



Universidad Nacional Autónoma de México



Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

Tesis

Para obtener el título de:

Biólogo

Patrones de distribución de la biomasa fitoplanctónica y su relación con los procesos hidrodinámicos en el Cañón de Campeche, sur del Golfo de México.

Presenta:

Torres Martínez Carlos Mauricio

Ecología marina

Director de tesis: Dr. Erik Coria Monter

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

Ciudad de México, Mayo 2020



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.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, Juan Luis Torres Trujano e Inés Martínez Fierros, por siempre apoyarme y demostrarme su amor en cada paso que he dado.

Agradecimiento para Ana Montoya, una gran mujer, que siempre estuvo apoyándome y dándome su amor incondicional, muchas gracias.

Agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México por el financiamiento para la realización de la campaña oceanográfica CAÑÓN IV realizada a bordo del B/O Justo Sierra.

Agradecimiento al Dr. Erik Coria Monter por aceptarme como su alumno y por todo el apoyo que me brindo en la realización de este trabajo.

Quiero agradecer al Dr. David Alberto Salas de León y la Dra. María Adela Monreal Gómez por el acceso a los datos y el espacio en sus laboratorios.

Agradecimiento al Hidrobiol. Sergio Castillo Sandoval por el apoyo técnico durante el desarrollo del proyecto.

Contenido

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
MARCO TEÓRICO	3
Fitoplancton	3
Diatomeas	3
Dinoflagelados	4
Cocolitofóridos	5
Silicoflagelados	6
Clorofila- <i>a</i>	6
Algunos procesos hidrodinámicos que regulan la distribución del fitoplancton en el océano	7
Ondas internas	7
Vórtices	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
ANTECEDENTES	10
HIPÓTESIS	13
OBJETIVOS	13
General	13
Particulares	13
ÁREA DE ESTUDIO	13
MATERIALES Y MÉTODOS	14
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	16
RESULTADOS	17
Hidrografía	17
Masas de agua	17
Distribución horizontal de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m ³) y salinidad absoluta (g/kg)	19
Velocidades geostróficas	26
Distribución horizontal de la clorofila- <i>a</i> y oxígeno disuelto	26

Imágenes satelitales	30
Distribución vertical de la clorofila- <i>a</i>	31
Región del Cañón de Campeche.....	31
Región del Banco de Campeche.....	34
Análisis estadísticos.....	37
DISCUSIÓN.....	39
CONCLUSIONES.....	41
REFERENCIAS	42

RESUMEN

Se analiza el efecto que presentan los vórtices en la distribución de la clorofila-*a* en el Cañón y el Banco de Campeche, Golfo de México, durante el invierno de 2011 (época de nortes). Los datos hidrográficos fueron obtenidos con un CTD SeaBird 19 plus y un sensor de fluorescencia activo ECO Wetlabs, en una campaña oceanográfica a bordo del B/O Justo Sierra de la UNAM. Los resultados mostraron la presencia de cinco masas de agua (Agua Común del Golfo, Agua Subtropical Profunda del Caribe, Agua Subtropical Profunda del Atlántico Norte, Agua Tropical Central del Atlántico y Agua Intermedia del Antártico), una columna de agua mezclada, típica de invierno derivado de la presencia de vientos intensos, y una circulación ciclónica y anticiclónica en la región sur y centro del área de estudio, respectivamente. La distribución vertical de clorofila-*a* mostró que la concentración máxima estuvo asociada con una picnoclina estacional a una profundidad de ~40 m, mientras que la distribución horizontal de clorofila-*a* mostró que la concentración máxima estuvo asociada con el vórtice ciclónico presente en el cañón. La concentración superficial de clorofila-*a* obtenida por imágenes satelitales fue de 0.5 mg/m³ en la región del banco de Campeche y 0.04 mg/m³ en la región del cañón de Campeche. Se concluye que la presencia de vórtices en el cañón determina, en gran medida, la distribución de clorofila-*a*.

Palabras clave: clorofila-*a*, vórtices, Cañón de Campeche, Banco de Campeche, Golfo de México.

INTRODUCCIÓN

El fitoplancton comprende un conjunto heterogéneo de microorganismos que se distribuyen en el océano, representa la base de la cadena trófica y desempeña un papel fundamental en el ecosistema marino, debido a su contribución para mitigar el cambio climático y el calentamiento global, al reducir los niveles de CO₂ atmosférico (Vajravelu *et al.*, 2018).

Además de ser un componente distintivo del fitoplancton y tener una distribución universal entre todas las algas fotoautotróficas y las cianobacterias, la clorofila-*a* también se usa ampliamente como un índice de biomasa de fitoplancton (Reynolds, 2006). La clorofila-*a* tiene la propiedad de emitir fluorescencia la cual es un fenómeno propio del aparato fotosintético (Govindjee, 2004).

La distribución vertical y horizontal del fitoplancton en el océano está controlada, en buena medida, por procesos hidrodinámicos que se presentan en la capa eufótica a diferentes escalas espacio-temporales y que se vinculan con el abastecimiento de nutrientes. La distribución del fitoplancton es heterogénea y está asociada a condiciones de mezcla o estratificación en la columna de agua (Klausmeier y Litchman, 2001), así como a la presencia de vórtices, que dependiendo de su sentido de rotación se clasifican como ciclónicos, anticiclónicos o “mode-water”.

En este orden de ideas, el estudio del fitoplancton debe de ser enfocado desde diferentes puntos de vista y a través de varios niveles de organización, con el objetivo de identificar aquellos procesos hidrodinámicos que regulan su productividad, en particular en ambientes caracterizados por su elevado hidrodinamismo, como el sur del Golfo de México.

El presente trabajo contribuye al entendimiento de la ecología del fitoplancton en la porción sur del Golfo de México durante la época de “Nortes”, un periodo donde las observaciones *in-situ* desde buques son limitadas debido a los desafíos que implica realizar expediciones oceanográficas durante una época del año en la que los vientos y las corrientes son extremas. Los resultados presentados en este trabajo también resaltan la necesidad de combinar observaciones *in-situ* y satelitales para explorar patrones de distribución en la biomasa fitoplanctónica y su relación con el ambiente físico.

MARCO TEÓRICO

Fitoplancton

Diatomeas

Las diatomeas son algas pardo-doradas con un exoesqueleto o frústula silíceica que, poseen la capacidad de habitar cualquier ambiente acuático o semiacuático que esté expuesto a la luz (Figura 1). Su talla varía entre 2 y 2000 μm ; los cloroplastos presentan clorofila *a*, *c1* y *c2*, así como el carotenoide pardo-dorado fucoxantina. Las diatomeas se reproducen preferentemente de manera asexual por fisión binaria (Halse y Syvertsen, 1996; Lara Villa *et al.*, 1996) y se ha reconocido que la reproducción sexual es oógama en las diatomeas céntricas e isógama en las pennadas, y el producto de la fusión sexual es una auxospora (Round *et al.*, 1990).

De acuerdo a su forma, las diatomeas pueden ser divididas en cuatro grupos básicos: 1) centrales y radiales, en donde las estructuras de la célula tienen un arreglo de acuerdo a un punto central (e.g. *Coscinodiscus*); 2) De estructura uniforme, donde el arreglo de la estructura es sin referencia a ningún punto o línea (e.g. *Eunotia*); 3) Triangular, donde el arreglo está dado por ángulos (e.g. *Triceratium*); 4) Penales, donde la estructura tiene una forma simétrica a ambos lados de una línea central (e.g. *Navicula*) (Lee, 2008).

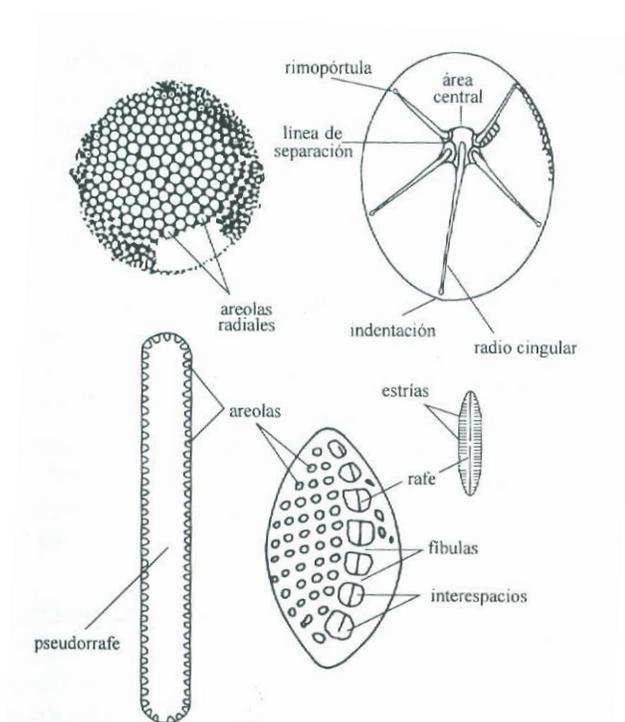


Figura 1. Morfología valvar de algunas diatomeas pennadas y céntricas (Licea, 1996).

Debido a que la concentración de Silicio en el mar es generalmente baja (Barron, 1985; Barron, 1987), muchas diatomeas tienen que hundirse para obtenerlo en la termoclina (100-120 m en mares tropicales) o en los lagos oligotróficos (30-40 m). Como el pico de absorción de la fucoxantina es entre 500 y 560

nm y el número de moléculas de clorofila aumenta a bajas intensidades de luz, esto les permite fotosintetizar y crecer bajo esas condiciones; se ha documentado que un repentino transporte hacia la superficie afecta su tasa fotosintética, ya que estos organismos pueden modificar rápidamente sus pigmentos y enzimas activas. La deficiencia de Silicio acarrea la acumulación de lípidos, mientras que la escasez de otros nutrimentos, como fósforo y el nitrógeno, incrementa carbohidratos y lípidos (Lara Villa *et al.*, 1996).

Dinoflagelados

Los dinoflagelados se encuentran habitualmente en ambientes marinos, sus células son generalmente uninucleadas o binucleadas, móviles e inmóviles, pláncticas, bénticas, simbioses o parasitas, con un núcleo eucarionte y otro dinocarión (Figura 2). Otros organelos unicelulares son las púsculas (fagocitos), ocelos, estigmas, nematocistos y tricostis. Por su nutrición pueden ser autótrofos, auxótrofos y heterótrofos (Licea, 1995). El tamaño de estos organismos oscila entre los 50 y 500 μm . Los cloroplastos de los dinoflagelados autótrofos contienen clorofila *a* y *c*, además de peridina como los principales pigmentos fotosintéticos.

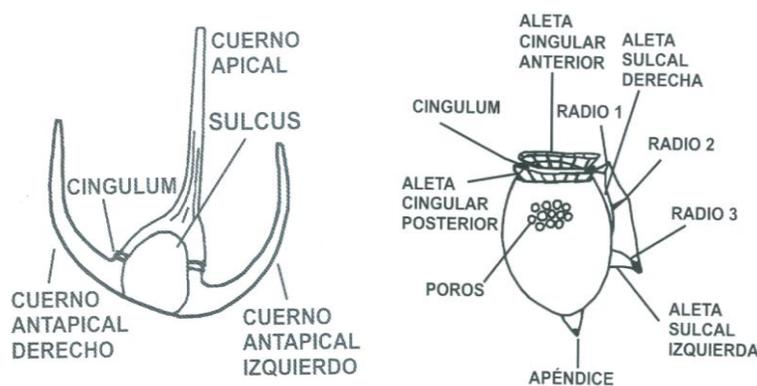


Figura 2. Características morfológicas de dinoflagelados del género *Ceratium* (izquierda) y del género *Dinophysis* (derecha) (Licea, 1995).

La pared celular o teca, también conocida como anfrisma puede ser muy fina y relativamente sin ornamentaciones, los dinoflagelados que presentan este tipo de estructura se le denomina desnudos o atecados. La teca puede estar formada

por una pared celular de placas celulósicas con espinas o rebordes, cuya estructura básica es una serie de membranas, a estos organismos se les conoce como dinoflagelados tecados (Licea, 1995). La estructura celular de este grupo se basa en dos regiones denominadas epiteca (la superior) e hipoteca (la inferior) las cuales se encuentran separadas por el

cingulum, que aloja al flagelo transversal, mientras que en la región ventral de la hipoteca se localiza el sulcus, que aloja al flagelo longitudinal.

La producción de quistes en los dinoflagelados ha sido conocida desde hace mucho tiempo como un estado en su ciclo de vida (Tappan, 1980), el enquistamiento ocurre cuando se presentan condiciones ambientales adversas, durante las cuales el quiste se desarrolla dentro de la teca, permaneciendo en estado de latencia hasta que las condiciones son favorables nuevamente (Licea, 1995).

Cocolitofóridos

Los cocolitofóridos son organismos eucariotas (con núcleo y organelos celulares bien definidos) con una talla de hasta 20 μm pertenecientes a la División Haptophyta, un grupo que se caracteriza por la presencia de dos flagelos similares y una estructura similar a los flagelos llamada haptonema, cuya morfología (estructura y arreglo microtubular) y función (adhesión a sustratos, mecanismos de ingestión de partículas o presas) son distintas a la de los flagelos (Billard y Inouye, 2004; Hernández-Becerril, 2014; Hagino y Young, 2015).

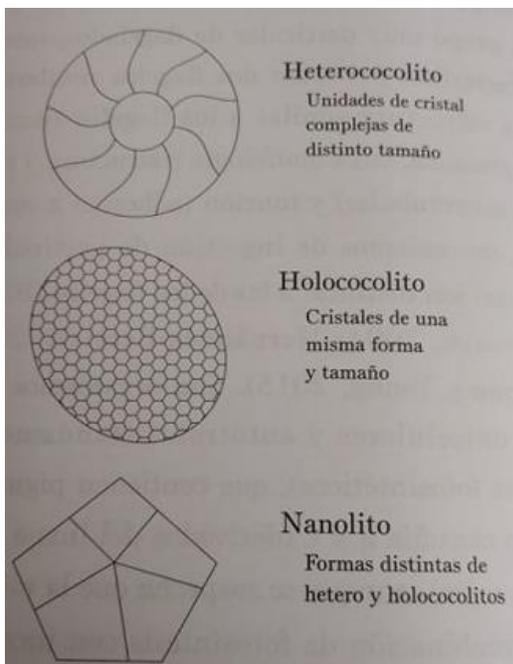


Figura 3. Terminología usada para la caracterización de cocolitofóridos (Hernández-Becerril, 2014).

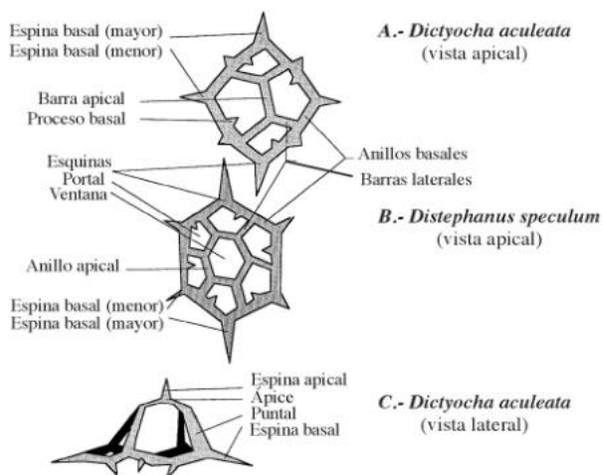
Los cocolitofóridos producen placas calcáreas especializadas y diversas, denominadas cocolitos, los cuales han sido clasificados en tres grupos estructurales: heterococolitos, holococolitos y nanococolitos (Figura 3). Los primeros son estructuras complejas que consisten de cristales modificados de calcita, originados en vesículas especializadas del aparato de Golgi, mientras que los segundos están constituidos por cristales ensamblados de talla uniforme, formados extracelularmente (Hagino y Young, 2015). Su capacidad de llevar a cabo la fotosíntesis los convierte en productores primarios y participan activamente en el ciclo de varios elementos básicos en los ecosistemas marinos, como los

ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, y son considerados como los responsables de la mitad de la precipitación de todo el CaCO_3 (Hernández-Becerril *et al.*, 2016).

Los cloroplastos contienen clorofila *a* y *c*, xantofilas del tipo dianinoxantinas, diatoxantinas, fucoxantina y β -caroteno.

Silicoflagelados

Los silicoflagelados son organismos flagelados unicelulares que poseen un esqueleto de sílice opalino (Haq, 1998) Estos organismos uniflagelados son pequeños, con tallas que oscilan entre los 10 y 250 μm (Figura 4). Contienen numerosos cloroplastos de color pardo-amarillento. Solo unas cuantas especies se reconocen actualmente, y estas usualmente son



más abundantes en aguas frías (Lalli y Parsons, 2007).

Los esqueletos silíceos, típicamente tubulares, varían de forma: desde espículas simples tradicionales, hasta complejas estructuras semejantes a cúpulas. La mayoría de los géneros presentan un anillo basal poligonal del cual se origina una estructura apical que puede consistir de unas cuantas barras, en el anillo basal, o bien, puede estar

Figura 4. Morfología general del exoesqueleto de los silicoflagelados (Molina, 2017).

constituida por una red de barras formando una estructura hemisférica-esférica (Perez Cruz, 1985).

Clorofila-a

Como uno de los pigmentos presentes en todos los organismos del fitoplancton, la clorofila-*a* ha sido considerada ampliamente como un indicador de la biomasa fitoplanctónica en ambientes epicontinentales y marinos (Davies *et al.*, 2018). También, su determinación ha sido considerada como un indicador de la composición y del estado fisiológico general de las diferentes comunidades (Lalli y Parson, 2006).

La estructura molecular de la clorofila contiene dos partes: un anillo de porfirina que contiene un núcleo de magnesio y cuya función es absorber y emitir luz, y una cadena hidrófoba fitol, cuya función es mantener a la molécula integrada en la membrana fotosintética (Figura 5).

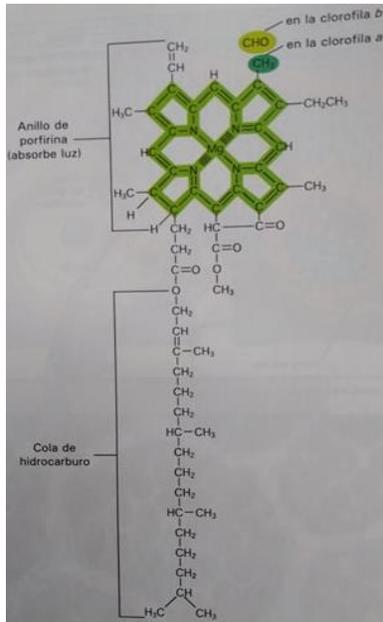


Figura 5. Estructura molecular de la clorofila.

La clorofila-*a* tiene la propiedad de absorber luz y transferirla como energía de excitación a los centros de reacción y complejos antena del aparato fotosintético. Una buena parte de esa energía es re-emitida en forma de calor y fluorescencia, esta última puede ser captada y cuantificada mediante sondas convencionales. La cuantificación de la fluorescencia de la clorofila-*a* ha sido ampliamente utilizada en la Oceanografía Biológica como un indicador de la biomasa fitoplanctónica y como un indicador de la actividad fotosintética. Chamberlin *et al.* (1990) sugiere que su señal es suficientemente fuerte para ser detectada en la zona eufótica.

Algunos procesos hidrodinámicos que regulan la distribución del fitoplancton en el océano

Ondas internas

Las corrientes de marea a menudo generan ondas internas que se propagan sobre la pycnoclina, la cual al ser desplazada verticalmente, genera una fuerza restauradora que empuja la pycnoclina hacia su posición inicial. Esta fuerza conduce a una oscilación vertical y la onda comienza a propagarse entre las capas de diferente densidad (Figura 6). Las ondas internas pueden ser generadas por diversos factores que incluyen cambios en la densidad, el efecto del viento en la capa superficial, fluctuaciones de presión en la atmósfera, por cambios en el fondo, entre otros factores (Mann y Lazier, 2006). También, pueden formarse como consecuencia de diferencias en la velocidad de las corrientes. Independientemente de su mecanismo de generación, las ondas internas generan movimientos, horizontales y

verticales, elevando agua subsuperficial rica en nutrientes, fertilizando la zona en la que se presentan (Reynolds, 2006).

Las ondas internas tienen una variedad de escalas y son fenómenos muy extensos en el océano. Probablemente las más importantes relacionadas con las oscilaciones de marea a lo largo de la costa. Estas son suficientemente largas para ser detectadas fácilmente con fotografías aéreas y con imágenes satelitales, siempre que no sean demasiado profundas (Wright y Colling, 1995).

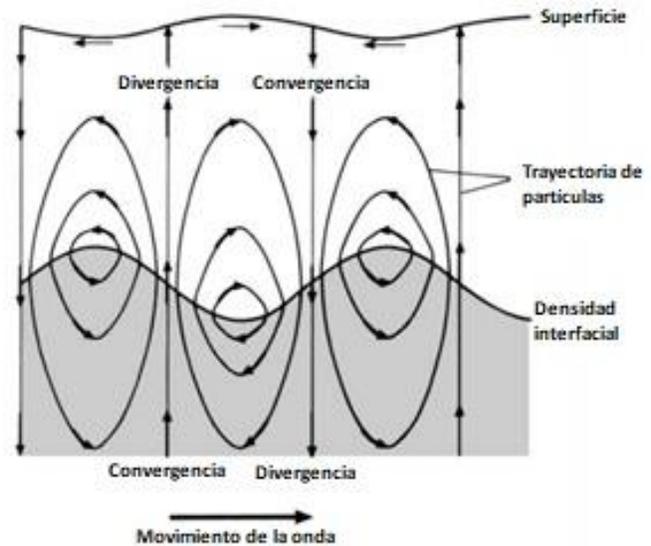


Figura 6. Esquema de la propagación de una onda interna que muestra las zonas de convergencia y divergencia en donde se presenta una fertilización (Mann & Lazier, 2006).

Vórtices

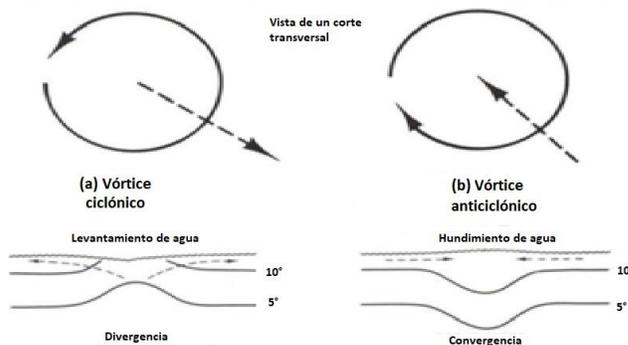


Figura 7. Corte transversal de un vórtice ciclónico (a) y anticiclónico (b) en el Hemisferio Norte. La flecha punteada indica el transporte de agua desde y hacia el centro, respectivamente (Lalli & Parsons, 2006).

Un vórtice puede ser definido como un flujo turbulento en rotación (Mann y Lazier, 2006). Los vórtices en el océano son de diferentes escalas; algunos son tan pequeños que son dominados por la viscosidad, mientras que otros son tan grandes que la curvatura y rotación de la Tierra tienen efecto sobre ellos. Su tamaño depende de diferentes factores tales como latitud a la que se forman,

estratificación, topografía del fondo o la naturaleza de su generación (Olson, 1991). Existen tres tipos de vórtices de mesoescala (escala de 10-100 km): ciclónicos, anticiclónicos y “mode-water” (Figura 7). Los vórtices ciclónicos elevan la pycnoclina estacional y permanente, mientras que los vórtices anticiclónicos hunden ambas pycnoclinas. Los

vórtices “mode-water” hundén la picnoclina principal mientras que la estacional se eleva. McGillicuddy *et al.* (2007) documentaron que la dirección de rotación en los vórtices “mode-water” es la misma que los vórtices anticiclónicos (en sentido de las manecillas del reloj), mientras que los vórtices ciclónicos presentan una rotación inversa (en contra de las manecillas del reloj)

En los vórtices anticiclónicos, el flujo de agua tiene una dirección en sentido de las manecillas del reloj en el Hemisferio Norte y en contra de las manecillas del reloj en el Hemisferio Sur. En el caso de los vórtices ciclónicos estos están formados por la circulación del agua que fluye en dirección contraria a las manecillas del reloj en el Hemisferio Norte y conforme a las manecillas del reloj en el Hemisferio Sur. Estos son vórtices divergentes que tienden a elevar agua profunda rica en nutrientes hacia la zona eufótica, por encima de la termoclina, lo que resulta en un suministro de nutrientes en la superficie y genera áreas altamente productivas (Lalli y Parsons, 2006). La dirección del vórtice “mode-water” es igual que los vórtices anticiclónicos y está caracterizado por el hundimiento de la picnoclina permanente, sin embargo, el desplazamiento de la picnoclina estacional ocurre como en un vórtice ciclónico, en donde ambos vórtices elevan nutrientes hacia la capa eufótica (McGillicuddy *et al.*, 2007). Los vórtices de mesoescala juegan un rol importante en los procesos de mezcla, porque transportan grandes volúmenes de agua con propiedades diferentes como temperatura y salinidad, y nutrientes de un sistema de corrientes a otro (Wright y Colling, 1995).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los patrones de distribución de la biomasa del fitoplancton, expresada como clorofila-a, tienen fuertes implicaciones en las redes tróficas pelágicas, particularmente en el zooplancton herbívoro. La disponibilidad de alimento para el zooplancton herbívoro es diferente cuando el fitoplancton está concentrado en una capa delgada (< 5 m) pero en cantidades elevadas ($> 0.5 \mu\text{g L}^{-1}$), que cuando está disperso en un espesor amplio (> 10 m) y en bajas cantidades ($< 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$). Tampoco es lo mismo si la mayor concentración de clorofila está en un solo máximo o bien la distribución vertical muestra varias crestas o es homogénea (Espinosa *et al.*, 2008). El zooplancton herbívoro y filtrador tiene que

acoplarse a dichos patrones para disponer, en cada caso, del alimento requerido (Scott *et al.*, 2004), lo que permite el buen funcionamiento de la “bomba biológica” (Longhurst y Harrison, 1989). En aras de poder comprender con mayor profundidad la vinculación de los procesos hidrodinámicos con los mecanismos involucrados en la productividad fitoplanctónica en las diferentes épocas del año, se requiere de una mayor profundización en los estudios sobre dichas interacciones para poder detectar zonas y épocas ricas en plancton e inferir algunas estrategias para un mejor aprovechamiento de los recursos marinos del sur del Golfo de México.

ANTECEDENTES

El estudio de los vórtices y su efecto en la Biología ha sido un tema de interés para la comunidad científica en los últimos años, y a la fecha han aparecido diversas publicaciones sobre papel de estos procesos en la distribución del plancton en diferentes regiones a lo largo del mundo.

Tal es el caso del trabajo realizado por Eden *et al.* (2009), en el mar de los Sargazos, el cual muestra que en vórtices ciclónicos la distribución de la biomasa fitoplanctónica tiene una concentración elevada en la periferia del vórtice, mientras que en vórtices “mode-water”, la distribución está concentrada en el centro del vórtice, con un afloramiento fitoplanctónico, principalmente de diatomeas.

Los vórtices anticiclónicos y ciclónicos pueden formar anillos de clorofila en su periferia como resultado de la interacción viento-corrientes, o bien, por la advección horizontal. La interacción entre intensos vientos y corrientes superficiales resulta en un transporte vertical hacia la superficie. En regiones de intensos vientos y relativamente fuertes gradientes de corrientes horizontales, las velocidades verticales inducen un bombeo de Ekman, el cual es generado no solo por la penetración de los fuertes vientos, sino también por la interacción de la superficie con los gradientes de vorticidad geostrofica (Xu, 2019). La interacción vórtice-viento promueve el flujo vertical de nutrimentos en vórtices “mode-water” y lo contrarrestan en vórtices ciclónicos, esto explica como los afloramientos de diatomeas son más duraderos en vórtices “mode-water”. La elevación de las picnoclinas se asocia con la mayor concentración de clorofila en los giros ciclónicos (McGillicuddy *et al.*, 2007).

En mares mexicanos el papel de los vórtices y su efecto en el ecosistema planctónico del sur de Golfo de California ha sido abordado por Coria-Monter *et al.* (2014), quienes documentaron que la presencia de un vórtice ciclónico de mesoescala confinado en la Bahía de La Paz, induce la formación de una distribución del fitoplancton, con una predominancia de diatomeas sobre la periferia del vórtice y una predominancia de dinoflagelados en su centro. También, se ha documentado que dicho vórtice genera un bombeo de Ekman hacia la capa eufótica, lo cual favorece la producción del fitoplancton de la región (Coria-Monter *et al.*, 2017)

En el sur del Golfo de México el efecto de los vórtices en el ecosistema planctónico ha sido abordado por diversos autores.

Aldeco-Ramírez *et al.* (2009), estudió el patrón de corrientes observado en el Cañón de Campeche y propuso tres hipótesis que promueven la productividad biológica de la región: (1) el rotacional negativo del esfuerzo del viento sobre el Golfo de México, el cual es anticiclónico en la parte noreste del golfo y ciclónico en la parte suroeste (Gutiérrez-de Velasco y Winant 1996); (2) la fricción de la corriente con el borde del talud continental que genera surgencias topográficas (Hsueh y O'Brien, 1971) y giros ciclónicos; y (3) el desprendimiento de los giros anticiclónicos de la Corriente de Lazo, los cuales migran hacia el oeste en el golfo (Vidal *et al.*, 1994).

La presencia de masas de agua en el Golfo de México fue estudiada por Portela *et al.* (2018), donde definió siete masas de agua: Agua remanente del Mar Caribe (CSWr), Agua Profunda Subtropical del Atlántico Norte (NASUW), Agua Común del Golfo (GCW), Agua Tropical del Centro Atlántico (TACW), Núcleo de Agua Tropical del Atlántico Central (TACWn), Agua Intermedia del Antártico (AAIW), Agua Profunda del Atlántico Norte (NADW).

En el Cañón de Campeche los picos de nutrimentos y de clorofila-*a* están ligados a un vórtice ciclónico presente en la región, y a los procesos de submesoescala en el borde de los vórtices anticiclónico y ciclónico, respectivamente. La distribución vertical de la clorofila-*a*, en su pico máximo, está asociado con la base de la capa eufótica y presenta una predominancia de cocolitofóridos (Durán-Campos *et al.*, 2017).

La concentración de clorofila-*a* durante la época de verano generalmente ocurre entre el intervalo de 0.21-0.32 mg/m³, donde el máximo de clorofila se presenta a profundidades de 78 y 89 m. La distribución horizontal de temperatura mostró que a los 40 m de profundidad, se presenta un giro con núcleo cálido en el suroeste del cañón, con temperaturas máximas de 29°C y salinidad de 36.05 a 36.3. Mientras que en la parte noreste del cañón hay un núcleo frío con baja salinidad, generado por el borde de un vórtice anticiclónico (Salas de León *et al.*, 2004).

El estudio de los vórtices en el Golfo de México por medio de observaciones *in-situ* e imágenes satelitales, ha sido abordado por Linacre *et al.* (2015), los cuales señalan que la presencia constante de vórtices, tanto ciclónicos como anticiclónicos, no solo tienen influencia en los patrones de distribución de la temperatura superficial, sino que también inducen una amplia variabilidad en los patrones verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y de clorofila-*a*. Faber-Lorda *et al.* (2019) mencionan que la presencia del vórtice ciclónico quasi-permanente ubicado en la Bahía de Campeche, favorece el transporte vertical de nutrientes, lo cual genera afloramientos estacionales de fitoplancton, con una presencia mayor en otoño-invierno comparado con primavera-verano.

Las evidencias en los campos geológicos y biológicos, muestran que los cañones submarinos son lugares privilegiados debido al intercambio de agua entre la zona costera y el mar abierto. El agua costera está generalmente confinada a la plataforma continental por la presencia de frentes a lo largo de la costa, los cuales representan una verdadera barrera física para el transporte de propiedades hacia mar adentro. Los cañones no solo son significativos por los intercambios existentes entre sus aguas, sino también por los movimientos verticales causados por su topografía y por los vórtices de mesoescala que se desarrollan en sus alrededores (Ardhuin *et al.*, 1999).

El estudio en cañones submarinos indica que la circulación dentro del cañón puede generar vórtices intensos que atrapan material dentro de ellos; la extensa vorticidad y el balance geostrofico dentro del cañón generan movimientos de advección, los cuales aumentan la densidad del plancton y su tiempo de residencia dentro del cañón (Allen *et al.*, 2001). Otro

proceso que induce una elevada productividad biológica son las surgencias, que a menudo se han asociado a cañones submarinos.

HIPÓTESIS

La distribución de la biomasa fitoplanctónica, expresada como clorofila-*a*, dependerá de la presencia de los procesos hidrodinámicos en el Cañón de Campeche, en particular de la presencia de vórtices.

OBJETIVOS

General

- Caracterizar los patrones de distribución de la biomasa fitoplanctónica, expresada como clorofila-*a*, y su relación con los procesos hidrodinámicos en el Cañón de Campeche, sur del Golfo de México, durante la época de Nortes.

Particulares

- Identificar las masas de agua presentes en la región durante la época de muestreo.
- Caracterizar las propiedades hidrográficas de la columna de agua en su distribución horizontal.
- Determinar la distribución vertical de las propiedades hidrográficas de la columna de agua y su relación con la concentración de la clorofila-*a*.
- Determinar la relación entre los procesos físicos y la distribución, tanto vertical como horizontal, de la clorofila-*a*.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la región del Cañón y Banco de Campeche que está localizado entre latitudes 20° 12'N y 21° 46'N, y longitudes 92° 24'O y 93° 24'O, en el lado oeste de la península de Yucatán (Figura 8a). El Cañón de Campeche tiene un origen tectónico (Weaver, 1950). Creager (1958) fue el primero en definir el eje del cañón como una línea que va de 20°N, 92°21'W a 21°N, 92°42'W, con una longitud de 125 km y un ancho de 30 km en el centro; en el extremo inferior de ensancha a 55 km.

El intervalo de profundidad del cañón es de 160-2800 m, el cual es un ambiente con procesos hidrodinámicos únicos con la presencia de ambos vórtices: ciclónico y anticiclónico (Salas-de-León *et al.*, 2004). En la zona de estudio una corriente proveniente de la plataforma de Yucatán se extiende hasta la Bahía de Campeche y fluye sobre el cañón (Lavín, 1997).

El Cañón de Campeche no tiene influencia directa de aporte de ríos y es afectada principalmente por la Corriente de Lazo. Las masas de agua que circulan cerca del cañón, se mueven en la vertical a lo largo de su eje, lo cual favorece la formación de vórtices (Ardhuin *et al.*, 1999). Durante el verano, cuando se produce la surgencia topográfica en el este de la plataforma de Yucatán, se transporta agua rica en nutrimentos hacia el oeste a lo largo de la piconclina sobre el Banco de Campeche (Merino, 1997), provocando un transporte significativo que llega al cañón, formando un vórtice anticiclónico el cual produce un hundimiento en las isotermas hasta 300 m de profundidad, forzando la formación de un vórtice ciclónico al sur del cañón (Salas-de-León *et al.*, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este proyecto se utilizaron datos hidrográficos adquiridos a bordo del B/O “Justo Sierra” de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) durante la campaña oceanográfica CAÑON-IV realizada del 8 al 26 de febrero de 2011, en la región del Cañón y Banco de Campeche, sur del Golfo de México, en una red de 48 estaciones hidrográficas (Figura 8b).

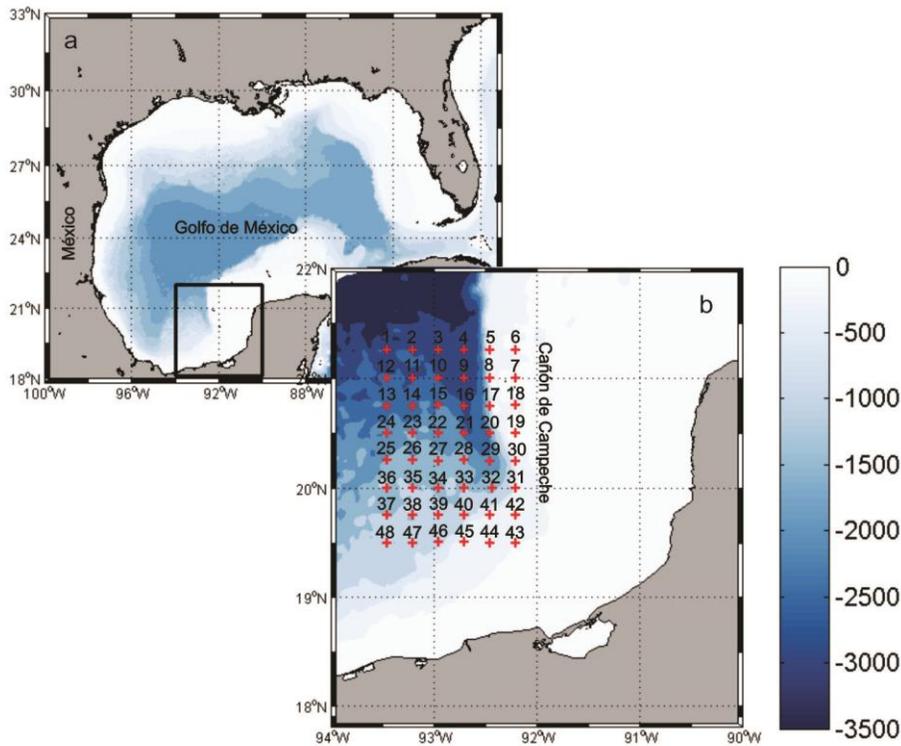


Figura 8. Área de estudio: a) Golfo de México con el área muestreada representada dentro del rectángulo y, b) estaciones hidrográficas sobre el Cañón de Campeche. La batimetría es mostrada en metros.

Se obtuvieron datos hidrográficos de alta resolución mediante un CTD SeaBird 19 plus y un sensor activo de fluorescencia activo ECO Wetlabs (intervalo 0.00 – 125 $\mu\text{g L}^{-1}$). La temperatura conservativa, la salinidad absoluta y la densidad se calcularon a partir de la conductividad, temperatura y presión de acuerdo a la ecuación termodinámica del agua de mar, TEOS-10 (McDougall *et al.*, 2010). Para este proyecto, el mayor énfasis se orientó en aquellas regiones donde se observaron estructuras de mesoescala, tales como vórtices ciclónicos o anticiclónicos, los cuales, como se discutió anteriormente, han sido señalados como los procesos energéticos que generan mayor variabilidad biológica en la región de estudio.

Los datos provenientes del sensor de fluorescencia fueron procesados con el objetivo de obtener perfiles de acuerdo a los criterios propuestos por Kiefer *et al.* (1989). A partir de estos datos, se determinaron los valores máximos y mínimos para cada estación, se analizó su distribución tanto vertical como horizontal y se vinculó con la estructura hidrográfica de la columna de agua y la presencia de procesos hidrodinámicos en ambas regiones. Además, se realizaron mapas de distribución horizontal de las variables señaladas con el objetivo de visualizar las regiones con mayor concentración de biomasa fitoplanctónica. Dichos mapas fueron elaborados con el software Surfer V.13.

Con el objetivo de comparar las mediciones *in-situ* se obtuvieron imágenes satelitales de la temperatura superficial del mar y clorofila-*a* en la fecha en las que se realizó el crucero de investigación (23 de febrero de 2011). Las imágenes fueron obtenidas del espectrorradiómetro 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>). Las imágenes, con una resolución espacial de 1 km por pixel fueron procesadas de la siguiente manera: primero, se utilizó 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. Las masas de agua se obtuvieron mediante un mapa de dispersión y se agruparon mediante sus propiedades físicas (temperatura conservativa, salinidad absoluta y densidad).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para identificar el efecto de las variables ambientales sobre la distribución de la biomasa fitoplanctónica, se aplicó un análisis de conglomerados (Cluster), el cual tiene como

objetivo encontrar “agrupaciones naturales” donde las muestras que pertenecen a un grupo sean similares entre sí, basándose en una matriz de similitud comenzando con las similitudes mutuas más altas y luego disminuyendo gradualmente el nivel de similitud en el que se forman los grupos. El análisis de conglomerados es usado en este proyecto para diferenciar sitios que tengan una estructura hidrodinámica particular. Las matrices de datos para dichos análisis se construyeron a partir de los datos obtenidos mediante el CTD (temperatura, salinidad, densidad, oxígeno, clorofila-*a*) y se procesaron utilizando el programa PRIMER v6.

RESULTADOS

Hidrografía

Masas de agua

Se encontraron cinco masas de agua en el Cañón de Campeche por encima de los 1000m de profundidad (Figura 9), las cuales fueron: 1) Agua Común del Golfo (GCW), caracterizada por presentar un intervalo de temperatura de 22-28 °C y de salinidad de 36.2-36.4 g/kg, localizada entre 50-150 m profundidad; 2) Agua Subtropical Profunda del Caribe (CSUW), caracterizada por temperaturas de 22-26 °C y salinidad de 36.4- 36.6 g/kg ubicada por encima de los 120 m de profundidad; 3) Agua Subtropical Profunda del Atlántico Norte (NASUW), caracterizada por intervalos de temperatura de 20-25 °C y de salinidad de 36.8-37.1 g/kg, localizada entre 150-230 m de profundidad; 4) Agua Tropical Central del Atlántico (TACW), con características de temperatura de 8-20 °C y salinidad de 35-36.6 g/kg, localizada entre los 300-700 m; y 5) Agua Intermedia del Antártico (AAIW) que cuenta con características de temperatura de 5.5-6.5 °C y salinidad 35.05-35.11 g/kg y se encuentra entre los 740-900 m de profundidad (Tabla 1).

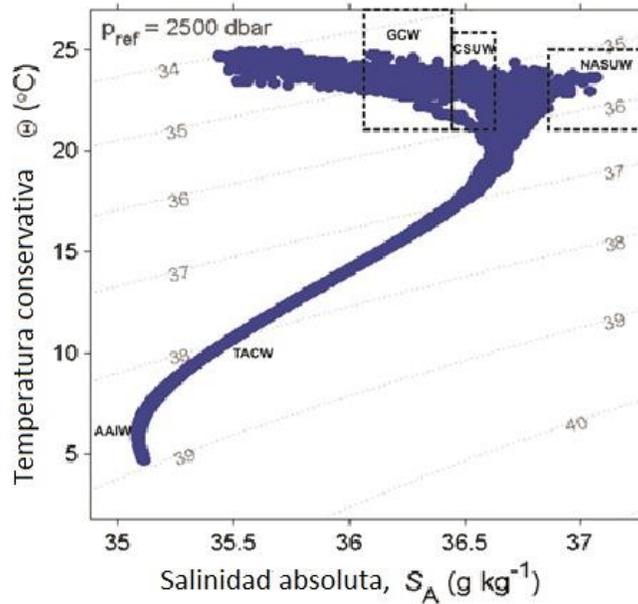


Figura 9. Definición de masas de agua por medio del diagrama de Temperatura-Salinidad (T-S): Agua Común del Golfo (GCW), Agua Subtropical Profunda del Caribe (CSUW), Agua Subtropical Profunda del Atlántico Norte (NASUW), Agua Tropical Central del Atlántico (TACW) y Agua Intermedia del Antártico (AAIW).

Tabla 1. Características termo-halinas de las masas de agua del Cañón de Campeche, de acuerdo a la clasificación de Durán-Campos *et al.* (2017) y Portela *et al.* (2018).

Masas de agua	Temperatura (°C)		Salinidad (g/kg)		Profundidad (m)
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	
GCW	22	28	36.2	36.4	50-150
CSUW	22	26	36.4	36.6	>120
NASUW	20	25	36.8	37.1	150-230
TACW	8	20	35	36.6	300-700
AAIW	5.5	6.5	35.05	35.11	740-900

Distribución horizontal de la temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$), densidad (kg/m^3) y salinidad absoluta (g/kg).

La distribución superficial de la temperatura conservativa mostró valores máximos de 24.4°C en la zona suroeste del cañón asociado con los valores mínimos de densidad que se observaron con $24.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ y de salinidad absoluta con $35.9 \text{ g}/\text{kg}$, lo cual indica que en la zona suroeste del cañón se observa agua cálida de baja salinidad y, origina una baja densidad. Se presentaron dos núcleos de salinidad en la parte norte y centro del cañón, con valores de $36.05 \text{ g}/\text{kg}$ y un núcleo en la parte sur del eje del cañón con una salinidad de $36.2 \text{ g}/\text{kg}$ asociado con los valores medios de densidad $24.25 \text{ kg}/\text{m}^3$. En la zona oeste del cañón, se observó la densidad máxima con un valor de $24.7 \text{ kg}/\text{m}^3$ y una salinidad máxima de $36.35 \text{ g}/\text{kg}$, lo cual indica agua menos cálida, más salina y densa (Figura 10)

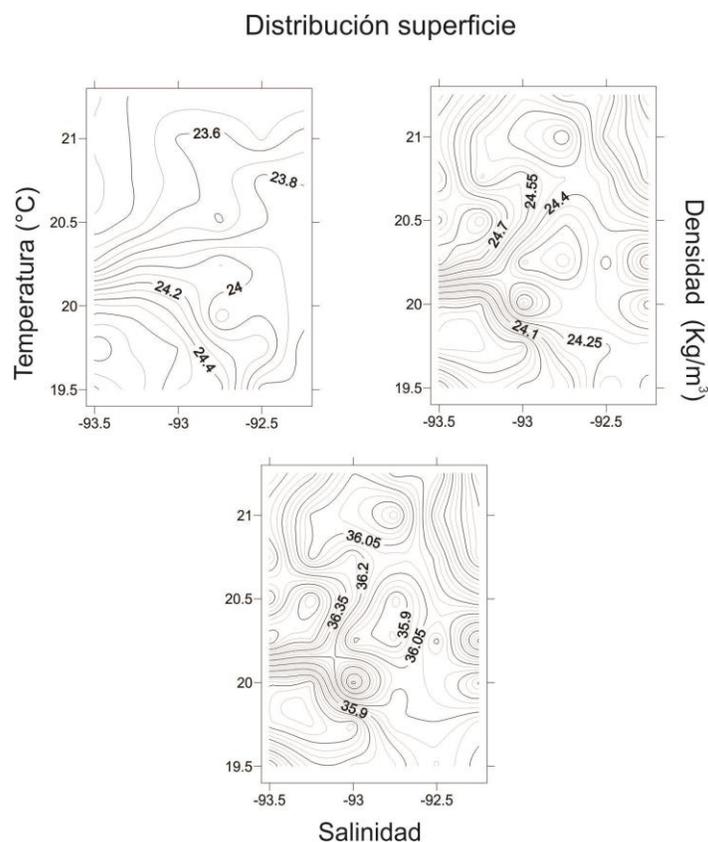


Figura 10. Distribución horizontal de la temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$), densidad (kg/m^3) y salinidad absoluta (g/kg) en superficie.

La distribución horizontal a 10 m de profundidad, mostró en la zona sur del cañón, un núcleo de agua cálida de 24.2 °C, con los valores mínimos de salinidad absoluta del orden de 35.75 g/kg, lo que explica el decremento de densidad en esa región. En la parte oeste de la zona de estudio se presentan los valores máximos de densidad y salinidad, con 24.7 kg/m³ y 36.5 g/kg respectivamente, asociado con el valor mínimo de temperatura que es de 23.5 °C, indicando que hay un núcleo de agua densa, salina y de menor temperatura (Figura 11).

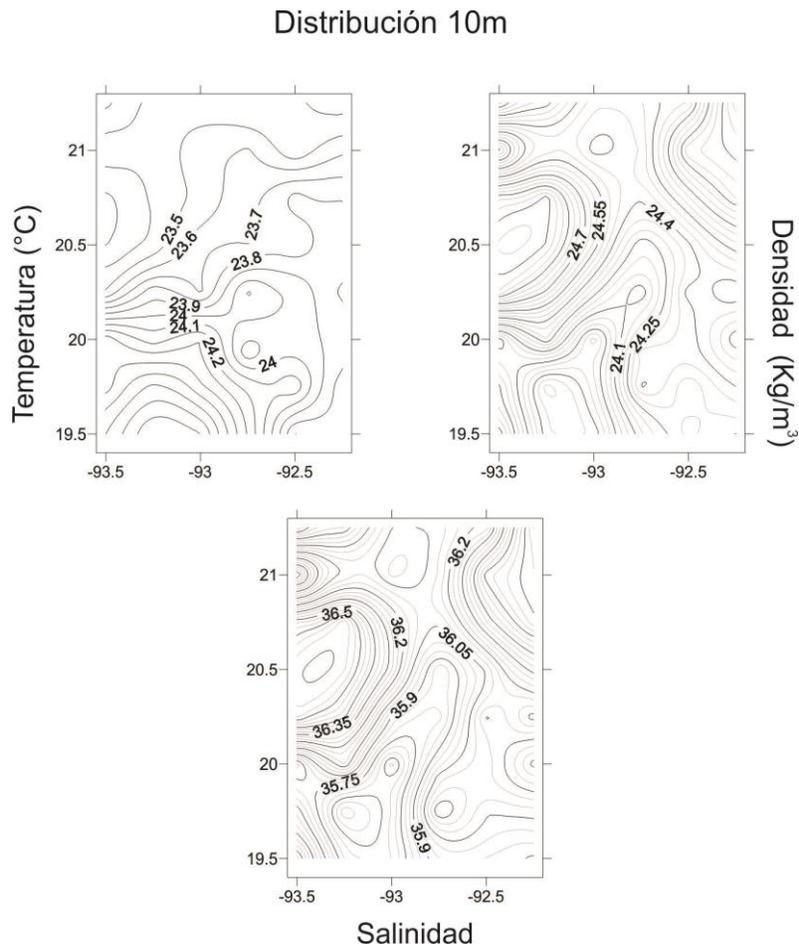


Figura 11. Distribución horizontal de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m³) y salinidad absoluta (g/kg) a 10 m de profundidad.

La temperatura a los 30 m de profundidad presentó un núcleo en la zona sur, el cual muestra la zona más cálida a esta profundidad con un valor de 23.45 °C, se presenta el agua menos salina y por lo tanto menos densa, con valores de 36.35 g/kg y 24.26 kg/m³, respectivamente. En la parte noroeste del cañón se observó un núcleo con características similares al del sur, y por debajo de este núcleo, se observaron las temperaturas más bajas, con 23.15 °C, mientras que la salinidad y la densidad alcanzan sus valores más altos con 36.75 g/kg y 25 kg/m³, respectivamente, lo que la convierte en una zona con agua de mar más densa y salina; éste núcleo sur puede ser explicado por la presencia de un vórtice de mesoescala en la región (Figura 12).

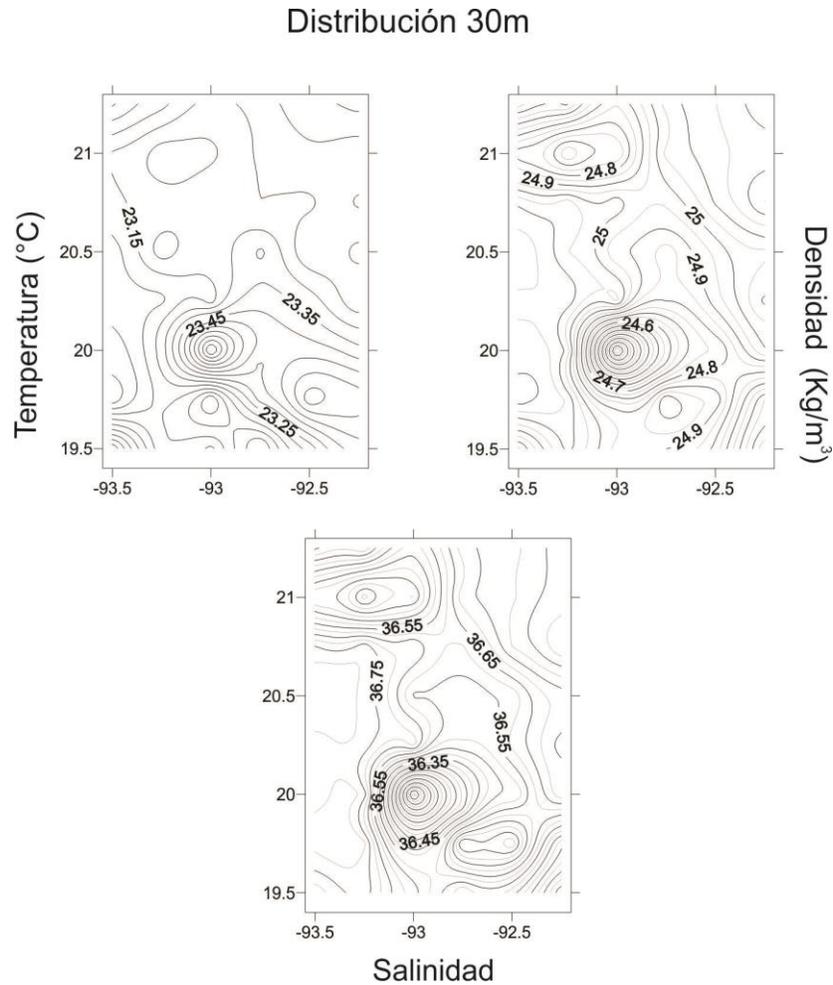


Figura 12. Distribución horizontal de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m³) y salinidad absoluta (g/kg) a 30 m de profundidad.

La distribución horizontal de la temperatura a 50 m presentó valores que van de los 22.7°C en la parte sur del área de estudio hasta los 23.1 °C en la zona este. La salinidad presentó una variación de 0.05 g/kg, con una distribución constante a lo largo de la zona de estudio; sin embargo, se observó un núcleo en la parte noreste del cañón, con un salinidad absoluta de 36.7 g/kg y dos pequeños núcleos en la parte sur con valor de 36.75 g/kg. La densidad a esta profundidad presentó, al igual que la salinidad, un núcleo en la parte noroeste y un núcleo más denso en la parte sur con valores de 25.25 kg/m³ (Figura 13).

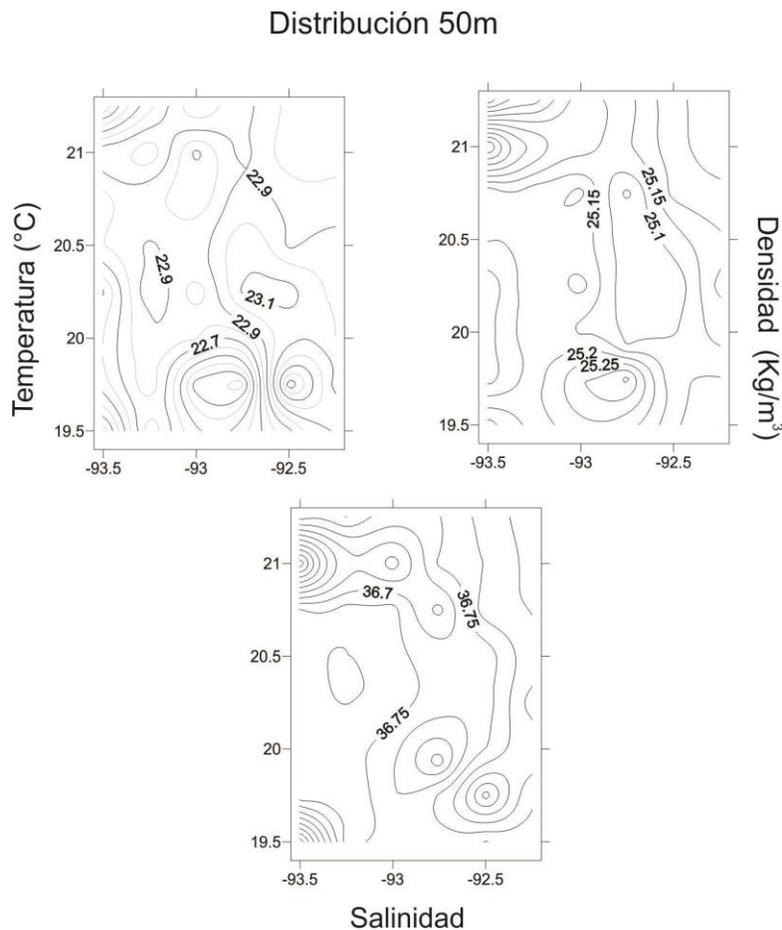


Figura 13 Distribución horizontal de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m³) y salinidad absoluta (g/kg) a 50 m de profundidad.

A 100 m de profundidad, se observó una distribución homogénea, con pocas variaciones de temperatura que oscila entre 19.6 °C a 20 °C, con los valores más bajos en la parte sur y valores más elevados en la parte este. La salinidad absoluta presentó un variación de 0.1 g/kg en la que el valor más bajo se observó en la parte sur, con 36.62 g/kg y la zona más salina se observó en la porción noreste, con un valor de 36.72 g/kg. A esta profundidad la densidad de la zona varió 0.1 kg/m³, donde el valor máximo se ubicó en la porción central y sur del cañón, mientras que la zona de menor densidad se observó en la parte este del cañón, con un valor de 25.9 kg/m³ (Figura 14).

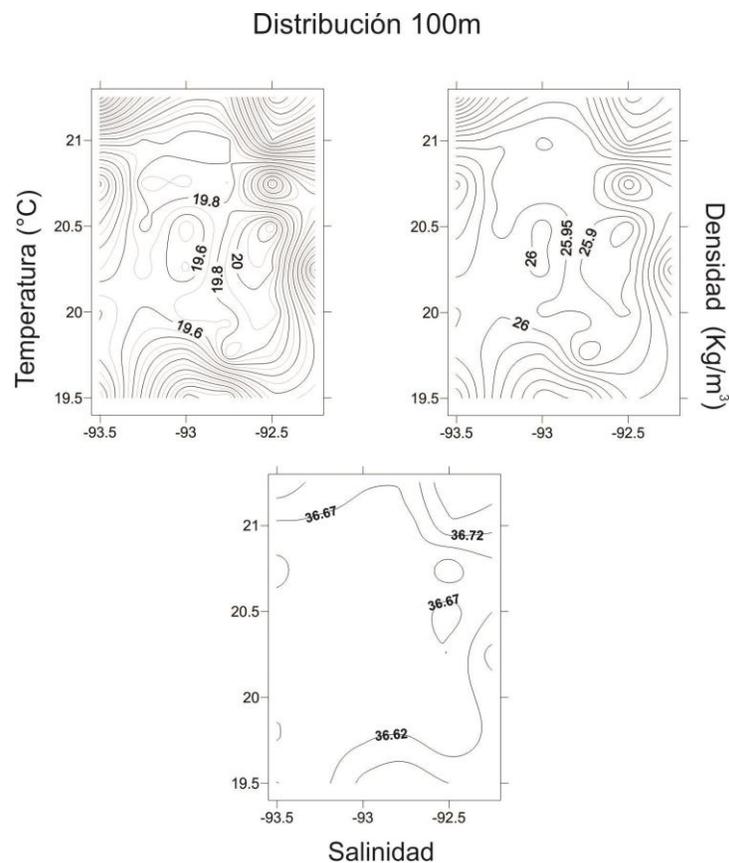


Figura 14. Distribución horizontal de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m³) y salinidad absoluta (g/kg) a 100 m de profundidad.

La distribución de los parámetros hidrográficos a 500 m de profundidad presentó dos núcleos en la parte sur de Cañón de Campeche; uno con una temperatura de 8.3 °C en la parte sureste, y otro en la región próxima, que alcanza valores de 8.0 °C a 8.2 °C. La salinidad a esta profundidad es donde tiene una menor variación, con solo 0.03 g/kg; sin embargo, se observaron dos núcleos en la misma zona que los núcleos de temperatura y densidad, lo cual puede explicarse por la presencia de dos vórtices diferentes (Figura 15).

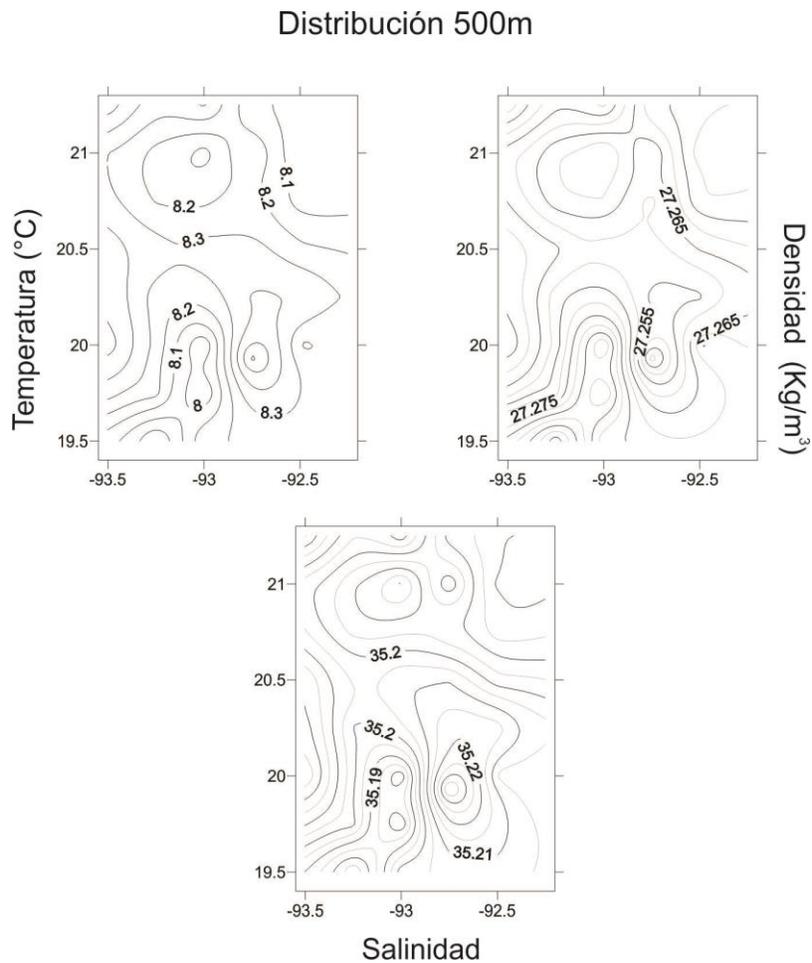


Figura 15. Distribución horizontal de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m^3) y salinidad absoluta (g/kg) a 500 m de profundidad.

La distribución a 1000 m de profundidad mostró que la temperatura tuvo un intervalo de 4.86°C a 4.96°C. La salinidad fue constante a lo largo de toda la zona del cañón con un valor de 35.1025 g/kg, mientras que la densidad presentó un mayor número de isolíneas la variación es mínima con valores de 27.629 kg/m³ a 27.634 kg/m³. Lo anterior indica que tenemos una masa de agua fría y muy densa a 1000 m de profundidad (Figura 16).

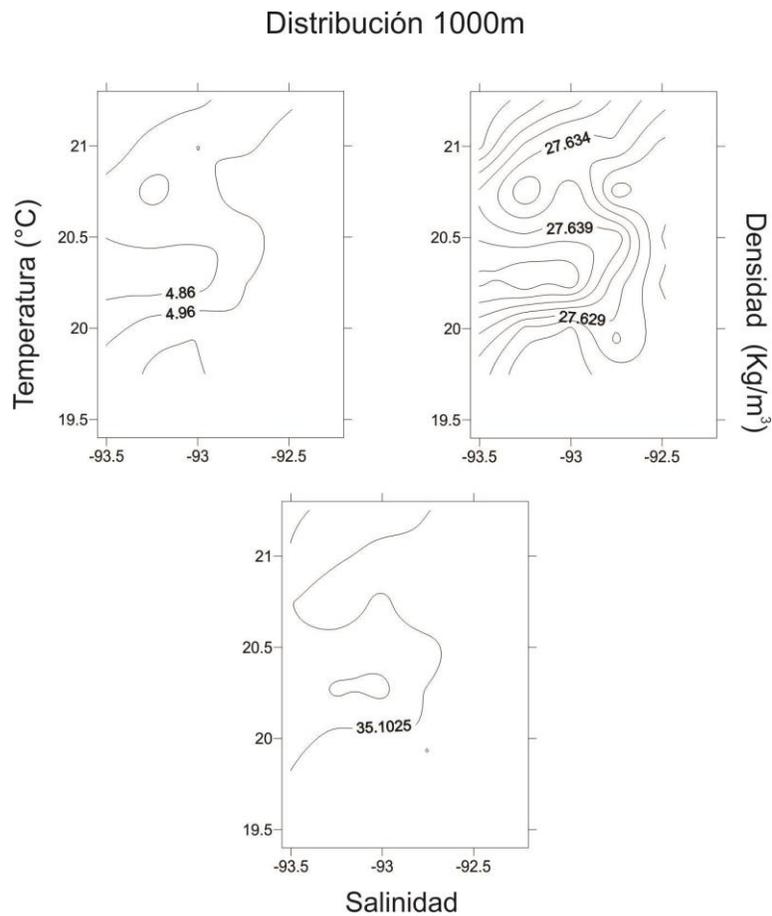


Figura 16. Distribución horizontal de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m³) y salinidad absoluta (g/kg) a 1000 m de profundidad.

Velocidades geostróficas

El cálculo de las velocidades geostróficas a diferentes profundidades mostró la presencia de diferentes vórtices, tanto ciclónicos como anticiclónicos con un diámetro de entre 10 y 20 km, los cuales coinciden con la distribución de temperatura y densidad mostrada en la sección anterior (Figura 17). Dichos vórtices se observaron asociados con la presencia de corrientes intensas, en particular en su periferia. También, se observó un patrón de corrientes interesantes en la región donde ambos vórtices interactúan, lo cual puede originar frentes. La circulación de las corrientes coincide con las isoclinas y los núcleos de las propiedades hidrográficas (Figura 10, Figura 13 y Figura 14), los cual nos indican que los vórtices presentan propiedades únicas dentro de la zona.

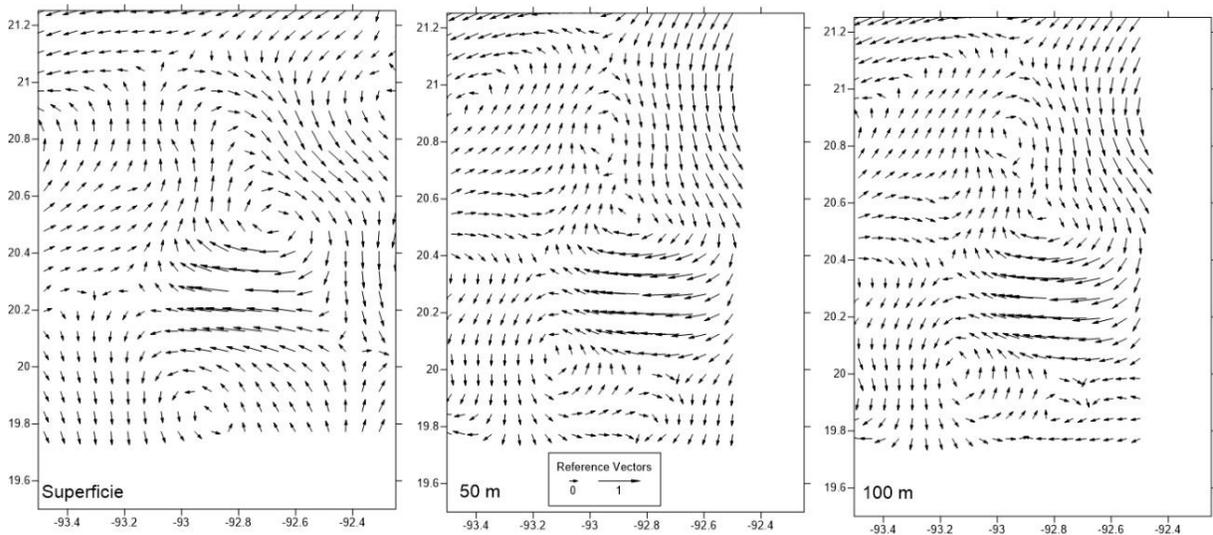


Figura 17. Circulación geostrófica (m/s) a diferentes profundidades; superficie, 50 m y 100 m.

Distribución horizontal de la clorofila-*a* y oxígeno disuelto

La distribución de la clorofila-*a* en la superficie, mostró los valores más altos en la parte sur y centro del área de estudio, con 0.13 mg/m^3 y 0.11 mg/m^3 , respectivamente, mientras que en la zona norte se observaron concentraciones de 0.09 mg/m^3 . El oxígeno disuelto mostró

una concentración que va aumentando hacia el norte del cañón, con un intervalo desde 4.15 a 4.55 mg/L, lo cual indica una menor concentración de clorofila y mayor oxigenación del agua de la zona norte y a la inversa en la zona sur (Figura 18). La concentración de clorofila y oxígeno a los 10 m de profundidad, mostró ligeras diferencias respecto al patrón de distribución observado en la superficie, debido a la cercanía de las profundidades (Figura 19).

Distribución superficie

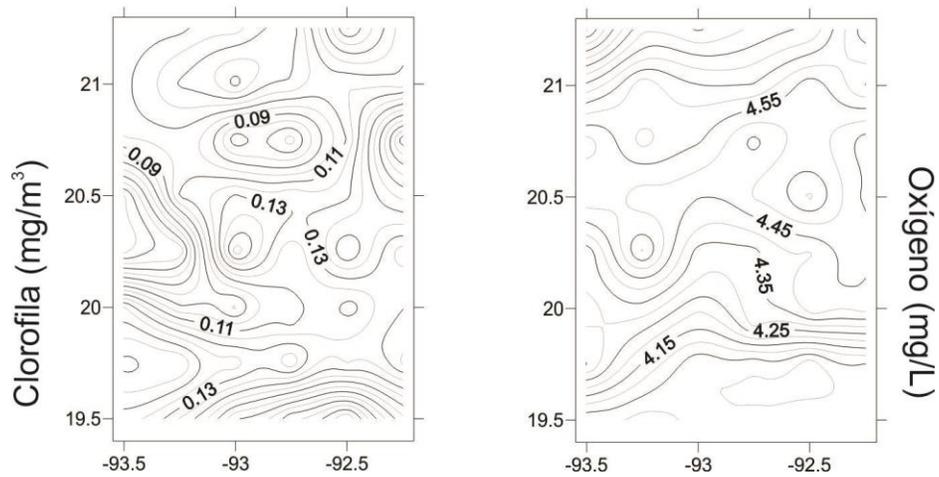


Figura 18 Distribución horizontal de la clorofila (mg/m³) y del oxígeno disuelto (mg/L) en la superficie.

Distribución 10m

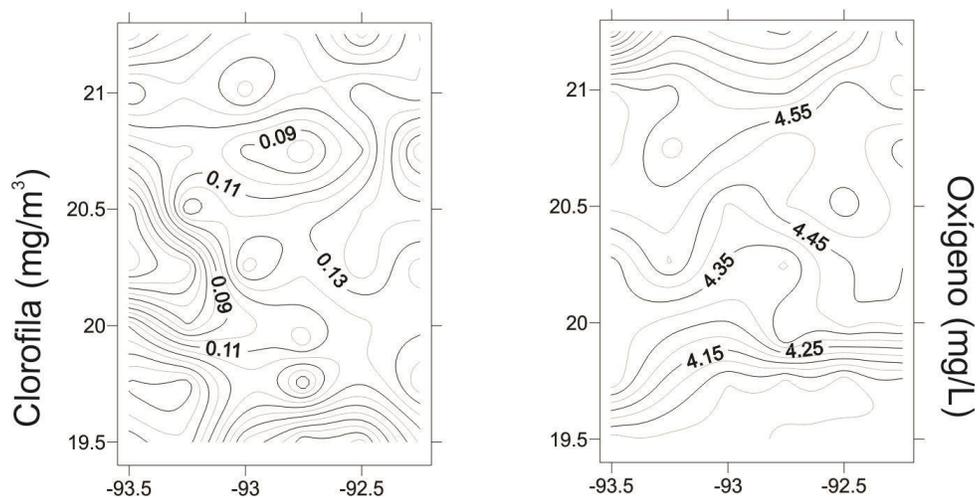


Figura 19. Distribución horizontal de la clorofila (mg/m^3) y oxígeno disuelto (mg/L) a 10 m de profundidad.

La distribución de clorofila-*a* a 30 m de profundidad, mostró un núcleo en la parte sur con la concentración más alta de $0.35 \text{ mg}/\text{m}^3$; se presentó un segundo núcleo en la zona norte-central con valores de $0.25 \text{ mg}/\text{m}^3$. La concentración mínima de clorofila se observó fuera de los núcleos sur y norte-central con valores de $0.13 \text{ mg}/\text{m}^3$ y $0.19 \text{ mg}/\text{m}^3$, respectivamente. La máxima concentración de clorofila-*a* se observó en el centro del núcleo y la concentración mínima de clorofila se presentó en la periferia de los núcleos, lo cual puede explicarse por un vórtice anticiclónico, debido a sus características. La concentración de oxígeno no mostró un cambio significativo comparado con la distribución de profundidades anteriores, debido principalmente a la influencia de la penetración de los vientos (Figura 20).

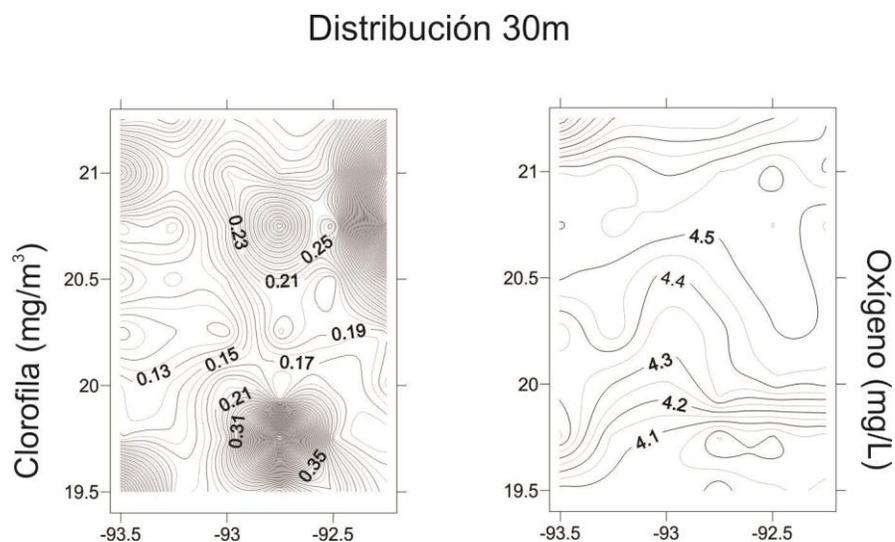


Figura 20. Distribución horizontal de la clorofila (mg/m^3) y oxígeno disuelto (mg/L) a 30 m de profundidad.

La distribución a 50 m de profundidad presentó el valor máximo de clorofila en la parte sur de la zona de estudio, con un valor de $1.22 \text{ mg}/\text{m}^3$ localizado en un núcleo, mientras que en

la zona norte se observaron dos núcleos con valores de 0.94 mg/m^3 . El oxígeno disuelto presentó un gradiente de 0.1 mg/L hacia el norte (Figura 21). A 100 m de profundidad los valores de clorofila máximos se observaron en la parte oeste con valores de 0.35 mg/m^3 , y con un gradiente de 0.04 mg/m^3 generado por una circulación hacia el este del cañón. El oxígeno no presentó una variación dentro de la zona eufótica a lo largo de la columna de agua. Sin embargo, la zona norte del cañón presentó una concentración más alta de oxígeno disuelto, principalmente por la penetración de los vientos (Figura 22).

Distribución 50m

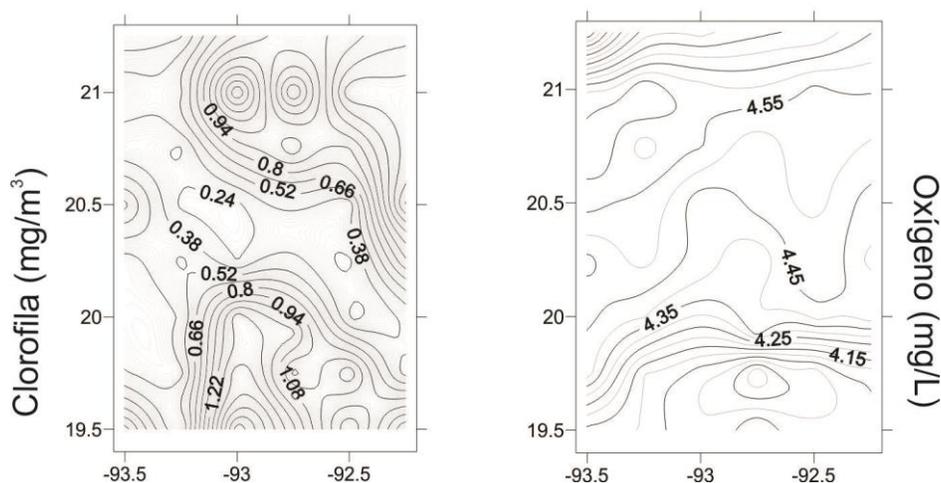


Figura 21. Distribución horizontal de la clorofila (mg/m^3) y oxígeno disuelto (mg/L) a 50 m de profundidad.

Distribución 100m

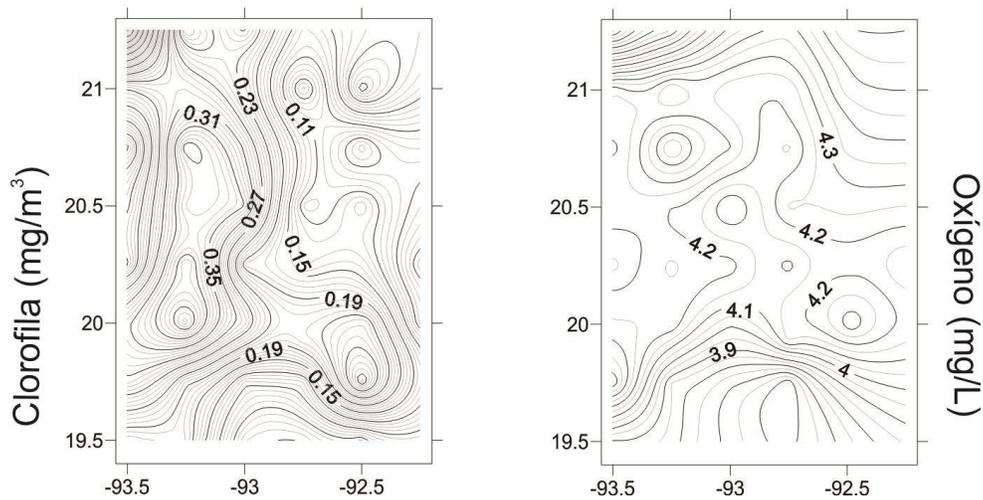


Figura 22. Distribución horizontal de la clorofila (mg/m^3) y oxígeno disuelto (mg/L) a 100 m de profundidad.

Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales obtenidas para el día del crucero oceanográfico (23 de febrero de 2011) en general coinciden con la distribución horizontal obtenida por las observaciones *in-situ* (Figura 23). Los valores obtenidos en la temperatura superficial del mar mediante satélite coinciden con los mostrados en la Figura 10, con un intervalo entre 23 y 25 °C; la imagen muestra que los mayores valores se localizaron en la región próxima a la costa. La distribución de la clorofila-*a* medida por satélite mostró que los mayores valores se localizaron en la región costera, y se observó la presencia de diversos filamentos que se presentaron principalmente a lo largo de eje del cañón. La presencia de dichos filamentos ha sido relacionada con la ocurrencia de los procesos de mesoescala, tales como los vórtices.

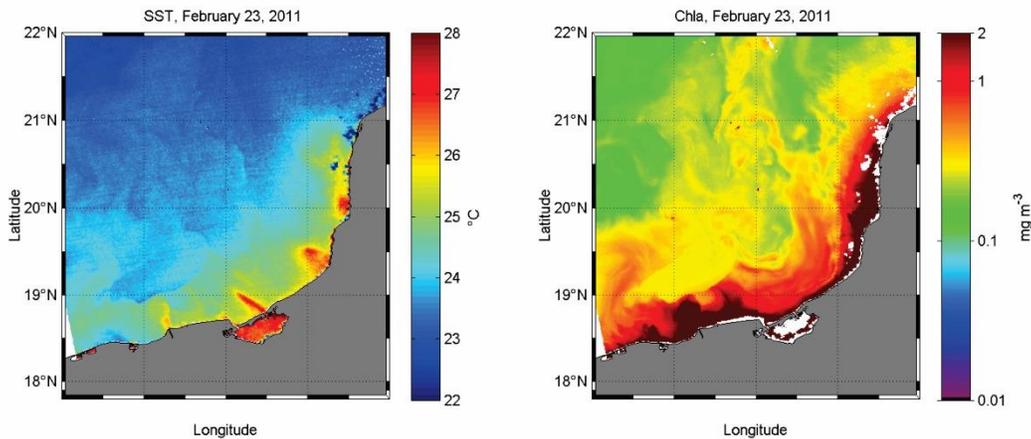


Figura 23. Imágenes satelitales de la temperatura superficial del mar y de la clorofila-*a* del 23 de febrero de 2011.

Distribución vertical de la clorofila-*a*

Con el objetivo de determinar la distribución vertical de la clorofila-*a* y su relación con las variables físicas, se realizaron perfiles verticales en todas las estaciones hidrográficas. Con base en las diferencias topográficas de la región (ver Figura 8), en esta sección se presentan dichos perfiles divididos en dos grandes regiones: 1) la región profunda del cañón, y 2) la región del Banco de Campeche.

Región del Cañón de Campeche

La distribución vertical de la densidad presentó una picnoclina estacionaria por encima de los 30 m y valores de 24.5 kg/m^3 y una picnoclina permanente alrededor de los 70 m con valores máximos de 25.5 kg/m^3 . La temperatura mostró que la termoclina se formó a los 70 m con valores de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ a $24 \text{ }^\circ\text{C}$, asociada a la picnoclina permanente, y una segunda termoclina estacional en la superficie. Los picos máximos de clorofila en la región del Cañón de Campeche están asociados con la picnoclina y con la termoclina, ya sean estacionales o permanentes, lo cual genera una barrera de densidad que los organismos unicelulares no pueden penetrar. El oxígeno disuelto disminuye en la zona de cambio de densidad (picnoclina), principalmente por el consumo de organismos, e incrementa su concentración por debajo de la zona eufótica (Figuras 24, 25 y 26).

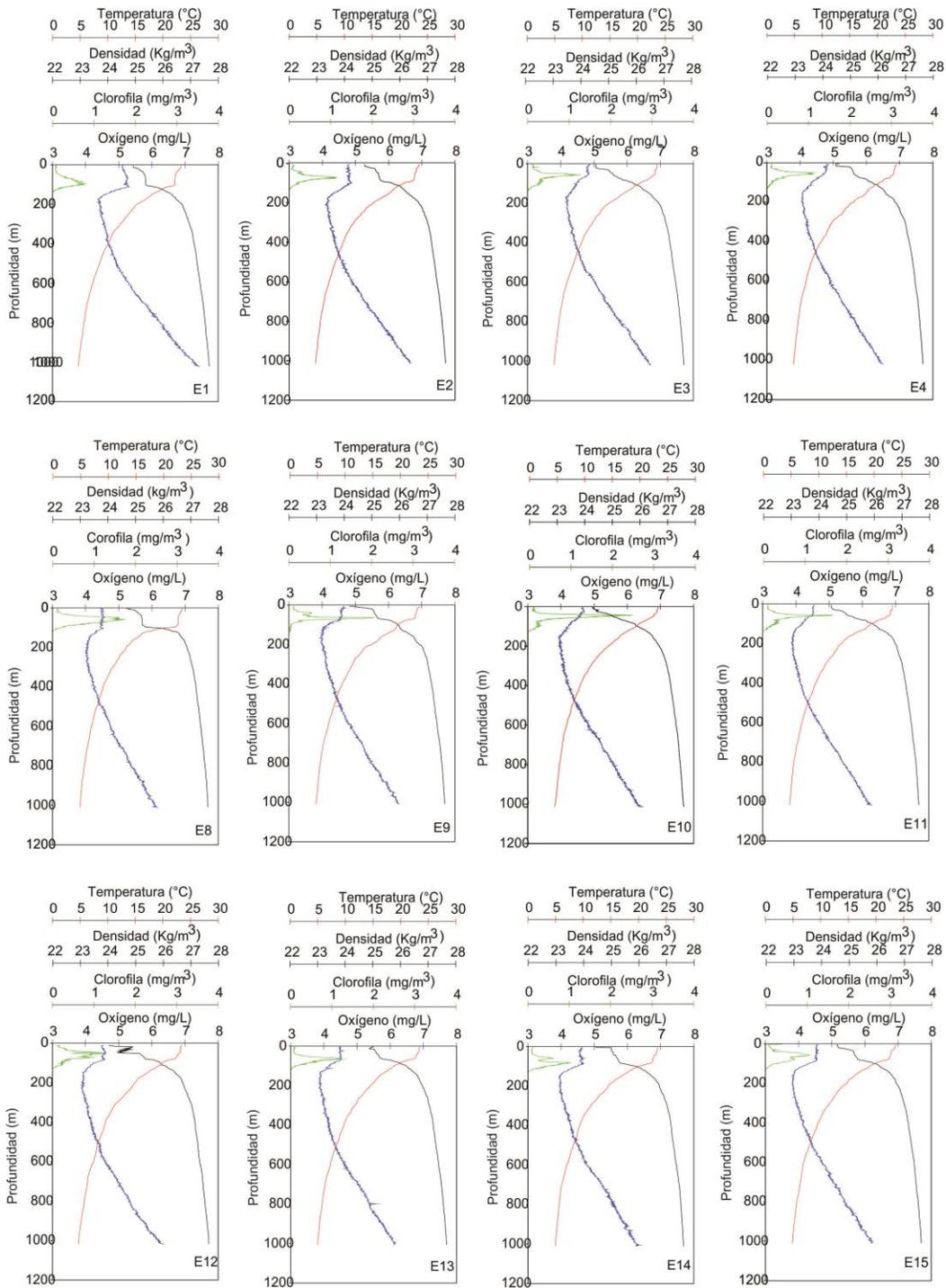


Figura 24. Distribución vertical de la temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$), densidad (kg/m^3), clorofila- a (mg/m^3) y oxígeno disuelto (mg/L) representadas por las líneas de color rojo, negro, verde y azul, respectivamente, de las estaciones profundas del Cañón de Campeche (>1000 m).

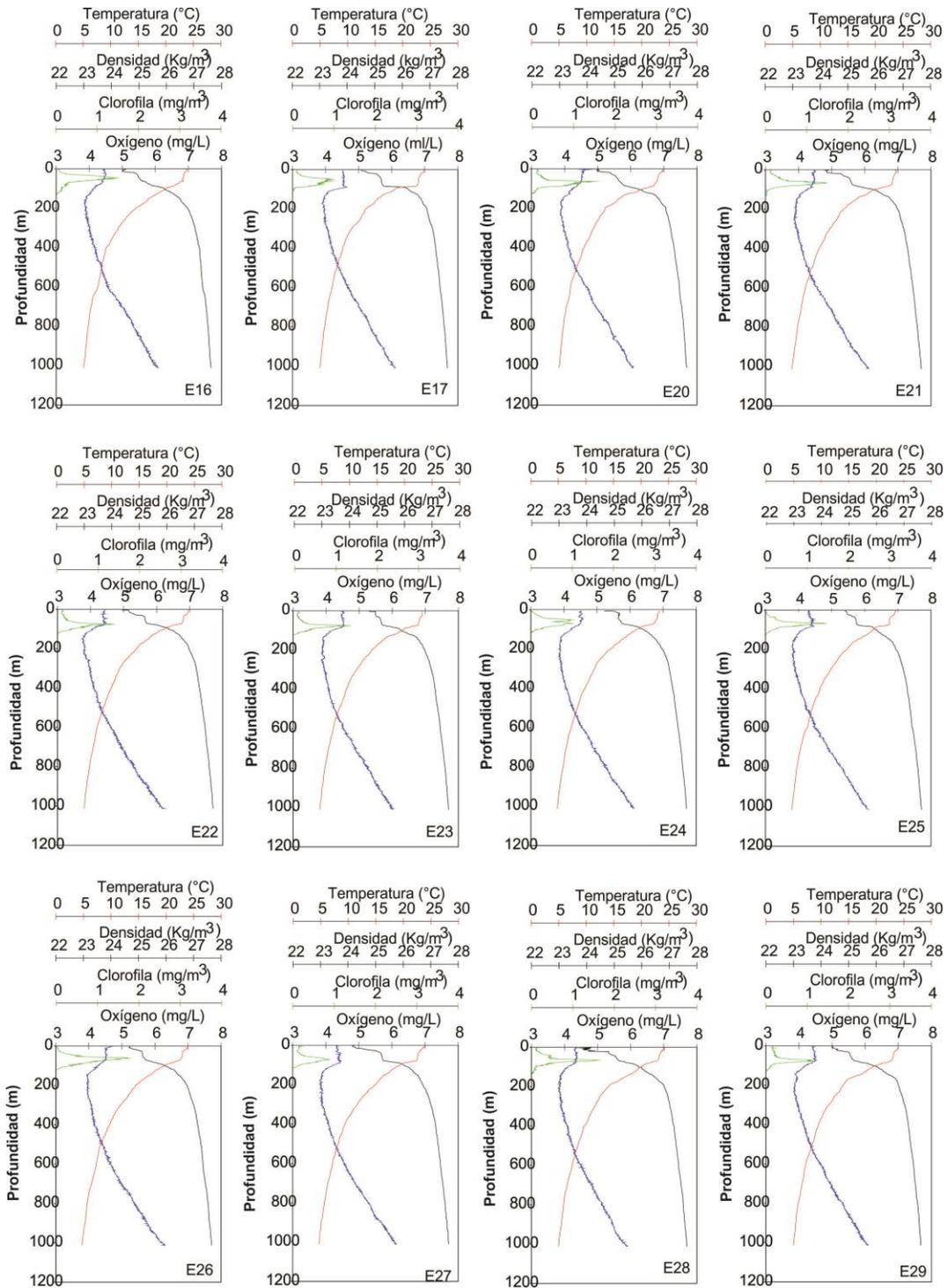


Figura 25. Distribución vertical de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m³), clorofila-a (mg/m³) y oxígeno disuelto (mg/L) representadas por las líneas de color rojo,

negro, verde y azul, respectivamente, de las estaciones profundas del Cañón de Campeche (>1000 m) Continuación.

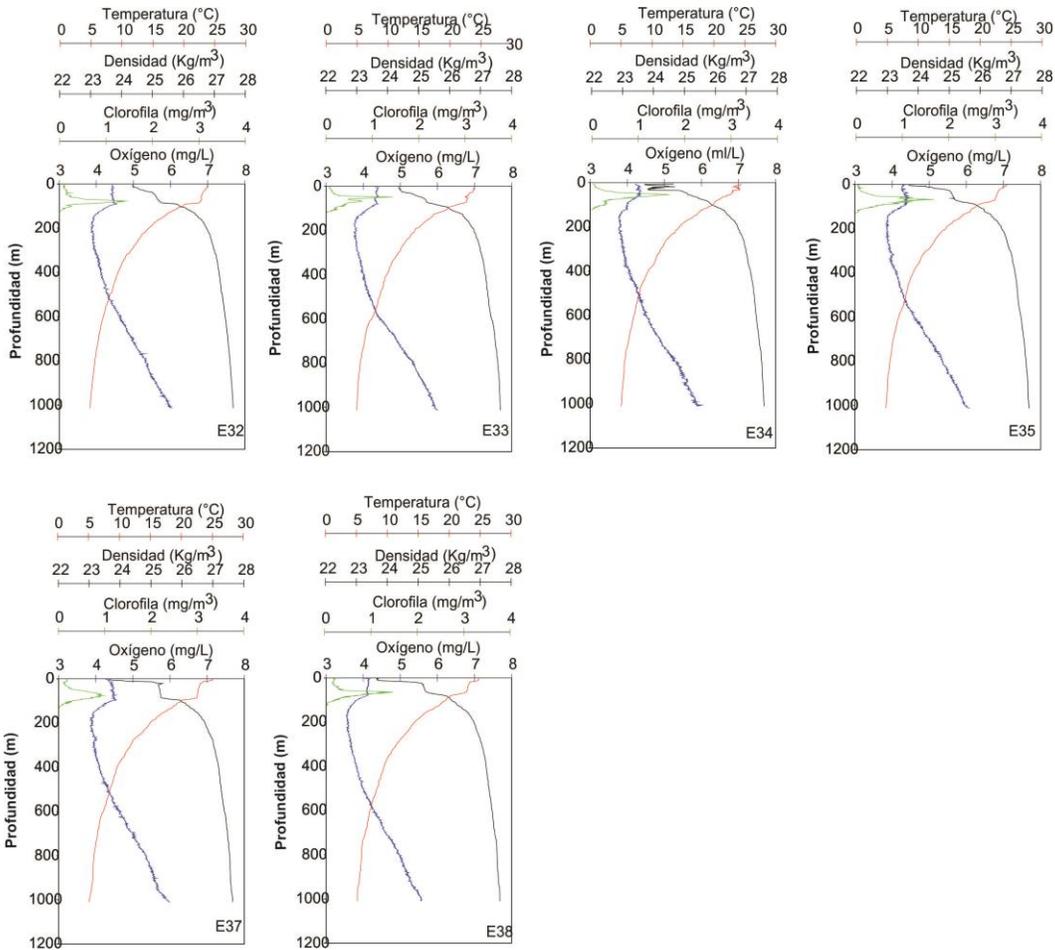


Figura 26. Distribución vertical de la temperatura conservativa (°C), densidad (kg/m³), clorofila-*a* (mg/m³) y oxígeno disuelto (mg/L) representadas por las líneas de color rojo, negro, verde y azul, respectivamente, de las estaciones profundas del Cañón de Campeche (>1000 m).

Región del Banco de Campeche

La distribución vertical en el Banco de Campeche mostró que la temperatura presenta una termoclina estacional y permanente por encima de los 50 m y los 100 m, con valores de densidad de 25 kg/m³ y 25.5 kg/m³, respectivamente. El pico máximo de clorofila de esta región se presentó por encima de la picnoclina estacional, debido a la presencia de un vórtice ciclónico (Figura 27, estación 40). El oxígeno disuelto en las estaciones con

profundidades menores a 100 m, se presentó constata a lo largo de la columna de agua, mientras que a profundidades mayores presenta un aumento en su concentración, alcanzando los valores máximos a grandes profundidades (Figuras 27 y 28).

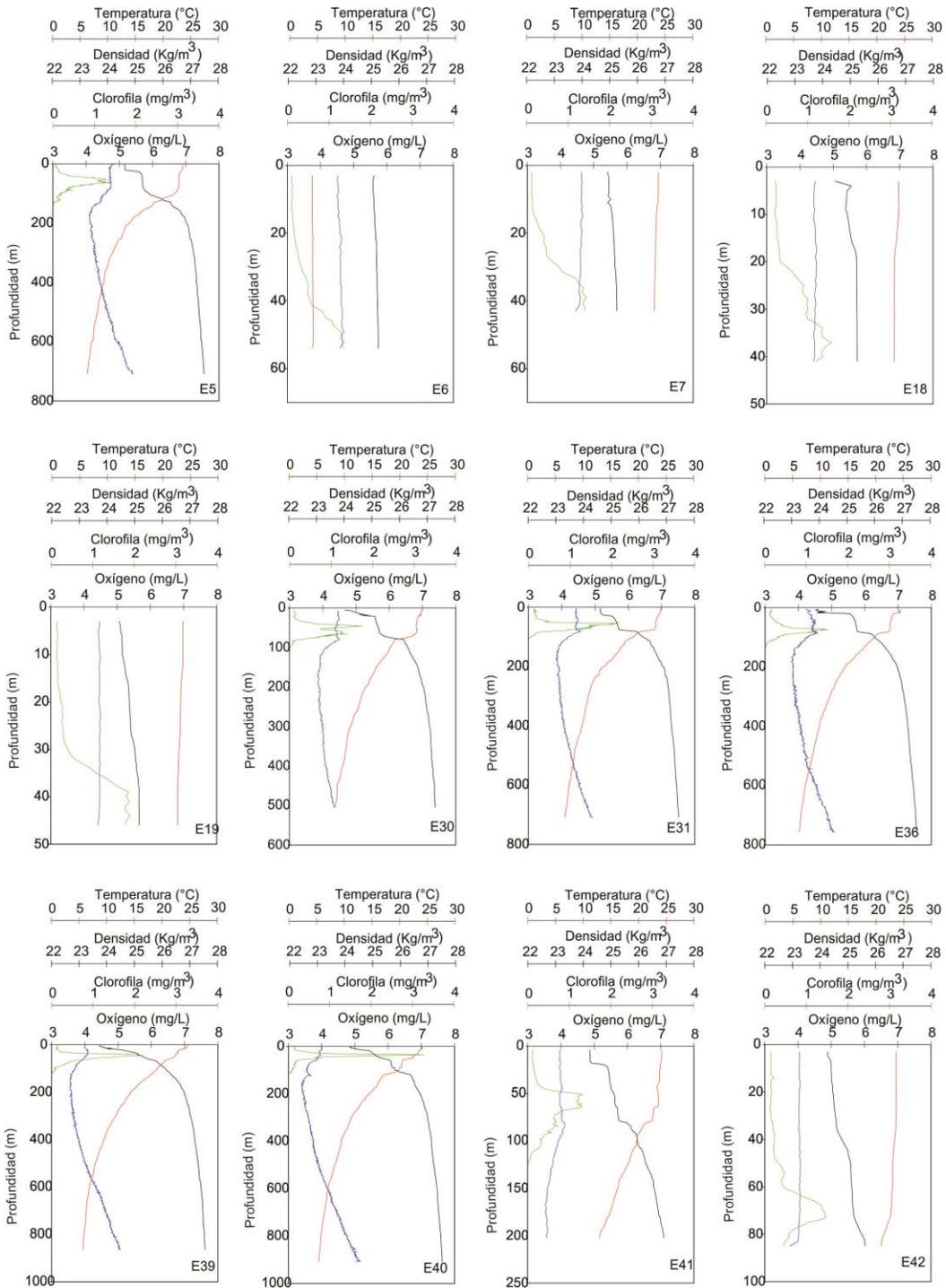


Figura 27. Distribución vertical de la temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$), densidad (kg/m^3), clorofila-*a* (mg/m^3) y oxígeno disuelto (mg/L) representadas por las líneas de color rojo, negro, verde y azul, respectivamente, de las estaciones poco profundas del Cañón de Campeche ($<1000\text{ m}$).

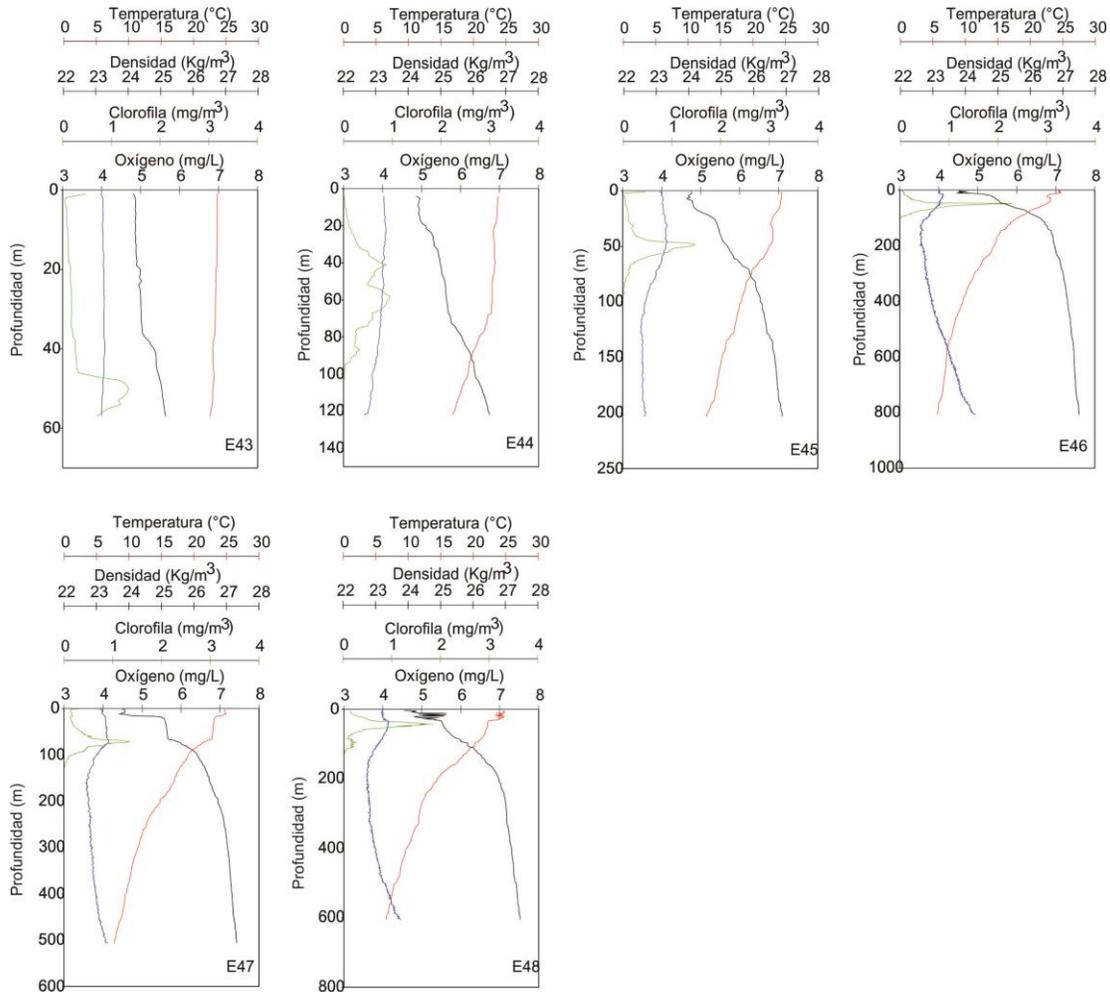


Figura 28. Distribución vertical de la temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$), densidad (kg/m^3), clorofila-*a* (mg/m^3) y oxígeno disuelto (mg/L) representadas por las líneas de color rojo, negro, verde y azul, respectivamente, de las estaciones poco profundas del Cañón de Campeche ($<1000\text{ m}$) Final.

Análisis estadísticos

El análisis de conglomerados mostró que a 10 m de profundidad se presentan 6 grupos estadísticamente significativos, en los cuales se distingue la estación 18 con un comportamiento único, al ser la estación con mayor concentración de clorofila-*a*; otro grupo lo conforman las estaciones 24, 25 y 26, las cuales están en un núcleo de temperatura, salinidad y densidad (ver Figura 11); un tercer grupo conformado por las estaciones 6, 7, 8, 14 y 23, presenta la mejor similitud entre estaciones, debido a que las variaciones entre sus valores de cada una de las variables fue mínima (Figura 29).

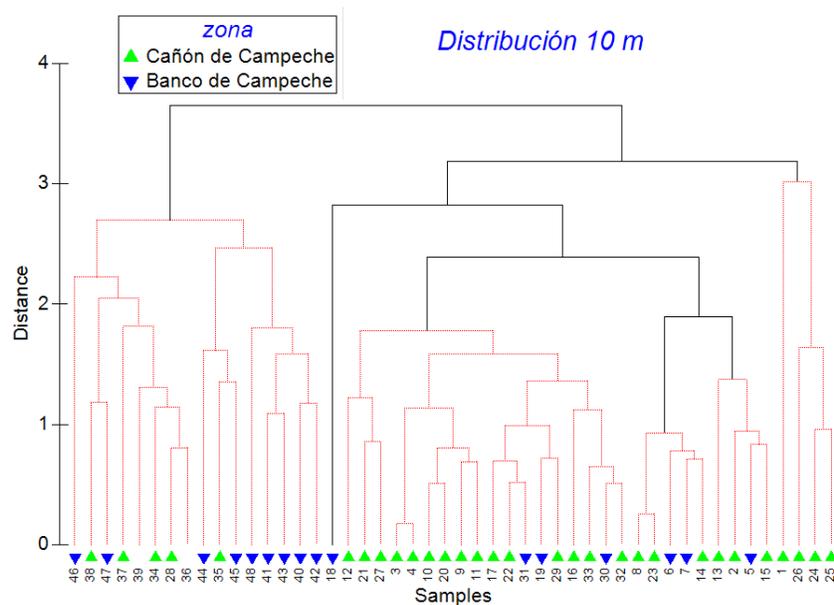


Figura 29. Análisis Cluster de las estaciones hidrográficas (Cañón de Campeche y Banco de Campeche) a 10 m de profundidad.

Los resultados obtenidos del análisis de conglomerados a una distribución de 30 m mostraron 7 grupos, de los cuales el grupo estadísticamente más significativo es el de las estaciones 3, 10, 11, 12, 21, 28, 32 y 33, el cual tiene como máxima variación 0.43 mg/L, en la concentración de oxígeno disuelto, mientras que la variable con menos variación es la clorofila-*a* con 0.01 mg/m³; Las estaciones 1 y 34 presentan un comportamiento único, el cual genera dos grupos respectivamente; en la zona del Banco de Campeche se observaron 3 grupos, uno lo comprenden las estaciones 39, 44, 45 y 46 que están asociados al giro

ciclónico ubicado al sur de la zona de estudio (ver figura 17); un grupo distinto lo forman las estaciones 41, 42, 43 y 48, las cuales presentan valores de clorofila-*a* muy similares en las primeras tres estaciones (0.15-0.18 mg/m³) mientras que la estación 48 presentó una elevada concentración (0.5 mg/m³), sin embargo forma parte del grupo porque los valores del resto de variables son muy similares (Figura 30).

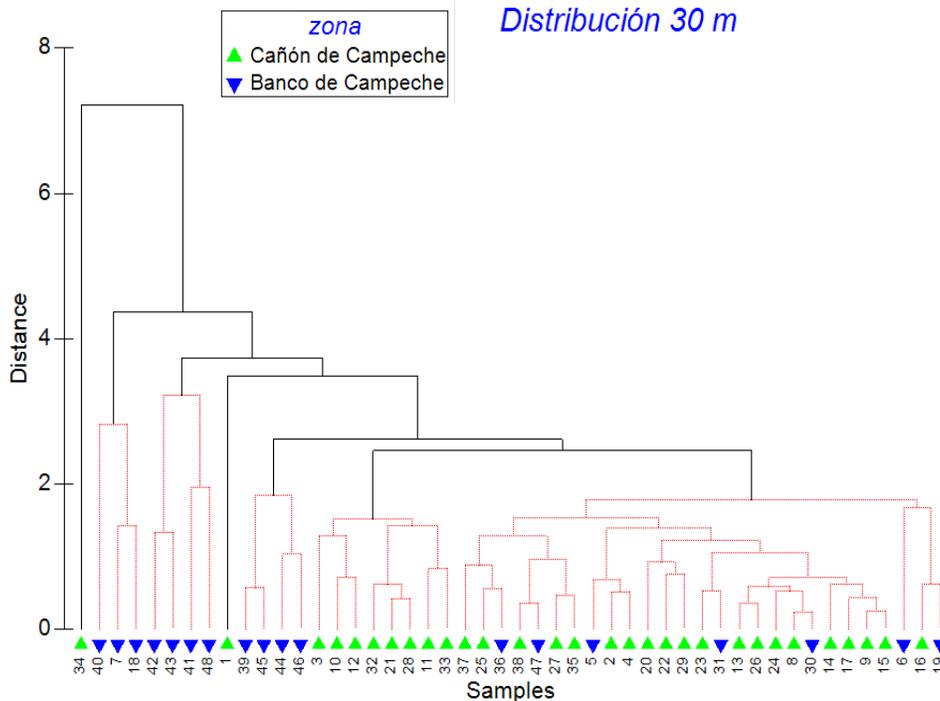


Figura 30. Análisis Cluster de las estaciones hidrográficas (Cañón de Campeche y Banco de Campeche) a 30 m de profundidad.

Los resultados obtenidos del análisis de conglomerados a 50 m de profundidad mostró 10 grupos, las estaciones 1, 40 y 41 presentan una dinámica única y por lo tanto un grupo cada una de ellas; las estaciones 3 y 4 generan el grupo estadísticamente más significativo al presentar variaciones máximas de 0.2 mg/m³ en la concentración de clorofila-*a* y mínimas de 0.02 en la salinidad; las estaciones 39, 45 y 46 permanecen agrupadas por la influencia del vórtice ciclónico y donde se presentan las máximas concentraciones de clorofila-*a*; otro grupo formado por las estaciones 5, 6, 8, 15, 17, 19, 24 y 30, se asociaron principalmente porque su temperatura oscila entre los 22.7°C a los 22.9°C (Figura 31).

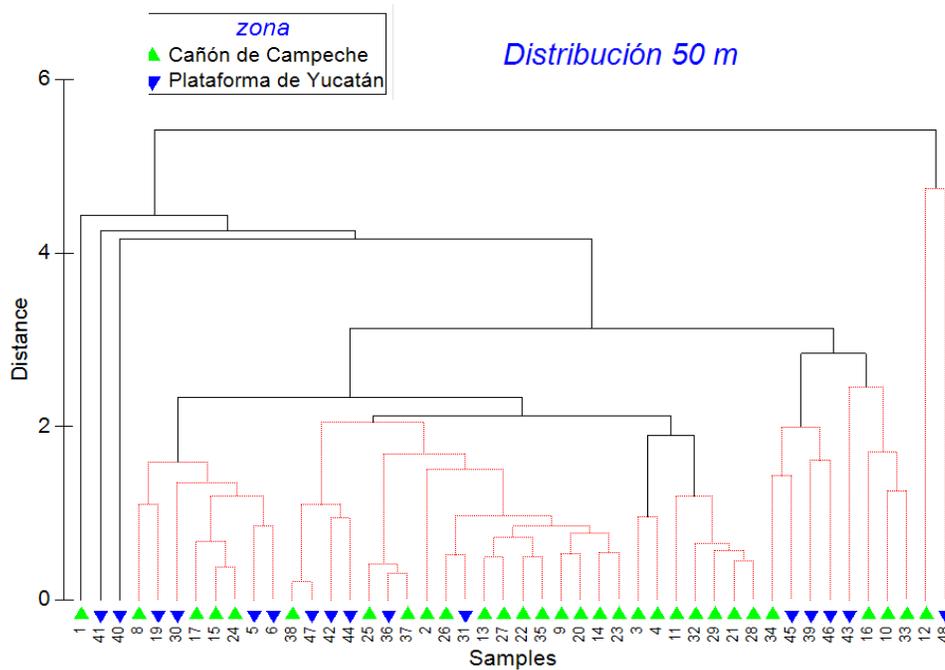


Figura 31. Análisis Cluster de las estaciones hidrográficas (Cañón de Campeche y Banco de Campeche) a 50 m de profundidad.

DISCUSIÓN

La distribución de las masas de agua al interior del Golfo de México es altamente variable derivado del elevado hidrodinamismo de la región. Por ejemplo, la proporción del Agua Común del Golfo en épocas de nortes tiene una mayor presencia con respecto a lo documentado para primavera-verano por Duran-Campos *et al.* (2017) y Portela *et al.* (2018), esto se debe a que la formación de esta masa de agua se lleva a cabo dentro del Golfo de México en época de nortes, derivado de: la dinámica de las corrientes y por la presencia de los intensos vientos en esa época del año.

Los resultados mostrados por las velocidades geostroficadas del área de estudio en este trabajo, coinciden con lo reportado por Aldeco-Ramírez *et al.* (2009), al presentar un vórtice ciclónico en la región sur del cañón de Campeche y un vórtice anticiclónico en la

región central del cañón, debido a dos factores principales: 1) la fricción de la corriente con el talud del cañón; y 2) el desprendimiento de vórtices anticiclónicos procedentes de la Corriente de Lazo, respectivamente.

Con respecto a la temperatura, Duran-Campos *et al.* (2017) mostraron que la isolínea de temperatura de 18.5 °C se presentó en un intervalo de 120 m a 140 m, sin embargo, Salas de León *et al.* (2004), documentaron que esta se presenta a profundidades de 75 m a 130 m, mientras que en este estudio se observó que la isolínea de 18.5 °C tiene valores de profundidad mínimos de 90 m y máximos de 140 m, lo que indica que en época de nortes la profundidad alcanzada por la temperatura a 18.5 °C es mayor.

Salas de León *et al.* (2004) señalaron que los valores máximos de clorofila-*a* presentes en la región del cañón de Campeche para la época de verano tienen concentraciones desde 0.008 a 0.44 mg/m³, y se presentaron en un intervalo de profundidad de 80 a 90 m; sin embargo, en este estudio, el valor máximo de clorofila-*a* fue de 2.5 mg/m³ y se presentó a una profundidad de ~40 m. Estas marcadas diferencias en la concentración de clorofila-*a* pueden ser explicadas a la mezcla de la columna de agua que se genera en la época de nortes en el Golfo de México derivada de los intensos vientos; esta mezcla de la columna de agua induce a una elevada concentración de nutrientes hacia la zona eufótica disponible para el fitoplancton, y aunque no contamos con mediciones de nutrientes para este crucero, se asume que la concentración fue elevada, lo cual puede ser explicado por la elevada concentración de clorofila-*a*.

Duran-Campos *et al.* (2017) señalaron que en la región del Banco de Campeche, el valor máximo de clorofila está asociado con el fondo debido a la poca profundidad del área y fue de 0.6 mg/m³, mientras que este estudio reportó que el pico máximo de clorofila-*a* fue de 3.2 mg/m³, asociado a una picnoclina estacionaria, elevada por un vórtice ciclónico.

La presencia del pico máximo de clorofila-*a* en el centro del vórtice ciclónico, se debe a un bombeo de Ekman, que favorece la producción de fitoplancton de la zona al elevar los nutrientes hacia la capa eufótica, este patrón fue observado con anterioridad por Coria-Monter *et al.* (2017).

La concentración de oxígeno disuelto en época de nortes mostró un gradiente interesante desde la zona sur hacia la zona norte a lo largo de la zona de estudio, lo cual coincide con lo reportado para la época de verano por Salas de León *et al.* (2004) y Aldeco-Ramírez (2009), esto puede ser explicado por la surgencia de Yucatán que fertiliza las aguas superficiales y por la intensidad de los vientos en la época de nortes. La presencia de núcleos de clorofila-*a* no elevó las concentraciones de oxígeno debido al consumo que se presentan en estas zonas de alta productividad.

Las imágenes satelitales mostraron una temperatura superficial que varía de 23 a 24 °C ligada con los vórtices presentes en la zona de estudio, estos valores coinciden con lo reportado por Linacre *et al.* (2015) y Faber-Lorda *et al.* (2019) para el mes de febrero. El análisis de clorofila-*a* superficial por medio de las imágenes satelitales mostró en la zona de estudio valores máximos de 0.5 mg/m³ y 0.04 mg/m³ para las regiones del Banco de Campeche y el Cañón de Campeche, respectivamente, mientras que Faber-Lorda *et al.* (2019) presentó valores máximos de 0.6 mg/m³ para la región del Banco de Campeche y 0.3 mg/m³ para el Cañón de Campeche. Esta diferencia de concentraciones se debe principalmente a las marcadas diferencias de profundidad entre las regiones muestreadas, donde penetración de la luz y la mezcla con el fondo elevan la productividad de la zona.

Los resultados presentados aquí contribuyen al conocimiento de la ecología del fitoplancton en la región sur del Golfo de México durante una temporada de nortes, un periodo en el que las mediciones *in-situ* desde barcos son escasas debido a los desafíos planteados a las expediciones marítimas durante una época del año en la que los vientos y las corrientes son extremas, lo que complica la adquisición de datos de alta calidad. Los resultados presentados aquí también resaltan la necesidad de combinar observaciones *in-situ* y satelitales para explorar patrones de distribución de biomasa de fitoplancton y sus variaciones estacionales, particularmente en regiones que se caracterizan por tener un elevado hidrodinamismo y una alta productividad como el Golfo de México.

CONCLUSIONES

- La distribución vertical de las masas de agua en temporada de nortes indica una zona de mezcla, en donde se presentó una dominancia del Agua Común del Golfo,

seguida por el Agua Subtropical Profunda del Caribe y Agua Subtropical Profunda del Atlántico Norte, respectivamente; por debajo de esta capa de mezcla se encontró el Agua Tropical Central del Atlántico y el Agua Intermedia del Antártico.

- Se presenta un giro ciclónico en la zona sur del cañón y un giro anticiclónico en la zona centro-norte, ambos fueron superficiales y subsuperficiales.
- La distribución horizontal de clorofila-a mostró que las mayores concentraciones estuvieron presentes en la región sur del área de estudio, lo cual confirma que la presencia del vórtice afecta directamente la distribución de la biomasa fitoplanctónica.
- La distribución vertical de clorofila-a mostró que la mayor concentración se presentó en la región del Banco de Campeche y estuvo asociado con la picnoclina estacional.
- Estos resultados muestran que el Cañón de Campeche es una zona altamente productiva debido a los procesos hidrodinámicos que se presentan durante la época de nortes.

REFERENCIAS

- Allen, S. E., Vindeirinho, C., Thomson, R. E., Foreman, M. G., y Mackas, D. L. (2001). Physical and biological processes over a submarine canyon during an upwelling event. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 58(4):671-684. DOI: 10.1139/cjfas-58-4-671
- Aldeco, J., Monreal-Gómez, M. A., Signoret, M., Salas-de León, D. A., y Hernández-Becerril, D. U. (2009). Occurrence of a subsurface anticyclonic eddy, fronts, and *Trichodesmium* spp. over the Campeche Canyon region, Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 35(4): 333-344. doi: <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v35i4.1551>.
- Ardhuin, F., Pinot, J. M., y Tintoré, J. (1999). Numerical study of the circulation in a steep canyon off the Catalan coast (western Mediterranean). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C5), 11115-11135. doi:10.1029/1999jc900029.

- Barron, J. A. (1985). Miocene to Holocene planktic diatoms. In J. B. S. H.M. Bolli, K. Perch-Nielsen (Ed.), *Plankton Stratigraphy* (Vol. 2, pp. 763-810). Great Britain: Cambridge University Press.
- Barron, J. S. (1987). Diatoms. In T. W. Broadhead (Ed.), *Fossil Prokaryotes and Protists: notes for a short course* (pp. 128-146). Arizona: University of Tennessee.
- Billard, C., y Inouye, I. (2004). What is new in coccolithophore biology? In H. R. Thierstein y J. R. Young (Eds.), *Coccolithophores: From Molecular Processes to Global Impact* (pp. 1-29). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Chamberlin, W. S., Booth, C. R., Kieffer, D. A., Morrow, J. H., y Murphy, R. C. (1990). Evidence for a simple relationship between natural fluorescence, photosynthesis and chlorophyll in the sea. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 37(6), 951-973. doi:[https://doi.org/10.1016/0198-0149\(90\)90105-5](https://doi.org/10.1016/0198-0149(90)90105-5).
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M. A., Salas-de-León, D. A., Aldeco-Ramírez, J., y Merino-Ibarra, M. n. (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(9), 6258-6268. doi:10.1002/2014JC009916.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M. a. A., Salas de León, D. A., Durán-Campos, E., y 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.07.010>.
- Creager, J. S. (1958). A canyon-like feature in the Bay of Campeche. *Deep Sea Research (1953)*, 5(2), 169-172. doi:[https://doi.org/10.1016/0146-6313\(58\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0146-6313(58)90007-8).
- Durán-Campos, E., Salas-de-León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., y Coria-Monter, E. (2017). Patterns of chlorophyll-a distribution linked to mesoscale structures in two contrasting areas Campeche Canyon and Bank, Southern Gulf of Mexico. *Journal of Sea Research*, 123, 30-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seares.2017.03.013>.
- Eden, B., Steinberg, D., Goldthwait, S., y McGillicuddy, D. (2009). Zooplankton community structure in a cyclonic and mode-water eddy in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56, 1757-1776. doi:10.1016/j.dsr.2009.05.005.

- Espinosa, G., Golzarri, J. I., Gammage, R. B., Sajo-Bohus, L., Viccon-Pale, J., y Signoret-Poillon, M. (2008). Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method. *Radiation Measurements*, 43, S364-S368. doi:<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.04.033>.
- Färber-Lorda, J., Athie, G., Camacho-Ibar, V., Daessle, L., y Molina, O. (2019). The relationship between zooplankton distribution and hydrography in oceanic waters of the Southern Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, 192, 28-41. doi:10.1016/j.jmarsys.2018.12.009.
- Govindjee, R. (2004). A Signature of Photosynthesis. In Govindjee, R. Papageorgiou (Ed.), *Chlorophyll a Fluorescence* (1 ed., Vol. 19, pp. 818): Springer Netherlands.
- Gutiérrez-de Velasco, G., y Winant, C. D. (1996). Seasonal patterns of wind stress and wind stress curl over the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C8), 18127-18140. doi:10.1029/96JC01442.
- Hagino, K., y Young, J. R. (2015). Biology and Paleontology of Coccolithophores (Haptophytes). In S. Ohtsuka, T. Suzaki, T. Horiguchi, N. Suzuki, & F. Not (Eds.), *Marine Protists: Diversity and Dynamics* (pp. 311-330). Tokyo: Springer Japan.
- Halse, G. R., y Syvertsen, E. E. (1996). Chapter 2 - Marine Diatoms. In C. R. Tomas (Ed.), *Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates* (pp. 5-385). San Diego: Academic Press.
- Haq, B. U. (1998). 11 - Silicoflagellates and ebridians. In B. U. Haq & A. Boersma (Eds.), *Introduction to Marine Micropaleontology (Second Edition)* (pp. 267-275). Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- Hernández-Becerril, D. U. (2014). Biodiversidad de algas planctónicas marinas (Cyanobacteria, Prasinophyceae, Euglenophyta, Chrysophyceae, Dictyochophyceae, Eustigmatophyceae, Parmophyceae, Raphidophyceae, Bacillariophyta, Cryptophyta, Haptophyta, Dinoflagellata) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 44-53. doi:<https://doi.org/10.7550/rmb.32037>.
- Hernandez-Becerril, D. U., Esqueda-Lara, K., y Torres-Martínez, R. (2016). *Cocolitofóridos del Pacífico Mexicano y del Golfo de México*. México.
- Hsueh, Y., y O'Brien, J. (1971). Steady coastal upwelling induced by an along-shore current. *Journal of Physical Oceanography*, 1(43): 180-186.

- Kiefer, D. A., Chamberlin, K. S., y Booth, C. R. (1989). Natural fluorescence of chlorophyll a: relationship to photosynthesis and chlorophyll concentration in the western South Pacific gyre. *Limnology and Oceanography*. 34(5). 868-881. doi:10.4319/lo.1989.34.5.0868.
- Klausmeier, C., y Litchman, E. (2001). Klausmeier CA, Litchman E.. Algal games: the vertical distribution of phytoplankton in poorly mixed water columns. *Limnol Oceanogr* 46: 1998-2007. *Limnology and oceanography*, 46, 1998-2007. doi:10.4319/lo.2001.46.8.1998.
- Lalli, C. M., y Parsons, T. R. (2006). CHAPTER 3 - PHYTOPLANKTON AND PRIMARY PRODUCTION. In C. M. Lalli & T. R. Parsons (Eds.), *Biological Oceanography: An Introduction (Second Edition)* (pp. 39-73). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Lara Villa, M. A., Moreno Ruiz, J. L., y Amaro Mauricio, E. J. (1996). *Fitoplancton : conceptos básicos y técnicas de laboratorio*. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.
- Lee, R. E. (2008). *Phycology* (4° ed.). New York: Cambridge University Press.
- Licea, S., Moreno, J. L., Santoyo, H., y Figueroa, G. (1996). *Diatomeas del Golfo de California*. Univesidad Autónoma de Baja California Sur, México.
- Licea, S., Moreno, J. L., Santoyo, H., y Figueroa, G. (1995). *Dinoflageladas del Golfo de California*. Univesidad Autónoma de Baja California Sur, México.
- Linacre, L., Lara-Lara, R., Camacho-Ibar, V., Herguera, J. C., Bazán-Guzmán, C., y Ferreira-Bartrina, V. (2015). Distribution pattern of picoplankton carbon biomass linked to mesoscale dynamics in the southern gulf of Mexico during winter conditions. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 106, 55-67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.009>.
- Longhurst, A. R., y Harrison, G.W. (1989). The biological pump: Profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Progress in Oceanography*, 22(1), 47-123. doi:[https://doi.org/10.1016/0079-6611\(89\)90010-4](https://doi.org/10.1016/0079-6611(89)90010-4).
- Mann, K. H., y Lazier, J. R. N. (2006). *Dynamics of Marine Ecosystems*, Third Edition. Blackwell Publishing. Oxford, UK. 489 p.

- McDougall, T., Feistel, R., Millero, F., Jackett, D. R., Wright, D., King, B., . . . Spitzer, P. (2010). *The International Thermodynamic Equation of Seawater 2010 (TEOS-10): Calculation and Use of Thermodynamic Properties*.
- McGillicuddy, D. J., Anderson, L. A., Bates, N. R., Bibby, T., Buesseler, K. O., Carlson, C. A., y Steinberg, D. K. (2007). Eddy/Wind Interactions Stimulate Extraordinary Mid-Ocean Plankton Blooms. *Science*, 316(5827), 1021. doi:10.1126/science.1136256.
- Merino, M. (1997). Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems*, 13(1), 101-121. doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00123-6).
- Molina, E. (2017). *Micropaleontología*. Tercera Edición. Presna de la Universidad de Zaragoza. España. 341 p.
- Olson, D. B. (1991). Rings in the Ocean. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 19(1), 283-311. doi:10.1146/annurev.ea.19.050191.001435.
- Perez-Cruz, L. (1985). *Distribución de los silicoflagelados en el Golfo de California durante la ocurrencia del fenomeno Oceanografico del "niño"*. (Biología). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Pieri, A. B., von Hardenberg, J., Parodi, A., y Provenzale, A. (2015). Sensitivity of Precipitation Statistics to Resolution, Microphysics, and Convective Parameterization: A Case Study with the High-Resolution WRF Climate Model over Europe. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 1857-1872. Retrieved from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015JHyMe..16.1857P>.
- Portela, E., Tenreiro, M., Pallás-Sanz, E., Meunier, T., Ruiz-Angulo, A., Sosa-Gutiérrez, R., y Cusi, S. (2018). Hydrography of the Central and Western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8), 5134-5149. doi:10.1029/2018jc013813.
- Reynolds, C. S. (2006). *The Ecology of Phytoplankton*. New York.: Cambridge University Press.

- Round, F. E., Crawford, R. M., y Mann, D. G. (1990). *The Diatoms : biology & morphology of the genera*. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press.
- Salas-de-León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., Signoret, M., y Aldeco, J. (2004). Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact on near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the Campeche Canyon, Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C5). doi:10.1029/2002JC001614.
- Scott, M. G., Hidekatsu, Y., y Cabell, S. D. (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. Retrieved from <https://www.int-res.com/abstracts/meps/v267/p27-43/>.
- Tappan, H. (1980). Dinoflagellates. In T. HN (Ed.), *The paleogeology of plant protest* (pp. 225-462). San Francisco.
- Vajravelu, M., Martin, Y., Ayyappan, S., y Mayakrishnan, M. (2018). 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. *Oceanologia*, 60(2), 114-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.08.003>.
- Vidal, V. M. V., Vidal, F. V., Hernández, A. F., Meza, E., y Zambrano, L. (1994). Winter water mass distributions in the western Gulf of Mexico affected by a colliding anticyclonic ring. *Journal of Oceanography*, 50(5), 559-588. doi:10.1007/BF02235424.
- Weaver, P. (1950). Variations in History of Continental Shelves: REPLY. *Aapg Bulletin - AAPG BULL*, 34. doi:10.1306/3D933FF2-16B1-11D7-8645000102C1865D.
- Wright, J., y Colling, A. (1995). CHAPTER 4 - DENSITY AND PRESSURE IN THE OCEANS. In J. Wright & A. Colling (Eds.), *Seawater: its Composition, Properties and Behaviour (Second Edition)* (pp. 39-60): Pergamon.
- Xu, G., Dong, C., Liu, Y., Gaube, P., y Yang, J. (2019). Chlorophyll Rings around Ocean Eddies in the North Pacific. *Scientific reports*, 9(1), 2056-2056. doi:10.1038/s41598-018-38457-8.

