de 2017.

Región centro

Los perfiles verticales de la porción central de la bahía, que incluyen las estaciones 12 a la 27 se muestran en las Figuras 12 y 13. Todas las estaciones presentaron una profundidad máxima de 300 m; en esta región se observó una temperatura superficial que osciló de los 25 °C a los 25.5°C, con una termoclina alrededor de los 20 m. La densidad mostró una picnoclina alrededor de los 20 m, similares que la temperatura. La distribución vertical de la salinidad se observó de manera homogénea a lo largo de la columna de agua. La distribución vertical de la clorofila-a se encontró en los primeros 50 m de profundidad, con picos máximos entre los 20 m y 30 m, y concentraciones mayores a 3 mg/m³ los cuales se localizaron por debajo de la termoclina y picnoclina.

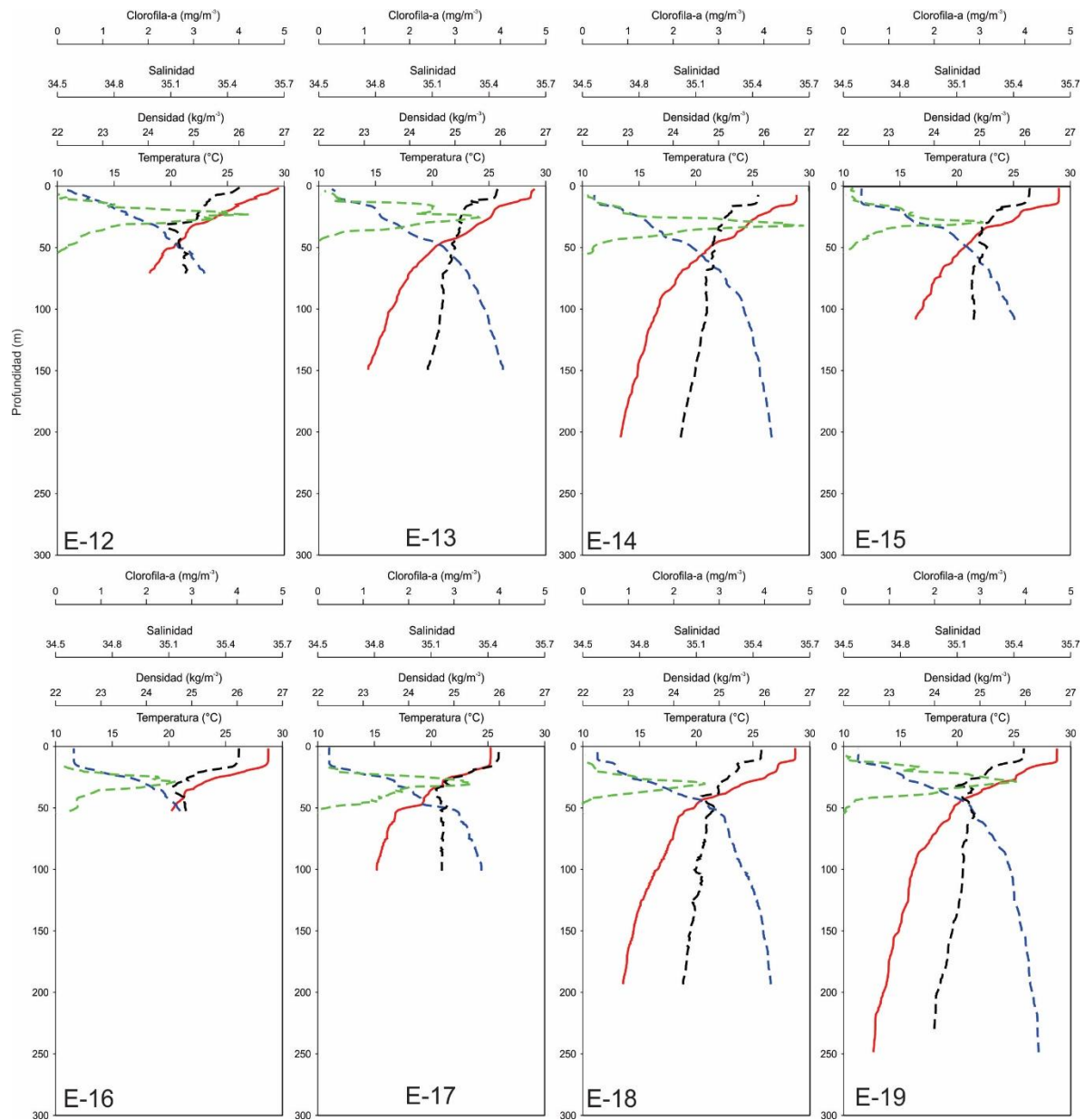


Figura 12. Perfiles verticales de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), densidad (kg/m^3), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m^3) en la porción central (E 12-19) de la Bahía de La Paz durante el mes de agosto de 2017.

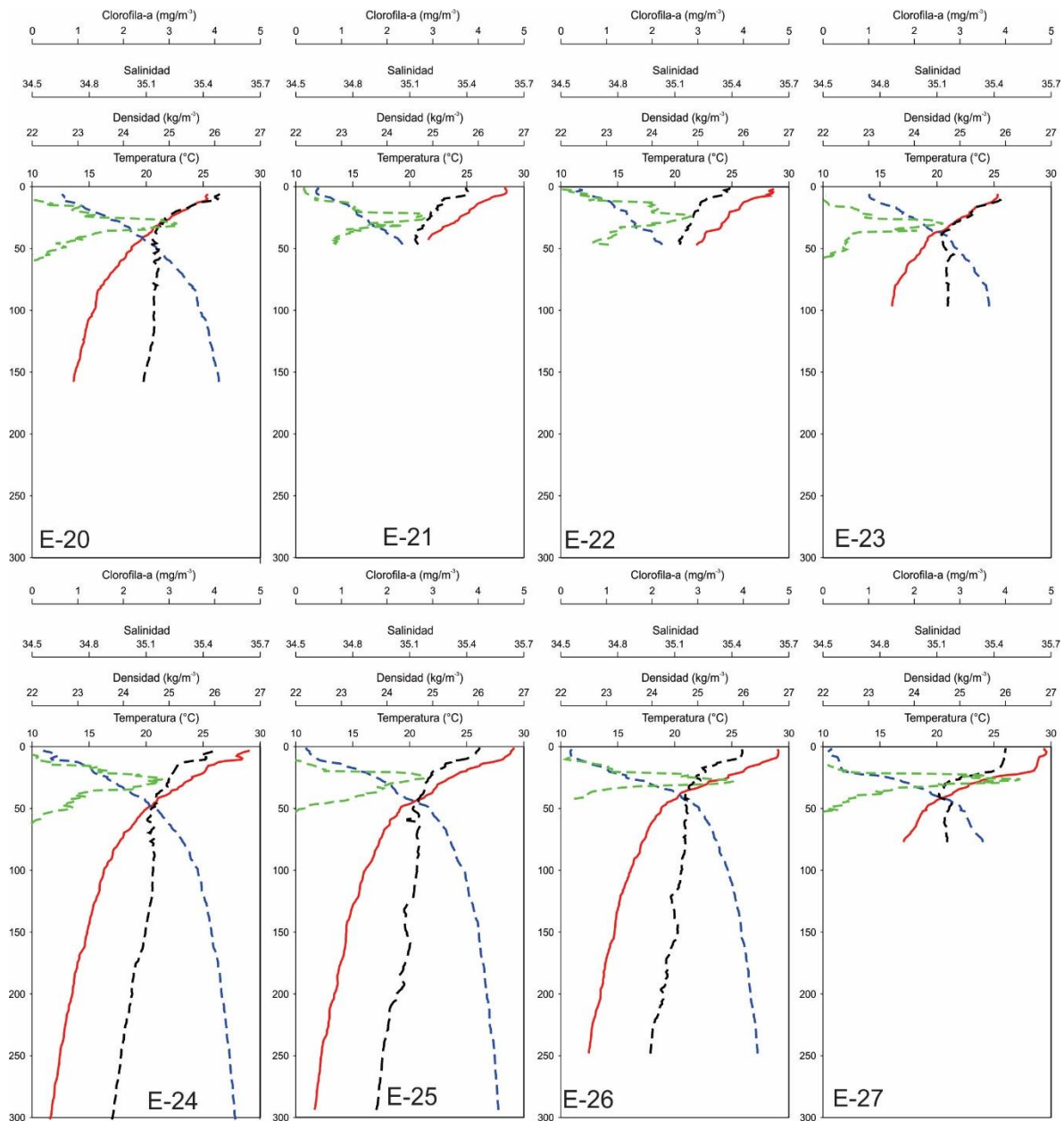


Figura 13. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m³) en la porción central (E 20-27) de la Bahía de La Paz durante el mes de agosto de 2017.

Región norte

Los perfiles verticales de la porción norte de la bahía, que incluyen las estaciones 28 a la 47 se muestran en la Figuras 14, 15 y 16. Todas las estaciones de esta región fueron profundas, con una máxima de 500 m. La temperatura superficial osciló entre los 28°C y 30°C, con una termoclina alrededor de los 20 m. La distribución vertical de la densidad fue homogénea en la superficie, con una pycnoclina alrededor de los 20 m, al igual que la temperatura, mientras que la salinidad se mantuvo homogénea. La distribución vertical de la clorofila-a se presentó en los primeros 50 m de profundidad, con picos máximos de concentración entre los 20 y 30 m, con altas concentraciones de clorofila-a mayores a los 3 mg/m³ en algunas estaciones (Estación 28, 30, 32, 35, 36, 38, 40, 41, 43, 44, 45, 46 y 47). La estación 31 no muestra valores de clorofila-a debido a fallas en la adquisición de datos por parte del equipo.

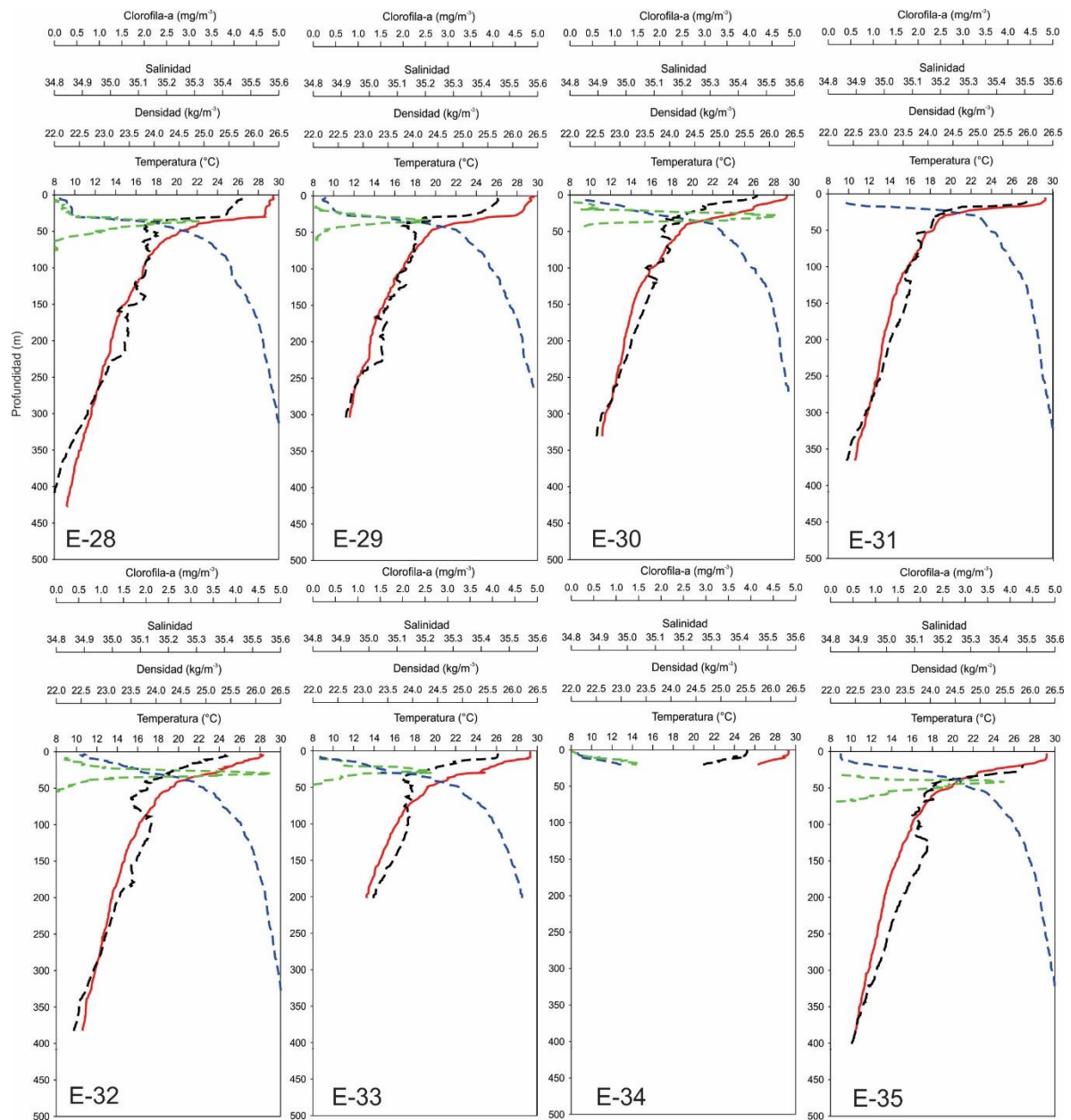


Figura 14. Perfiles verticales de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), densidad (kg/m^3), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m^3) en la porción norte (E 28-35) de la Bahía de La Paz durante el mes de agosto de 2017.

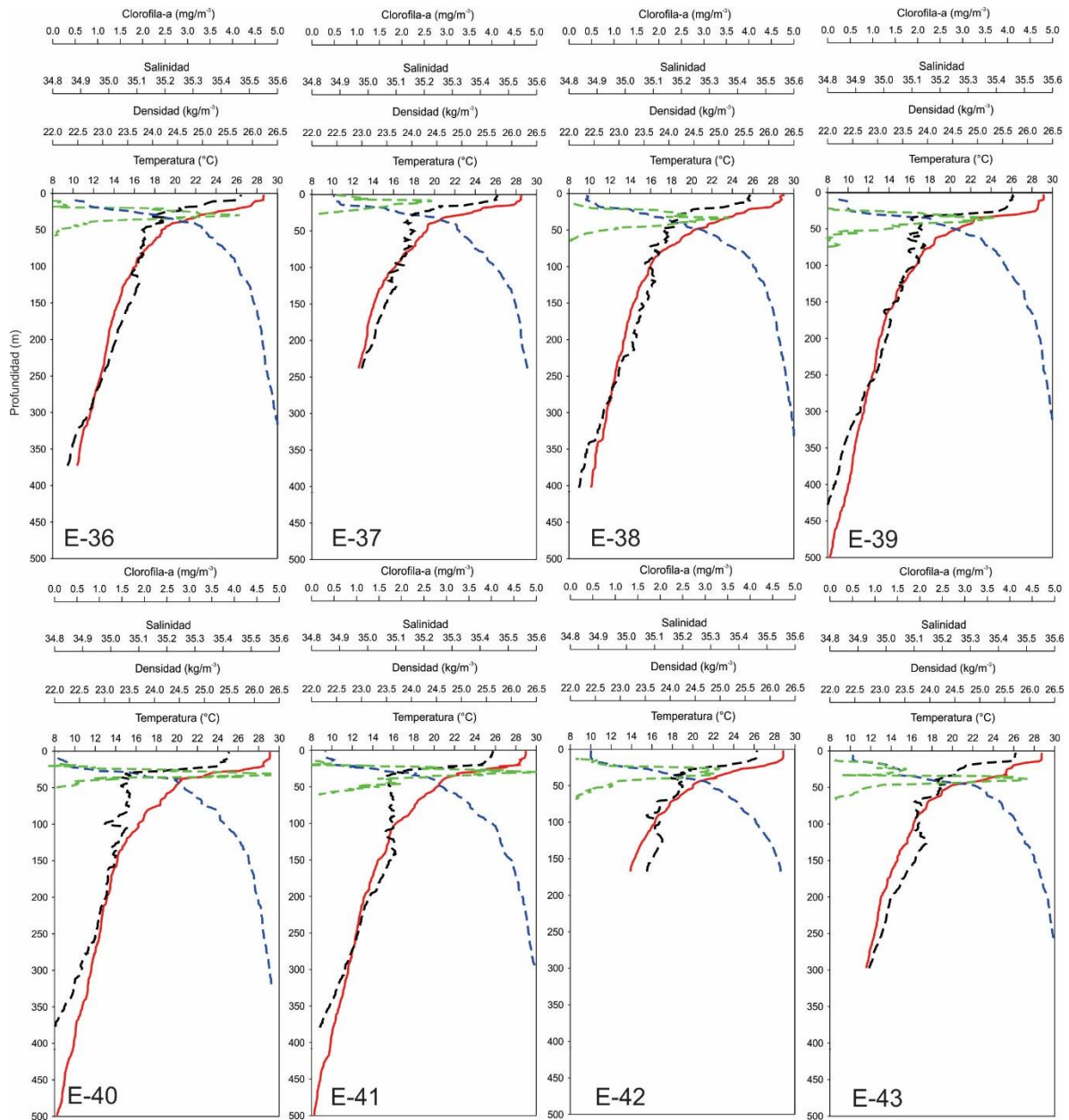


Figura 15. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m³) en la porción norte (E 36-43) de la Bahía de La Paz durante el mes de agosto de 2017.

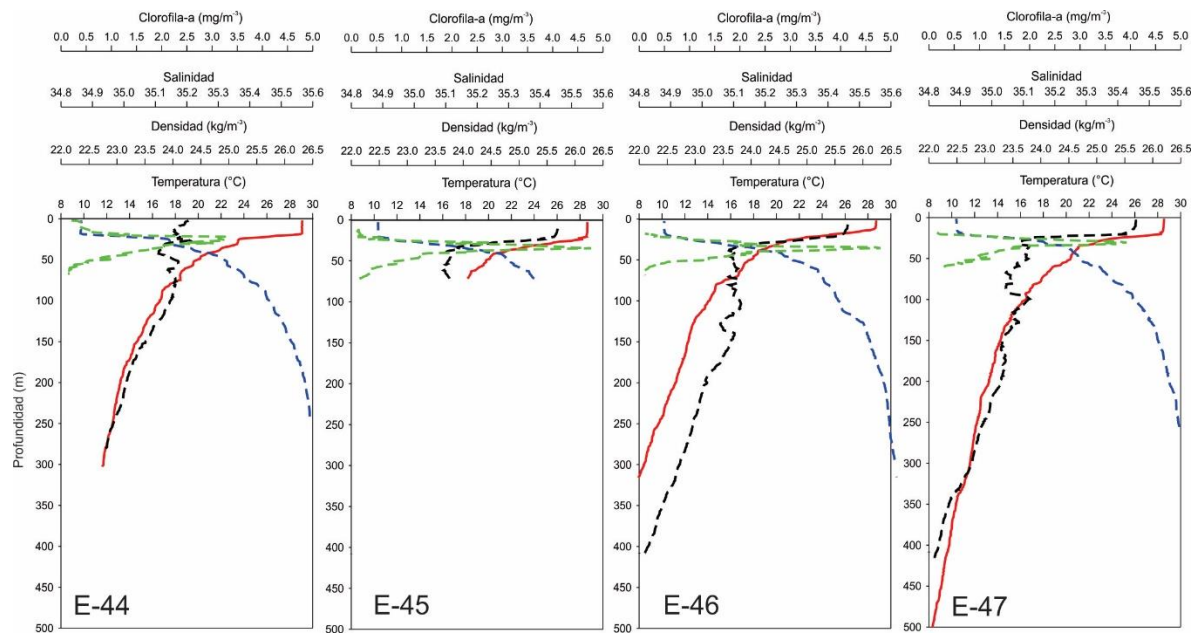


Figura 16. Perfiles verticales de temperatura (°C), densidad (kg/m³), salinidad y fluorescencia de clorofila (mg/m³) en la porción norte (E 44-47) de la Bahía de La Paz durante el mes de agosto de 2017.

Discusión

Durante el mes de agosto de 2017, en el interior de la Bahía de La Paz, se presentó una estratificación de la columna de agua, con una termoclina y piconclina alrededor de los 20 m de profundidad. De acuerdo con Cervantes-Duarte et al. (2005) en los meses de noviembre a febrero se presenta una columna de agua bien mezclada y en los meses de junio a septiembre se presenta una columna de agua estratificada, esto último concuerda con lo identificado para este estudio durante la misma época.

En la región sur de la bahía se presentó una temperatura superficial de 28.5°C, en la región central se identificó una temperatura entre 25°C y 25.5°C, mientras que en la región norte fue de 28°C a 30°C, en coincidencia con lo reportado por Durán-Campos et al. (2015) para la misma época. Estudios realizados en el interior de la bahía, reportan que el cambio en la temperatura superficial del agua es gradual a lo largo de todo el año, presentando las temperaturas mínimas en invierno y máximas en verano (De Silva-Dávila, 1997), con temperaturas máximas en el norte de la bahía debido a la influencia del Golfo de California.

Se identificó que la densidad incrementa con el aumento en la salinidad y disminución de la temperatura. Con los datos obtenidos en este estudio, se refleja que la temperatura presenta una mayor influencia en la densidad que la salinidad, lo cual se puede considerar como característico a la bahía.

El análisis de los datos hidrográficos mostró la presencia de un núcleo frío al norte de la bahía, cercano a Boca Grande, lo cual es indicativo de la presencia de un vórtice ciclónico, ya que estas estructuras presentan diferentes características y propiedades, tales como, disminución de la temperatura y bombeo de nutrientes, además de presentar núcleos fríos que contienen altas concentraciones de nutrientes, particularmente nitrato. Tales núcleos fríos son atribuibles a la elevación de las isotermas, dando como consecuencia un aumento en la producción primaria. En este estudio se logró identificar mediante la distribución de la isoterma de 20°C, que esta se eleva desde los 70 m de profundidad hasta los 25 m, en coincidencia con la base de la termoclina (McGillicuddy et al., 1998; Vaillancourt et al., 2003; Chelton et al, 2007).

La distribución de las masas de agua en el Golfo de California, así como dentro de la bahía de La Paz, es muy cambiante, debido a la comunicación con el Océano Pacífico, lo que provoca la entrada de aguas superficiales con características muy similares, así como el patrón regional de vientos que afecta significativamente la distribución de las masas de agua (Castro et al., 2000; Lavín y Marinone, 2003; Coria-Monter et al., 2017).

Durante agosto de 2017, se identificó la presencia de tres masas de agua (AIP, AStSs, AGC) dentro de la bahía, siendo el Agua del Golfo de California la masa de agua predominante y su presencia al interior de la bahía está determinada por dos mecanismos: 1) la formación dentro de la bahía, debido al incremento en las concentraciones de la salinidad del Agua Ecuatorial Superficial (AES, ahora renombrada como Agua Tropical Superficial (ATS) por Lavín et al., 2009) durante el verano, como consecuencia de la alta evaporación, aunado a la baja en la temperatura del agua que se presenta en invierno, y 2) a su ingreso a través del norte de la bahía, en particular por la Boca Grande. Debido a la alta evaporación que se presenta en la bahía durante verano, la AGC es resultado de la evaporación y el incremento de la salinidad (Monreal-Gómez et al., 2001).

Por otra parte, la presencia de la AStSs dentro de la bahía, está relacionada con los vientos del sur, los cuales favorecen el ingreso de esta masa de agua al Golfo de California, permitiendo así el ingreso a la bahía a través de Boca Grande, siendo esta región, el sitio donde ocurre el intercambio de masas de agua entre la bahía y el Golfo de California (Monreal-Gómez et al., 2001; Coria-Monter et al., 2017). Mientras que el Agua Intermedia del Pacífico se encuentra presente a largo de todo el año dentro del Golfo de California (Lavín et al., 2009). Este patrón de masas de agua concuerda con lo reportado por Ruvalcaba-Aroche et al. (2018) para la misma época, en el sur del Golfo de California, presentando una masa de agua adicional perteneciente a la corriente de California, mientras que en el interior de la bahía estudios recientes muestran un patrón similar de masas de agua al reportado en este estudio (Coria-Monter et al., 2019).

El patrón de corrientes geostróficas indicó la presencia de un vórtice ciclónico (vórtice de mesoescala) localizado al norte de la bahía, con velocidades máximas de 1 m s^{-1} . Coria-Monter et al. (2017) identificaron un vórtice ciclónico al norte de la bahía en las proximidades de Boca Grande con velocidades de 0.5 m s^{-1} . También, se han identificado estructuras con velocidades de 1 m s^{-1} en frentes entre un vórtice ciclónico y un anticiclónico en el sur del mar de China (Liang et al., 2018). Estudios más recientes han mostrado dipolos (vórtice ciclónico y anticiclónico) en el interior de la bahía, en los cuales se han identificado velocidades de hasta 0.4 m s^{-1} para el vórtice ciclónico (Durán-Campos et al., 2019). Diversos estudios han identificado este tipo de estructuras en el norte de la Bahía de La Paz, no solo para el verano, sino también para las diferentes épocas, postulando diferentes mecanismos para formación de este tipo de vórtices, los cuales involucran el patrón de vientos en la bahía, el cual, como se mencionó anteriormente, presenta cambios estacionales muy marcados, con vientos provenientes del noroeste durante el invierno y del

sureste en el verano. También, se ha discutido que la generación de este vórtice se encuentra relacionada con la interacción de las corrientes y la topografía del fondo, así como al intercambio de agua que se presenta entre la bahía y el Golfo de California (Monreal-Gómez et al., 2001; Sánchez-Velazco et al., 2004; Martínez-Mérida, 2013).

Los vórtices de mesoescala tienen un papel fundamental en la circulación oceánica debido a que transportan materia y energía, lo cual repercute en los ciclos biogeoquímicos que se desarrollan en el océano. (Gaeta et al., 1999; McGillicuddy et al., 2007). La dinámica de los vórtices de mesoescala puede influir directamente en la biomasa fitoplanctónica, la cual es generalmente expresada como concentración de clorofila-*a*, además de influir en la composición y distribución de las comunidades planctónicas. Diversos factores puede influir en la dinámica biológica que se presenta en los vórtices y como estos varían en el tiempo, tales como, la zona de origen del vórtice, su polaridad (cyclónica o anticiclónica), el estado en que se encuentren, edad, y las interacción que pueden tener con la diferentes masas de agua adyacentes que modifican su dinámica y su efecto en las comunidades planctónicas (Bakun, 2006). Además, los vórtices ciclónicos generan una mayor productividad primaria, tal como se muestra en este estudio, ya que en zonas cercanas al vórtice ciclónico se presento una mayor concentración de clorofila-*a*, permitiendo una mayor cantidad de alimento y transferencia de energía a los depredadores, en comparación con zonas donde no se presenta este tipo de estructuras (Kai y Marsac, 2010; Mahadevan et al., 2012; Gaube et al., 2014; Condie y Condie, 2016).

Diversos estudios han identificado vórtices ciclónicos en el sur del Golfo de California, particularmente en la Bahía de la Paz, postulándose que estas estructuras son un mecanismo que influye en procesos biológicos, principalmente en la producción primaria, en este estudios, se observó la presencia de un vórtice ciclónico en donde se presentó mayor biomasa fitoplanctonica, expresada en clorofila-*a* (Monreal-Gómez et al., 2001; Coria-Monter et al., 2014).

En el presente trabajo, la distribución horizontal de clorofila-*a* mostró concentraciones máximas de 1.7 mg/m³ entre los 20 y 30 m de profundidad, localizadas en la periferia del vórtice ciclónico identificado en las proximidades de Boca Grande, debido a que en aguas estratificadas, los vórtices ciclónicos producen una elevación de nutrimentos proveniente de aguas subsuperficiales hacia la zona eufótica (McGillicuddy y Robinson, 1997; Zhang et al., 2014), lo cual permite explicar las altas concentraciones de clorofila asociadas al vórtice ciclónico. La advección horizontal de agua, causada por la rotación y dirección de propagación del vórtice, ha sido uno los mecanismos dominantes para explicar la presencia de fitoplancton en las periferias de los mismos, lo que influye directamente en las

concentraciones de clorofila en la periferia de dichas estructuras (Chelton et al., 2011). Además, algunos estudios han indicado que las concentraciones de fitoplancton en las periferias de los vórtices ciclónicos está determinado por la vorticidad relativa presente en los vórtices ciclónicos (Kahru et al., 2007).

Las concentraciones más altas de clorofila-a en lo largo de la columna de agua, se presentaron en la región norte de la bahía con valores máximos de 4.5 mg/m^3 , siendo esta región la de mayor profundidad. Los picos más elevados de clorofila-a se observaron por debajo de la termoclina y picnoclina (aproximadamente 20 m de profundidad). En esta zona norte se ubica el vórtice ciclónico identificado, permitiendo que en esta zona se presenten altas concentraciones de clorofila-a. De acuerdo con Coria-Monter et al. (2017), se forma un máximo de clorofila-a asociado a la termoclina y nutriclina, a una profundidad de 15 m, concordando con lo identificado en este estudio. La termoclina ha sido considerada como una barrera física importante en el océano, separando la capa de mezcla y las capas de agua más profunda, pero también ha sido considerada como una zona de altas concentraciones de clorofila (Sharples et al., 2001). Sin embargo, la profundidad de la termoclina varía dependiendo de la interacción de patrón de circulación y con la profundidad, lo que origina un el levantamiento de las isotermas sobre la plataforma continental, en función de la profundidad (Walsh et al., 2003).

Las altas concentraciones de clorofila (máximos de 4.5 mg/m^3), asociados a la termoclina y picnoclina identificados en este estudio (máximos de 4.5 mg/m^3), están estrechamente relacionadas con una nutriclina, la cual a su vez está vinculada con ambientes costeros, especialmente en el Pacífico Tropical (Pennington et al., 2006). Sin embargo, también se han asociado los máximos de clorofila-a con agregaciones de fitoplancton en la picnoclina, dado que, el flujo vertical de nutrientes presente durante las diferentes etapas de vida del vórtice ciclónico se producen principalmente a lo largo de los gradientes isopícnicos (Huggett, 2014), aunado al efecto de hundimiento de ciertas células dependientes de nutrientes, pero principalmente, los máximos de clorofila-a están asociados a la nutriclina (Sharples et al., 2001; Cullen, 2015).

En la región central de la bahía los valores máximos de clorofila-a (3.5 mg/m^3) se presentaron en la periferia del vórtice ciclónico por debajo de la termoclina y picnoclina, ya que este tipo de estructura ciclónica origina un bombeo de nutrientes, lo que permite que se presenten concentraciones altas en la periferia de estos (Falkowski et al., 1991; Jenkins, 1988; Siegel et al., 1999). Los vórtices ciclónicos se han asociado con el levantamiento de la termoclina estacional y el afloramiento de masas de agua profundas y ricas en nutrientes hacia la superficie, provocando el crecimiento del fitoplancton y por ende de la producción

primaria (Lin et al., 2014). Diversos estudios han identificado altas concentraciones de biomasa fitoplanctónica asociada a la periferia de los vórtices ciclónicos, así como en las proximidades de los núcleos fríos de los mismos (Hassler et al., 2011; Coria-Monter et al., 2014). Estudios recientes para la época de verano (Durán-Campos et al., 2019) muestran un compartimento similar a este estudio, presentando los máximos de clorofila-a asociados a la termoclina y picnoclina con profundidades de entre 20 y 40 m.

En la Bahía de la Paz se han identificado, para la época de verano, una zonación en la distribución vertical de la clorofila-a, con dos regiones principales: una zona en la cual se muestran picos máximos de clorofila-a con relación con el fondo que incluye a la zona costera de la bahía y la región sur, y otra zona abarca el centro y norte de la bahía, en la cual los máximos de clorofila-a se asocian con la termoclina y picnoclina (Durán-Campos et al., 2019). Esta última zona concuerda con lo identificado en este estudio, ya que los máximos de clorofila-a se distribuyen por debajo de la termoclina y picnoclina presentes en el parte norte de la bahía.

Por otra parte, las concentraciones más bajas de clorofila-a (0.6 mg/m^3) se localizaron al centro de la bahía, región en la cual el vórtice ciclónico observado no tiene influencia sobre la fertilización de las aguas, dando como resultado las bajas concentraciones en comparación con la zona influencia por vórtice ciclónico.

A pesar que en este estudio no se trabajó con organismos del zooplancton, se puede inferir al observar la distribución y las zonas de mayor concentración de clorofila-a aquí reportados, ciertos organismos herbívoros, tales como, copépodos calanoides, salpas, doloideos, entre otros, se encuentran asociados a estas zonas de mayor concentración de clorofila-a, respondiendo a mecanismos bottom-up, esto debido al efecto que el vórtice ciclónico género en el fitoplancton (Heath et al., 2014; Durán-Campos et al., 2019).

La presencia de agregaciones de fitoplancton en la columna de agua, ha sido explicada por diferentes mecanismos que incluyen los procesos de adaptaciones del fitoplancton a permanecer en una determinada profundidad asociada con la termoclina y nutriclina, como resultado de una alta densidad celular, además de poder permanecer en las zona eufótica, así como los procesos físicos que se desarrollan en la columna de agua (Cullen, 2015; Durán-Campos et al., 2019). Además de estar relacionado con las concentraciones de nutrientes, particularmente nitratos y silicatos, tal como se muestra en Coria-Monter et al. (2014) para la misma época de este estudio.

Uno de los factores determinantes de las altas concentraciones de clorofila-a para este estudio fueron las temperaturas bajas, resultado de la influencia del vórtice ciclónico reportado. Sin embargo, la concentración de nutrientes aporta información fundamental

para entender las concentraciones de clorofila-*a*. A pesar de que para este estudio no se obtuvieron muestras para el análisis de nutrimentos, estudios realizados en el sur del Golfo de California y la Bahía de La Paz, sugieren que el sur del Golfo de California es un depósito importante de evaporitas, lo que permite la presencia de altas concentraciones de nutrimentos por debajo de los 50 m de profundidad, mientras que las concentraciones de fosfatos y nitratos dentro de la bahía puede estar asociadas al intercambio de agua entre el golfo y la bahía, ya que en la época de verano se presenta una gran entrada de agua a través de Boca Grande (Álvarez- Borrego y Chee-Barragán, 1976; Bustos- Serrano y Castro-Valdez, 2006).

Estudios realizados en la época de verano dentro de la bahía (Mojica-Ramírez, 2008) indican la presencia de altas concentraciones de nitratos, fosfatos y silicatos entre los 10 y 30 m de profundidad asociado a un vórtice ciclónico. Para la misma época, Coria-Monter, et al. (2017) identificaron una nutriclina entre los 10 y 20 m de profundidad, identificando el transporte de los nutrimentos provenientes de aguas subsuperficiales, debido a la presencia de un vórtice ciclónico; estos autores identificaron altas concentraciones nitrato de entre 2 y 16 μM a los 20 m de profundidad. La nutriclina identificada en ambos estudios, ayudan a asociar los máximos de clorofila-*a* reportado en este estudio, ya que se identificó máximos de clorofila-*a* alrededor de los 20 m, permitiendo entender que el fitoplancton se distribuye mayormente en esta profundidad.

Tanto la luz y los nutrimentos juegan un papel importante en la distribución vertical del fitoplancton (De Oliveira-Carvalho et al., 2019), lo que permite comprender que las mayores concentraciones de clorofila-*a* se presentan a una profundidad somera (20 m de profundidad), ya que existe un aporte importante de nutrimentos gracias a la presencia del vórtice y la cantidad de luz que se presenta a esta profundidad, permite que los organismos fotosintéticos se distribuyan preferentemente a esta profundidad.

En estudios de modelación en la costa este de Australia, han caracterizado en los vórtices ciclónicos altas concentraciones de clorofila-*a* y tallas grandes en el fitoplancton, esto debido a capas de mezcla someras, en comparación con los vórtices anticiclónicos (Laiolo et al., 2016).

Las imágenes satelitales han sido una clave fundamental para el estudio del impacto que los vórtices ciclónicos y anticiclónicos producen en la superficie del mar. Diversos estudios ha recurrido al estudios de estas estructuras mediante imágenes satelitales por medio de la temperatura y la concentración de clorofila-*a* en la superficie del mar (Chaigneau et al., 2008; Leterme y Pingree, 2008; McGillicuddy, 2016).

De acuerdo con las imágenes satelitales obtenidas para agosto de 2017, se observó la presencia de dos núcleos fríos, corroborando lo obtenido a partir de las mediciones *in-situ*, lo que permitió identificar el vórtice ciclónico al norte de la bahía para esta época. De acuerdo con Durán-Campos et al. (2019), identificaron la presencia de un núcleo frío en el sur de la bahía con temperaturas similares a lo encontrado en este estudio.

Para este estudio, se identificaron concentraciones máximas de clorofila de alrededor de 0.5 mg/m³. Lin et al. (2014) reportan concentraciones máximas de clorofila-a (~0.3 mg/m³) cercanas al centro de un vórtice ciclónico localizado en el sur del mar de China. En estudios observacionales y con sensores remotos realizados en el Canal de Mozambique identificaron la presencia de un vórtice ciclónico reportando concentraciones altas de clorofila-a (0.4 mg/m³) asociados a la presencia del vórtice (Barlow et al., 2014).

Conclusiones

Durante el mes de agosto de 2017 en el interior de la bahía se registró una distribución de clorofila-a heterogénea, con mayores concentraciones en la zona norte de la región, seguido de la zona centro y finalmente la zona sur, la cual presentó la menor concentración de clorofila-a. Los máximos valores de la región norte (1.7 mg/m^3), se asociaron a la presencia de un vórtice ciclónico de mesoescala, ya que esta estructura permitió el afloramiento de nutrientes desde zonas subsuperficiales hacia la zona eufótica, además de un levantamiento de las isotermas. Mientras que en la región sur las concentraciones de clorofila-a (0.7 mg/m^3) fueron menores en comparación con la región norte.

En cuanto a la distribución vertical, las máximas concentraciones de clorofila-a ($>3 \text{ mg/m}^3$) se mostraron por debajo de las termoclina y picnoclina (20 m).

Además, se identificó la presencia de dos masas de agua en el interior de la bahía: el Agua Subtropical Subsuperficial (AStSss) y el Agua del Golfo de California (AGC), así como una tercera masa de agua (Agua Intermedia del Pacífico) al norte de la bahía en la conexión con el Golfo de California.

Literatura citada

- Álvarez- Borrego, S., Chee-Barragán, A. 1976. Distribución de fosfatos y silicatos en la Bahía de San Quintín, B.C. *Ciencias Marinas* 3(1): 51-56.
- Bakun, A. 2006. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive, response and competitive advantage. *Science Marine* 70S2: 105-122.
- Banks, J.M. 2018. Chlorophyll fluorescence as a tool to identify drought stress in *Acer* genotypes. *Environmental Experimental Botany* 155: 118-127.
- Barlow, R., Lamont, T., Morris, T., Sessions, H., van den Berg, M. 2014. Adaptation of phytoplankton communities to mesoscale eddies in the Mozambique Channel. *Deep Sea Research II* 100: 106-118.
- Bustos-Serrano, H., Castro-Valdez, R. 2006. Flux of nutrients in the Gulf of California: Geostrophic approach. *Marine Chemistry* 99: 210-219.
- Castro, R., Mascarenhas Jr. A., Durazo, R., Collins, C.A. 2000. Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas* 26(4): 561-583.
- Cervantes-Duarte, R., Verdugo, G., Valdez J.E. 2005. Modelo estacional de la producción primaria estimada mediante fluorescencia natural en una región costera del Golfo de California, México. *Hidrobiológica* 15 (1): 79-87.
- Chelton, D.B., Schlax, M.G., Samelson, R.M., de Szoeke, R.A. 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters* 34:L15606.
- Chelton, D.B., Gaube, P., Schlax, M.G., Early, J.J., Samelson, R.M. 2011. The influence of nonlinear mesoscale eddies on Near-surface oceanic chlorophyll. *Science* 334(6054): 328-332.
- Chaigneau, A., Gizolme, A., Grado, C. 2008. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: identification algorithms and Eddy spatio-temporal patterns. *Progress in Oceanography* 79: 106-119.
- Condie, S., Condie, R.. 2016. Retention of plankton within ocean eddies. *Global Ecology Biogeography* 25: 1264-1277.

-
- Coria-Monter, E. 2010. Efecto de algunos procesos hidrodinámicos sobre la distribución de la clorofila a en la Bahía de la Paz, BCS, México. Tesis de maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- 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., Merino-Ibarra, M. 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., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Durán-Campos, E.. 2019. 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* 12:473.
- Cullen, J.J. 2015. Subsurface chlorophyll maximum layers: enduring enigma or mystery solved? *Annual Review Marine Science* 7: 207-239.
- Davies, C.H., Ajani, P., Armbrecht, L. 2018. A data base of chlorophyll a in Australian waters. *Scientific Data* 5: 180018.
- De Oliveira-Carvalho, A.C., Mendes. C.R.B., Kerr, R., Azebedo, J.L.L., Galdino, F., Tavano, V.M. 2019. The impact of mesoscale eddies on the phytoplankton community in the South Atlantic Ocean: HPLC-CHEMTAX approach. *Marine Environmental Research* 144: 154-165.
- De Silva Dávila, R., 1997. Abundancia y distribución de los eufáusidos y producción larvaria de *Nyctiphanes simplex* Hansen, en La Bahía de La Paz, B.C.S., México. Maestría en Ciencias Marinas Tesis, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, B.C.S., México.
- Durán-Campos, E., Salas de León, D.A., Monreal-Gómez, M.A., Aldeco-Ramírez, J., Coria-Monter, E. 2015. Differential zooplankton aggregation due to relative vorticity in a semi-enclosed bay. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 164: 10-18.

-
- Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Coria-Monter, E. 2019. Impact of 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. 2019. Chlorophyll- a vertical distribution patterns during summer in the Bay of La Paz, Gulf of California, México. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 45: 109-115.
- Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Coria-Monter, E. 2019. Zooplankton functional groups in a dipole eddy in a coastal region of the southern Gulf of California. *Regional Studies in Marine Science* 28, 100588.
- Falkowski, P.G., Ziemann, D., Kolber, Z., Bienfang, P.K. 1991. Role of Eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature* 352: 55-58.
- Falkowski, P.G., Woodhead, A.D. 1992. *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*, vol. 43. Plenum Press, New York, NY.
- Findlay, H.S., Gibson, G., Kedra, M., Morata, N., Orchowska, M., Pavlov, A.K., Weydmann, A. 2015. Responses in Arctic marine carbon cycle processes: conceptual scenarios and implications for ecosystem function. *Polar Research* 34:24252.
- Gaeta, S.A., Lorenzetti, J.A., Miranda, L.B., Susini-Ribeiro, S.M.M., Pompeu, M., De Aranjó, C.E.S. 1999. The Vitoria Eddy and its relation to the phytoplankton biomass and primary production during the austral fall of 1995. *Archives of Fishery and Marine Research* 47 (2): 253-270.
- Gallager, S.M., Yamazaki, H., Davis C. 2004. Contribution of fine-scale vertical structure and swimming behaviour to formation of plankton layers on George Bank. *Marine Ecology Progress Series* 267: 27-43.
- Gaube, P., Chelton, D.B., Strutton, P.G., Behrenfeld, M.J. 2013. Satellite observations of chlorophyll, phytoplankton biomass and Ekman pumping in non-linear mesoscale eddies. *Journal of Geophysical Research Oceans* 118: 6349 – 6370.
- Gaube, P.D., McGillicuddy Jr., J., Chelton, D.B., Behrenfeld, M.J., Strutton, P.D. 2014. Regional variations in the influence of mesoscale eddies on near-surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research Oceans* 119: 8195-8220.
- Hassler, C.S., Djajadikarta, J.R., Doblin, M.A., Everett, J.D., Thompson, P.A. 2011. Characterization of water masses and phytoplankton nutrient limitation in the East Australian Current separation zone during spring 2008. *Deep Sea Research II* (5): 664-677.

-
- Heath, M.R., Speirs, D.C., Steele, J.H., 2014. Understanding patterns and processes in models of trophic cascades. *Ecology Letters*. 17, 101–114.
- Henson, S.A., Sarmiento, J.L., Dunne, J.P., Bopp, L., Lima, I., Doney, S.C., John, J., Beaulieu, C. 2010. Detection anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity. *Biogeosciences* 7: 621-640.
- Huggett, J.A. 2014. Mesoscale distribution and community composition of zooplankton in the Mozambique Channel. *Deep Sea Research II* 100: 119-135.
- Jenkins, W.J. 1988. Nitrite flux into the euphotic zone near Bermuda. *Nature* 331: 521-523.
- Jiménez-Illescas, A. 1996. *Ánalisis de procesos barotrópicos y baroclínicos en la bahía de la Paz*, B.C.S. Tesis doctoral, UNAM, México, 212 pp.
- Kahru, M., Mitchell, B.G., Gille, S.T., Hewes, C.D., Holm-Hansen, O. 2007. Eddies enhance biological production in the Weddell-Scotia Confluence of the Southern Ocean. *Geophysical Research Letters* 34: L146603.
- Kai, E.T., Marsac, F. 2010. Influence of mesoscale eddies on spatial structuring of top predators communities in the Mozambique Chanel. *Progress in Oceanography* 86: 214-223.
- Klausmeier, C., Lichman, E. 2001. Algal games: the vertical distribution of phytoplankton in poorly mixed water columns. *Limnology and Oceanography* 46: 1998-2007.
- Laiolo, L., McLlnes, A.S., Matear, R., Doblin, M.A. 2016. Key drives of seasonal plankton dynamics in cyclonic and anticyclonic eddies off East Australia. *Frontiers in Marine Sciences* 3: 1-14.
- Lavín, M.F., Marinone, S.G. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California, in *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*, edited by Velasco-Fuentes, O.U., Sheinbaum, J., Ochoa, J. pp.173-204, Kluwer Acad., Dordrecht, Netherlands.
- Lavín, M.F., Castro, R., Beier, E., Godínez, V.M., Amador, A., Guest, P. 2009. SST, thermohaline structure, and circulation in the southern Gulf of California in June 2004 during the North American Monsoon experiment. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 114: C02025.
- Ledwell, J.R., McGillicuddy, D.J., Anderson, L.A. 2008. Nutrient fluz into an intense deep chlorophyll layer in a mode-water eddy. *Deep-Sea Research II* 55:1139-1160.

-
- Leterme, S.C., Pingree, R.D. 2008. The Gulf Stream, rings and North Atlantic Eddy structures from remote sensing (Altimeter and SeaWiFS). *Journal of Marine Systems* 69: 177-190.
- Liang, W., Tang, D., Luo, X. 2018. Phytoplankton size structure in the western South China Sea under the influence of a jet-eddy system. *Journal of Marine Systems* 187: 82-95.
- Lin, J., Cao, W., Wang, G., Hu, S. 2014. Satellite-observed variability of phytoplankton size classes associated with a cold Eddy in the South China Sea. *Marine Pollution Bulletin* 83:190-197.
- Liu, F.F., Tang, S.L., Chen, C.Q. 2013. Impact of nonlinear mesoscale eddy on phytoplankton distribution in the northern South China Sea. *Journal Marine Systems* 123-124: 33-40.
- Lohrenz, S.E., Fahnenstiel, G.L., Redalje, D.G., Lang, A.G., Dagg, M.G., Withledge, T.E., Dortch, Q. 1999. Nutrients, irradiance and mixing as factor regulating primary production in costal waters impacted by the Mississippi river plume. *Continental Shelf Research* 19: 1113-1142.
- Mahadevan, A., D'Asaro, D., Lee, C., Perry, M.J. Eddy-Driven Stratification Initiates North Atlantic Spring Phytoplankton Blooms. *Science* 337: 54-58.
- Martínez-Mérida, J.L. 2013. Modelación de la circulación en la Bahía de la Paz, B.C.S. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 82 p.
- Martínez-López, A., Cervantes-Duarte, R., Reyes-Salinas, A., Valdez, J. 2001. Cambio estacional de clorofila a en la Bahía de La Paz, B.C.S., México. *Hidrobiológica* 11(1): 45-52.
- McGillicuddy Jr., D.J., Robinson A. 1997. Eddy induced nutrient supply and new production in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research* 44(8): 1427-1450.
- McGillicuddy Jr., D.J., Robinson, A.R., Siegel, D.A., Jannasch, H.W., Johnson, R., Dickey, T.D., McNeil, J., Michaels, A.F., Knap, A.H. 1998. Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Nature* 394: 263–266.
- McGillicuddy Jr., D. J, Anderson, L.A., Bates, N.R., et al. 2007. Eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms. *Science* 316 (5827): 1021-1026.
- McGillicuddy, Jr, D.J. 2016. Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale. *Annual Review of Marine Science* 8: 125-159.

-
- Mojica-Ramirez, E. 2008. Estructura del zooplancton de la bahía de la Paz, B.C.S. y su relación con la hidrografía durante el verano de 2004. Tesis de maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- 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.
- Muggli, M., Lecourt, M., Harrison, P. 1996. Effects on iron and nitrogen source on the sinking rate, physiology and metal composition of an oceanic diatom from the subarctic Pacific. *Marine Ecology Progress Series* 132: 215-227.
- Parsons, T.R., Maita, Y., Lalli, C.M. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Oxford. 173 p.
- Pennington, J.T., Mahoney, K.L., Kuwahara, V. S., Kolber, D.D., Calienes, R., Chavez, F.P., 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69: 285-317.
- Pieri, M., Massi, L., Lazzara, L., Nuccio, C., Lapucci, C., Maselli, F. 2015. Assessment of three algorithms for the operational estimation of [CHLA] from MODIS data in the Western Mediterranean Sea. *European Journal of Remote Sensing* 48:383–401
- Pond, S., Pickard, G.L. 1983. *Introductory Dynamical Oceanography*, 2nd Ed. Pergamon Press, Oxford.
- Reyes-Salinas, A., Cervantes, R., Morales, R., Váldez, J.E. 2003. Variabilidad estacional de la producción primaria y su relación con la estratificación vertical en la Bahía de La Paz, B.C.S. *Hidrobiológica* 13(2): 103-110.
- Ruvalcaba-Aroche, E.D., Sánchez-Velasco, L., Beier, E., Godínez, V.M., Barton, E.D., Pacheco, M.R. 2018. Effects of mesoscale structures on the distribution of cephalopod paralarvae in the Gulf of California and Pacific. *Deep-Sea Research I* 131:62-74.
- Sánchez-Velasco, L., Jiménez-Rosenberg, P., Shirasago-German, B., Obeso-Nieblas, M. 2004. Distribution and abundance of fish larvae in Bahía de la Paz (Gulf of California) and their relation to hydrographic variability during summer (1997–1998). *Deep Sea Research* 51: 723–737.

-
- Sharples, J., Moore, M.M., Rippeth, T.P., Holligan, P.M., Hydes, D.J., Fisher, N.R., Simpson, J.H. 2001. Phytoplankton distribution and survival in the thermocline. *Limnology and Oceanography* 46(3):486-496.
- Siegel, D.A., McGillicuddy Jr., D.J., Fields, E.A., 1999. Mesoscale eddies, satellite altimetry, and new production in the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research* 104 (C6): 13359-13380.
- Strickland, J.D.H., Parsons, T.R., 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. 2nd Edition. J. Fisheries Research Board of Canada. No. 067. 311 pp.
- Sun, J. 2011. Marine phytoplankton and biological carbon sink. *Acta Ecologica Sinica* 31: 5372-5378.
- Vaillancourt, R.D., Marra, J., Seki, M.O., Parsons, M.L., Bidigare, R.R. 2003. Impact of a cyclonic eddy on phytoplankton community structure and photosynthetic competency in the subtropical North Pacific Ocean. *Deep-Sea Research* 150:829-847.
- Vajravelu, M., Martin, Y., Ayyappan, S., Mayakrishnan, M. 2017. Seasonal influence of physico-chemical parameters on phytoplankton diversity, community structure and abundance at Parangipettai coastal waters, Bay of Bengal, south east coast of India. *Oceanology* 60 (2): 114-127.
- Walsh, J.J., Weisberg, R.H., Dieterle, D.A., He, R., Darrow, B.P., Jollieff, J.K., Lester, K.M., Varo, G.A., Kirkpatrick, G., Fanning, K.A., Sutton, T.T., Jochen, A.E., Giggs, D.C., Nababan, B., Hu, C., Muller-Karger, F. 2003. Phytoplankton response to intrusions of slope water on the West Florida Shelf: Model and observations. *Journal of Geophysical Research* 108 (C6): 3190.
- Yacobi, Y.Z., Zohary, T., Kress, N., Hecht, A., Robarts, R.D., Waiser, M., Wood, A.M., Li, W.K.W. 1995. Chlorophyll distribution throughout the southeastern Mediterranean in relation to the physical structure of the water mass. *Journal of Marine Systems* 6(3): 179-190.
- Zhang, Z.G., Wang, W., Qiu, B. 2014. Oceanic mass transport by mesoscale eddies. *Science* 345 (6195): 322-324.