



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

PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE FLUORESCENCIA ACTIVA Y SU
RELACIÓN CON ALGUNOS PROCESOS HIDRODINÁMICOS EN EL CAÑÓN
DE CAMPECHE, GOLFO DE MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(BIOLOGÍA MARINA)

PRESENTA:
MARLENE CRISTINA RAMÍREZ DÍAZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. DAVID ALBERTO SALAS DE LEÓN
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. JAVIER ALCO CER DURAND (FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
IZTACALA)
DR. DAVID URIEL HERNÁNDEZ BECERRIL (INSTITUTO DE CIENCIAS DEL
MAR Y LIMNOLOGÍA)
DR. JAVIER ALDECO RAMÍREZ (POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y
LIMNOLOGÍA)
DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ (INSTITUTO DE GEOGRAFÍA)

MÉXICO, D. F. DICIEMBRE 2015



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.



Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



**PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE FLUORESCENCIA ACTIVA Y
SU RELACIÓN CON ALGUNOS PROCESOS HIDRODINÁMICOS
EN EL CAÑÓN DE CAMPECHE, GOLFO DE MÉXICO**

T E S I S

que para obtener el grado académico de

**Maestra en Ciencias
(Biología Marina)**

P r e s e n t a

Marlene Cristina Ramírez Díaz

Director de tesis: Dr. David Alberto Salas de León

Comité tutorial: Dr. Raúl Aguirre Gómez

Dr. Javier Alcocer Durand

Dr. Javier Aldeco Ramírez

Dr. David Uriel Hernández Becerril

México, D.F. Diciembre 2015

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. David Alberto Salas de León por todo el apoyo, asesoría, atención y paciencia; como tutor y ser humano me quedan grandes enseñanzas. Gracias, Dr. Salas.

A la Dra. Martha Signoret Poillon (†) por su asesoría, atención y enseñanza hasta el último momento; sin duda alguna una gran pérdida.

A la Dra. María Adela Monreal Gómez por inspirarme dentro de esta área de estudio y por toda su enseñanza transmitida.

Al Dr. Javier Aldeco Ramírez por su atención en cada consulta y su aportación a este estudio.

Al Dr. Raúl Aguirre Gómez por sus comentarios y sugerencias hacia este trabajo.

Al Dr. Javier Alcocer Durand por su aportación y participación durante este trabajo.

Al Dr. David Uriel Hernández Becerril por todos sus comentarios y observaciones a este estudio.

A Jorge Castro por el apoyo en el uso de programas y elaboración de imágenes.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante la realización de este estudio.

El muestreo y obtención de datos provienen de la campaña CAÑÓN 4 realizada en el año 2011 a bordo del B/O Justo Sierra. El financiamiento para el tiempo de barco para la realización de esta campaña fue cubierto por la Universidad Nacional Autónoma de México.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
<i>Fluorescencia y Clorofila a</i>	3
<i>Giros y Corrientes Geostróficas</i>	5
<i>Cañón de Campeche</i>	6
ANTECEDENTES.....	8
OBJETIVOS.....	13
<i>General</i>	13
<i>Específicos</i>	13
ÁREA DE ESTUDIO.....	14
MÉTODOS.....	16
RESULTADOS.....	20
<i>Masas de Agua</i>	20
<i>Fluorescencia y Masas de Agua</i>	22
<i>Dependencia de la Fluorescencia con la Temperatura, Salinidad y Oxígeno</i>	23
<i>Distribución Horizontal y Vertical de las Variables Ambientales</i>	25
<i>Perfiles Globales</i>	26
<i>Perfiles por Estación</i>	28
<i>Distribución de Temperatura, Salinidad y Sigma-t (Planos Horizontales)</i>	39
<i>Distribución de Oxígeno y Fluorescencia (Planos Horizontales)</i>	42
<i>Fluorescencia Integrada</i>	46
<i>Distribución Vertical por Transectos de Temperatura, Salinidad, Sigma-t, Oxígeno y Fluorescencia</i>	47
<i>Corrientes Geostróficas y Giros</i>	57
<i>Análisis de Conglomerados</i>	61
DISCUSIÓN.....	66
CONCLUSIONES.....	71
REFERENCIAS.....	72

RESUMEN

Se estudió la distribución de la fluorescencia activa mediante datos obtenidos durante la campaña oceanográfica CAÑÓN 4, a bordo del B/O Justo Sierra de la UNAM, del 23 al 27 de febrero del 2011. Se muestrearon 48 estaciones sobre el Cañón de Campeche; en cada una de ellas se registró la temperatura, presión, conductividad, oxígeno disuelto y fluorescencia, con un CTD SEABIRD SBE 9 PLUS. Posteriormente se calcularon la salinidad, densidad (σ_t) y profundidad, usando los programas de la compañía SEABIRD, basados en los algoritmos TEOS-10. La fluorescencia activa se midió con un sensor integrado al CTD que permite la toma de datos *in vivo* durante el día y la noche. A partir de los datos graficados en perfiles, planos, transectos y un diagrama T-S, se determinaron las estructuras hidrodinámicas y se analizó el efecto que tienen sobre la distribución de la fluorescencia. Los resultados muestran tres masas de agua: Agua Subtropical Subsuperficial del Caribe (AStSsC), Agua Subtropical Subsuperficial del Golfo de México (AStSsGM) y Agua Común del Golfo de México (ACGM). En los transectos estudiados se observaron variaciones verticales en la distribución de la fluorescencia. Se encontró una circulación anticiclónica sobre el eje del cañón de la cual se desprenden dos giros ciclónicos ubicados uno al noroeste y otro al suroeste de la zona de estudio. Se concluye que la distribución de la fluorescencia sigue los patrones de la circulación de los giros. Además, de acuerdo a la relación entre las concentraciones de fluorescencia con la temperatura y la salinidad, se encuentran tres zonas: la primera está sobre la plataforma, el talud continental y la parte norte con valores de 0.1 a 0.3 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$; la segunda es la zona del Cañón de Campeche que corresponde al giro anticiclónico con valores de 0.8 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y, la tercera, es la zona de los giros ciclónicos con valores de 0.8 a 1.2 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

ABSTRACT

The active fluorescence distribution in the Campeche Canyon was studied using data obtained during the oceanographic cruise CAÑON 4, on board of the UNAM R/V Justo Sierra, from February 23 to 27, 2011. 48 stations were sampled with a SEABIRD CTD SBE 9 PLUS registering temperature, pressure, conductivity, dissolved oxygen and fluorescence. Salinity, density ($\sigma\text{-t}$) and depth were calculated using the SEABIRD company programs, based on TEOS-10 algorithms. Active fluorescence was measured with a sensor integrated to the CTD that allows data collection *in vivo* during day and night. Hydrodynamic structures were determined from profiles, transects and a T-S diagram, and with that the effect on the distribution of fluorescence was analyzed. The results show three type of water mass: Caribbean Subtropical Subsurface Water (CStSs), Subtropical Subsurface Gulf of Mexico Water Mass (StSsGM) and Gulf Common Water (GCW). The result shows the existence of internal waves that affect the distribution and abundance of fluorescence. An anticyclonic circulation was identified along the canyon axis, this generate two cyclone eddies located one to the northwest and the other at southwest of the study area. It is concluded that fluorescence distribution follows eddies circulation patterns. Furthermore, according to the relationship between the fluorescence concentrations, and temperature and salinity, three areas were identified: the first one contains the continental shelf, the shelf break and the North side, with values of 0.1 to 0.3 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$; the second region is on the Campeche Canyon which corresponds to the anticyclonic eddy region with values of 0.8 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$; and the last is the area of cyclonic eddies with values ranging from 0.8 to 1.2 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

INTRODUCCIÓN

Los organismos fitoplanctónicos son los principales productores primarios en el mar y deben recibir luz solar para lograr una producción óptima; la mayor parte de la producción biológica en el océano depende del fitoplancton. La clorofila *a* (Chla) desempeña un papel básico en la bioquímica de la fotosíntesis; la luz solar provee la energía necesaria para que estos organismos transformen la materia inorgánica como CO₂, agua, nitrato, fosfato, en materia orgánica, mediante la absorción de la luz por los pigmentos activos en la fotosíntesis, que es usada en esta transformación.

Fluorescencia y Clorofila a

De los pigmentos presentes en el fitoplancton, la Chla es la que se presenta en mayor abundancia y es considerada un buen indicador de la biomasa del fitoplancton (Cowles *et al.*, 1993); es el elemento central de la fotosíntesis y se encarga de coleccionar fotones. Su distribución vertical está directamente vinculada con la estratificación y mezcla de la columna de agua, el espesor de la capa eufótica y la disponibilidad de nutrientes a diferentes escalas de tiempo y de espacio; así como, resultado de diversos procesos hidrodinámicos tales como surgencias, frentes, giros ciclónicos y anticiclónicos (Salas de León *et al.*, 2004).

La clorofila puede detectarse fácilmente debido a su comportamiento frente a la luz; medir óptimamente la concentración de clorofila permite una estimación de la biomasa fitoplanctónica e, indirectamente, de la actividad biológica. Por otro lado, la medición de la clorofila es un instrumento importante de vigilancia de los procesos de eutrofización.

La Chla tiene la propiedad de emitir fluorescencia. La fluorescencia de la Chla es un fenómeno cuántico propio del aparato fotosintético (Govindjee, 2004), se define como la propiedad de una sustancia para emitir energía cuando es expuesta a radiaciones de tipo ultravioleta, rayos X y luz visible

(Lakowicz, 2006). En este proceso, una molécula absorbe un fotón de alta energía y, posteriormente es emitido en forma de un fotón de baja energía. La diferencia de energía entre la absorción y la emisión se disipa a manera de calor por vibraciones moleculares. A nivel cuántico, las moléculas excitadas emiten luz cuando los electrones de las capas más externas se encuentran en estados excitados que son termodinámicamente inestables, pues poseen mayor energía de la que les corresponde cuánticamente. Para poder regresar a un estado con energía basal, los electrones deben deshacerse del exceso de energía liberando ésta en forma de un fotón. En otras palabras, la emisión de este fotón genera luz. El fenómeno fluorescente dura millonésimas de segundo y dependiendo del tipo de molécula serán los requisitos lumínicos para absorber, excitar y emitir fluorescencia (Valeur, 2002).

Las mediciones de la fluorescencia de la Chla obtenidas con un fluorómetro pueden utilizarse para estimar la concentración de Chla, la actividad fotosintética y por ende, la productividad primaria en la columna de agua. La fluorescencia puede medirse utilizando dos métodos: el método de la fluorescencia natural, también conocida como fluorescencia pasiva o inducida por el sol y, el método de la fluorescencia activa. En el método de la fluorescencia natural, la fuente de excitación es la luz solar de longitud de onda cercana a los 683 nm (Chamberlin *et al.*, 1990). En el método de la fluorescencia activa, se utiliza como fuente luminosa de excitación un haz de luz cuya longitud de onda es aproximadamente de 440 nm. Este valor depende del fluorómetro utilizado. El sensor del fluorómetro activo registra longitudes de onda entre 470 y 695 nm.

Chamberlin *et al.* (1990) mencionan que la señal de la fluorescencia es suficientemente fuerte para ser detectada en la zona eufótica. El primero en considerar esta propiedad fue Lorenzen (1966) y la incorporó en los métodos de registro en el mar. La fluorescencia *in vivo* permite estimar la biomasa del fitoplancton y su distribución en tiempo real, sin perturbar el medio (Kiefer *et al.*, 1989). La razón por la cual la fluorescencia de la Chla es usada, se debe a que tiene un papel central en la fotosíntesis y en ésta también se presenta una liberación de energía a manera de calor, durante el fenómeno fluorescente (Govindjee, 2004). La relación fluorescencia-fotosíntesis depende

estrechamente de la irradianza, de la temperatura y de la concentración de nutrientes (Falkowski, 1988).

Por lo anterior, podemos estimar el comportamiento del fitoplancton en el océano estudiando la distribución de la fluorescencia. La distribución y abundancia del fitoplancton en el océano depende de varias variables, entre ellas la temperatura, la profundidad, los nutrientes y las corrientes (Salas de León *et al.*, 2004).

Giros y Corrientes Geostróficas

En el océano las corrientes influyen en la distribución de las comunidades marinas, ya que la alta productividad biológica frecuentemente se genera en áreas donde se lleva a cabo un rápido cambio de energía auxiliar, como son las zonas de surgencias o afloramientos costeros, vórtices, mezcla y frentes. Estos procesos favorecen el aumento en la productividad primaria, la cual se transfiere a lo largo de la cadena trófica con efectos en las comunidades marinas. La influencia de las corrientes es mayor en los organismos planctónicos debido a su baja capacidad natatoria. El plancton se presenta en forma de parches, principalmente en giros, al ser transportado por las corrientes; por ello su distribución no puede desvincularse del movimiento de las masas de agua (Monreal Gómez *et al.*, 2004).

En el Golfo de México se presentan giros de diferentes escalas, ciclónicos y anticiclónicos dependiendo de la dirección de rotación y si tienen núcleos de baja o alta presión. En el hemisferio norte los giros que rotan en sentido de las manecillas del reloj son denominados anticiclónicos y los giros que rotan contrario a las manecillas del reloj se denominan ciclónicos, mientras que en el hemisferio sur los giros ciclónicos son los que rotan en el sentido de las manecillas del reloj y los anticiclónicos en dirección inversa. En los giros ciclónicos se produce un ascenso de agua; por la gran cantidad de nutrientes que llega a la capa eufótica, aumenta la productividad primaria, transfiriéndose a lo largo de la cadena trófica y generando una cascada de energía hacia los organismos marinos, lo que favorece las pesquerías. Los giros anticiclónicos, presentan un hundimiento de agua de alta temperatura y con bajo contenido de

nutrientes; por sus características estos giros son denominados cálidos y pobres. En general las capas superiores de los anticiclónicos son pobres en nitratos y concentraciones de clorofila, por lo que la producción primaria es poco abundante, por esta razón se puede decir que las aguas superficiales de estos giros poseen características oligotróficas; sin embargo, a pesar de que no representan un factor importante en la producción local, pueden modificar la distribución del plancton en general y, por lo tanto, también sus interacciones tróficas (Monreal Gómez *et al.*, 2004).

Los giros facilitan el transporte y distribución de organismos planctónicos y también promueven el transporte de larvas de las áreas oceánicas hacia la zona costera y viceversa (Salas de León *et al.*, 1998; Sánchez Iturbe *et al.*, 2006).

Cañón de Campeche

Los cañones submarinos presentan características hidrodinámicas especiales debido a su forma (Klinck, 1996; Rennie *et al.*, 2008; Santiago Arce y Salas de León, 2012). La dinámica sobre una región cuyo fondo está formado por un cañón submarino, presenta una serie de características de alto interés físico como la formación de giros ciclónicos y anticiclónicos y, afloramientos subsuperficiales, además de que las corrientes son muy intensas teniendo fuertes implicaciones biológicas, químicas y geológicas (Davis *et al.*, 2014; Canals *et al.*, 2013). Estas estructuras hidrodinámicas afectan la distribución y abundancia del fitoplancton y en consecuencia a la distribución y abundancia de los organismos que dependen del fitoplancton (Signoret *et al.*, 2006). En el Golfo de México existen dos estructuras fisiográficas importantes, una de ellas es el Cañón De Soto en el norte y otra es el Cañón de Campeche en el sur.

El Cañón de Campeche se encuentra en el lado este de la Bahía de Campeche, siendo éste un rasgo sobresaliente del talud continental cuyo origen está relacionado con la evolución tectónica de la zona (Weaver, 1950; Mendoza y Ortiz Pérez, 2000). En el cañón se ha observado una circulación anticiclónica-ciclónica (Monreal Gómez y Salas de León, 1997; Salas de León *et al.*, 2004; Signoret *et al.*, 2006). La presencia del par anticiclón-ciclón ejercen

un efecto importante sobre el contenido de la Chla, de la materia particulada suspendida y de la abundancia del fitoplancton (Salas de León *et al.*, 2004).

Esta investigación tiene como objetivo el estudio de la distribución de Chla expresada como fluorescencia y el efecto que tienen algunos procesos hidrodinámicos (giros, corrientes y ondas internas) sobre la fluorescencia, en el Cañón de Campeche.

ANTECEDENTES

El Golfo de México, se caracteriza por su riqueza en recursos naturales; así como, por su alta producción petrolera y pesquera (García Cuellar *et al.*, 2004; Sánchez Gil *et al.*, 2004). De particular importancia para la oceanografía biológica y pesquera son las estimaciones de Chla ya que éstas son referencia obligada en estudios orientados al entendimiento de las fluctuaciones en el océano y su efecto en la estructura del ecosistema. Manzano Sarabia y Salinas Zavala (2008) estudiaron la variabilidad estacional e interanual de la concentración de Chla y la temperatura superficial del mar en el sur del Golfo de México; refieren que la estimación de la Chla es un indicador del fitoplancton (Lluch Cota, 2002; Signoret *et al.*, 2006), mientras que la temperatura superficial influye en los patrones de distribución y crecimiento de las poblaciones marinas (Dower *et al.*, 2000) y señalan que en la región de los estados de Campeche y Tabasco, se presentan valores altos de Chla en la transición otoño-invierno, lo cual puede estar relacionado con los patrones de circulación; así como, con los frentes fríos. Los resultados discutidos por Müller-Karger *et al.* (1991) sugieren que la estacionalidad de la Chla en el Golfo de México es muy marcada, con valores máximos de diciembre a febrero y con condiciones de baja concentración de julio a septiembre.

En el Golfo de México se han realizado diversas investigaciones ecológicas del fitoplancton (Hernández Becerril *et al.*, 2008). Diversos autores reportan la presencia de un giro anticiclónico asociado a uno ciclónico y de un gradiente térmico en el borde de la plataforma continental (Salas de León *et al.*, 2004; Durán Campos, 2010). Tanto el gradiente como los giros influyen en el contenido y distribución de Chla (Salas de León *et al.*, 2004) y en la abundancia del fitoplancton (López Calderón *et al.*, 2006). Sin embargo, estudios donde se analice la influencia de las condiciones oceanográficas en la producción biológica en el Cañón de Campeche son escasos (Salas de León y Monreal Gómez, 2004).

Estudios realizados en el sur del Golfo de México sugieren que hay zonas en las cuales los procesos oceánicos como giros, frentes, corrientes,

afloramientos, etc., están involucrados en la producción regenerada, lo que favorece la producción biológica; esta característica está presente en el Cañón de Campeche (Salas de León *et al.*, 2004).

Las corrientes en un cañón pueden oscilar a lo largo del eje del cañón induciendo la formación de giros (Denman y Powell, 1984; De Madron *et al.*, 1999; Cherubin *et al.*, 2000; Allen *et al.*, 2001). En varios cañones submarinos se han observado giros anticiclónicos (Perénne *et al.*, 1997). Estos giros pueden tener diferentes orígenes. En el Cañón de Blanes, en el Mediterráneo Occidental, el giro anticiclónico se mantiene por la fricción con la corriente (Arduin *et al.*, 1999). Una situación similar ocurre en el noreste del Golfo de México, donde las distribuciones de temperatura, salinidad, oxígeno y nutrientes revelan la presencia de surgencias; particularmente cerca de la cabeza del Cañón De Soto. Estos eventos se han relacionado con la circulación anticiclónica cuasiperiódica característica en este cañón (Nowlin *et al.*, 2000); ahí, las corrientes cerca de la superficie son forzadas dentro o fuera del margen por la topografía del cañón, arrastrando aguas superficiales, ya sea dentro o fuera de la plataforma continental en las inmediaciones del cañón.

Salas de León y Monreal Gómez (2004) muestran que la desviación de las corrientes cerca de la superficie hacia el Cañón de Campeche, puede aportar nutrientes a la capa fótica (o eufótica) por el bombeo de Ekman, promoviendo la producción biológica. Por otro lado, estos autores, examinaron los efectos del Cañón de Campeche en la circulación local; así como, sobre las partículas suspendidas, la saturación de oxígeno y la concentración de Chla, encontrando que en todas las estaciones, las concentraciones de Chla fueron más altas en las capas superficiales, oscilando entre los 0.21 y 0.32 mg m⁻³ y que el máximo de clorofila se produjo a una profundidad entre 78 y 79 m. Los datos hidrográficos revelaron la presencia de un par de giros submarinos anticiclón-ciclón sobre la región del cañón. Ambos giros se encontraban bien definidos a una profundidad de 300 m. Las isoclinas de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto fueron ascendentes en el este y el sur, lo que indica la presencia de surgencias subsuperficiales de aguas frías ricas en nutrientes cerca de la superficie, sugiriendo que la circulación local en el borde del Cañón de Campeche, modulada por la presencia de los giros anticiclónicos y

ciclónicos, juega un papel importante en la productividad biológica de la zona de estudio.

En un estudio realizado por Signoret *et al.* (2006) en el oeste y centro del Golfo de México, se identificaron y caracterizaron los patrones horizontales y verticales de la Chla y su relación con las condiciones térmicas y lumínicas de la capa eufótica; así como, con la hidrodinámica de la región. Encontrando que los patrones de circulación ciclónica y anticiclónica están relacionados con la profundidad de la termoclina, en el borde del talud continental y en mar abierto. Estos autores obtuvieron concentraciones de Chla de 0.02 a 0.45 mg m⁻³ y de Chla integrada de 1.7 a 12.7 mg m⁻². Los mayores valores se obtuvieron en las estaciones cercanas al talud y se asociaron con la frontera de la circulación ciclónica de mediana intensidad, resaltando la importancia que tienen los patrones de distribución vertical de la Chla para los consumidores primarios de la biomasa fitoplanctónica.

Durante el verano se observó que la distribución vertical de la Chla por fluorescencia, en combinación con los factores de saturación de oxígeno y partículas suspendidas en el sur del Golfo de México, en una región donde la escorrentía del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta induce gradientes térmicos y halinos, depende básicamente de las estructuras térmicas y de la iluminación y, en algunos casos de los frentes térmicos y halinos asociados con las descargas de los ríos y los patrones de circulación regional (Signoret *et al.*, 2006). Por lo que las concentraciones de Chla muestran una alta variabilidad en el sur del Golfo de México, con valores altos cerca de la costa.

Licea y Luna (1999) encontraron la más alta concentración de Chla en la desembocadura del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta y dentro de la Laguna de Términos. Aguirre (2002) reportó una distribución homogénea de Chla a través de las áreas oceánicas, pero concentraciones visiblemente diferentes en las zonas costeras o con altas cantidades de sedimentos, con valores que llegan a 46.6 mg m⁻³ en la desembocadura del río Coatzacoalcos. En las aguas oceánicas del sur del Golfo de México, Signoret *et al.* (1998) encontraron un máximo de Chla en la parte superior de la capa eufótica asociada a la nutriclina.

Hernández Becerril *et al.* (2008) describen la estructura de la comunidad fitoplanctónica y su relación con las condiciones hidrográficas en tres zonas: costera, de plataforma y oceánica, del sur del Golfo de México. Encontrando que la estructura de la comunidad del fitoplancton estuvo relacionada con las condiciones oceanográficas. Por otro lado, estos autores sugieren que los altos valores de Chla están asociados con la alta abundancia de cocolitofóridos y con un frente térmico.

En el Cañón de Campeche, Durán Campos (2010) estudió los patrones de distribución de la Chla por fluorescencia natural y su relación con procesos hidrodinámicos. Concluyendo que la mayor concentración de Chla se da en las zonas de las fronteras entre los giros; con una distribución del máximo profundo de Chla por debajo de la termoclina, lo cual se debe al desplazamiento vertical de las comunidades del fitoplancton hacia regiones más profundas con mayor concentración de nutrientes y, observó dos tipos de patrones de distribución de Chla: un máximo profundo ubicado en el Cañón de Campeche y un máximo asociado al fondo en la zona del Banco de Campeche. Los valores máximos de Chla integradas se ubicaron en el centro del giro ciclónico y en zonas alejadas del giro.

Por otro lado, Aguirre Gómez (2002) realizó un estudio sobre la producción primaria, registrando valores más bajos en regiones oceánicas que en las zonas costeras o con presencia de sedimento. Estos valores fueron asociados a características topográficas de la zona de estudio, donde los valores más altos fueron encontrados muy cerca del Cañón de Campeche.

Con base en los antecedentes antes citados, se hace evidente la importancia de estudiar al fitoplancton como entidad dinámica, ya que este fluctúa a corto y largo plazo. La mayor parte de las investigaciones realizadas estudian la forma en que los factores ambientales afectan a la biomasa fitoplanctónica; sin embargo, no consideran cómo los procesos hidrodinámicos, como las corrientes marinas y la vorticidad, influyen en la distribución y abundancia del fitoplancton. El conocimiento de estos procesos hidrodinámicos y su relación con los procesos biológicos es muy limitado en el Cañón de Campeche, por lo tanto para tener un mejor entendimiento de esta región, es necesario desarrollar estudios sobre las interacciones entre los procesos físicos y biológicos.

OBJETIVOS

General

Identificar y describir los patrones de distribución de la fluorescencia y su relación con algunos procesos hidrodinámicos y algunas variables ambientales en el Cañón de Campeche.

Específicos

- Determinar las principales variables ambientales como la temperatura, salinidad, sigma-t y oxígeno disuelto y, establecer cómo intervienen en la distribución de la fluorescencia.
- Describir los principales procesos hidrodinámicos como son corrientes y giros y estudiar el efecto que tienen en la distribución vertical y horizontal de la fluorescencia.

ÁREA DE ESTUDIO

El Cañón de Campeche se sitúa entre las latitudes de 20° 12' y 21° 36' N y longitudes 92° 24' y 93° 24' W, al sur del Golfo de México, frente a las costas de Campeche y Tabasco en el lado oeste de la plataforma de Yucatán (Fig. 1). Es una región topográficamente compleja que presenta una profundidad máxima de 160 m en la parte superior del talud y de 2800 m en su parte más profunda, con una longitud de 125 km; 55 km de ancho en la parte más profunda y 30 km de ancho en la parte de la cabeza. El cañón es de origen tectónico y data del Jurásico (Weaver, 1950).

Sobre el cañón fluye una corriente proveniente de la plataforma de Yucatán (Monreal Gómez y Salas de León, 1990). Durante el verano, cuando se produce la surgencia topográfica en el este de la plataforma de Yucatán, se mueve agua fría y rica en nutrientes hacia el oeste a lo largo de la pycnoclina sobre el Banco de Campeche (Merino, 1977). Esto provoca un transporte significativo que llega al cañón (Furnas y Smayda, 1987). Al oeste del cañón se forma un giro anticiclónico el cual produce un hundimiento de las isothermas hasta los 300 m de profundidad; este giro anticiclónico produce la formación de un giro ciclónico al sur del cañón (Salas de León *et al.*, 2004).

Esta región no presenta influencia directa de aporte de ríos, ni frentes halinos. Es afectada principalmente por la Corriente de Lazo, que es mayor en verano y por la Corriente de Yucatán (Salas de León *et al.*, 2004). También, es influenciada por una corriente de intrusión que se dirige hacia el sur (Monreal Gómez *et al.*, 2004).

Se sabe que la dinámica en un cañón submarino presenta fenómenos como formación de giros ciclónicos y anticiclónicos, afloramientos y convergencias de flujos (Klinck, 1996; Santiago Arce y Salas de León, 2012), por lo que es de esperarse que en el Cañón de Campeche esta serie de procesos físicos modulen la distribución de la fluorescencia y en consecuencia del fitoplancton.

Al Golfo de México llegan masas de aire frío continental, de E.U.A. y Canadá que chocan con las masas de aire propias del golfo de origen marítimo

y tropical (Panoffsky, 1956). Durante los meses de octubre a abril la rapidez de los vientos es grande; estos vientos son los llamados localmente nortes. Durante el paso de los nortes la dinámica del Golfo de México se ve afectada ya que las tormentas severas pueden permanecer hasta cuatro días seguidos, ocasionando lluvia, descenso de temperatura y mezcla turbulenta en la capa superficial (DiMego *et al.*, 1976). La época de nortes prevalece de noviembre a marzo (Rodríguez *et al.*, 1973). Los nortes severos ocurren de diciembre a febrero y ocasionalmente pueden presentarse posteriormente. Se ha reportado que el paso de las tormentas invernales o nortes, tienen influencia directa en la dinámica del cañón y en la distribución y abundancia del zooplancton (Ramírez Cruz, 2005).

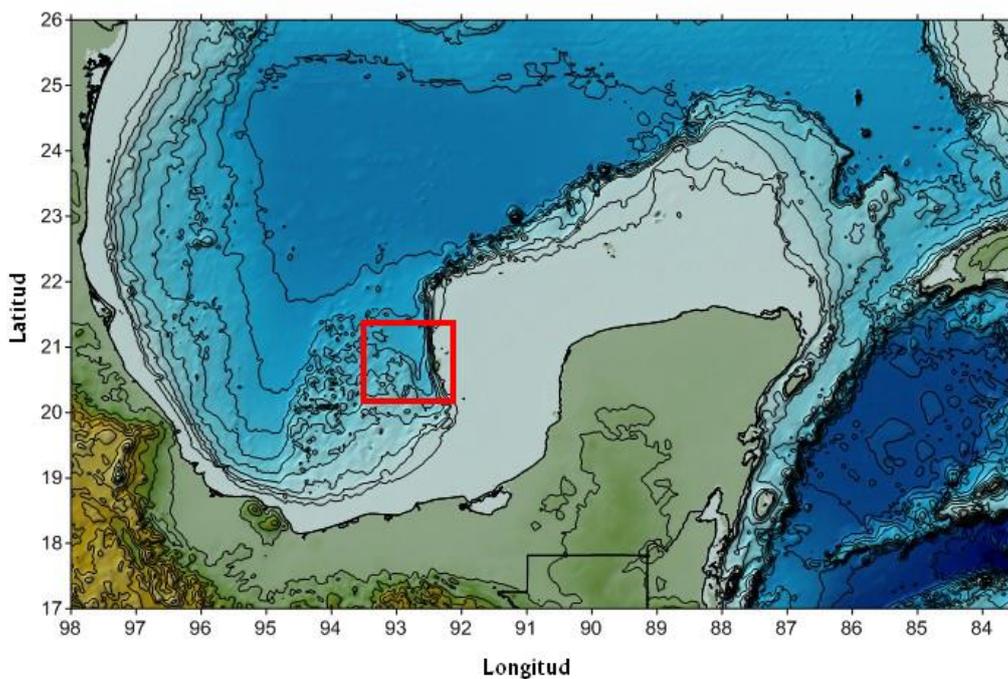


Figura 1. Ubicación del Cañón de Campeche. El cuadro rojo denota la región estudiada.

MÉTODOS

La toma de datos y muestras, usados en esta tesis, se llevó a cabo en el buque oceanográfico Justo Sierra de la UNAM (Fig. 2), del 23 al 27 de febrero del 2011, durante la campaña oceanográfica CAÑÓN 4. Estas fechas corresponden a la temporada de tormentas invernales, localmente conocidas como nortes. Durante la campaña oceanográfica se realizaron 48 estaciones tratando de cubrir el cañón y la principal zona de influencia de la hidrodinámica del cañón (Fig. 3).



Figura. 2. Buque oceanográfico Justo Sierra de la UNAM.

En cada estación se registraron datos de temperatura, presión, conductividad (salinidad), oxígeno y fluorescencia, con un CTD SEABIRD SBE 9 PLUS, hasta la profundidad de 1000 m. Posteriormente se calcularon la salinidad, densidad relativa ($\sigma\text{-t}$) y profundidad, usando los programas de la compañía SEABIRD, que se basan en los algoritmos TEOS-10.

Para medir la fluorescencia activa a lo largo de la columna de agua se utilizó un fluorómetro WET Labs, modelo ECO FL, que emite luz a 440 nm y cuyo sensor detecta longitudes de onda entre 470 y 695 nm. La sensibilidad del sensor es de $0.01 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y el intervalo al que puede medir o detectar

fluorescencia es de 0.01 a $125 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$; este sensor permite la toma de datos *en vivo* durante el día y la noche y está integrado al CTD.

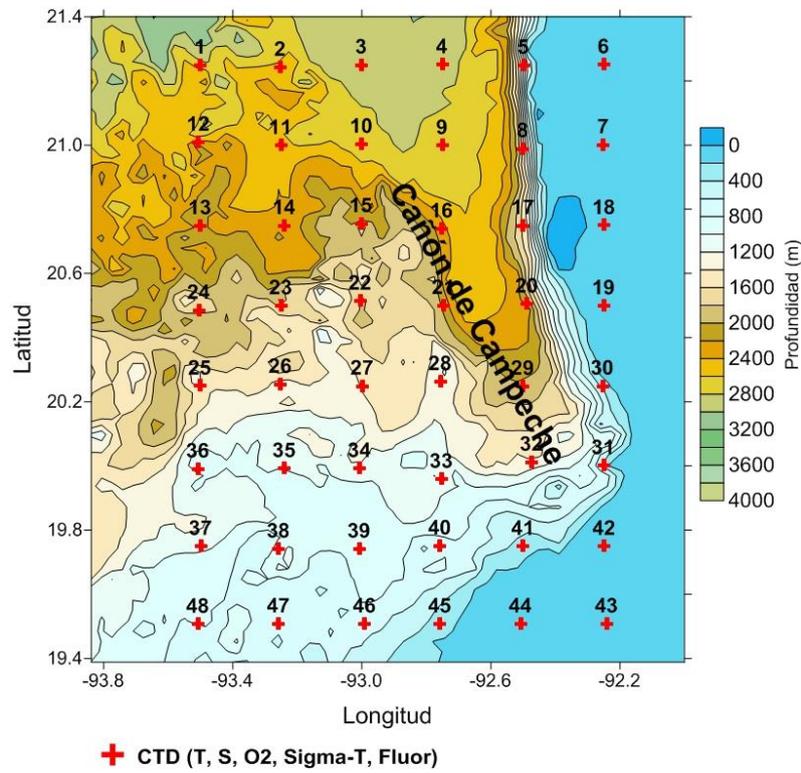


Figura 3. Red de estaciones del muestreo efectuado en el Cañón de Campeche, durante la campaña oceanográfica CAÑON 4.

Con los datos provenientes del CTD se elaboraron gráficas de perfiles, planos y transectos; así como, un diagrama T-S para identificar las masas de agua presentes, las estructuras hidrodinámicas dominantes y estudiar la distribución de la Chla.

Los perfiles que se presentan son hasta los 150 m de profundidad, de las 48 estaciones. Los planos son a nivel de superficie, 60 m (máximo de los picos de fluorescencia en promedio) y 100 m. Los transectos están orientados en dirección norte-sur, este-oeste y uno sobre el eje principal del cañón hasta los 150 m (Fig. 4).

De acuerdo a los procesos hidrodinámicos que se presentan en el cañón de Campeche (giros, corrientes), se analizó el efecto en la fluorescencia

(biomasa fitoplanctónica) y su distribución a partir de imágenes de velocidades de corrientes geostróficas (modificadas de Rivera Hernández, 2013).

Posteriormente se realizó un análisis de conglomerados para observar la relación de la fluorescencia con la temperatura y la salinidad, e inferir también el efecto de las corrientes y giros en la distribución de la fluorescencia.

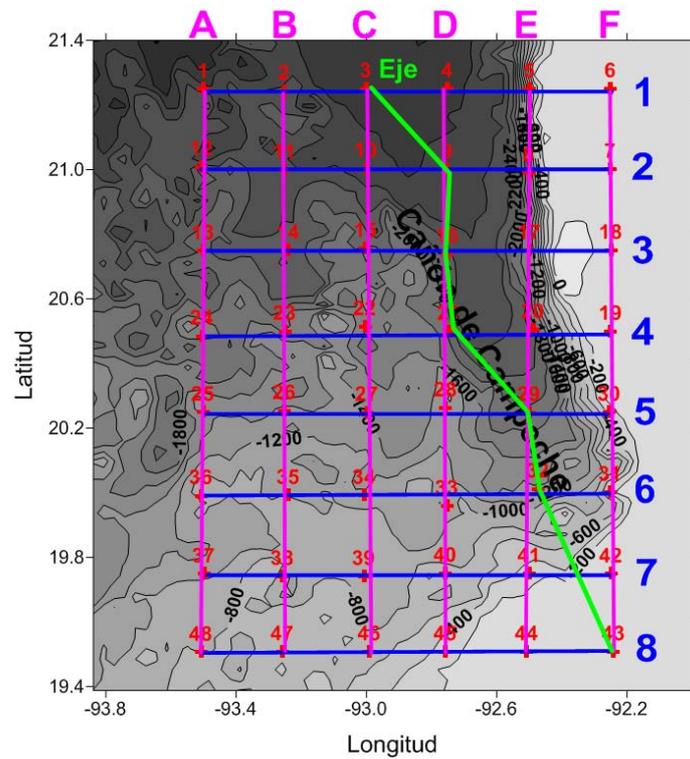


Figura 4. Transectos efectuados en el Cañón de Campeche. Con número se indican los transectos este–oeste, con letras los transectos norte–sur y con el nombre de Eje el transecto sobre el eje del cañón. La batimetría (m) se presenta en tonos de gris y las estaciones en números rojos.

RESULTADOS

Masas de Agua

El océano está compuesto por diferentes masas de agua, las cuales normalmente se presentan en capas de menor densidad en la superficie, hasta llegar a las de mayor densidad en el fondo. Estas masas de agua se forman en la superficie debido a la disminución de la temperatura y/o al aumento de la salinidad, provocando incrementos en la densidad del agua de mar dando como resultado su hundimiento hasta encontrar su nivel de equilibrio. Tanto la temperatura como la salinidad varían moderadamente dentro de amplios rangos; esta amplia variabilidad sugiere que el valor de la densidad puede ser empleado para identificar a ciertas masas de agua en particular. Por lo que las masas de agua se distinguen de otras por su temperatura y salinidad y se pueden representar por una curva que se construye con los puntos que describe gráficamente la relación que tienen entre sí estas dos características del agua de mar, llamados comúnmente diagramas T-S (Tomczak, 2002). Las profundidades de estas masas son aproximadamente constantes, aunque sus posiciones varían en el tiempo y el espacio, estando determinados por el campo de circulación baroclínico y por los giros ciclónicos y anticiclónicos dentro del Golfo de México (Vidal *et al.*, 1990).

Con los datos del CTD colectados durante el muestreo se observó mediante un diagrama T-S, la presencia de tres masas de agua (Fig. 5), Agua Subtropical Subsuperficial del Caribe (AStSsC), Agua Subtropical Subsuperficial del Golfo de México (AStSsGM) y Agua Común del Golfo de México (ACGM).

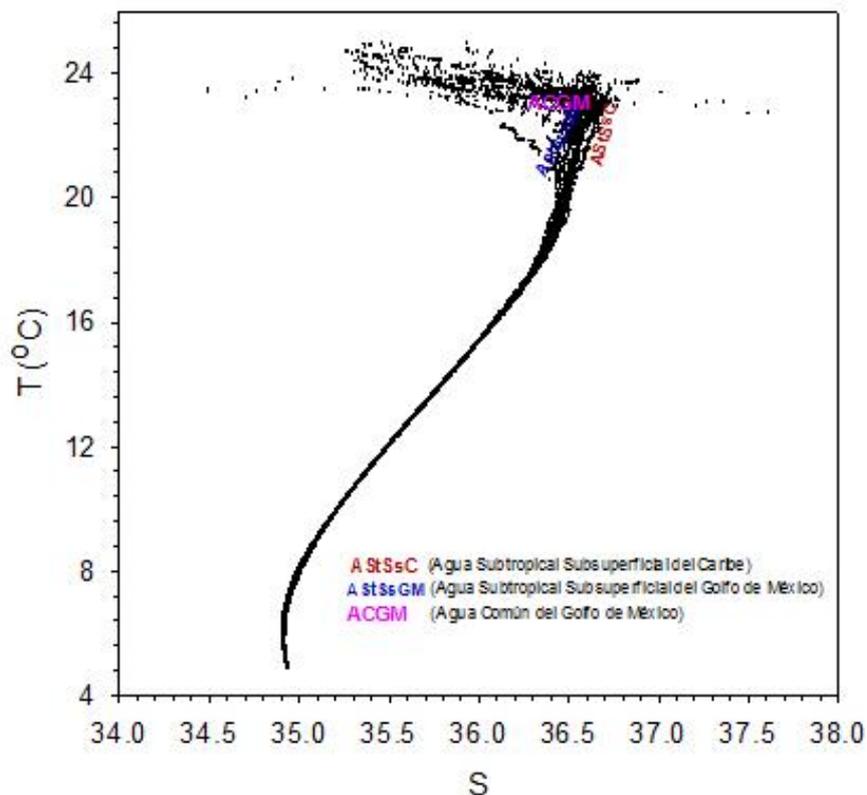


Figura 5. Masas de agua presentes en el Cañón de Campeche durante la época de muestreo (febrero 2011).

La figura 5 muestra el diagrama T-S hasta 1000 m, que fue la profundidad máxima de muestreo, aunque la profundidad máxima a la cual se registraron valores de fluorescencia fue de 140 m. Las tres masas de agua presentes se localizan generalmente en la capa superior de los 250 m (Vidal *et al.* 1990).

El Agua Subtropical Subsuperficial del Caribe (AStSsC) presenta valores de temperatura y salinidad alrededor de 22.50 °C y 36.60 gr kg⁻¹. Se forma fuera del golfo y se introduce por medio de la Corriente de Lazo; una parte de esta agua penetra al oeste del Golfo de México y otro volumen importante de esta masa forma parte del giro anticiclónico que se desprende de la Corriente de Lazo (Aldeco *et al.*, 2009).

El Agua Subtropical Subsuperficial del Caribe (AStSsC), se mezcla por efecto de los nortes y produce el Agua Común del Golfo de México (ACGM) durante el invierno (Monreal Gómez y Salas de León, 1997), cuando se produce un enfriamiento y consecuentemente una mezcla convectiva (Elliott,

1982). Sin embargo, esta mezcla sólo afecta la capa superior, por lo que el mecanismo más importante en la formación de esta masa de agua es la colisión del giro anticiclónico con el talud y la plataforma continental de Tamaulipas (Vidal *et al.*, 1992; Vidal *et al.*, 1994). El ACGM tiene una salinidad y temperatura alrededor de 36.40 gr kg^{-1} y $22.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y conforma el 4.83% del agua que se encuentra en el Golfo de México.

El AStSsGM también se forma adentro del golfo durante el invierno, por mezcla convectiva de agua de la capa de la superficie hasta los 200 m (Elliott, 1982); lo que provoca la disminución de salinidad y la pérdida de calor, transformando el agua del núcleo de los giros anticiclónicos que se desprenden de la Corriente de Lazo en agua de menor temperatura y salinidad, con valores alrededor de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ y 36.40 gr kg^{-1} .

Fluorescencia y Masas de Agua

La concentración de clorofila depende de las características particulares de la columna de agua y, está en función de la dinámica de cada región en particular y del fitoplancton presente. Así, las especies fitoplanctónicas contenidas en una masa de agua están sometidas a cambios continuos en el tiempo y en el espacio y dichos cambios se deben a los efectos de los factores físicos, químicos y biológicos. Las masas de agua también resultan importantes por el aporte en el contenido de nutrientes cuando se presentan afloramientos o giros ciclónicos, por el ascenso de agua de mayor profundidad, dando como resultado un incremento en la densidad de organismos fitoplanctónicos y en la producción primaria en la superficie.

Cada masa de agua se identifica por su temperatura y salinidad características; así como, por su contenido de oxígeno en algunas ocasiones, pues, en contraste al alto contenido de oxígeno de las aguas polares y profundas, las masas de agua de las regiones ecuatoriales son más bajas en oxígeno (Weihaupt, 1984).

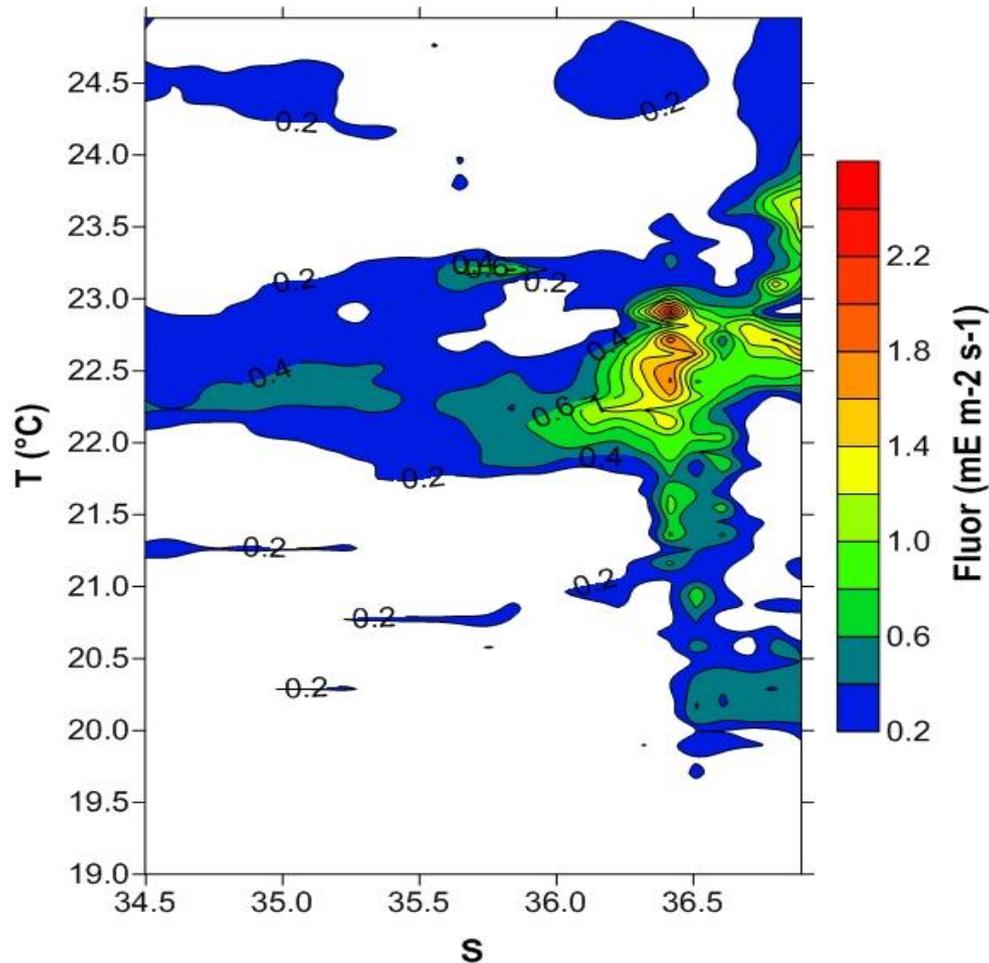


Figura 6. Fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y masas de agua.

La fluorescencia en función de las masas de agua se encuentra distribuida principalmente desde la superficie hasta los 140 m. Presenta las máximas concentraciones que van de $1.4 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a $2.6 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a temperaturas de 22 a 23 °C y salinidades de 36.4 gr kg^{-1} , mismas que quedan entre los valores del Agua Subtropical Subsuperficial del Golfo de México (AStSsGM) (Fig. 6).

Dependencia de la Fluorescencia con la Temperatura, Salinidad y Oxígeno

Los diagramas de dispersión entre los datos de fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura (°C), salinidad (gr kg^{-1}) y oxígeno (mg L^{-1}) y entre datos de oxígeno (mg L^{-1}) y temperatura (°C) (Fig. 7); nos permiten estimar la relación que existe

entre las variables ambientales con la fluorescencia y proponer hipótesis de la forma en que cada variable afecta la distribución de la fluorescencia.

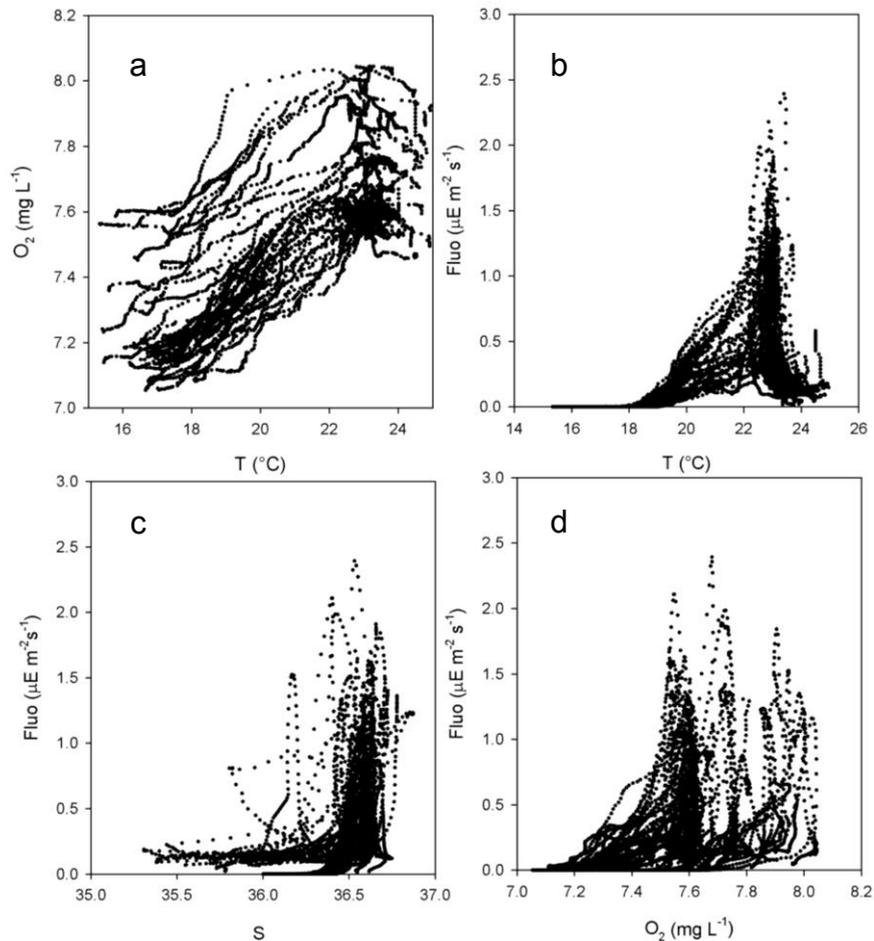


Figura 7. Diagramas de dispersión entre: a) temperatura (°C) y oxígeno (mgL⁻¹), b) fluorescencia (µE m⁻²s⁻¹) y temperatura (°C), c) fluorescencia (µE m⁻²s⁻¹) y salinidad (gr kg⁻¹) y d) fluorescencia (µE m⁻²s⁻¹) y oxígeno (mgL⁻¹).

A menor temperatura la cantidad de oxígeno es mayor y conforme esta aumenta el oxígeno disminuye, ya que por lo general, la solubilidad de los gases es inversamente proporcional a la temperatura y esto se observa también como resultado del cambio en la temperatura con la profundidad; aunque en la figura 7a, a los 20 °C, se presenta un aumento considerable de oxígeno, esto lo podemos relacionar con la presencia de una gran cantidad de fluorescencia, proporcionada por la presencia de biomasa fitoplanctónica, como se muestra en la figura 7d; de esta manera es que puede explicarse el

comportamiento inverso al esperado de una mayor solubilidad del oxígeno a menor temperatura. También se observan tres picos de oxígeno, el primero a 7.6 mg L^{-1} , el segundo a 7.8 mg L^{-1} y el tercero a 8 mg L^{-1} que corresponden a fluorescencias cercanas a $2 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y un amplio rango de temperatura de 18 a $24 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la figura 7b, observamos el comportamiento de la fluorescencia en función de la temperatura; la cual muestra que la mayor cantidad de fluorescencia se encuentra entre los 18 y los $24 \text{ }^\circ\text{C}$, teniendo un pico máximo a los $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Sabemos que la temperatura es un factor importante, ya que afecta las actividades enzimáticas del fitoplancton como la fotosíntesis, la cual generalmente se favorece a mayor temperatura.

En la figura 7c se muestra la fluorescencia como función de la salinidad. Observamos que la salinidad se mantiene en un rango estrecho que va de 35.5 a 36.5 gr kg^{-1} , su distribución es muy homogénea, aunque dentro de este intervalo se presenta una mayor concentración de fluorescencia a 36.5 gr kg^{-1} con un valor considerable que va hasta los $2.5 \mu\text{Em}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en algunos casos. La figura 7d muestra la relación que presenta la fluorescencia y el oxígeno, donde el oxígeno se incrementa por el proceso de la fotosíntesis, en este caso podemos decir que es el oxígeno una función dependiente de la fluorescencia.

Distribución Horizontal y Vertical de las Variables Ambientales

Debido a la naturaleza tridimensional del medio marino, conviene dividir los patrones de distribución en horizontales y verticales. Los primeros varían de acuerdo a la temperatura, a la radiación solar y a la cantidad de nutrientes, según la latitud a la que se encuentren, principalmente; mientras que la distribución vertical del fitoplancton depende de las variaciones de los factores físicos, químicos y ecológicos y de las interacciones entre ellos con la profundidad. Por lo que la densidad de las poblaciones planctónicas varía con la profundidad; así como, con la distribución geográfica.

A continuación se hace una descripción de la distribución de la fluorescencia de acuerdo a las imágenes de perfiles hasta 150 m de

profundidad, planos a superficie, 60 m y 100 m de profundidad y transectos hasta 150 m y se analiza la relación y el efecto que tienen los procesos hidrodinámicos estudiados sobre la fluorescencia.

Perfiles Globales

Los perfiles globales o acumulativos de las 48 estaciones por temperatura, salinidad, sigma-t, oxígeno y fluorescencia hasta la profundidad de 150 m (Fig. 8a), muestran que la termoclina se encuentra a 78 m de profundidad, la haloclina está a 39 m, la picnoclina se encuentra a la profundidad de 58 m y la oxiclina a 66 m. El pico máximo de fluorescencia se presenta a 60 m de profundidad en promedio (desviación estándar = 12.65 m), el cual se observa muy marcado. Antes de estas profundidades se puede considerar que hay una capa de mezcla en la parte superior.

La distribución vertical de estos parámetros ambientales después de los 300 m no tienen mucha variación, a excepción de la fluorescencia que se encuentra distribuida principalmente en los primeros 140 m de la columna de agua (Fig. 8b). Tomando en cuenta esta característica, la profundidad a la que se trabajaron los datos fue a 100 m para los planos horizontales y a 150 m de profundidad para los perfiles individuales y transectos.

La temperatura presenta valores que van de 25 a 21 °C desde la superficie hasta aproximadamente los 70 m, después, a los 78 m de profundidad se observa el máximo cambio, que corresponde a la termoclina, llegando a presentar 15 °C a la profundidad de 150 m. A partir de ahí disminuye gradualmente y de manera más homogénea hasta los 1000 m.

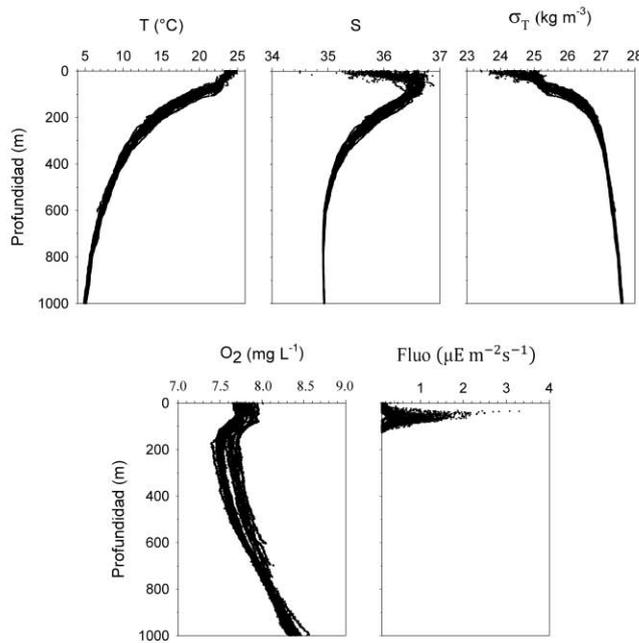
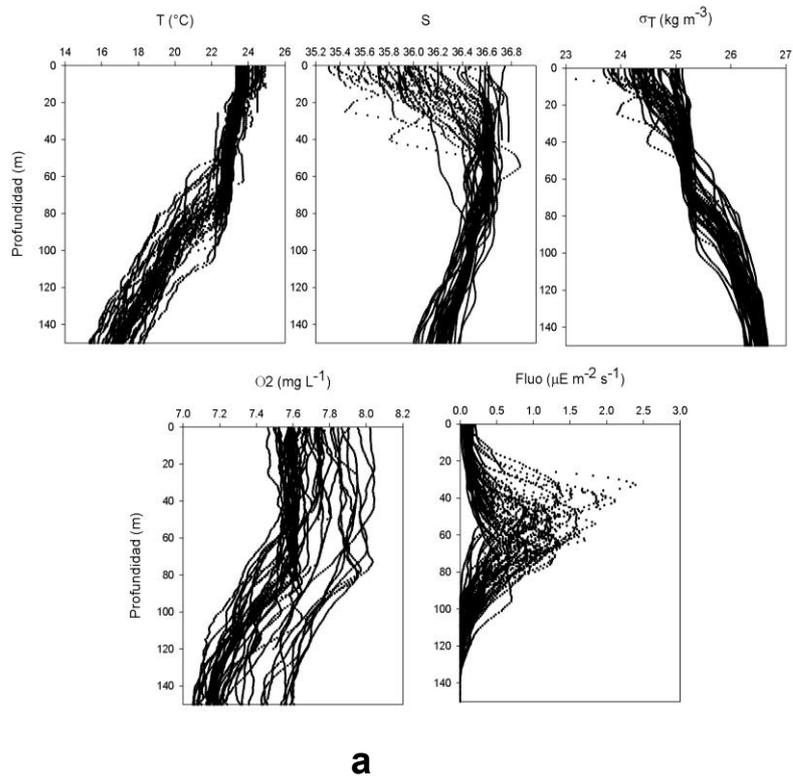


Figura 8. Perfiles globales de temperatura (°C), salinidad (gr kg⁻¹), sigma-t (kg m⁻³), oxígeno (mg L⁻¹) y fluorescencia (μE m⁻² s⁻¹) hasta la profundidad de a) 150 m y b) 1000 m de las 48 estaciones.

En el perfil de la salinidad se observan datos dispersos desde la superficie hasta los 35 m, con valores de 35.4 a 36.8 gr kg⁻¹, después se presenta la haloclina a los 39 m de profundidad. Esta dispersión se puede deber a la evaporación que se presenta en la capa superior de la columna de agua. Después de los 100 m hasta los 300 m el cambio va de 36.6 a 35.2 gr kg⁻¹, para llegar hasta los 1000 m con una distribución uniforme y con valores de 35 gr kg⁻¹.

La densidad (σ_T) tiene valores de 23.5 a 25 kg m⁻³ desde la superficie hasta los 30-50 m de profundidad. La pycnoclina se encuentra a los 58 m, a partir de ahí los valores van de 25 a 27 kg m⁻³ hasta 300 m, luego se alcanzan valores de 27.5 kg m⁻³ hasta llegar a los 1000 m.

Los valores del oxígeno van de 7.5 a 8 mg L⁻¹ de la superficie a los 60 m. La oxiclina se encuentra a 66 m, después de esa profundidad disminuye a 7 mg L⁻¹ hasta los 200 m y después se presenta un aumento de modo gradual que llega a 8.5 mg L⁻¹ a los 1000 m; este aumento se debe a que a esa profundidad el oxígeno deja de ser consumido y también parcialmente debido a las bajas temperaturas del agua en las profundidades. Además se puede considerar que el incremento en la concentración de oxígeno en las aguas profundas es causado por el flujo de las masas de agua frías y ricas en éste, que fluyen desde altas latitudes a lo largo del fondo oceánico.

La fluorescencia se distribuye principalmente a lo largo de los primeros 140 m de profundidad, teniendo su pico máximo a los 60 m. Es importante notar que este dato coincide, aproximadamente, con la profundidad de la pycnoclina (58 m) y la oxiclina (66 m), ya que estos parámetros tienen una relación directa, debido a que la fluorescencia está dada por la Chla de los organismos fitoplanctónicos y estos cuando llevan a cabo el proceso fotosintético producen oxígeno.

Perfiles por Estación

En este apartado se muestran los perfiles de las 48 estaciones, asociados a datos de temperatura (°C), salinidad (gr kg⁻¹), sigma-t (Kg m⁻³), oxígeno (mg L⁻¹)

y fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Se presenta cada uno de manera individual por cada estación hasta la profundidad de 150 m.

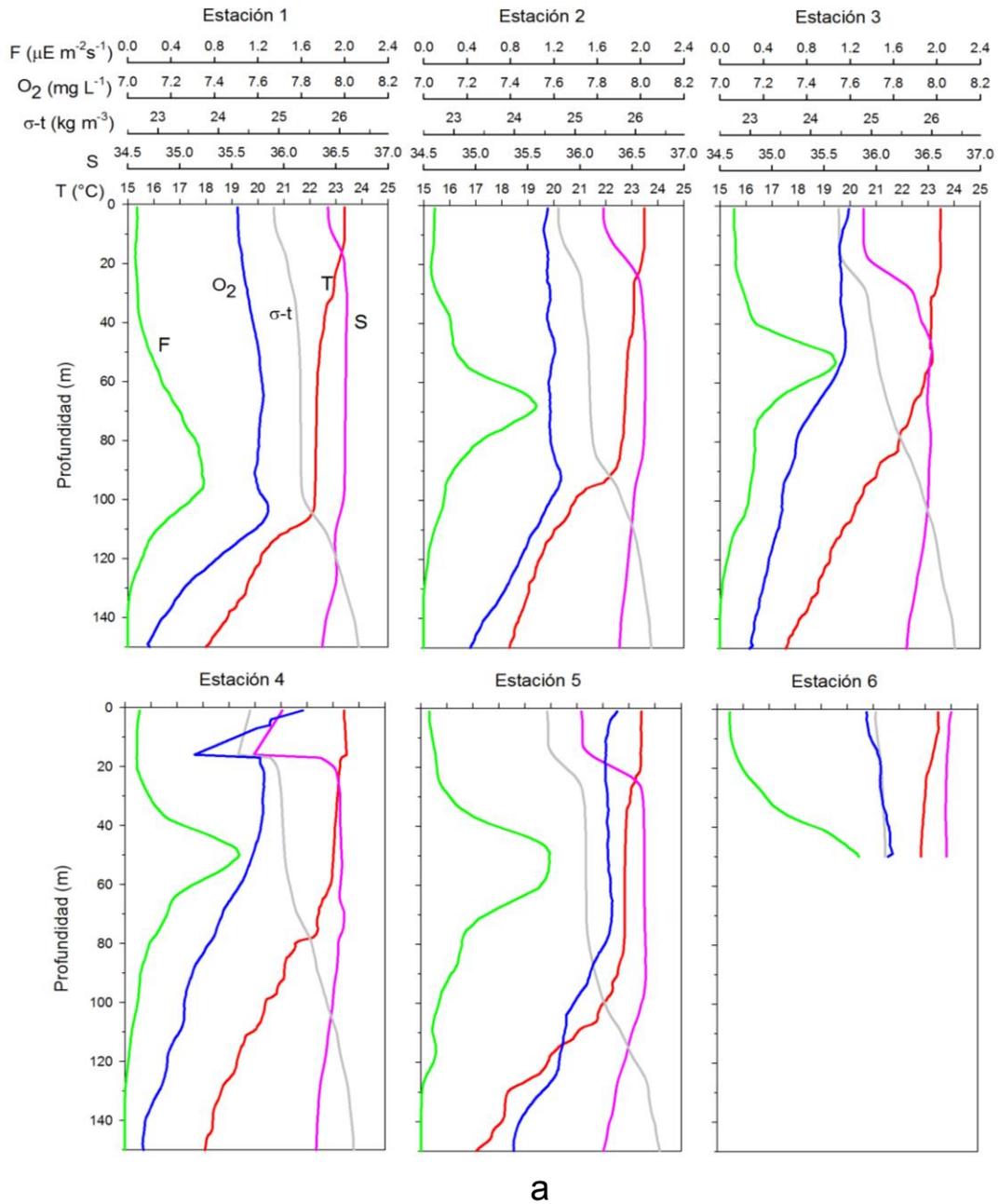
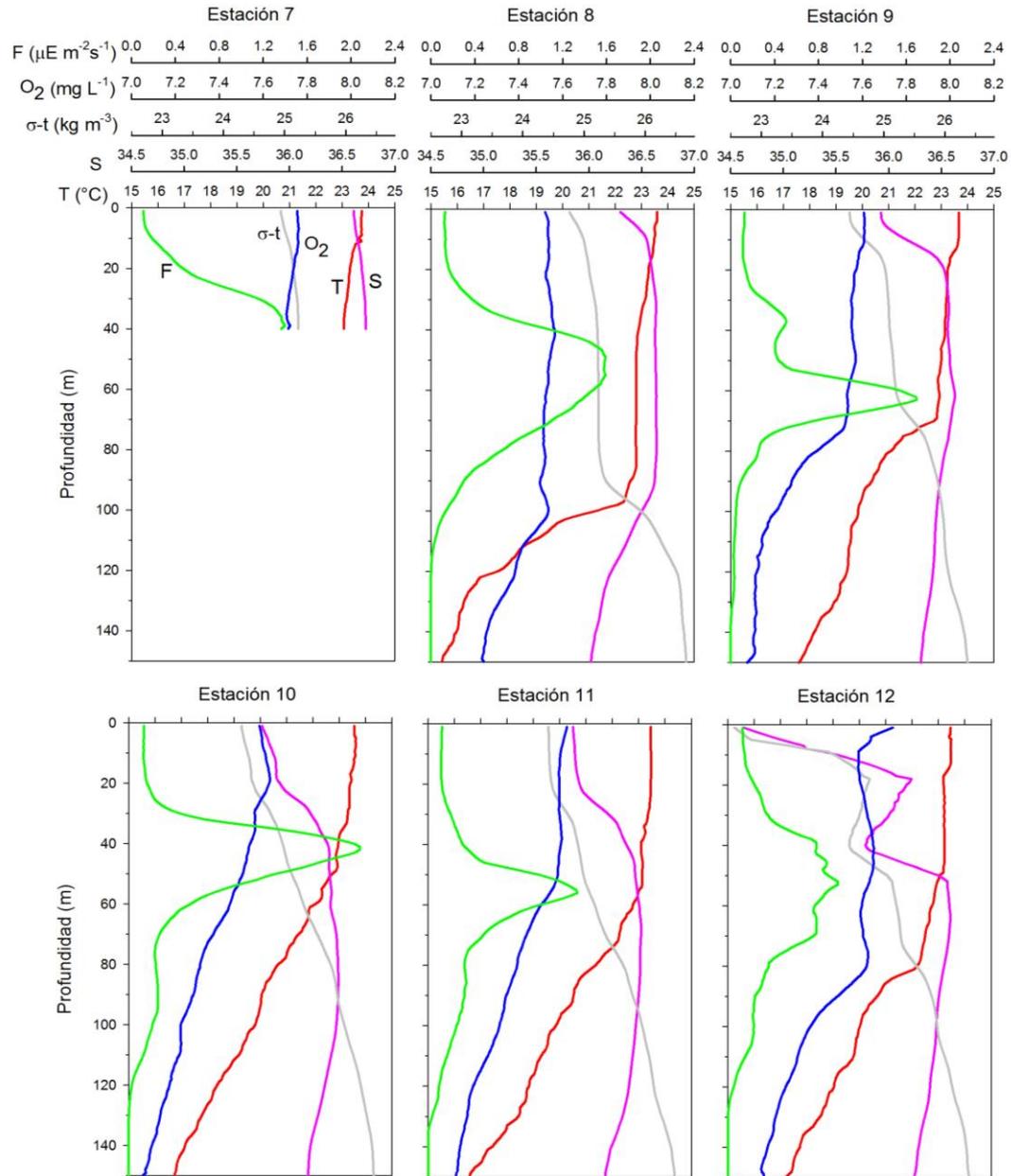
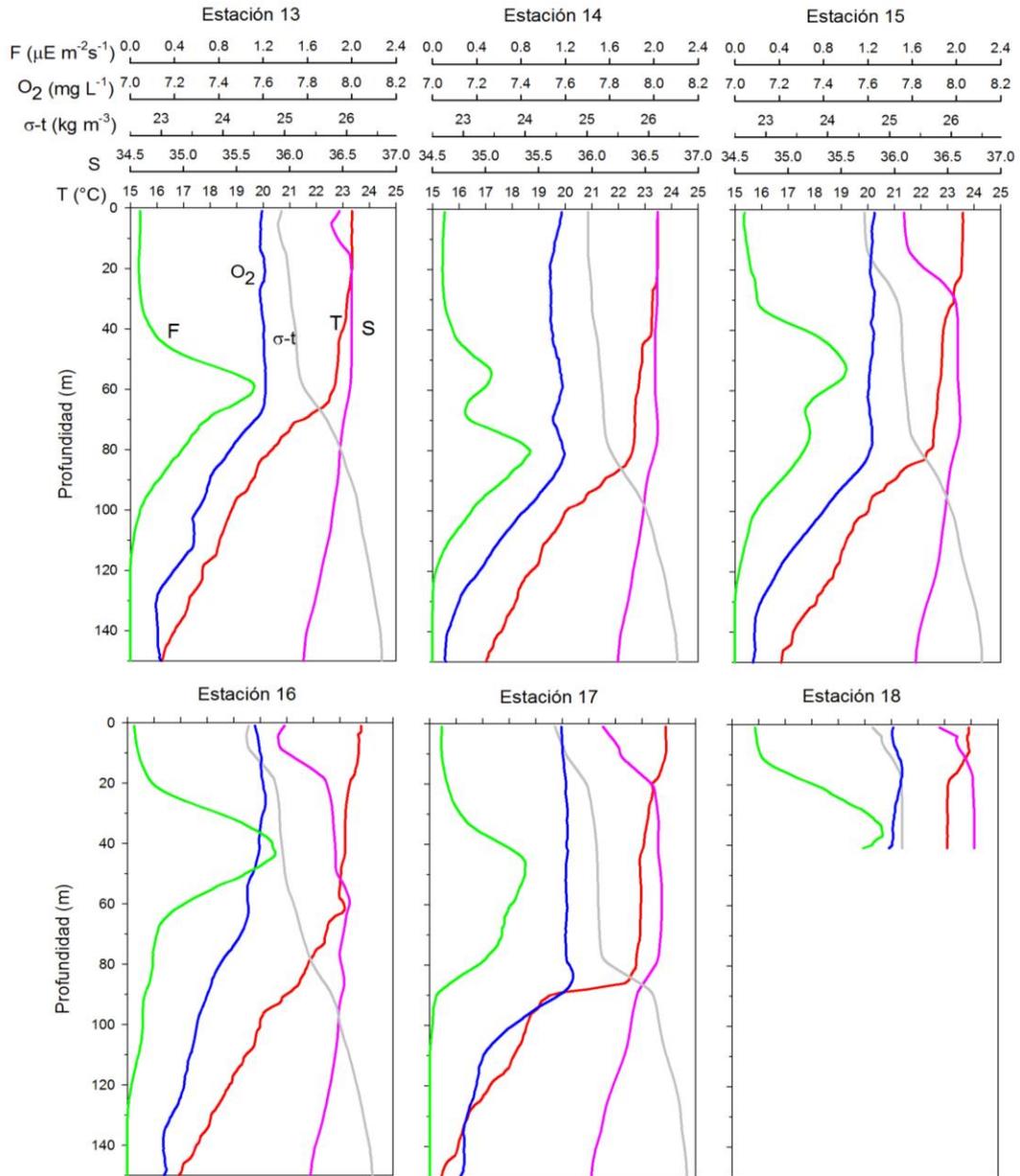


Figura 9. Perfiles individuales de las 48 estaciones con datos de temperatura (°C), salinidad (gr kg^{-1}), sigma-t (Kg m^{-3}), oxígeno (mg L^{-1}) y fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Estaciones 1-6 (a), estaciones 7-12 (b), estaciones 13-18 (c), estaciones 19-24 (d), estaciones 25-30 (e), estaciones 31-36 (f), estaciones 37-42 (g) y estaciones 43-48 (h).



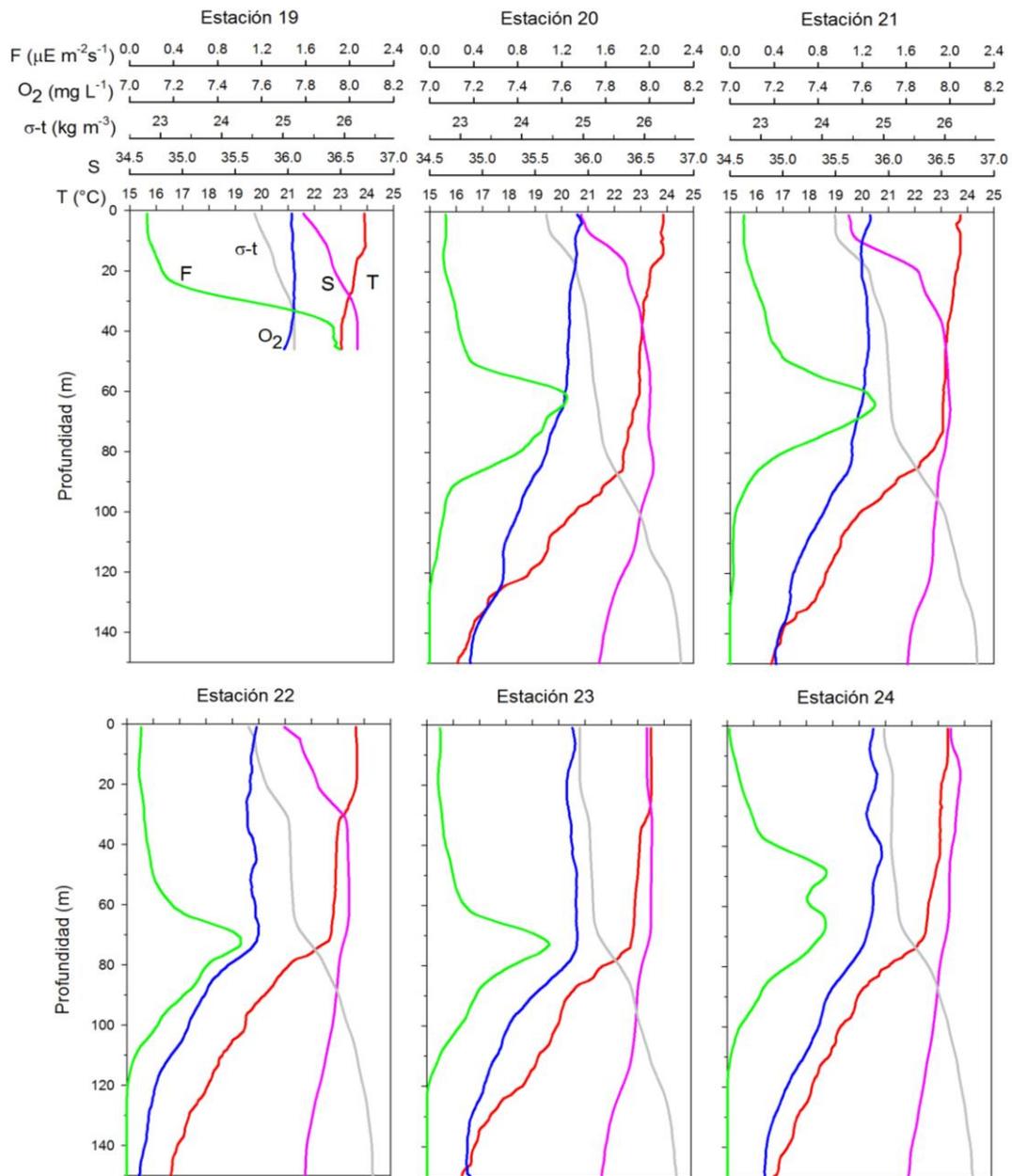
b

Fig. 9 Continuación



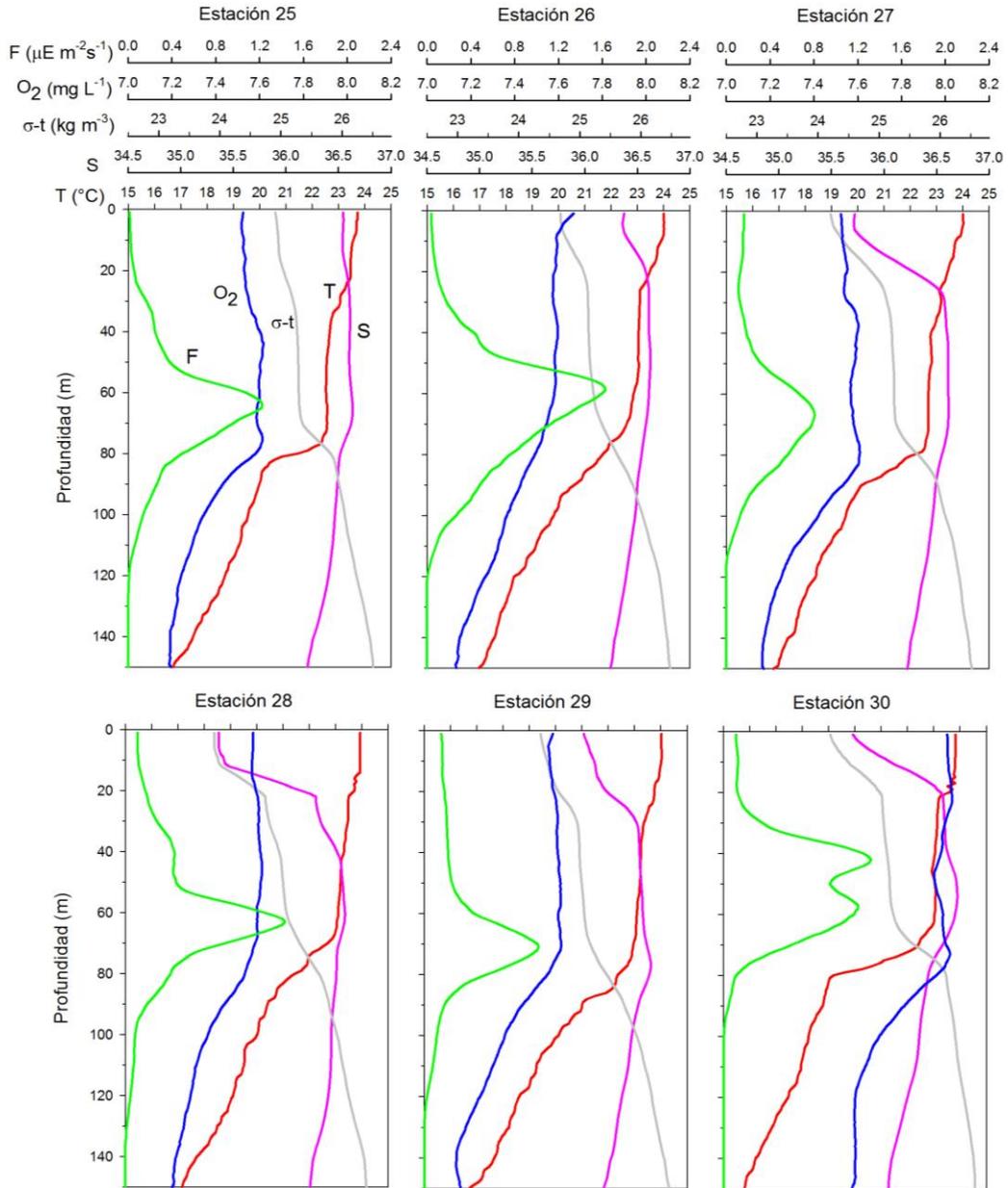
C

Fig. 9 Continuación



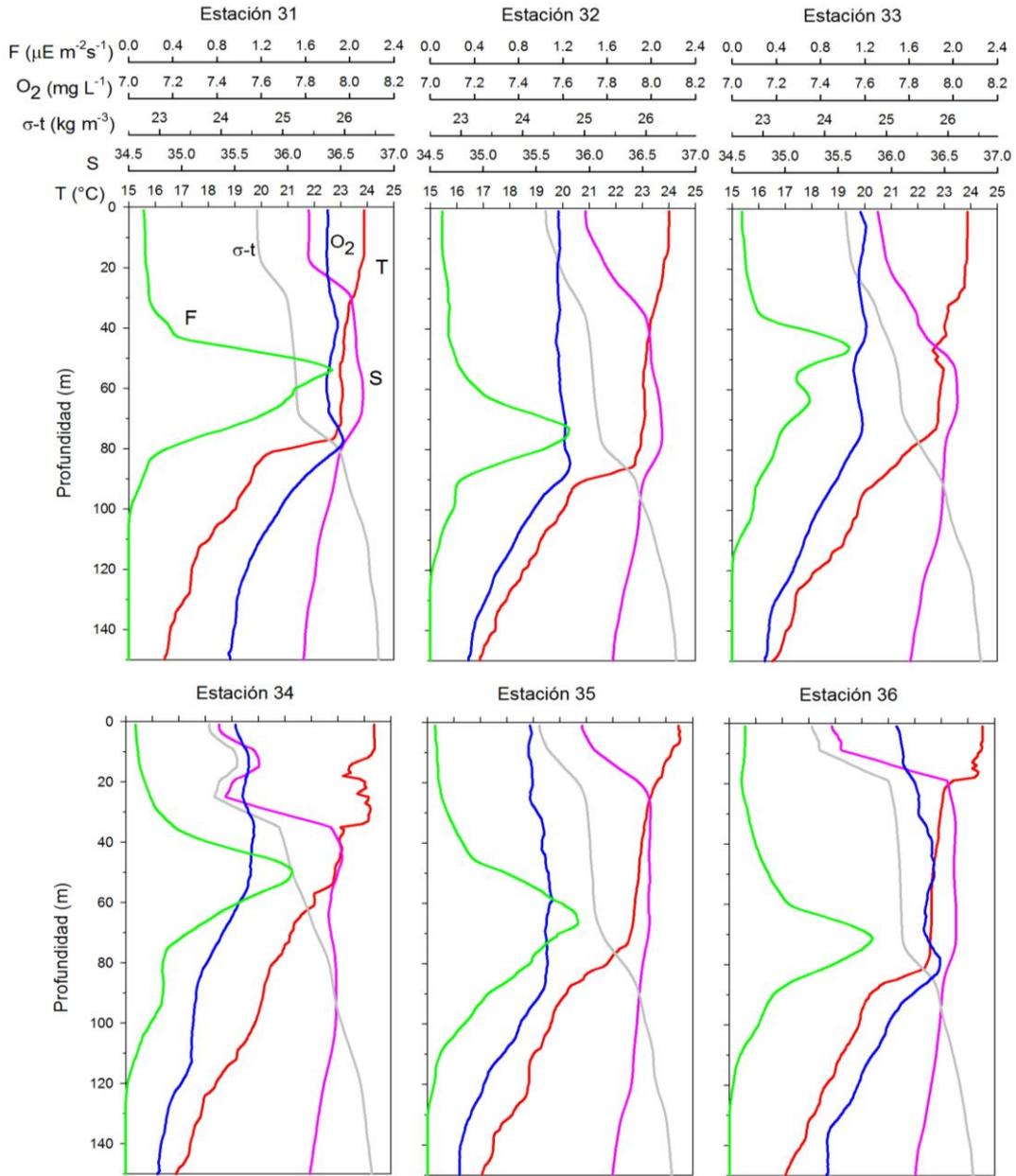
d

Fig. 9 Continuación



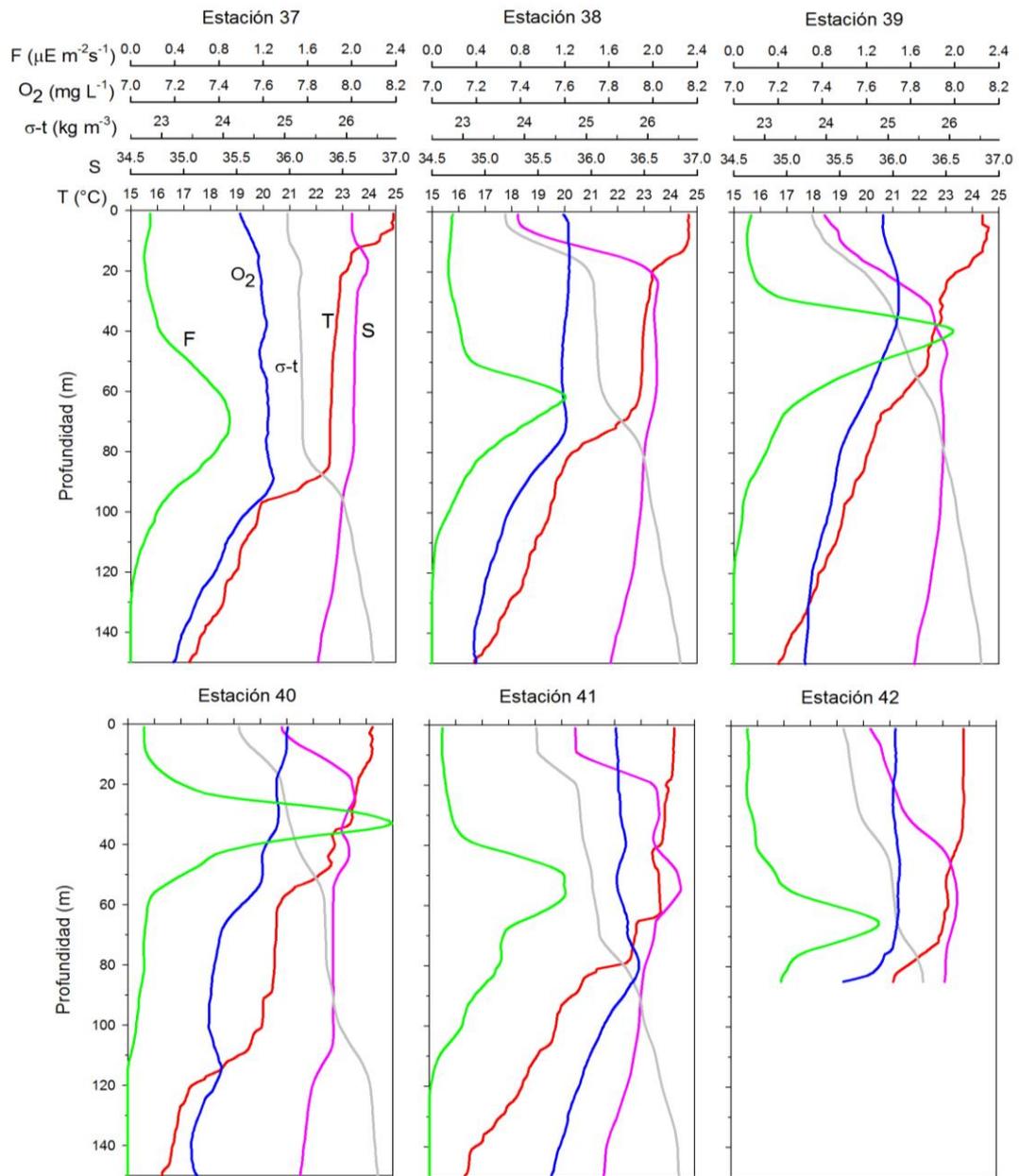
e

Fig. 9 Continuación



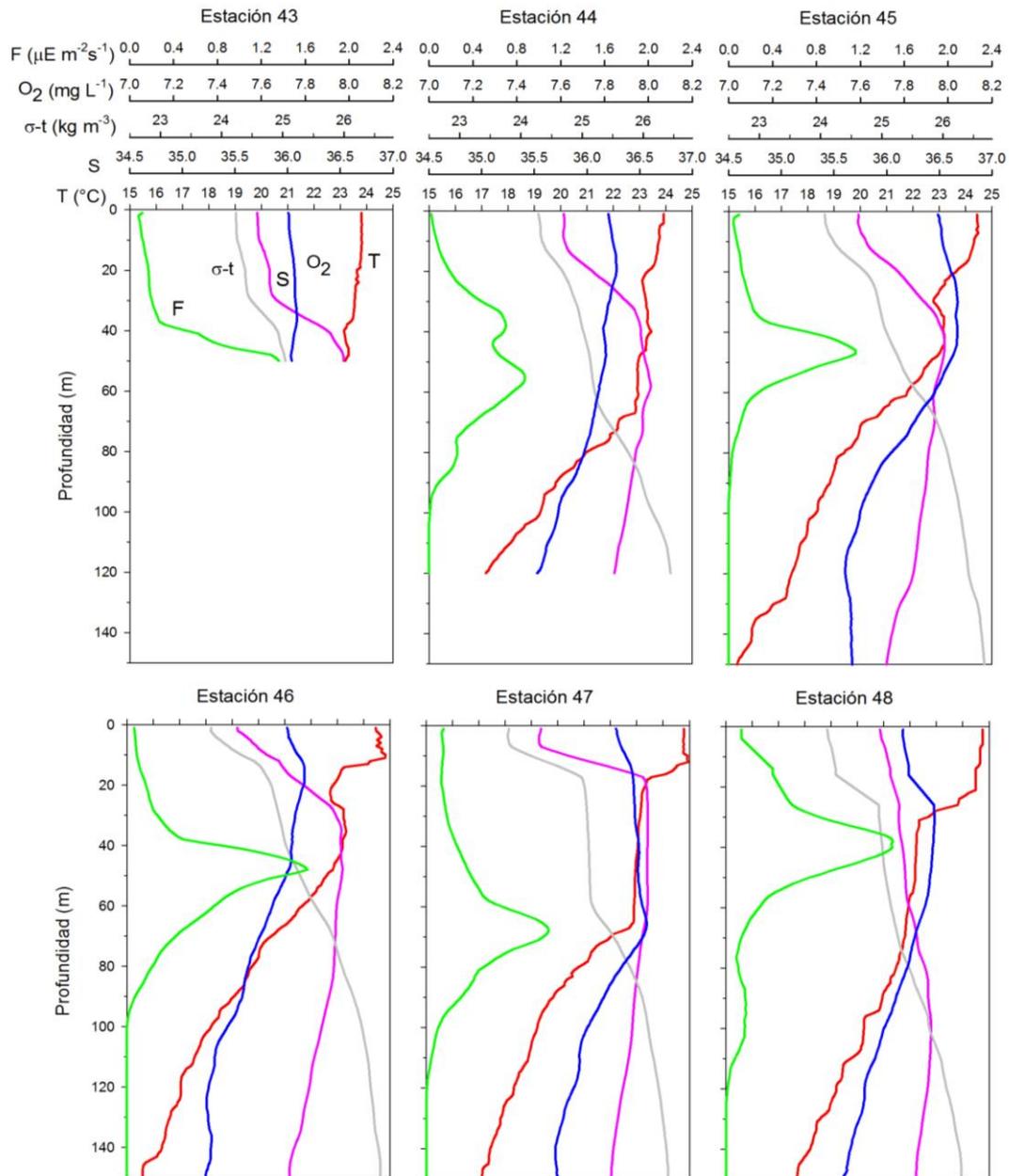
f

Fig. 9 Continuación



g

Fig. 9 Continuación



h

Fig. 9 Continuación

En este estudio la termoclina se encuentra a los 78 m de profundidad tomando en cuenta las 48 estaciones. Como referencia, Ramírez Cruz (2005), reporta un descenso continuo en la termoclina, haloclina y pycnoclina hasta los 100 m de profundidad, por efecto de mezcla turbulenta inducida por el paso de un norte fuerte durante la campaña oceanográfica del 18 de febrero al 6 de marzo del 2003. Rosales Navarro (2007), reporta la termoclina de los 50 a los 60 m en el mes de abril de 2001 con una capa de mezcla de 40 m de espesor

(época de nortes) y para junio de 2002 encuentra una capa de mezcla de 25 m y no observa una termoclina bien definida (época de secas); ambos en la zona del Cañón de Campeche. Lo que sugiere que en este estudio llevado a cabo en época de nortes (febrero 2011) y por la continua mezcla característica de esta época, la termoclina se haya encontrado a la profundidad de 78 m.

Como se mencionó en la parte de los perfiles globales, tomando en cuenta las 48 estaciones de muestreo, el pico máximo de fluorescencia se encontró a 60 m de profundidad en promedio, asociado de manera general con la profundidad de la picnoclina (58 m) y de la oxiclina (66 m); sin embargo, puede señalarse que los valores de fluorescencia presentaron variaciones en la distribución vertical en relación a la profundidad de la termoclina, por lo que se encontraron cuatro patrones: 1) pico máximo de fluorescencia asociado a la termoclina, 2) pico máximo de fluorescencia por arriba de la termoclina, 3) pico máximo de fluorescencia por debajo de la termoclina y además de distribuciones verticales 4) con presencia de dobles picos de fluorescencia. Así, observamos que en las estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 24, 25, 27, 30, 33, 37, 41 y 44 los picos máximos de fluorescencia se encuentran ubicados por arriba de la termoclina, el pico máximo de fluorescencia en la estación 48 se encuentra por debajo de la termoclina y los picos máximos de fluorescencia en las estaciones 9, 10, 22, 23, 26, 28, 29, 31, 32, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 42, 45, 46 y 47 se encuentran asociados a la termoclina.

Observamos que se presentan dobles picos de fluorescencia en las estaciones 9, 14, 15, 24, 30, 33 y 44, con picos muy marcados principalmente en las estaciones 14, 24 y 30 (Fig. 9c-e). Las estaciones 14 y 24 se ubican en la zona oceánica, del lado oeste del área de estudio y la estación 30 en la zona de la plataforma continental de lado este, muy cerca del eje del cañón (Fig. 3).

La estación 40 muestra el valor de fluorescencia más alto ($2.4 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Fig. 9h) y la estación 1 muestra el valor de fluorescencia más bajo ($0.6 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Fig. 9a); estas concentraciones pueden deberse a la ubicación de las estaciones en las distintas zonas, cerca de la plataforma en la parte sur y zona oceánica más profunda del lado noroeste del área de estudio, respectivamente (Fig. 3), de acuerdo a los valores encontrados en un estudio hecho por Signoret *et al.* (2006) en la región sur del Golfo de México, donde señalan que los

valores mayores se obtuvieron en las estaciones cercanas al talud y se asociaron con la frontera de la circulación ciclónica de mediana intensidad; así como lo reportado por Aguirre (2002), quien indica una distribución homogénea de Chla a través de las áreas oceánicas y concentraciones diferentes en las zonas costeras o con altas cantidades de sedimentos en la desembocadura del río Coatzacoalcos.

Distribución de Temperatura, Salinidad y Sigma-t (Planos Horizontales)

La temperatura en el océano es crítica para la supervivencia de los organismos fitoplanctónicos. A diferencia de la salinidad, la temperatura del agua marina varía en un amplio rango, tanto vertical como horizontalmente, aunque este cambio sea más pequeño que los de la luz solar y la disponibilidad de nutrientes y sus efectos sean generalmente menos aparentes que éstos.

La distribución horizontal de la temperatura a diferentes profundidades se muestra en forma de isotermas con intervalos de contorno que van de 0.1 °C en la superficie a 0.2 °C a 60 m y 100 m (Fig. 10). En general la temperatura varía de 25 a 18 °C desde la superficie hasta los 100 m. En la parte central en la superficie, muy cerca del eje del cañón, se observan valores de temperatura entre 23.6 y 24.2 °C, siendo tal la influencia que más adelante da lugar a la formación de un giro anticiclónico en la parte oeste del cañón, donde se observa ligeramente un aumento de la temperatura llegando a presentar valores de hasta 24.8 °C. En la parte noroeste de la región se puede observar un núcleo frío que sugiere la formación de un giro ciclónico con valores de entre 23.4 y 24.0 °C de temperatura, aumentando hacia la parte suroeste hasta alcanzar valores de 24.8 °C, dando lugar a un núcleo cálido.

La temperatura a los 60 m de profundidad varía de 23.2 a 21.4 °C, siendo los rangos de temperatura correspondientes a dos pequeños núcleos, uno frío y uno cálido, que se observan en la parte sur de la zona, mismos que sugieren un patrón de circulación anticiclónico y ciclónico respectivamente, muy cerca de la plataforma continental y en la base del cañón.

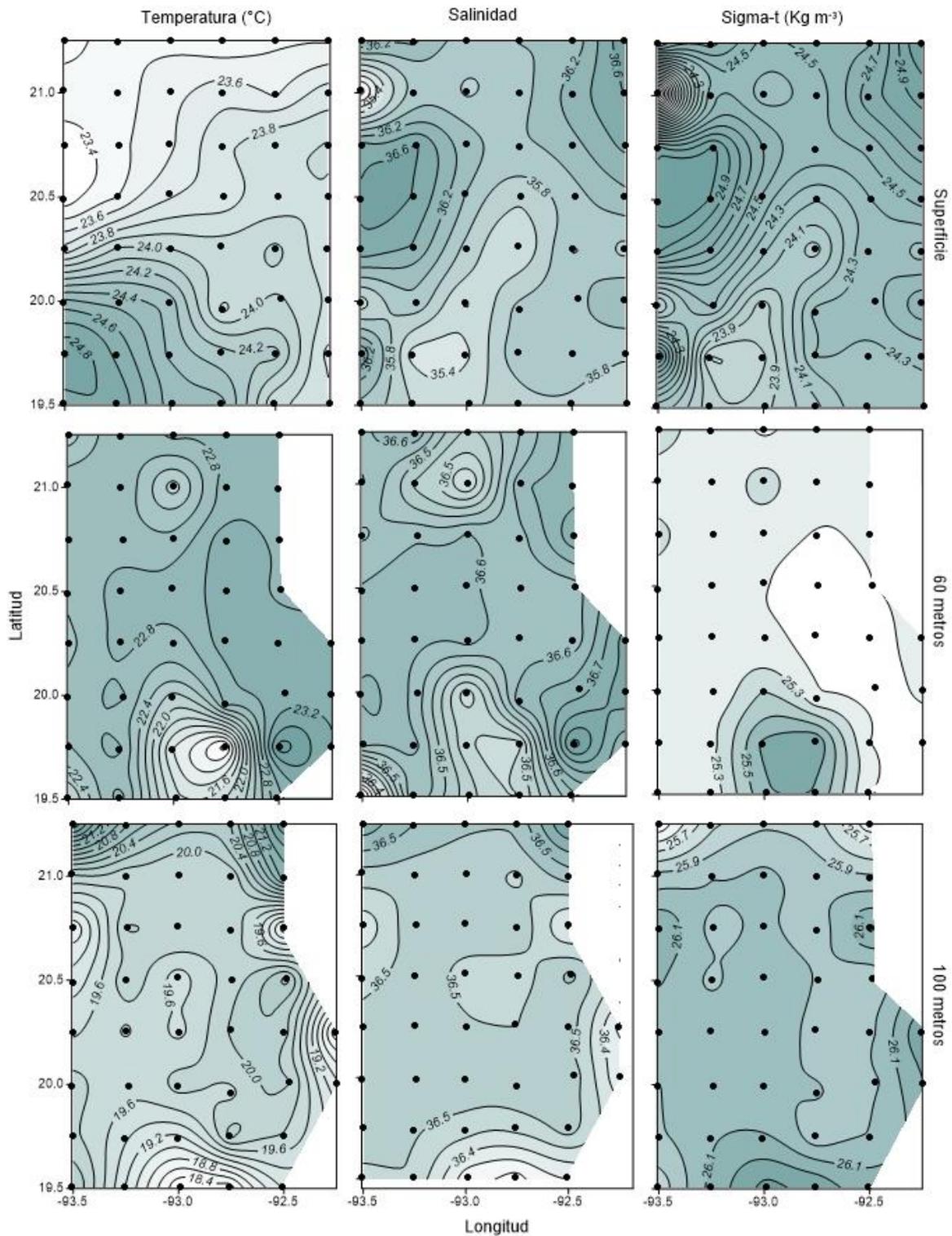


Figura 10. Planos de temperatura (°C), salinidad (gr kg⁻¹) y sigma-t (kg m⁻³) en superficie, 60 m y 100 m.

La temperatura a los 100 m de profundidad varía de 18.4 a 20.4 °C. Se observan núcleos fríos en la parte sur con 18.4 °C y también, en la parte este-oeste con una variación en la temperatura de entre 19.0 y 19.4 °C, que

sugieren un patrón de circulación ciclónica. Hacia la zona noreste de la área de estudio se encuentra un núcleo cálido, con una temperatura de 20.4 °C, asociado a una circulación anticiclónica que corre a lo largo del eje del cañón.

La salinidad del agua de mar también es crucial, ya que el crecimiento de las plantas y los animales marinos está relacionado al suministro de los gases vitales disueltos, las sales y otros nutrientes. Los cambios en la salinidad pueden afectar significativamente la tasa de crecimiento de muchos organismos; sin embargo, la tolerancia hacia la salinidad parece ser menor para algunas especies cuando la temperatura del agua de mar es baja (Weihaupt, 1984).

La salinidad se presenta en forma de isohalinas con intervalos de contorno de 0.03 gr kg⁻¹ a 60 y 100 m y de 0.2 gr kg⁻¹ en superficie. Los valores van de 34.6 a 36.8 gr kg⁻¹ desde la superficie hasta los 100 m. Los valores de salinidad en la superficie van de 35.4 a 36.6 gr kg⁻¹. Se observan dos núcleos de baja salinidad, ambos de 35.4 gr kg⁻¹ en la parte noroeste y sur de la región; este último se extiende hasta la parte central, cerca del eje del cañón. También se observan dos núcleos de alta salinidad, los dos con valores de 36.6 gr kg⁻¹; uno se encuentra en la parte noreste, sobre la plataforma continental, debido quizá a la corriente de intrusión que después genera la formación de un giro ciclónico o al efecto de algún afloramiento y, otro en la parte oeste, pegado al núcleo de baja salinidad que se encuentra al norte de la zona de estudio.

La salinidad a 60 m muestra dos núcleos en la parte sur, uno de baja salinidad de 36.5 gr kg⁻¹ y uno de alta salinidad de 36.7 gr kg⁻¹, estos núcleos coinciden con los que se presentan en la temperatura a la misma profundidad. Se observa otro núcleo de baja salinidad con el mismo valor de 36.5 gr kg⁻¹ en la parte norte. A esta profundidad se puede ver como los valores de salinidad se empiezan a homogeneizar siendo su rango de variación muy pequeño. La salinidad a 100 m se encuentra muy homogénea, prácticamente no hay ninguna variación con respecto del valor más bajo de salinidad de los 60 m, siendo este de 36.4 gr kg⁻¹.

Normalmente la distribución vertical de la densidad es bastante uniforme y las diferencias horizontales se observan menores, excepto donde las corrientes modifican al gradiente de densidad. Las diferencias locales de densidad pueden ser la causa de las corrientes de convección en el océano.

Las corrientes causadas por éste o por otros mecanismos pueden establecer patrones bien definidos, o pueden ser sólo locales y temporales y servir para mezclar y homogeneizar al agua de mar vecina (Weihaupt, 1984).

Las densidades menores usualmente son encontradas en las aguas cálidas superficiales y las más altas en las aguas más profundas y frías; así, los gradientes y valores de la densidad varían dependiendo de los cambios en las propiedades del agua de mar que la afectan.

Observamos que la distribución de la densidad (σ_T) presenta valores que van de 23.9 a 24.1 kg m^{-3} (Fig. 10), desde la superficie hasta los 100 m. Los resultados se muestran en forma de isopicnas con intervalos de contorno de 0.1 kg m^{-3} en todos los planos (Fig. 10). De acuerdo a los valores en la superficie se observan dos núcleos de mayor densidad, ambos con valores de 24.9 kg m^{-3} , uno ubicado en la parte sureste sobre la plataforma continental y otro en la parte oeste, los cuales coinciden con los núcleos de alta salinidad que se forman en la superficie; de la misma forma, al igual que con los valores de la salinidad, se forman dos núcleos de menor densidad, uno en la parte noroeste y otro en el sur de la malla, el primero con un valor de 24.3 kg m^{-3} y el segundo con un valor de 23.9 kg m^{-3} .

La densidad a 60 m muestra valores muy homogéneos, con una variación de 25.3 a 25.5 kg m^{-3} , con un solo núcleo muy marcado de 25.5 kg m^{-3} en la parte sur. La densidad a los 100 m tiene un intervalo de variación que va de 25.7 a 26.1 kg m^{-3} y presenta el mismo patrón de distribución que la temperatura y la salinidad, con dos núcleos de menor densidad en la parte noreste y noroeste; ambos con valores de 25.7 kg m^{-3} ; así como, un tercer núcleo de mayor densidad en la parte sur con densidades relativas de 26.1 kg m^{-3} .

Distribución de Oxígeno y Fluorescencia (Planos Horizontales)

La distribución del oxígeno en el agua de mar está controlada por una variedad de factores, entre ellos la temperatura, la salinidad, la presión atmosférica e hidrostática, la mezcla turbulenta y la actividad biológica, siendo esta última

quizá el factor más importante para producir variaciones bien definidas en la concentración y la distribución del oxígeno, por la dinámica que se da entre la fotosíntesis-respiración.

Al igual que la temperatura y la salinidad, los giros ciclónicos y anticiclónicos también tienen un efecto importante en la distribución espacial y temporal del oxígeno, como en la plataforma de Campeche, que a finales de la época de lluvias puede alcanzar 2.6 ml L^{-1} de oxígeno en la superficie, como resultado del ascenso de aguas de fondo, producido por los giros ciclónicos (Secretaría de Marina, 1972). O como la reportada por Signoret *et al.* (1998), en la plataforma de Yucatán, donde señala una sobresaturación del 112% (6.11 ml L^{-1}) a una profundidad de 20 m, condicionada por una alta productividad biológica resultado de un afloramiento de aguas subsuperficiales.

Los valores de oxígeno obtenidos por Durán Campos (2010), muestran una variabilidad de entre 2 y 5 ml L^{-1} , para la zona del Cañón de Campeche. Aldeco *et al.* (2009), reportan valores entre 3.28 y 8.21 ml L^{-1} y mencionan que la concentración de oxígeno disminuye conforme se acerca al talud continental del Banco de Campeche.

En este estudio se observan valores de oxígeno que van de 7.3 a 8 mg L^{-1} , desde la superficie hasta los 100 m (Fig. 11). El oxígeno en la superficie presenta valores muy uniformes de 7.5 a 7.9 mg L^{-1} . Se observa una serie de núcleos con alto contenido de oxígeno (7.9 mg L^{-1}) en la parte sur y sureste de la región, ubicados sobre la zona de la plataforma continental y otro núcleo con la misma concentración de oxígeno observado más hacia la parte norte, también con influencia de la plataforma continental. De ahí en el resto de la región la distribución de oxígeno sólo varía de 7.5 a 7.6 mg L^{-1} .

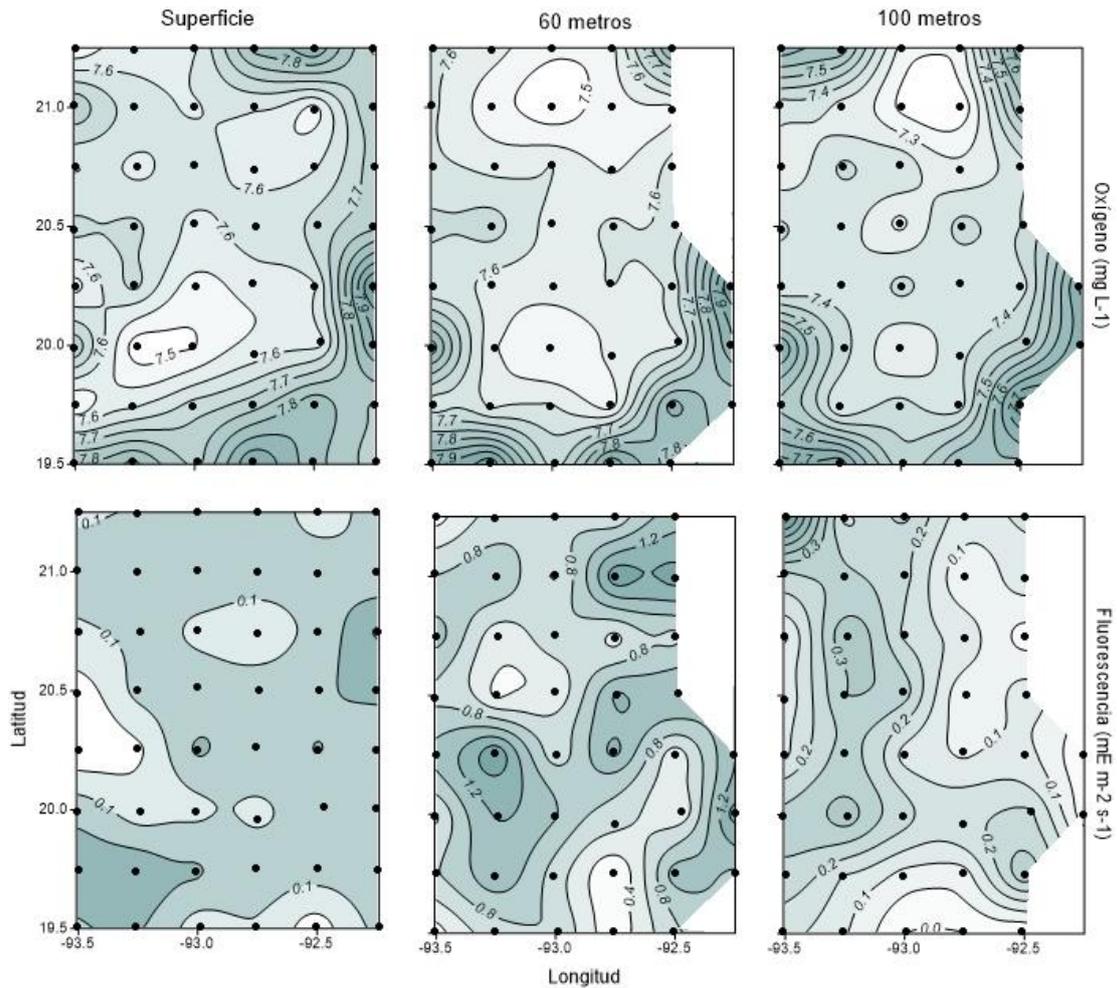


Figura 11. Planos de oxígeno (mg L^{-1}) y fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en superficie, 60 m y 100 m.

A los 60 m de profundidad, el oxígeno presenta las mismas variaciones en los intervalos que en la superficie con valores de 7.5 a 7.9 mg L^{-1} . Se mantienen los mismos núcleos y concentraciones y aparece uno más marcado que en la superficie en la parte oeste con un valor de 7.9 mg L^{-1} . Los valores a los 100 m van de 7.3 a 7.7 mg L^{-1} , la distribución se presenta similar a la que se observa en la superficie y a 60 m aparece la misma serie de núcleos con una ligera disminución en sus concentraciones.

Prácticamente el oxígeno sigue el mismo patrón de distribución de la superficie hasta los 100 m con ligeros cambios en las concentraciones.

Para poder realizar la fotosíntesis, el fitoplancton debe recibir luz del sol, lo cual significa que la zona principal de producción es en las aguas cercanas a la superficie sobre una profundidad por encima de los 200 m,

aproximadamente. La luz es extremadamente importante para el bienestar de los organismos marinos, debido a que todos dependen, a la larga, del plancton fotosintético para su nutrición. La transparencia, la absorción, la turbidez y el índice de refracción son todos importantes para controlar la luz en los océanos (Weihaupt, 1984).

En cuanto a los valores de fluorescencia, estos tienen una variabilidad de entre 0 y $2 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Los resultados se graficaron en forma de isolíneas con intervalos de contorno de $0.05 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para la superficie y 100 m y de $0.2 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para los 60 m.

La fluorescencia en la superficie es muy homogénea, se observan núcleos con bajas concentraciones de $0.1 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$, también se observa que empiezan a aparecer algunos núcleos de mayor fluorescencia en la parte este y suroeste con un ligero aumento llegando a $0.2 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Los mayores valores, en promedio, se presentan a los 60 m de profundidad con intervalos que van de 0.4 hasta $1.4 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Se observan cuatro núcleos con concentraciones de $1.2 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$, dos distribuidos en la parte sureste, pegados a la parte del talud continental y en la región del Cañón de Campeche, otro en el suroeste de la zona y el cuarto en la parte norte con las mismas concentraciones que los que aparecen en el sur. También se puede ver en la zona del centro hacia el oeste, la presencia de un núcleo de baja concentración de fluorescencia ($0.4 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$), que colinda con el núcleo que tiene altos valores ($1.2 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ubicado al suroeste. Se observa que este patrón de distribución de fluorescencia es similar al patrón de distribución del oxígeno a la misma profundidad, sobre todo en la parte sur de la región, con ligeras variaciones en la concentración y distribución del oxígeno.

A los 100 m de profundidad la fluorescencia es casi uniforme, no presenta ningún pico importante en la distribución horizontal, las concentraciones se van homogeneizando, variando de 0 a $0.3 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y se dispersa el patrón de distribución de los núcleos de mayor concentración de fluorescencia de los 60 m.

Fluorescencia Integrada

La fluorescencia integrada (Fig. 12), es la suma de todos los datos en la columna de agua, desde la superficie hasta los 140 m, que se encuentra en toda el área de estudio.

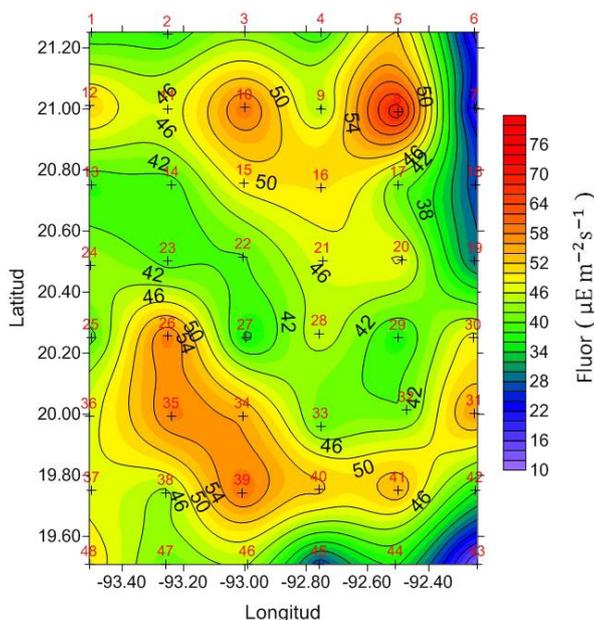


Figura 12. Fluorescencia integrada

La fluorescencia integrada muestra un intervalo con valores de 10 a 82 $\mu\text{E m}^{-1}\text{s}^{-1}$ en toda la columna de agua desde la superficie hasta los 140 m de profundidad.

Se observan altas concentraciones formando núcleos tanto en la parte norte como al sur de la zona. Al norte se presentan dos núcleos con valores que van de 50 a 54 $\mu\text{E m}^{-1}\text{s}^{-1}$, en la zona ubicada en la cabeza del cañón; al sureste se pueden ver dos núcleos pequeños también con las mismas concentraciones que los anteriores, estos se encuentran en la zona de la base del cañón y se aprecia cómo se continúan hacia la parte suroeste, formando un gran núcleo con los mismos valores que el primero. Estos núcleos tienen relación con la distribución de la temperatura, salinidad y densidad (Fig. 10), pues en los núcleos fríos que representan giros ciclónicos, se tiene menor concentración de salinidad y mayores valores de densidad, mismos que

corresponden a los de mayor fluorescencia que se observan en los datos integrados ya mencionados.

En la zona del Cañón de Campeche se presentan concentraciones con valores relativamente altos de $42 \mu\text{E m}^{-1}\text{s}^{-1}$, a través del eje del cañón.

Los núcleos que se forman con los valores de mayor concentración se encuentran ubicados en las estaciones 8, 10, 15, 16, 26, 30, 31, 34, 35, 39, 40 y 41, las cuales son estaciones cercanas a aquéllas donde se encuentran marcados los dobles picos de fluorescencia de los perfiles 9, 14, 15, 24, 30, 33, 34 y 44 (Fig. 9), teniendo quizá relación en cuanto a todos los procesos de mezcla vertical y el transporte de un punto a otro entre estación y estación que se presenta en la columna de agua. En estos resultados se observa que la fluorescencia sigue un patrón de distribución similar al del oxígeno en todos los planos (Fig. 11).

Distribución Vertical por Transectos de Temperatura, Salinidad, Sigma-t, Oxígeno y Fluorescencia

A continuación se describe la distribución vertical, en forma de transectos, de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad (gr kg^{-1}), sigma-t (Kg m^{-3}), oxígeno (mg L^{-1}) y fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Los transectos que se describen son: 1, 4 y 8 (norte-sur), A, C y F (este-oeste) y Eje del Cañón (Fig. 4), tomando en cuenta los principales puntos de la red de estaciones hasta la profundidad de 150 m.

En la sección vertical del transecto 1 (Fig. 13), que corre perpendicular al eje del cañón ubicado en la parte de la cabeza, se observa un hundimiento muy marcado en las isolíneas de la temperatura de los 20 m hasta aproximadamente los 45 m desde la estación 1 hasta la estación 6 que se ubica en la plataforma continental, con valores de temperatura de 23°C ; desde los 50 m hasta los 150 m se observa un levantamiento de las isothermas, con valores de temperatura que van de 19 a 22°C ; estas isolíneas se unen con las de las de la capa superior. Se ha reportado que en regiones próximas al talud el efecto topográfico de este produce afloramientos en las capas subsuperficiales (Salas de León *et al.*, 2004); dicho levantamiento en las

isotermas puede deberse a un afloramiento. Los valores de la temperatura para este transecto van de 19 a 23 °C.

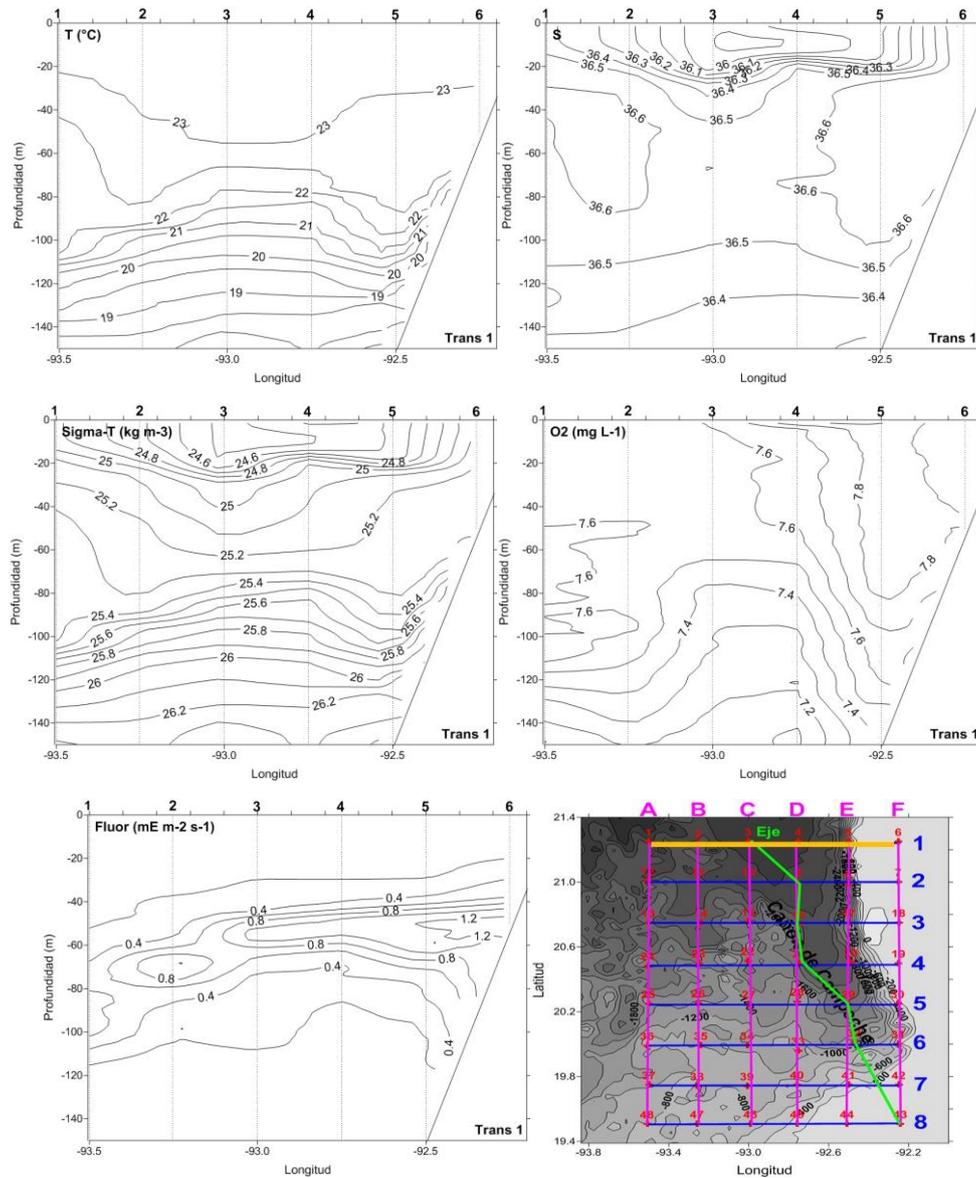


Fig. 13. Transecto 1 (estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6).

Se puede observar el mismo comportamiento de las isolíneas de la temperatura con las isopícnas; estas muestran valores de 24.6 a 26.2 kg m⁻³ desde la superficie hasta los 150 m, con hundimiento en la capa de la superficie a los 60 m y levantamiento de isopícnas de los 80 m a los 150 m. En las isolíneas de la salinidad se observa un pequeño núcleo formado en la superficie hasta los 40 m, los valores de este núcleo van de 36.5 en la periferia a 36.1 gr kg⁻¹ en el centro, lo que indica la presencia de un giro anticiclónico,

mismo que corresponde al hundimiento de la isoterma en la superficie. En las isolíneas del oxígeno se puede ver un hundimiento desde la superficie de las estaciones 3 a la 6 hasta los 120 m con valores de 7.8 a 7.6 mg L⁻¹ y desde los 150 m un levantamiento de las isolíneas alcanzando los 40 m. En las isolíneas de la fluorescencia se observan unas oscilaciones que corren a lo largo de todo el transecto de las estaciones 1 a la 6 a las profundidades entre 30 y 110 m, desplazándose de manera vertical. Los mayores valores de fluorescencia (1.2 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se encuentran en el lado este, pegado a la plataforma y disminuyen conforme la profundidad se hace mayor hasta llegar a 0.4 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$; aunque al nivel de los 60 m se observan unos núcleos con valores de 0.8 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

En el transecto 4 (Fig. 14), las estaciones se encuentran orientadas en dirección este-oeste y atraviesan el eje del Cañón en su parte central tocando parte de la plataforma continental en la estación 19. Aquí se observa aún el efecto del giro anticiclónico que hunde a las isotermas desde la superficie hasta los 50 m con valores de 23 °C. Aunque las isotermas que van de los 50 m a los 150 m se observan más estabilizadas.

En general se mantiene el mismo comportamiento y los mismos valores, tanto para la temperatura como para la salinidad y la densidad, que se muestra en el transecto 1. El oxígeno en esta sección tiene valores que van de 7.2 a 7.6 mg L⁻¹ y en las isolíneas se puede ver el levantamiento que se marca desde los 140 m hasta la superficie donde se observa un pico hacia la estación 22; este pico corresponde a la influencia de un giro ciclónico. En cuanto a la fluorescencia se observan las mismas oscilaciones en un intervalo de 30 m a 100 m de profundidad de la columna de agua, lo que indica que se encuentran altas concentraciones a esas profundidades.

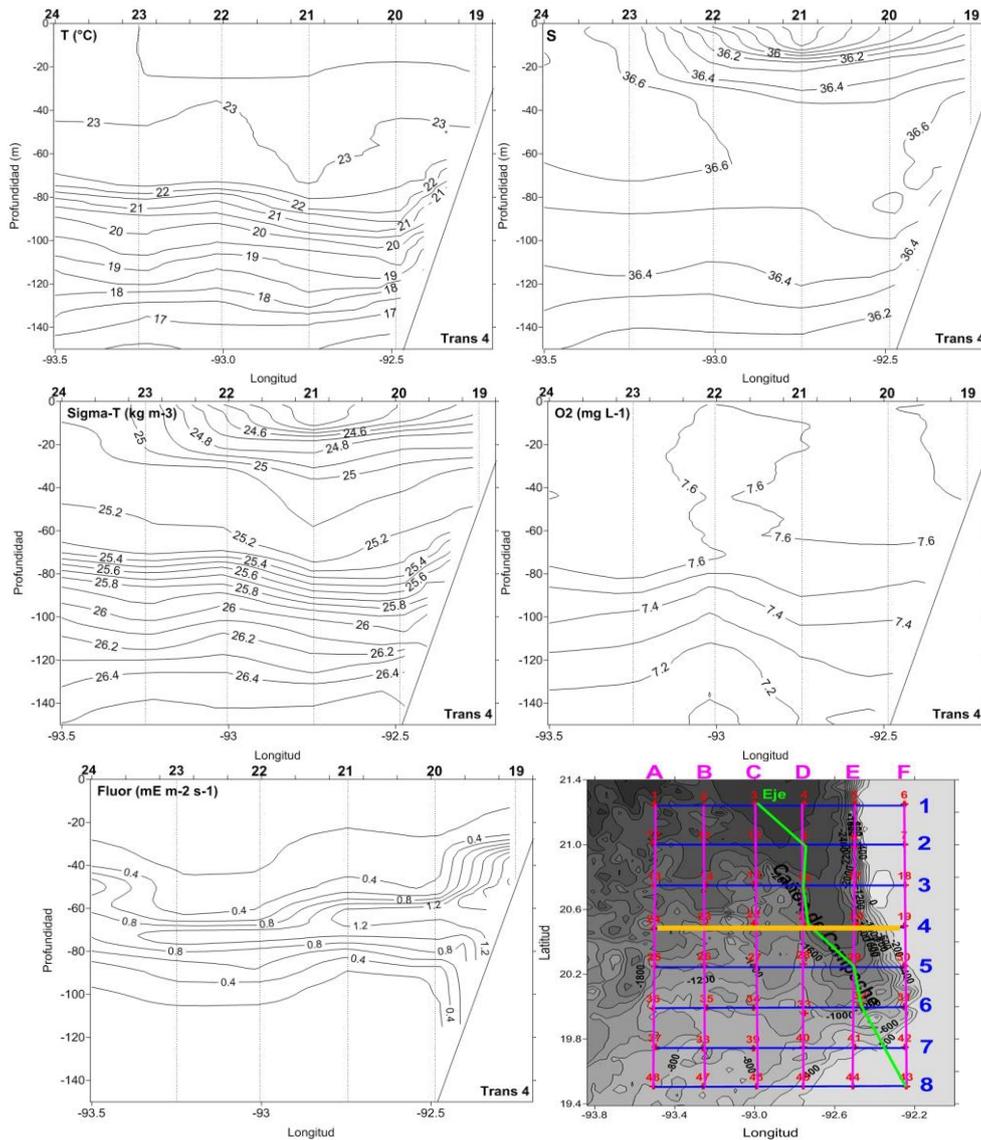


Figura 14. Transecto 4 (estaciones 19, 20, 21, 22, 23, 24).

En la sección vertical del transecto 8 (Fig. 15), las estaciones se encuentran ubicadas en la zona sur del cañón y sobre parte de la plataforma continental en el lado este. Las isotermas muestran un levantamiento desde los 150 m hasta aproximadamente los 50 m con un intervalo de valores de 17 a 22 °C. De la superficie hasta los 40 m se tienen temperaturas de 24 a 23 °C, se observa un movimiento en las isolíneas causado por efecto del talud. La salinidad presentan valores de 36.2 a 36.4 gr kg⁻¹ de la superficie hasta los 150 m y la densidad presenta valores de 24.6 kg m⁻³ a 26.4 kg m⁻³ mostrando hundimiento de las isolíneas hasta los 80 m. El oxígeno tiene valores de 7.6 mg L⁻¹ en un intervalo de 20 a 80 m, mismos donde se vuelven a presentar los

máximos de fluorescencia con valores que van de 0.2 a 1 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en forma de núcleos.

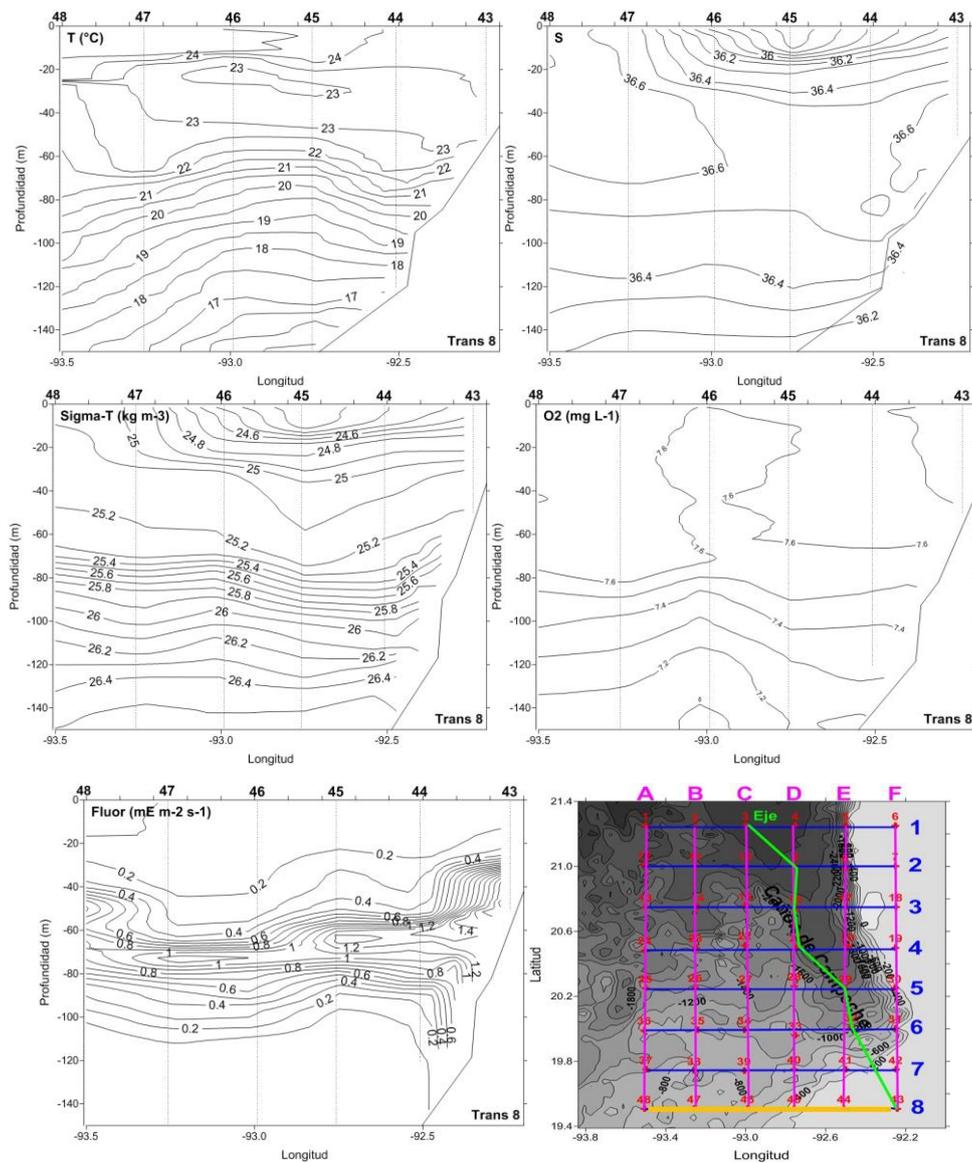


Figura 15. Transecto 8 (estaciones 43, 44, 45, 46, 47, 48).

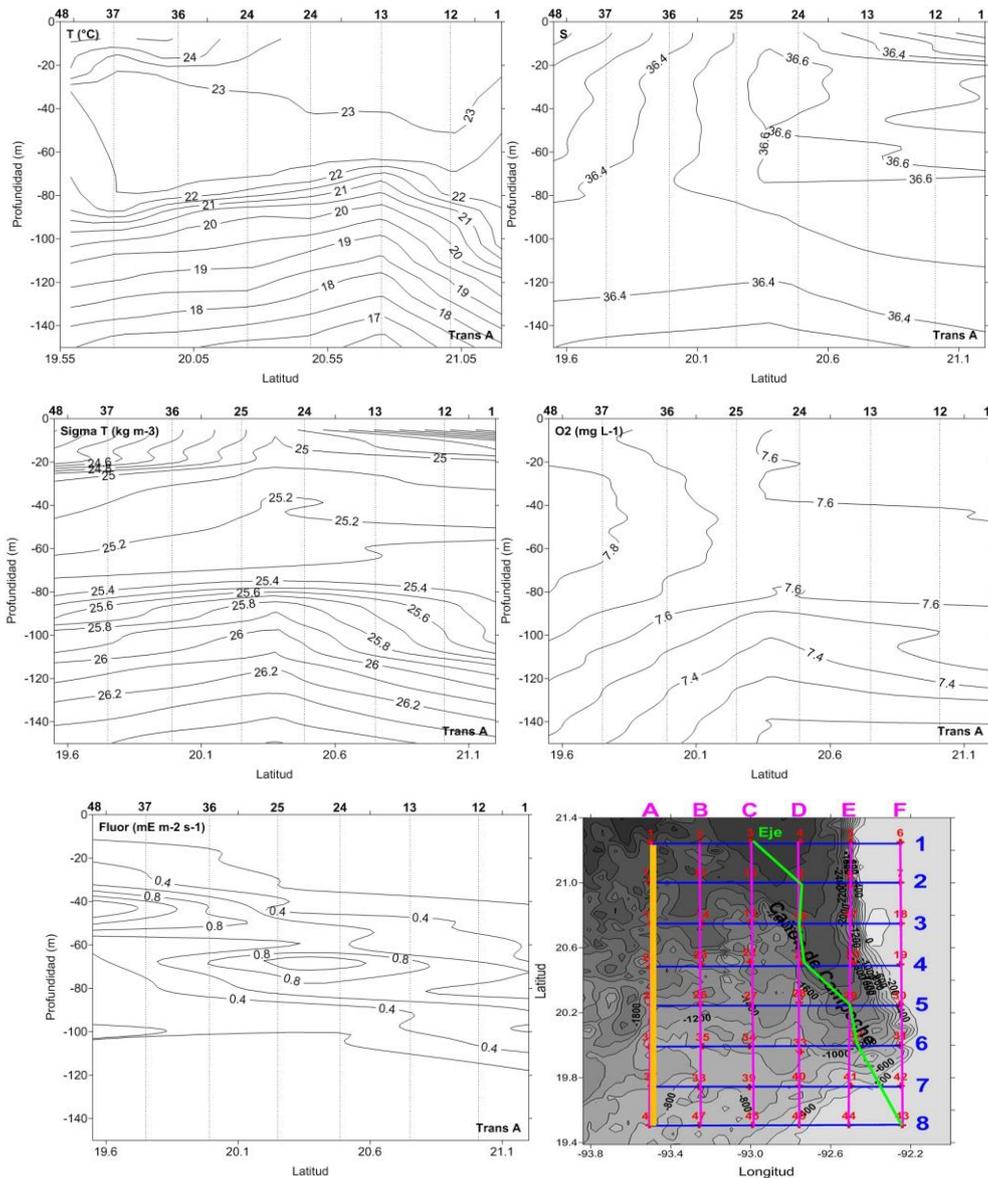


Figura 16. Transecto A (estaciones 1, 12, 13, 24, 25, 36, 37, 48).

En el transecto A (Fig. 16), las estaciones se encuentran orientadas en dirección norte-sur y se ubican en la parte oeste de la zona de estudio. En esta sección para la temperatura se observa un claro levantamiento de las isotermas desde los 150 m hasta la superficie con intervalos que van de 17 a 24 °C en la superficie, este patrón es característico de giros ciclónicos. La salinidad muestra valores muy homogéneos (36.4 gr kg⁻¹) y se observa un pequeño núcleo con salinidad de 36.6 gr kg⁻¹ hacia la estación 24. La densidad y el oxígeno marcan el mismo patrón de distribución con un levantamiento en las isolíneas; con valores de 25 a 26.2 kg m⁻³ y de 7.4 a 7.6 mg L⁻¹,

respectivamente, con un pico de mayor concentración de oxígeno de 7.8 mg L^{-1} a los 60 m. De la fluorescencia se tienen valores mínimos de $0.4 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con un núcleo bien marcados de $0.8 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a 60 m.

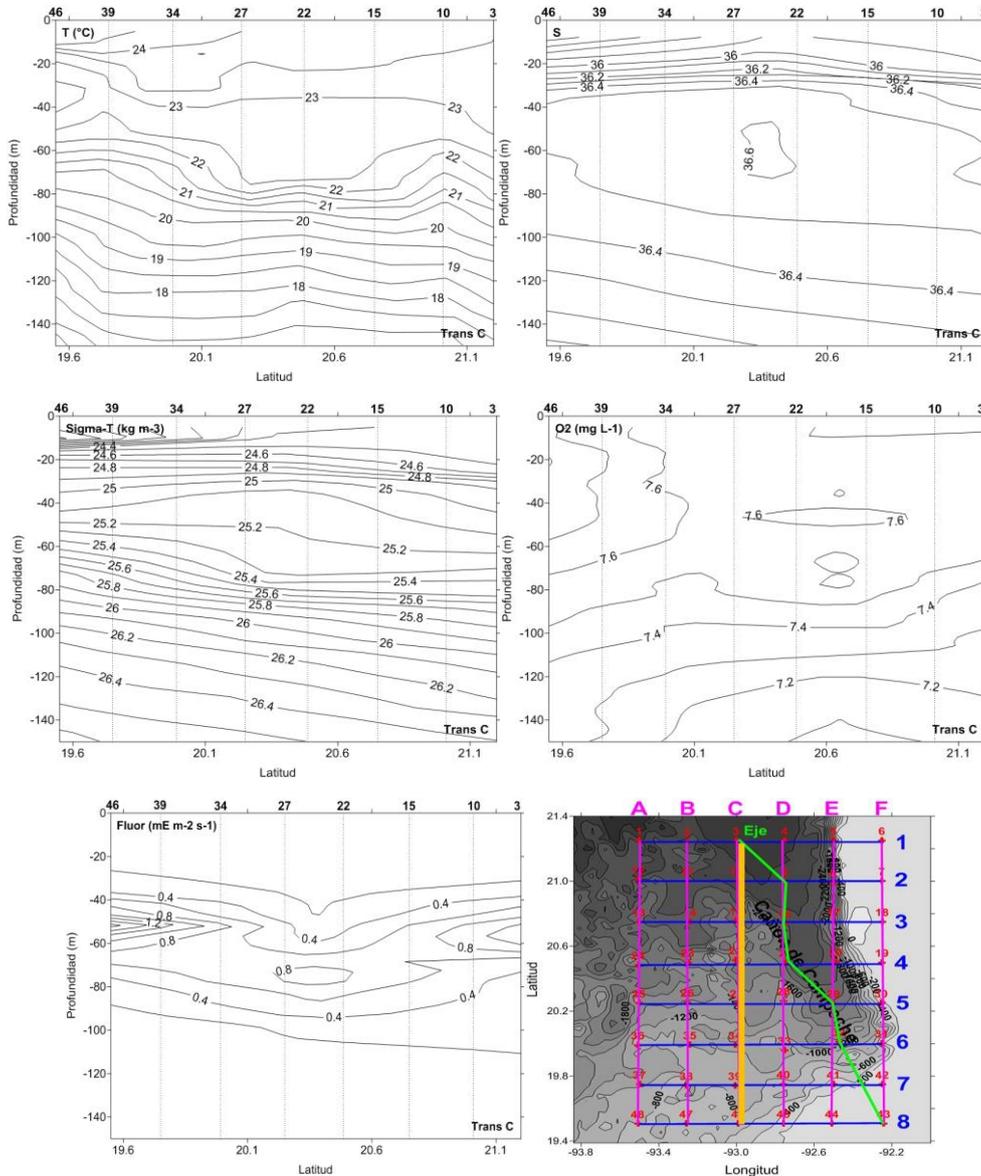


Figura 17. Transecto C (estaciones 3, 10, 15, 22, 27, 34, 39, 46).

El transecto C (Fig. 17) está orientado en dirección norte-sur, se ubica desde la cabeza del cañón hasta el talud en la parte sur de la zona de estudio. En esta sección la temperatura tiene valores de 18 a $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$, igual que en el transecto anterior, pero se nota un hundimiento de las isoterms muy marcado por el efecto del giro anticiclónico que se encuentra en esa zona, acercándose al cañón. En la salinidad se observa una disminución con valores de 36 gr kg^{-1}

en la superficie donde se nota una estratificación en las isohalinas, luego un núcleo de 36.6 gr kg^{-1} de salinidad a los 60 m. El intervalo de densidad aumenta y presenta valores de 24.4 kg m^{-3} en la superficie a 26.4 kg m^{-3} a 150 m. Las isopicnas en la superficie muestran la misma estratificación que la salinidad, con un ligero levantamiento a los 60 m, que también se puede ver en las isolíneas del oxígeno; este tiene valores de 7.5 a 7.2 mg L^{-1} .

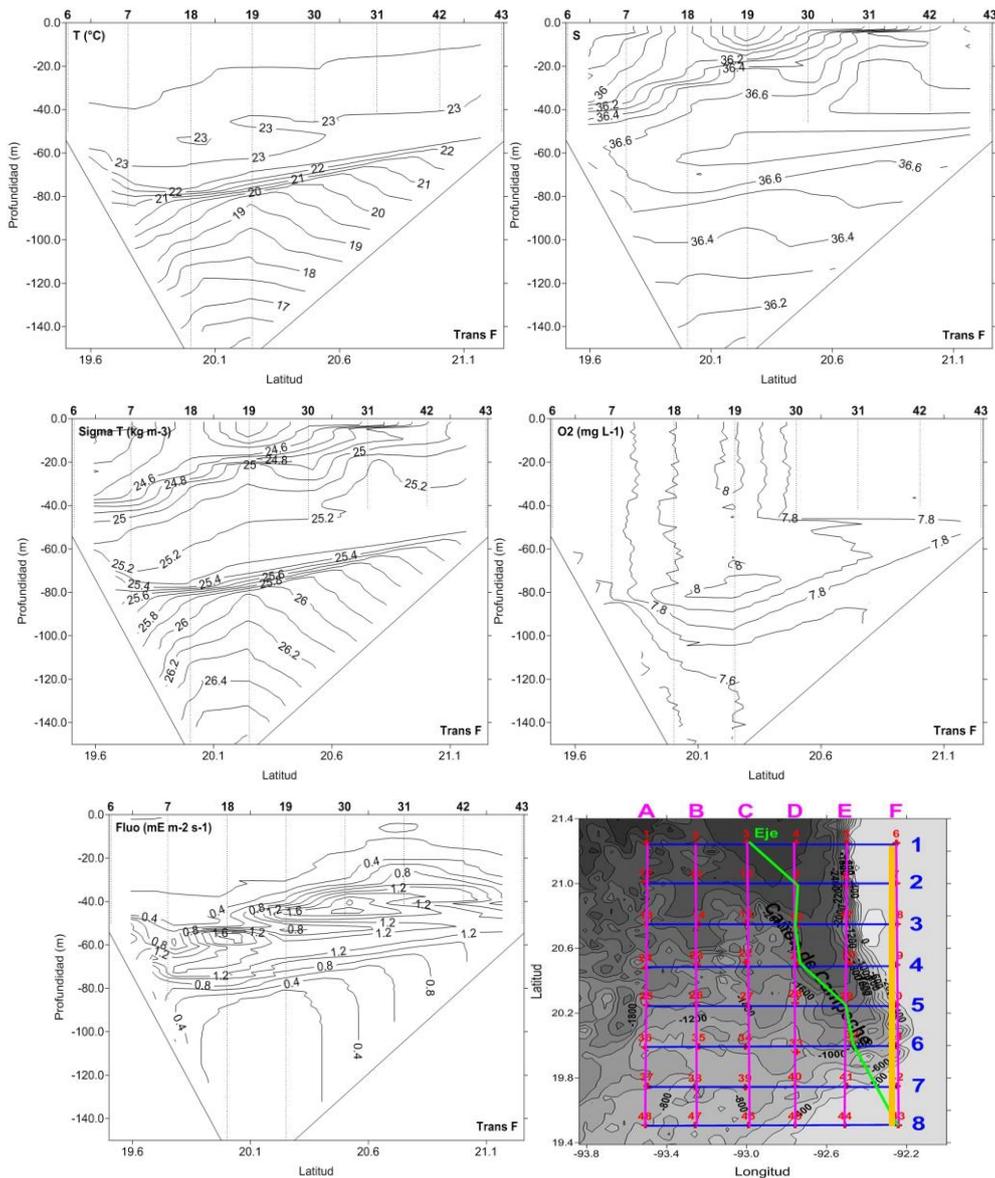


Figura 18. Transecto F (estaciones 6, 7, 18, 19, 30, 31, 42, 43).

La sección del transecto F (Fig. 18) se encuentra orientado en dirección norte-sur y se ubica sobre la plataforma continental a nivel de superficie. En la temperatura se observa un levantamiento de las isotermas desde los 150 m

hasta los 60 m aproximadamente, tiene valores de 17 a 23 °C. En la salinidad se puede ver también, el levantamiento de las isohalinas hasta la profundidad de 70 m. A nivel de los 60 m se encuentra un núcleo con mayor valor de salinidad de 36.6 gr kg^{-1} , a diferencia de los que se encuentran en la superficie y a 150 m que tienen 36.2 gr kg^{-1} . En la estación 19 se nota un pequeño hundimiento de las isohalinas en superficie. En la densidad se observan las isopícnas distribuidas desde la superficie hasta los 60 m y luego desde los 150 m hasta los 60 m un levantamiento muy marcado de éstas. La densidad tiene valores de 24.6 a 26.4 kg m^{-3} . En el oxígeno se ven unas perturbaciones desde la superficie hasta los 80 m y entre los 60 m y los 80 m se observa otro núcleo con valores de 8 mg L^{-1} de oxígeno. En la fluorescencia se pueden ver cambios muy marcados desde la superficie de la estación 31, esta se encuentra en el borde de la plataforma sobre el talud, lo que sugiere que el cambio de profundidad marca este levantamiento en ese punto. Aquí también se tienen valores altos de fluorescencia, que van de $0.4 \text{ } \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en la periferia a $1.2 \text{ } \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en el centro de los núcleos que se forman y se distribuye hasta los 90 m aproximadamente.

El transecto del Eje del Cañón (Fig. 19) se encuentra ubicado de manera diagonal, desde la cabeza del cañón, en la estación 3, hasta la base tocando la plataforma continental en la estación 43. Está orientado en dirección norte-sur y atraviesa todo el eje del cañón. Se observa una estratificación muy marcada en las isotermas desde los 60 m a los 150 m. Los valores van de 23 a 18 °C. En las isotermas se puede ver un levantamiento en las estaciones 3 a 21 que corresponden a la cabeza y parte del eje del cañón ubicada en la zona norte.

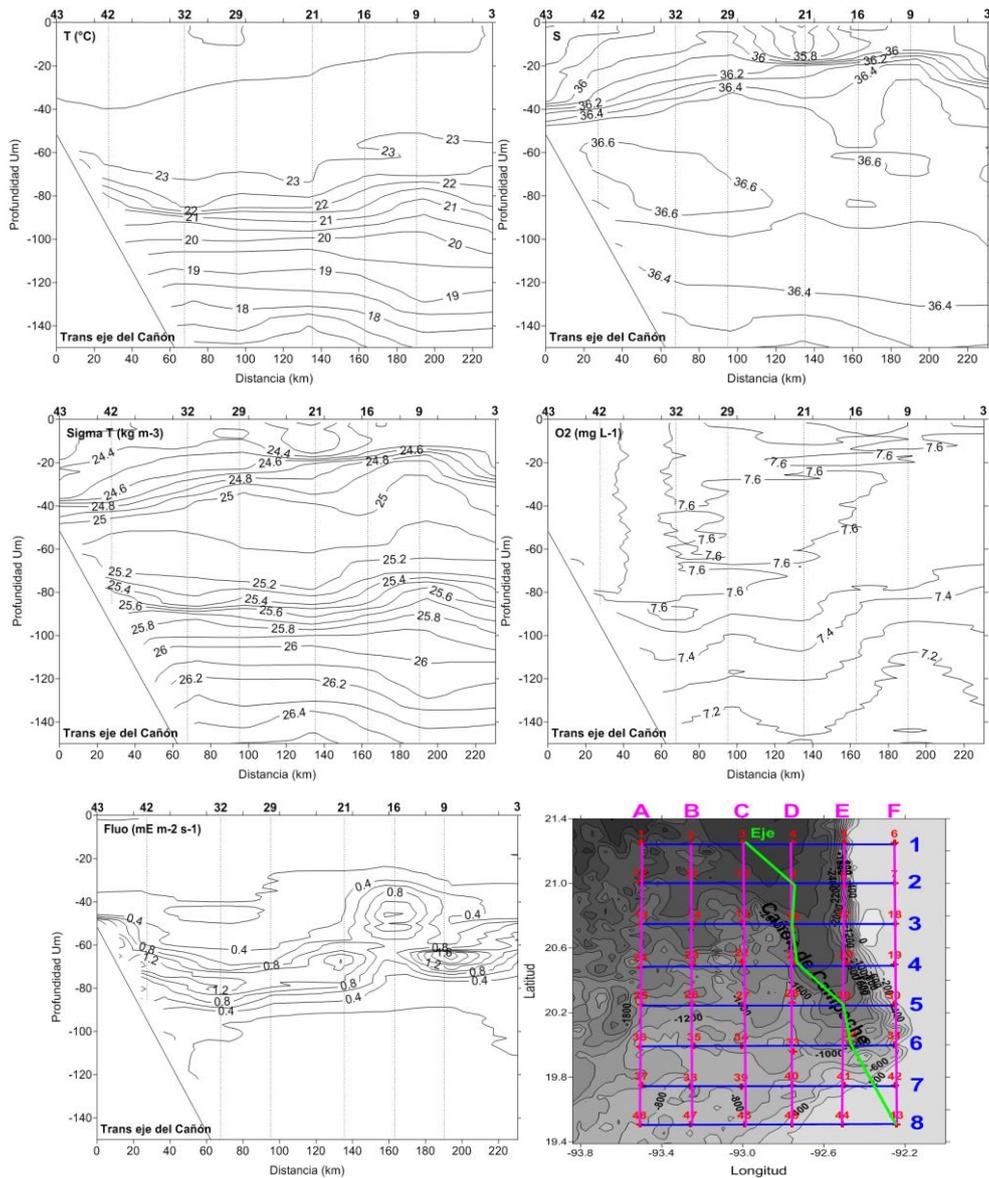


Figura 19. Transecto Eje del Cañón (estaciones 3, 9, 16, 21, 29, 32, 42, 43).

En la salinidad se observan núcleos con valores de 36.6 gr kg⁻¹ entre los 60 y 80 m. En la superficie se tienen valores de 35.8 gr kg⁻¹ y a los 150 m de 36.4 gr kg⁻¹. En las isohalinas se marca un levantamiento desde los 60 m a la superficie y se aprecia principalmente en las estaciones 9 y 29.

En la densidad se puede ver una estratificación de las isopicnas en casi toda la columna de agua, con un levantamiento en la capa de los 100 m a los 20 m, con el mismo patrón que siguen las isohalinas en las estaciones 9 y 29.

Es posible notar que entre estas estaciones se marca un hundimiento de las isolíneas, igualmente para la salinidad.

En el oxígeno se tienen valores de 7.6 a 7.2 mg L⁻¹, desde la superficie hasta los 150 m y en las isolíneas se observa un ligero levantamiento de los 80 hasta los 150 m, más marcado de la estación 21 a la 3.

La fluorescencia en todo lo largo del eje del cañón, desde la estación 3 hasta la 43; presenta valores de 0.4 a 1.2 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en una capa que va desde los 30 m a los 100 m.

Corrientes Geostróficas y Giros

La distribución del fitoplancton obedece a las variaciones que se dan en las condiciones ambientales en el océano, sobre todo en las aguas superficiales; depende en gran medida del viento y de las corrientes para su movimiento de un lugar a otro, así la influencia de la circulación oceánica determina zonas de altas concentraciones de Chla.

Dentro de los aspectos ambientales más importantes que se presentan en el océano y que tienen influencia sobre la distribución, composición y abundancia del fitoplancton se encuentran los procesos advectivos y la mezcla turbulenta, inducidos por las corrientes, las olas y el viento (Currie y Roff, 2006). Estos procesos de transporte y mezcla contribuyen de manera significativa, directa e indirectamente, siendo los principales factores que regulan las interacciones que se dan en el océano (Genin, 2004).

Las corrientes marinas y la turbulencia también modulan la transferencia de energía en la red trófica, por lo que regiones de mayor turbulencia tendrán una distribución y abundancia diferente de aquellas menos turbulentas, ya que la mezcla en el océano cuando es suficientemente intensa, enriquece las aguas superficiales con nutrientes, afectando al fitoplancton, como en las zonas de surgencias y de los giros de mesoescala (Bakun, 1996; Mann y Lazier, 1991). En la zona del Cañón del Campeche se han detectado giros anticiclónicos y ciclónicos asociados a la interacción de las corrientes.

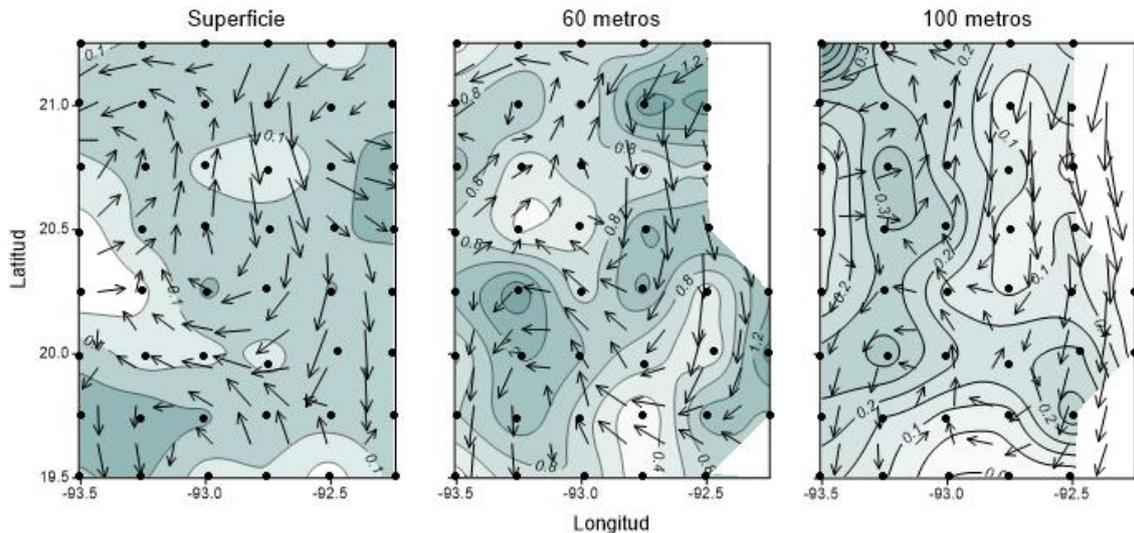


Figura 20. Distribución de fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y velocidades de corrientes geostroficas (modificadas de Rivera Hernández, 2013) en superficie, 60 m y 100 m de profundidad. Referencia del vector \rightarrow (40 cm s^{-1}).

En la zona noreste de la región, en la superficie, se observa la formación de un giro ciclónico ubicado sobre la plataforma continental (Fig. 20), del cual se desprenden corrientes que circulan a través del eje del cañón, teniendo gran influencia hacia la parte sureste y que por la topografía propia del cañón, propician la formación de un giro con circulación anticiclónica, el cual se observa al centro de la región. De este patrón de circulación anticiclónica se puede observar que la distribución de la corriente se deriva de un patrón de circulación ciclónica en la parte suroeste y noroeste, formando giros de gran escala, importantes para el ascenso de aguas ricas en oxígeno y nutrientes de gran influencia en la productividad biológica.

A esta profundidad se alcanza a apreciar el efecto de las corrientes en la distribución de la fluorescencia, con la formación de los giros ciclónicos que se observan en la zona noreste y suroeste con valores de fluorescencia de $0.2 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

A la profundidad de 60 m la distribución de las corrientes siguen el mismo patrón de circulación ciclónica en la parte noreste; de la misma forma esta circulación que corre a través del eje del cañón con un patrón de corrientes de circulación anticiclónica hacia la parte sureste, observado en la zona del talud, sube originando la formación de los giros ciclónicos distribuidos

uno en la parte noroeste y otro en la parte suroeste. Se observa que estos giros, ciclónico y anticiclónico, que se presentan en la parte sureste y suroeste, son los mismos que se presentan en la distribución horizontal de la temperatura y salinidad a esta misma profundidad, ya que los patrones de corrientes también tienen efectos en la distribución de estas variables ambientales (Fig. 10). Así mismo, se puede apreciar que la distribución de la fluorescencia a esta profundidad, sigue el mismo patrón de circulación de las corrientes y de la formación de los giros ciclónicos y anticiclónicos, donde el gran giro anticiclónico observado en el eje del cañón, al colindar con los giros ciclónicos formados en la parte suroeste y noroeste, forman una zona frontal, así pueden influir en la producción biológica, alcanzando valores de $1.2 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de fluorescencia.

A la profundidad de 100 m, la distribución del patrón de corrientes comenzó a variar de acuerdo al que se presentó tanto en superficie como a los 60 m. Se observa que el giro ciclónico que se presentaba en la parte noreste, sobre la plataforma continental, va perdiendo su forma conforme avanza en dirección norte-sur y en la profundidad y, se comporta más como un meandro, lo que sugiere a su vez que la corriente que sigue a través del eje del cañón también pierde fuerza para la formación del giro con circulación anticiclónica que se observa mejor definido en los otros niveles y con influencia hacia el sur del cañón. En la figura 20 se aprecia el patrón de circulación ciclónica bien definida en la zona suroeste y noroeste, a diferencia de cómo se observan en superficie y a 60 m de profundidad. A esta profundidad los valores de la distribución de la fluorescencia fueron muy homogéneos. Se aprecian núcleos con valores de $0.3 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$, coincidiendo con el patrón de circulación ciclónica que se presenta en el noroeste principalmente. Es importante observar que las corrientes circulan a través del eje del cañón en los tres niveles de profundidad.

Análisis de Conglomerados

Para observar las asociaciones que tienen las 48 estaciones de muestreo, se aplicó un análisis de conglomerados (cluster), tomando en cuenta la

temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y salinidad (gr kg^{-1}) con respecto a la fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$), sobre la cual se organizaron los grupos en los distintos niveles de distribución (superficie, 60 y 100 m), asociados a la vez con los patrones de circulación ciclónica y anticiclónica que se presentan en la zona de estudio.

Estas asociaciones están conformadas de acuerdo a la distancia euclidiana que hay entre una y otra asociación y mediante la cual se definen los grupos con base en la similitud entre dichas variables ambientales.

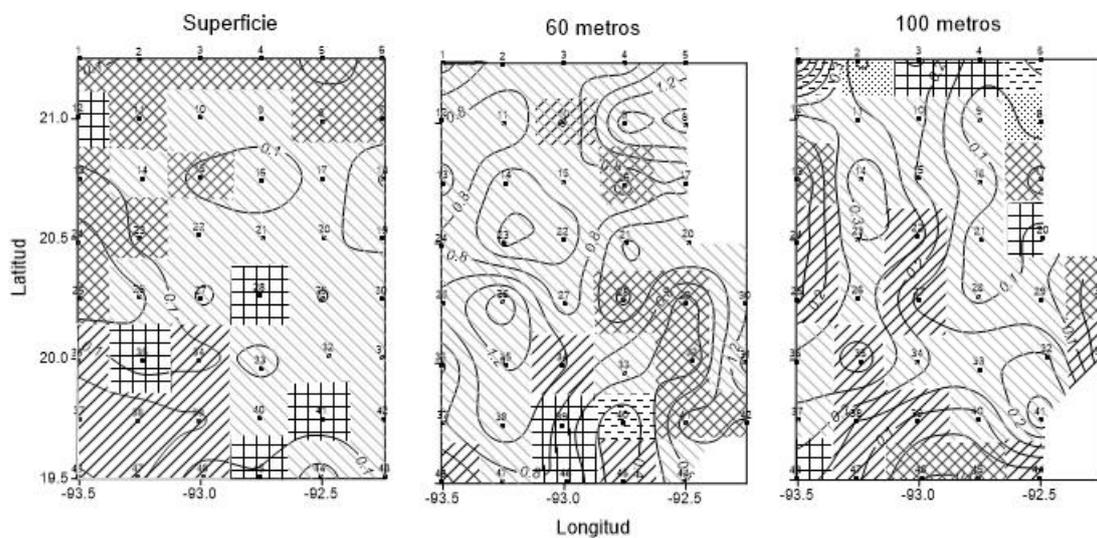


Figura 21. Fluorescencia relacionada con la distribución espacial de los grupos del análisis de conglomerados en superficie, 60 y 100 m.

En la distribución de la fluorescencia en superficie de acuerdo al análisis de conglomerados, se ubicaron cuatro grupos a la distancia de 0.02 (Fig. 21 a 24). El primer grupo está formado por las estaciones 9, 10, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 40, 42 y 43 y se encuentran sobre parte de la plataforma continental, en el eje y en la base del cañón; aquí se presenta un núcleo con las mayores concentraciones de fluorescencia ($0.2 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ubicado hacia la parte noreste, el cual se relaciona con la influencia de un giro ciclónico de menor temperatura (23.8°C) y mayor salinidad (36.4gr kg^{-1}).

El segundo grupo se forma por las estaciones 12, 28, 35 41 y 45, es el más disgregado en la distribución en cuanto a las zonas con similitudes (fig. 21) y al unirse con el primer grupo forman un mayor bloque ubicado de manera

general en toda la zona central y sureste de la zona de estudio, hacia la plataforma, con concentraciones muy homogéneas de fluorescencia ($0.1 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

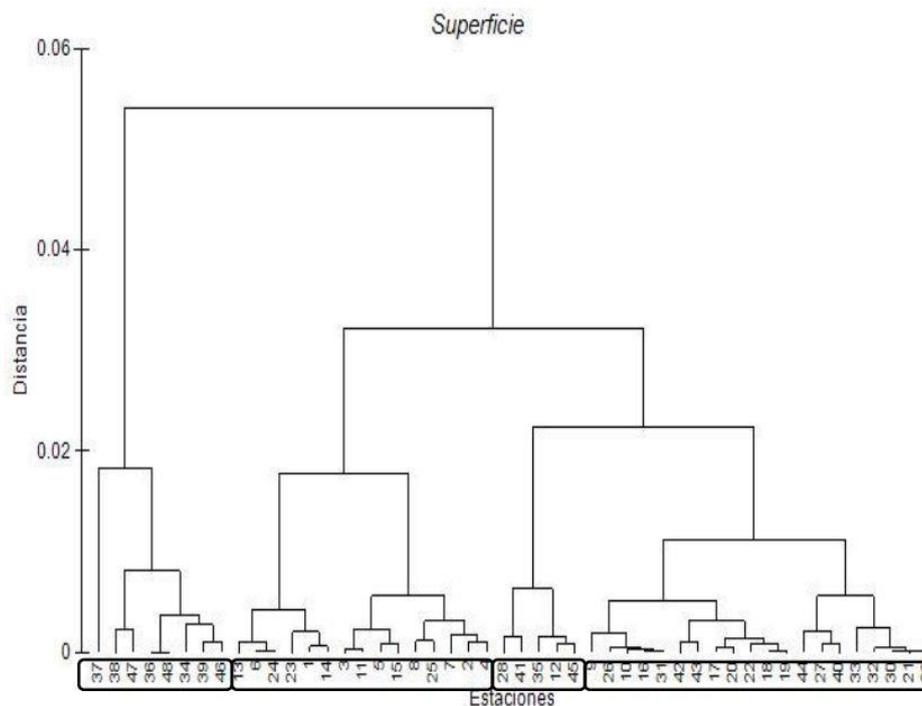


Figura 22. Distribución de fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) relacionada con los grupos del análisis de conglomerados en superficie.

En el tercer grupo se encuentran las estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 23, 24 y 25; éste grupo está ubicado en toda la parte norte y presenta valores homogéneos de fluorescencia ($0.1 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

En el cuarto grupo están las estaciones 34, 36, 37, 38, 39, 46, 47 y 48 y se encuentra ubicado en la parte suroeste de la región. Es un grupo muy representativo ya que tiene influencia directa de un giro ciclónico formado en esa zona, presenta valores de temperatura de $24.8 \text{ }^\circ\text{C}$ y 36.2 gr kg^{-1} de salinidad y un núcleo con concentraciones de fluorescencia de 0.2 a $0.1 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

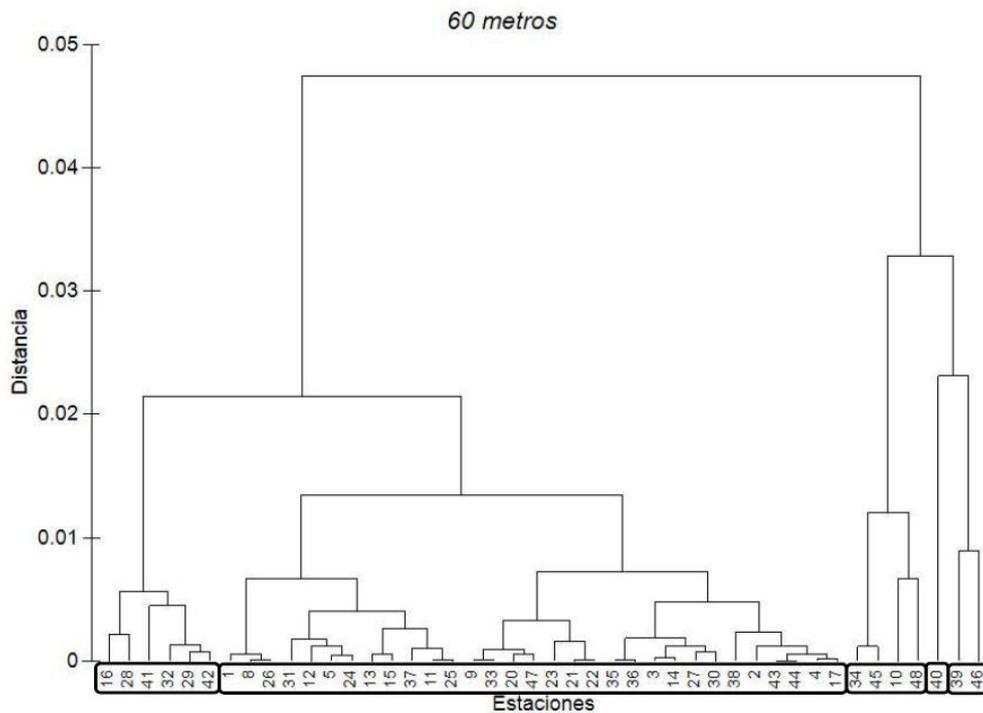


Figura 23. Distribución de fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) relacionada con los grupos del análisis de conglomerados a 60 m de profundidad.

En el análisis de conglomerados a los 60 m de profundidad se forman cinco grupos. También se ubican a la distancia de 0.02. En el primero se encuentran las estaciones 39 y 46, ubicadas al sur de la región. La estación 40 conforma el segundo grupo, se encuentra aislado en la base del cañón y alcanza un valor de fluorescencia de $1.0 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Las estaciones 10, 34, 45 y 48 se encuentran en el tercer grupo ubicadas en forma de parches; únicamente la estación 34 tiene influencia directa de un giro ciclónico y muestra valores de fluorescencia que van de 0.8 a $1.2 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con baja temperatura y alta salinidad. Este intervalo de valores se debe a la ubicación de un frente en esa zona; este grupo se une con el primero y el segundo y forman un bloque pequeño de parches distribuidos en su mayoría en la parte sur. En el cuarto grupo se encuentran la mayoría de las estaciones, abarcan casi toda la zona de estudio de norte a sur y de este a oeste. En él se encuentran las estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 33, 35, 36, 37, 38, 43, 44 y 47 donde se encuentran una serie de núcleos con altas concentraciones de fluorescencia de $1.2 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y con relación a un

núcleo frío con alta salinidad, siendo el grupo más representativo por el aporte en la productividad biológica que se da en esa zona. El quinto grupo lo forman las estaciones 16, 28, 29, 32, 41 y 42. Estas estaciones se ubican también dispersas en forma de parches al borde de la plataforma y representan zonas con poca concentración de fluorescencia. Se encuentran principalmente en el borde de los giros ciclónicos.

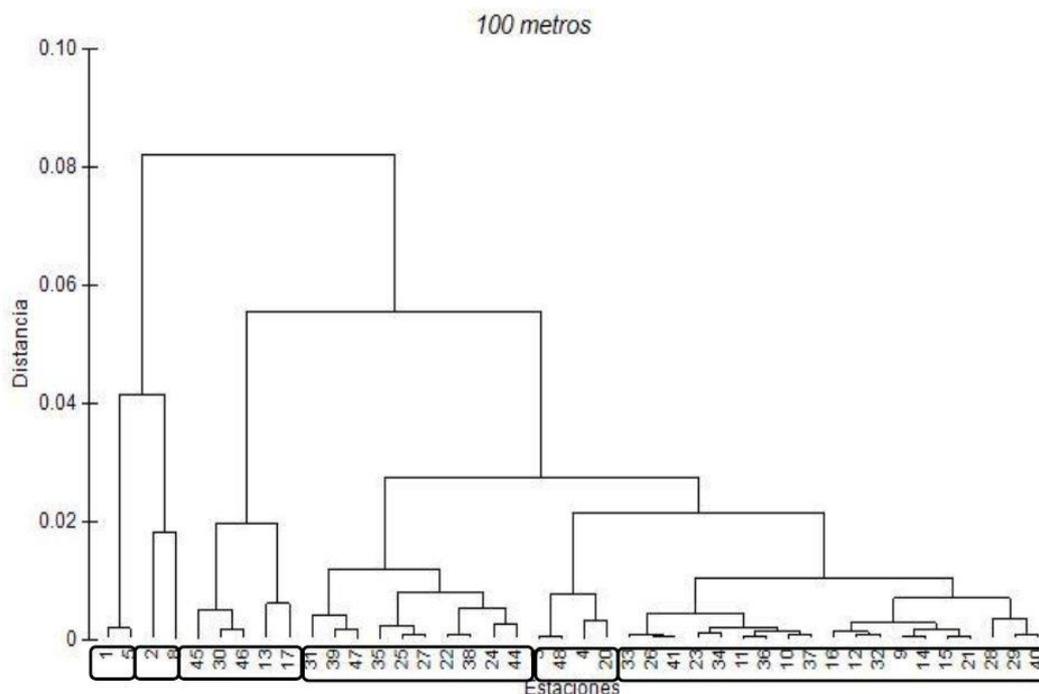


Figura 24. Distribución de fluorescencia ($\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) relacionada con los grupos del análisis de conglomerados a 100 m.

A la profundidad de 100 m en el análisis de conglomerados, se formaron seis grupos ubicados a la misma distancia de 0.02. En el primer grupo se encuentran las estaciones 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 21, 23, 26, 28, 29, 32, 33, 34, 36, 37, 40 y 41. Se encuentran ubicadas sobre un par de pequeños núcleos con concentraciones de fluorescencia de 0.2 y 0.3 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$, principalmente distribuidos en el centro de la malla, es el grupo más representativo. El segundo grupo lo forman la estaciones 3, 4, 20 y 48 las cuales se encuentran al borde del eje del cañón en la parte norte, excepto la estación 48 y presentan valores muy homogéneos de fluorescencia (0.1 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$). En el tercer grupo

se encuentran ubicadas las estaciones 22, 24, 25, 27, 31, 35, 38, 39, 44 y 47. El cuarto grupo lo forman las estaciones 13, 17, 30, 45 y 46. El quinto grupo lo forman las estaciones 2 y 8 y, en el sexto grupo las estaciones 1 y 5. Estos cuatro grupos restantes se encuentran distribuidos en forma de parches y todos presentan valores muy homogéneos de fluorescencia (0.1 a $0.2 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$, fig. 21).

De acuerdo al análisis de los resultados se puede señalar que las similitudes encontradas en la distribución de los patrones de fluorescencia con respecto a la temperatura y la salinidad fueron menores en superficie. Se observa que la distribución de los grupos de los análisis de conglomerados aumenta conforme avanza en la profundidad, lo que indica que hay mayor relación entre las variables cuando se encuentran patrones bien definidos en las distribuciones, como a los 60 m de profundidad, donde se encuentran los picos máximos de fluorescencia, que las distribuciones que se presentan en forma de parches.

DISCUSIÓN

El fitoplancton está inmerso en un medio físico cambiante que puede afectar sus procesos biológicos y cambiar su productividad. Las corrientes oceánicas y los giros constituyen procesos físicos en la vida de los organismos fitoplanctónicos en el océano. El estudio de estos procesos hidrodinámicos es de gran importancia en los fenómenos biológicos, pues éstos modifican de manera significativa la distribución y abundancia del fitoplancton; los giros inducen el transporte vertical en la columna de agua y proveen de nutrientes a la capa eufótica; las corrientes producen a su vez remolinos que conducen a un intercambio vertical o mezcla; por lo tanto, son de fundamental importancia en los estudios de productividad primaria en el océano.

Estructuras hidrográficas como las isolíneas de temperatura, salinidad y densidad; así como, las velocidades de corrientes geostroficas, indican que en el Cañón de Campeche se presenta una circulación anticiclónica y que la corriente fluye en dirección norte-sur a través del eje del cañón, lo que coincide con lo que reporta Rosales Navarro (2007), quien menciona que al llegar una gran cantidad de agua al cañón se comporta hidráulicamente como un canal por lo que el fluido se ve forzado a aumentar su velocidad, dando como resultado que las corrientes a lo largo de las isobatas tiendan a curvarse y a formar un giro anticiclónico.

La estructura de circulación anticiclónica presenta temperatura y salinidad alta y valores bajos de densidad, se encuentra ubicado en la parte central en el eje del cañón con distribución hacia el sur, dominando en la parte del talud y, del cual se desprenden dos giros ciclónicos muy marcados en la parte suroeste y noroeste de la zona de estudio. El giro anticiclónico que se observa desde los 40 m hasta los 200 m de profundidad, fue reportado por Rivera Hernández (2013), durante la misma campaña oceanográfica. El par de giros ciclónicos se encuentran marcados aproximadamente desde los 30 m, con los contornos mejor definidos a los 100 y 200 m de profundidad. En las fronteras del gran giro anticiclónico que se encuentra en el eje del cañón, al aproximarse a los dos giros ciclónicos que se forman en la parte suroeste y noroeste del cañón, se ocasiona una zona de afloramiento la cual puede influir

en la producción biológica. Salas de León *et al.* (2004) mencionan que en las estaciones que se localizan en la periferia de los giros anticiclónico-ciclónicos presentan una nutriclina menos profunda que las estaciones que se localizan en el centro del giro, esto se debe a que en el anticiclónico existe una convergencia y en el ciclónico se da una divergencia y ahí se forma un frente en donde existen plumas ricas en nutrientes, Chla y materia particulada; también mencionan que dentro del Cañón de Campeche, los giros ciclónicos y anticiclónicos generan un gradiente horizontal de diferentes propiedades hidrográficas y distintas concentraciones de clorofila, ya que diferentes áreas en una misma región pueden tener diferentes condiciones ambientales.

En cuanto a los patrones de distribución de la fluorescencia, asociados a la circulación que se presenta en el cañón, se observa que las máximas concentraciones se encuentran distribuidas principalmente en los giros ciclónicos y sus zonas frontales que se forman con el gran giro anticiclónico. Los grupos que se forman al hacer el análisis de conglomerados, de acuerdo a la relación de las concentraciones de fluorescencia con la temperatura y la salinidad, en los tres niveles de profundidad, son representativos de las estaciones que se encuentran en tres zonas; una es la zona que se encuentra sobre la plataforma, el talud continental y la parte norte con valores de fluorescencia de 0.1 a 0.3 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$, la segunda es la zona del Cañón de Campeche que corresponde al giro anticiclónico ubicado desde la parte central hacia el sur con valores de fluorescencia de 0.8 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y la tercera es la zona de los giros ciclónicos ubicados al suroeste y noroeste del área de estudio con valores de fluorescencia de 0.8 a 1.2 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (fig. 21).

Acerca de los patrones de distribución vertical se encontró que los valores de fluorescencia presentaron variaciones; los resultados muestran cuatro patrones: 1) pico máximo de fluorescencia asociado a la termoclina, 2) por arriba de la termoclina, 3) por abajo de la termoclina y 4) con presencia de dobles picos de fluorescencia. Estas distribuciones pueden explicarse debido a que cerca de la superficie, donde la irradianza es alta y la concentración de nutrientes en baja, el contenido de clorofila es mínimo, mientras que en la zona más profunda (cerca de la nutriclina), la irradianza disminuye, los nutrientes son más abundantes y se estimula una mayor producción primaria relacionada a la

clorofila; así mismo la termoclina forma una barrera física la cual hace que en esa región de la columna de agua se concentre una mayor cantidad de organismos (Cullen, 1982). Generalmente se encuentran máximos de Chla en la parte superior de la zona eufótica asociados a la nutriclina y a la termoclina (Signoret *et al.* 1998). Duran Campos (2010) menciona que los máximos de Chla están asociados a la zona donde se presenta la nitratoclina en el Cañón de Campeche.

Para la existencia de los dobles picos de fluorescencia, una primera explicación es que se deban a la presencia de nutrientes, ya que los picos de las poblaciones fitoplanctónicas están principalmente controlados por la luz solar, generalmente acompañado por un incremento de la temperatura en las aguas superficiales y por la accesibilidad de los nutrientes; también se ha observado que la presencia de los nutrientes a profundidades que van de 100 a 300 m se debe principalmente a la dinámica de la circulación general que presentan los cañones y a sus flujos de corrientes que forma una pequeña surgencia en las zonas profundas, generando flujos de nutrientes hacia profundidades menores. También, por la influencia de bombeo generada por los giros ciclónicos, como los que se generan en el Cañón de Campeche, los nutrientes suben a profundidades alrededor de 100 m; por arriba de estas profundidades son incorporados rápidamente por los organismos fotótrofos que se encuentran en la capa eufótica (Rennie *et al.*, 2008).

Otra característica del fitoplancton asociada a los dobles picos en la columna de agua es su desigualdad en la distribución, ya que existen picos localizados en áreas que difieren tanto en cantidad como en composición. Los distintos comportamientos de las especies deben influir para que organismos de diferentes especies se concentren a diversos niveles en distintos momentos. Los efectos de que una especie prefiera ciertas condiciones ambientales, como un tipo distinto de luz, temperatura y salinidad, pueden ser causa de la aparición de ciertas especies en lugares determinados, formando así grupos localizados o picos (Tait, 1987); como en un estudio realizado en el Pacífico tropical mexicano donde se observaron dos picos de Chla considerables a diferentes profundidades, uno subsuperficial entre 12 y 20 m y otro submáximo más profundo de 75 a 100 m (Santana Vega, 2013). Cepeda *et al.* (2009) encontraron en el Pacífico oriental tropical mexicano un primer pico de Chla

subsuperficial compuesto primordialmente de microfitoplancton, grupo considerado con mayor contribución a la biomasa fitoplanctónica y un segundo pico de Chla profundo (80-120 m) atribuido a altas abundancias de *Prochlorococcus* (picofitoplancton); estos autores también señalan que en algunos artículos de regiones templadas atribuyen las concentraciones altas de Chla más profundas a picofitoplancton.

Se ha estudiado que la formación de los picos máximos de Chla en la superficie están dados por organismos del microfitoplancton, generalmente resistentes a altas irradianzas y adaptados a bajas concentraciones de nutrientes tales como algunas especies de dinoflagelados y diatomeas; mientras que, los máximos profundos están relacionados con especies del nanofitoplancton, generalmente adaptado a bajas irradianzas y altas concentraciones de nutrientes como son los cocolitofóridos (Margalef, 1978; Cullen, 1982). Por otra parte, Rennie *et al.* (2008) encontraron que la mayoría de los organismos que se localizaron en los máximos profundos de Chla son organismos migratorios como es el caso de los dinoflagelados. Signoret *et al.* (2006), reportaron la presencia de dos o más crestas asociadas, unas con la termoclina y otras con bajas irradianzas para el Golfo de México.

Para explicar la formación de los máximos de Chla se han propuesto varias posibilidades entre las que resaltan: a) una mayor densidad de células fitoplanctónicas derivada de patrones de comportamiento y adaptación a profundidades vinculadas con la termoclina y nutriclina; b) elevadas tasas de crecimiento ante condiciones favorables a la división celular; c) una mayor cantidad de biomasa por hundimiento de los organismos o por procesos físicos de acumulación; d) mayor proporción de Chla en relación a la biomasa, derivada de una mayor eficiencia enzimática a determinadas irradianzas, en general bajas (Steele, 1964; Cullen y Eppley, 1981; Cullen, 1982). De tal modo, que estas propuestas nos ayudan a explicar el por qué se presentan variaciones en la concentración de Chla y su distribución vertical asociada a condiciones ambientales y la respuesta de los organismos ante estos; así, podemos asociar los máximos de Chla con la distribución de la fluorescencia.

También es importante mencionar que en los registros de fluorescencia de la Chla en el Golfo de México, es usual observar a la zona costera como la de mayor riqueza, debido a la dinámica costera a escala local, incluyendo los

aportes de aguas epicontinentales, el oleaje y corrientes costeras generadas por el viento, que sin lugar a duda remueven e incorporan los nutrientes de la interfase agua-sedimento (Signoret *et al.*, 1998); esto ayuda a explicar la alta concentración de fluorescencia que presenta la estación 40 con un valor de $2.4 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Fig. 9h), en contraste con la estación 1 que muestra el valor de fluorescencia más bajo ($0.6 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Fig. 9a); ubicadas cerca de la plataforma en la parte sur y en la zona oceánica más profunda del lado noroeste del área de estudio, respectivamente.

CONCLUSIONES

De este estudio se desprenden las siguientes conclusiones:

- Se observaron tres masas de agua hasta la profundidad de 200 m: Agua Subtropical Subsuperficial del Caribe (AStSsC), Agua Subtropical Subsuperficial del Golfo de México (AStSsGM) y Agua Común del Golfo de México (ACGM).
- El pico máximo de fluorescencia en promedio se encontró a 60 m de profundidad y la termoclina a 78 m, a partir de aquí se observó que los valores de fluorescencia presentaron variaciones; los resultados muestran cuatro patrones de distribución vertical: 1) pico máximo de fluorescencia asociado a la termoclina, 2) por arriba de la termoclina, 3) por abajo de la termoclina y 4) con presencia de dobles picos de fluorescencia.
- Se encontró un patrón de circulación anticiclónica en el Cañón de Campeche, ubicado a 21° N y 92.8° W desde la parte central hacia el sur y del cual se desprenden dos giros ciclónicos distribuidos hacia el suroeste y noroeste.
- De acuerdo al análisis de conglomerados (cluster), se encontraron tres zonas que representan las asociaciones entre las concentraciones de fluorescencia con la temperatura y salinidad. Se observa que las máximas concentraciones (0.8 a 1.2 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$) se encuentran distribuidas principalmente en los giros ciclónicos y en las zonas frontales que se forman con el gran giro anticiclónico.

REFERENCIAS

- Aguirre Gómez, R. (2002). Producción primaria en el sur del Golfo de México estimada a partir de fluorescencia natural. *Hidrobiológica*, 12(1), 21-28.
- Aldeco, J., Monreal Gómez, M.A., Signoret, M., Salas de León, D.A. y Hernández Becerril, D.U. (2009). Subsurface anticyclonic eddy, fronts and *Trichodesmium* spp. Occurrence eddies over the Campeche Canyon region, Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 35 (4).
- Allen, S.E., Vindeirinho, C., Thomson, R.E., Foreman, M.G.G. y Mackas, D.L. (2001). Physical and biological processes over a submarine canyon during and upwelling event. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(4), 671-684.
- 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 Geophysical Research*, 104(C5),115-135.
- Bakun, A. (1996). Patterns in the ocean. Ocean processes and marine population dynamics. *Scientia Marina*, 61(4),527-527.
- Bejarano, L.F. (1997). *Characterization of the internal tide north of Mona Passage*. M.S. Thesis University of Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico, unpublished.
- Bornn, B. y Denise L. (1982). *Análisis cuantitativo del fósforo en la laguna de Mandinga estado de Veracruz, México*. Informe final de Servicio Social. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México.
- Canals, M., Company, J.B., Martín, D., Sánchez Vidal, A. y Ramírez Llodra, E. (2013). Integrated study of a deep submarine canyon and adjacent open slopes in the Western Mediterranean Sea: an essential habitat. *Progress in Oceanography*, 118,1-288.
- Cepeda, M. J., E. Beier, G. C. Gaxiola, M. F. Lavín, V. M. Godínez. (2009). Efecto de la zona del mínimo de oxígeno en el segundo máximo de

clorofila *a* en el Pacífico Oriental Tropical Mexicano. *Ciencias Marinas* 35: 389-403.

- Cervantes, R., Verdugo, J., Valdéz, E. (2005). Modelo estacional de producción primaria estimada mediante fluorescencia natural en una región costera del Golfo de California, México. *Hidrobiológica*, 15 (1), 79-87.
- Cowles, T., Desiderio, R.A. y Never, S. (1993). In situ characterization of phytoplankton from vertical profiles of fluorescence emission spectra. *Marine Biology*, 115, 217-222
- Cullen, J. y Eppley, W. (1981). Chlorophyll maximum layers of the Southern California bight and possible mechanisms of their formation and maintenance. *Oceanológica Acta*, 4, 23-32.
- Cullen, J.J. (1982). The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll *a*. *Canadian Journal of Aquatic Science* 39,791-803.
- Cushman Roisin, B. (1994). *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. New Jersey: Prentice Hall.
- Currie, W. y Roff, J.C. (2006). Plankton are not passive tracers: Plankton in a turbulent environment. *Journal of Geophysical Research*, 111,C05S07, doi:10.1029/2005JC002967.
- Cherubin, L., Carton, X., Paillet, J., Morel, Y. y Serpette. A (2000). Instability of the Mediterranean water undercurrents southwest of Portugal: Effects of baroclinicity and of topography. *Oceanológica Acta*, 23(5),551-573.
- Chamberlin, W.S., Booth, C.R., Kiefer, D.A., Morrow, J.H., Murphy, R.C. (1990). Evidence for a simple relationship between natural fluorescence, photosynthesis, and chlorophyll in the sea. *Deep Sea Research*, 37(6), 951-973.
- Davies, J.S., Howell, K., Stewart, H.A. y Golding, J.G.N. (2014). Defining biological assemblages (biotopes) of conservation interest in the submarine canyons of the South West Approaches (offshore United Kingdom) for use in marine habitat mapping. *Deep Sea Research. II* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.02.00>.

- De Madron, X.D., Castaing, P., Nyffeler, F. y Courp, T. (1999). Slope transport of suspended particulate matter on the Aquitanian margin of the Bay of Biscay. *Deep Sea Research, Part II*, 46, 2003-2027.
- Denman, K.L., y Powell, T.M. (1984). Effects of physical processes on planktonic ecosystems in the coastal ocean. *Oceanography and Marine Biology. Annual Review*, 22, 125-168.
- DiMego, G.J., Lance, B.F. y William, E.G. (1976). An examination of the frequency and mean conditions surrounding frontal incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Monthly Weather Review*, 104, 709-718.
- Dower, J., Leggett, W., y Frank, K. (2000). Improving fisheries oceanography in the future. Fisheries Oceanography: an Integrative Approach to Fisheries Ecology and Management. *Fish and Aquatic Resources Series*, 4, 263-281.
- Durán Campos, E. (2010). *Patrones de distribución de la Clorofila a partir de la fluorescencia natural y su relación con la hidrografía en el Cañón de Campeche y Banco de Campeche, México (junio, 2002)*. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, México.
- Elliott, B.A. (1982). Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 12, 1292-1309.
- Falkowski, P. (1988). Ocean productivity from space. *Nature* 335, 205.
- Furnas, M.J., Smayda, T.J. (1986). Inputs subthermocline waters and nitrate onto the Campeche Bank. *Continental Shelf Research*, 7(2), 161-175.
- García Cuellar, A., Arreguín Sánchez F., Hernández Vázquez S. y Lluch Cota D.B. (2004). Impacto ecológico de la industria petrolera en la Sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: Una revisión. *Interciencia*. 29, 311-319.
- Genin, A. (2004). Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies. *Journal of Marine Systems*, 50, 3-20.

- Govindjee, R. (2004). Chlorophyll a fluorescence: A bit of Basics and History. En Papageorgiou G.C. y Govindjee, *Chlorophyll a fluorescence: A signature of Photosynthesis. Advances in Photosynthesis and Respiration*. 19. Alemania: Springer.
- Hernández Becerril, D.U., García Reséndiz, J.A., Salas de León, D.A., Monreal Gómez, M.A., Signoret Poillon, M. y Aldeco Ramírez, J. (2008). Fracción de nanoplancton en la estructura del fitoplancton en el sur del Golfo de México. *Ciencias Marinas*, 34 (1),77-90.
- Klinck, J.M. (1996). Circulation near submarine canyons: A modeling study. *Journal of Geophysical Research*, 101,1211-1223.
- Kiefer, D., Chamberlin, W.S. y Booth, C. (1989). Natural fluorescence of chlorophyll a: relationship to photosynthesis and chlorophyll concentrations in the western South Pacific gyre. *Limnology and Oceanography*, 34,868-881.
- Knauss, J.A. (1996). *Introduction to physical oceanography*. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- Lakowicz, J.R. (2006). *Principles of Fluorescence Spectroscopy*. EUA: Plenum Press.
- Licea, S. y Luna, R. (1999). Spatio-temporal variation of phytoplankton on the continental margin in the SW Gulf of Mexico. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 49,83-99.
- Lorenzen, C.J. (1966). A method for continuous measurement of *in vivo* chlorophyll concentration. *Deep Sea Research*, 13, 223-227.
- Lluch Cota, D. (2002). Satellite measured interannual variability of coastal phytoplankton pigment in the tropical and subtropical Eastern Pacific. *Continental Shelf Research*, 22,803-820.
- McLellan, H.J. (1975) *Elements of Physical Oceanography*. Pergamon Press, Oxford, 151 p.
- Mann, K.H, y Lazier, J.R.N. (1991). *Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the ocean*. Boston: Blackwell Scientific Publications.

- Manzano Sarabia, M.M. y Salinas Zavala, C.A. (2008). Variabilidad estacional e interanual de la concentración de la clorofila a y temperatura superficial del mar en la región occidental del Golfo de México: 1996-2007. *Interciencia*, 33(9),628-634.
- Margalef, R. (1978). Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica Acta* 1, 493-509.
- Mendoza, M., Ortiz Pérez M.A. (2000). Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales de Campeche-Yucatán, México. Investigaciones Geográficas. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 43,7-31.
- Merino, M. (1997). Upwelling on the Yucatan Shelf: Hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems*, 13(1-4),101-121.
- Monreal Gómez, M.A. y Salas de León, D.A. (1990). Simulación de la circulación en la Bahía de Campeche. *Geofísica Internacional*, 29(2),101-111.
- Monreal Gómez, M.A. y Salas de León, D.A. (1997). Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. En: M, F. Lavín (ed.), Contribuciones a la oceanografía de México. *Unión Geofísica Mexicana*, (3),183-199.
- Monreal Gómez, M.A., Salas de León, D.A. y Velasco Mendoza, H. (2004). La hidrodinámica del Golfo de México. En Caso M., Pisanty I., Ezcurra E, *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. Vol. I. México: Instituto Nacional de Ecología.
- Monreal Gómez, M.A., Salas de León, D.A. y Gracia Gasca, A. (2004). Golfo de México, circulación y productividad. *Ciencias*, 76, 25-33.
- Morell, J.M., Corredor, J.E., Capella, J.E. y López, J. (1995). Density structure oscillations at "El Pichincho": Possible implications on pelagic fisheries. En *Chapman conference on the circulation of the Intra-Americas Sea*. January 22-26, 1995, La Parguera, Puerto Rico.
- Müller Karger, F.E, Walsh, J.J., Evans, R.H. y Meyers, M.B. (1991). On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature

- cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *Journal Geophysical Research*, 96(C7),12645-12665.
- Neale, D.B. (1995). Observations of solitary internal waves in the Boca de Monos, Dragon's Mouth, Trinidad (the remous phenomenon). *Caribbean Marine Studies*, 4,11-19.
- Nowlin, W.D., Jr., Jochens, A.E., Howard, M.K., DiMarco, S.F. y Schroeder, W.W. (2000). Hydrographic properties and inferred circulation over the northeastern shelves of the Gulf of Mexico during spring to midsummer of 1998. *Gulf of Mexico Science*, 18(1),40-54.
- Panoffsky, H. (1956). *Climatología Física*. México: Centro Interamericano de Adiestramiento de Aviación Civil.
- Perénne, N., Verron, J., Renouard, D., Boyer, D.L. y Zhang, X. (1997). Rectified barotropic flow over a submarine canyon. *Journal of Physical Oceanography*, 27(9),1868-1893.
- Ramírez Cruz, V. (2005). *Distribución y abundancia de la biomasa zooplanctónica en la región del Cañón de Campeche a fin de temporadas de nortes*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Rennie, S., Hanson, C.E., McCauley, R.D., Pattiaratchi, C., Burton, C., Bannister, J., Jenner, C. y Jenner, M.N. (2008). Physical properties and processes in the Perth Canyon, Western Australia: Links to water column production and seasonal pygmy blue whale abundance. *Journal of Marine Systems*, 77, 21–44.
- Rivera Hernández, F. (2013). *Efecto de la vorticidad en la distribución de la biomasa de zooplancton en el Cañón de Campeche*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, México.
- Rodríguez, R.M.C., González, Q. y Valdes, Q.R. (1973). Cronología de los frentes fríos que han entrado a Cuba 1916-1970. Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba.

- Rosales Navarro, I.S. (2007). *Hidrografía y corrientes geostróficas en la región del Cañón del Campeche*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, México.
- Salas de León, D.A., Monreal Gómez, M.A., Sanvicente Añorve, L. y Flores Coto, C. (1998). Influence de la circulation à long terme sur la répartition des organismes zooplanctoniques Dans la Baie de Campeche, Mexique. *Oceanológica Acta*, 21,87-93.
- Salas de León, D.A., Monreal Gómez, M.A., Signoret, M. y Aldeco, J. (2004). Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the Campeche Canyon, Gulf of México. *Journal of Geophysical Research*, 109,1-10.
- Salas Monreal, D., Salas de León, D.A., Monreal Gómez, M.A., Riverón Enzástiga, M.L. y Mojica Ramírez, E. (2012). Hydraulic Jump in the Gulf of California. *Open Journal of Marine Science*, 141-149, doi:10.4236/ojms.2012.24017
- Sánchez Gil, P., Yañez Arancibia, A., Ramírez Gordillo, J., Dayd, J.W. y Templet, P.H. (2004). Some socio-economic indicators in the Mexican states of the Gulf of Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 47,581-596.
- Sánchez Iturbe, A., Flores Coto, C. y Zavala García, F. (2006) Seasonal variation in growth and mortality of larval *Syacium gunteri* (Piscis: Paralichthyidae) in the southern Gulf of Mexico (1992 and 1993). *Ciencias Marinas*, 32,83-95.
- Santana Vega, Z. (2013). *Picofitoplancton del Pacífico Tropical Mexicano, crucero (Marear III): Cuantificación y distribución*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias del Masr y Limnología, México.
- Santiago Arce, T. (2010). *Análisis de la vorticidad en el Cañón de Campeche, Golfo de México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, México.

- Santiago Arce, T. y Salas de León, D.A. (2012). Vorticity and internal waves in the Campeche Canyon, Gulf of Mexico. En J. Klapp et al. *Experimental and theoretical Science and Engineering*, 163-169. doi: 10.1007/978-3-642-17958-7_11.
- Schott, F. (1971). On horizontal coherence and internal wave propagation in the North Sea. *Deep Sea Research*, 18,291-303.
- Secretaría de Marina (1972). Informe de datos oceanográficos IV crucero VU/71-20. Instituto Nacional de Pesca y Secretaría de Marina.
- Signoret, M., Bulit, C. y Pérez, R. (1998). Patrones de distribución de clorofila *a* y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiológica*, 8 (2),81-88.
- Signoret, M., Aldeco J. y Barreiro, M.T. (2006). Variabilidad de perfiles de clorofila *a* obtenidos por fluorescencia natural en el oeste y centro del Golfo de México en junio de 1999. *Hidrobiológica*, 16 (3),221-232.
- Signoret Poillon, M., Monreal Gómez, M.A., Aldeco, J. y Salas de León, D.A. (2006). Hydrography, oxygen saturation, suspended particulate matter, and chlorophyll-*a* fluorescence in an oceanic region under freshwater influence. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 69 (1-2),153-164.
- Steele, J.H. 1964. A study of production in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Research* 22 (3), 211-222.
- Stewart, R.H. (2005). *Introduction to physical oceanography*. Texas A & M University.
- Tait, R. V. (1987) *Elementos de ecología marina*. España. Editorial Acribia, S.A.
- Tomczak, M. (2002). An introduction to physical oceanography. Revisado el 28 de abril de 2014, de <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/>
- Valeur, B. (2002). *Molecular fluorescence: Principles and applications*. Alemania: Wiley-VCH
- Vidal, V.M.V., Vidal, F.V. y Hernández, O.A.F. (1990). *Atlas oceanográfico del Golfo de México*. Volumen III. Cuernavaca, Morelos: Instituto de Investigaciones Eléctricas, grupo de Estudios Oceanográficos.

- Vidal, V.M.V., Vidal, F.V. y Pérez Molero, J.M. (1992). Collision of a loop current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 97, 2155-2172.
- 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, 559-58.
- Weaver, P. (1950). Variation in history of continental shelves. *Bulletin of the American Association of Petrology and Geology*, 34,351-360.
- Weihaupt, J.G. (1984). *Exploración de los océanos*. México: Compañía editorial continental.