



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



**INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES GEOSTRÓFICAS SOBRE
LA DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DEL ZOOPLANCTON E
ICTIOPLANCTON EN LA REGION DE LA PLUMA DEL
GRIJALVA-USUMACINTA
(VERANO, 1999)**

T E S I S

que para obtener el grado académico de

Maestría en Ciencias del Mar y Limnología

Oceanografía Física

p r e s e n t a

CARLOS MELECIO CARMONA CEDILLO

Director de Tesis:

DR. DAVID ALBERTO SALAS DE LEÓN

Comité Tutorial:

DR. CÉSAR FLORES COTO

DR. FRANCISCO XAVIER CHIAPPA CARRARA

DR. CARLOS ROBINSON MENDOZA

DR. JAVIER ALDECO RAMÍREZ

Cd. Universitaria

Septiembre, 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA
OCEANOGRAFÍA FÍSICA

Influencia de las corrientes geostroficadas sobre la distribución y abundancia del zooplancton e ictioplancton en la región de la pluma del Grijalva - Usumacinta (verano, 1999)

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA

PRESENTA:
CARLOS MELECIO CARMONA CEDILLO

Director de Tesis
DR. DAVID ALBERTO SALAS DE LEON
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

Comité
DR. CÉSAR FLORES COTO
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
DR. FRANCISCO JAVIER CHIAPPA CARRARA
UNIDAD ACADÉMICA SISAL, FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM
DR. CARLOS ROBINSON MENDOZA
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
DR. JAVIER ALDECO RAMÍREZ
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA. Unidad

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE, 2014



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



**INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES GEOSTRÓFICAS SOBRE
LA DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DEL ZOOPLANCTON E
ICTIOPLANCTON EN LA REGION DE LA PLUMA DEL
GRIJALVA-USUMACINTA
(VERANO, 1999)**

T E S I S

que para obtener el grado académico de

Maestría en Ciencias del Mar y Limnología

Oceanografía Física

p r e s e n t a

CARLOS MELECIO CARMONA CEDILLO

Director de Tesis: DR. DAVID ALBERTO SALAS DE LEÓN
Comité Tutorial: DR. CÉSAR FLORES COTO
DR. FRANCISCO XAVIER CHIAPPA CARRARA
DR. CARLOS ROBINSON MENDOZA
DR. JAVIER ALDECO RAMÍREZ

Cd. Universitaria

Septiembre, 2014

Quetzalcóatl

la serpiente emplumada

descubrió el lugar

donde crecía el sagrado maíz

conocía el valor

de las piedras preciosas

el lenguaje eterno

de la escultura y la pintura

y reveló los usos

de los secretos de las plantas

Siempre que partía

hacia el horizonte

y le preguntaban

a donde se dirigía

Quetzalcóatl siempre respondía

voy a aprender

Agradecimientos

A mi padre Melecio Carmona quien no pudo ver concluido este trabajo

A mi madre María Ascensión por su amor

A mis hermanas Xochitl y Dulce María por su cariño y apoyo

Al Dr. David Alberto Salas de León por su amistad e infinita paciencia, así como por sus enseñanzas

Al Dr. César Flores Coto, por sus consejos y enseñanzas sobre el ictioplancton, sin contar las palizas en ajedrez

Al Dr. Javier Aldeco Ramírez, con quienes discutí conceptos de física y me ayudo a aclararlos

Al Dr. Carlos Robinson Mendoza, por su continuo apoyo y amistad.

A todos aquellos que de forma anónima y desinteresada me apoyaron para durante mis estudios

A la dirección General de Intercambio Académico, por la beca para realizar los estudios de posgrado.

Contenido

Resumen	1
Abstract	2
I.- Introducción	3
Planteamiento del Problema	4
Relevancia	5
II.- Hipótesis y Objetivos	6
II.1. Hipótesis	6
II.2. Objetivo General	6
II.3. Objetivos Específicos	6
III.- Área de Estudio	8
III.1. Localización Geográfica	8
III.2. Batimetría del Área	8
III.3. Antecedentes	10
Meteorología: Viento	10
Pluma del Sistema de Ríos Grijalva – Usumacinta	10
Circulación en el Golfo de México	14
Zooplancton e Ictioplancton	14
IV.- Metodología	16
IV.1. Diseño de muestreo	16
IV.2. Datos y Muestras	16
Estructura Frontal	16
Fracción de Agua Dulce	17
Estratificación y Estabilidad Estática	17
Vorticidad Potencial	18
Patrón de Flujo Geostrófico	21
IV.3. Variables Biológicas	34
Muestreo Biológico: Zooplancton e Ictioplancton	35
Muestreo en el campo	35
Determinación de la abundancia de larvas de pez y la biomasa de zooplancton	35
Relación físico – biológica	36

V.- Resultados	37
V.1. Estructura Frontal	37
Transectos Sur – Norte	37
<i>Transecto 71 sur – 76 norte</i>	37
<i>Transecto 70 sur – 64 norte</i>	41
<i>Transecto 59 sur – 63 norte</i>	45
Transectos Oeste – Este	49
<i>Transecto 71 oeste – 70 este</i>	49
<i>Transecto 72 oeste – 46 este</i>	52
<i>Transecto 73 oeste – 45 este</i>	55
V.2. Estructura Físico – Biológica	59
Hábitats y Abundancia de Zooplancton e Ictioplancton	60
Biogeografía: hábitats, zooplancton e ictioplancton	65
V.3. Patrón de circulación geostrófica	79
Campo de Velocidades Geostróficas	79
Circulación Geostrófica, Zooplancton e Ictioplancton	82
VI.- Discusión	88
VII.- Conclusiones	93
VIII.- Literatura Citada	94

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo describir la influencia de la circulación geostrófica sobre el patrón de distribución espacial de la abundancia de zooplancton e ictioplancton en la región de descarga del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta. Los datos hidrográficos y biológicos corresponden a la campaña oceanográfica “PROMEBIO-I”, realizada del 15 al 18 de agosto de 1999, frente a la desembocadura de sistema de ríos Grijalva-Usumacinta en el sur del Golfo de México. Se realizaron 35 estaciones oceanográficas se realizaron dentro del área de estudio. Los datos hidrográficos, temperatura, salinidad, densidad y presión fueron obtenidos con un perfilador de conductividad-temperatura y profundidad denominado CTD. Las muestras de zooplancton fueron obtenidas de arrastres oblicuos dobles, en 3 capas de 10 metros y 3 capas de 20 m, con redes de apertura-cierre de 75 cm diámetro en la boca y 500 μm de luz de malla. Las larvas de pez fueron extraídas de todas las muestras de zooplancton. La abundancia de zooplancton e ictioplancton fue estandarizada a 100 metros cúbicos y se reporta como biomasa ($\text{gr}/100 \text{ m}^3$) y número de larvas ($\text{núm. larvas}/100 \text{ m}^3$), respectivamente. La velocidad de las corrientes geostróficas fue estimada a partir de datos promedio de temperatura y salinidad en los primeros 30 m de profundidad (3 capas de 10 m). Mediante un modelo lineal inverso resuelto por el método de diferencias finitas. Lo cual da un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas, que puede ser resuelto en forma algebraica. De los resultados es posible identificar cuatro hábitats: agua del banco de Campeche (CBW), agua del la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta (GUPW), agua mezclada del frente por densidad (FMW), agua del frente topográfico (TFW) y apreciar dos tipos de frentes: Un Frente por pluma de río (permanente) formado por las descargas de agua menos salina del sistema Grijalva Usumacinta y un Frente Topográfico (frente de mares someros) asociado al borde de la plataforma continental. Los máximos de biomasa zooplanctónica y número de larvas de pez están asociados al frente formado por las descargas del sistema Grijalva Usumacinta y al patrón de corrientes geostróficas asociadas al mismo.

Abstract

The present study describes the influence of the geostrophic circulation on the pattern of spatial distribution of abundance of zooplankton and ichthyoplankton in the discharge region of the Grijalva-Usumacinta System Rivers. Hydrographic and biological data correspond to the oceanographic cruise "PROMEBIO-I", held from 15 to 18 August 1999, in the mouth of the Grijalva-Usumacinta system rivers in the South of the Gulf of Mexico. 35 Oceanographic stations within the study area were the hydrographic data; temperature, salinity, density, and pressure were obtained with a conductivity-temperature and pressure profiler called CTD. Zooplankton samples were obtained from double oblique tows, in 3 layers of 10 m and 3 layers of 20 m, with open-close networks of 75 cm diameter at their mouth and 500 μm of mesh size. The larvae of fish were taken from all the zooplankton samples. The abundance of zooplankton and ichthyoplankton was standardized to 100 cubic meters and is reported as biomass ($\text{g}/100 \text{ m}^3$) and number of larvae ($\text{no. larvae}/100 \text{ m}^3$), respectively. The geostrophic currents was estimated from temperature and salinity average data in the first 3 layers, using a linear inverse model solved by the finite differences method, which gives a system of two equations and 2 unknowns, which can be solved in algebraic form. From the results it is possible to identify four habitats and two types of fronts: A plume front (permanent), formed by river water discharges, less saline, from the Grijalva-Usumacinta system, and a topographic front (front of shallow seas) associated with the edge of the continental shelf. Maximum number of fish larvae and zooplankton biomass are associated to the front formed by the Grijalva-Usumacinta system and the geostrophic currents are associated with the same pattern.

I.- Introducción

El objetivo principal de la ecología marina es comprender las interacciones entre los organismos y el medio ambiente que los rodea, para explicar la distribución y abundancia de los organismos en el espacio y el tiempo. En el medio marino, a excepción de los mamíferos, aves y reptiles marinos, la gran mayoría de los organismos forman parte del zooplancton durante las primeras etapas de su vida y se les denomina meroplancton, por ejemplo las larvas de peces. Otros grupos de organismos durante toda su vida forman parte del zooplancton y se les denomina holoplancton por ejemplo los copépodos. El zooplancton permite el flujo de energía entre los productores primarios (fitoplancton) y los productores terciarios (carnívoros), dentro del ecosistema marino. La distribución que exhibe el plancton (fitoplancton y zooplancton) en el ambiente marino es un patrón en parches y/o enjambres, debido a factores físicos y biológicos que generan y mantienen dicho patrón (Hamner y Carleton, 1979; Mackas *et al.*, 1985; Parsons *et al.*, 1990; Haury y Yamazaki 1995; Lalli y Parsons, 1997; Leising y Yen, 1997; Levinton, 2009; Kaiser *et al.*, 2011).

La comprensión de la distribución espacial del zooplancton tiene profundo efecto en nuestro entendimiento de la dinámica de poblaciones entre especies diferentes, debido a que estas relaciones también afectan nuestra comprensión de las propiedades, funciones y dinámica de las metapoblaciones, comunidades y metacomunidades (Osborn, 1995; Longhurst, 2007; Nee, 2008; Fukami, 2011; Duffy, 2011; Bengtsson, 2011).

Diversas hipótesis han sido propuestas para explicar la distribución y abundancia de poblaciones marinas (en particular peces y especies de importancia comercial), como son: periodo crítico (Hjort, 1914), océano estable (Lasker, 1975, 1978), transporte-retención (Parrish *et al.* 1981), miembro-vagabundo (Sinclair, 1988), ventana ambiental (Curry y Roy, 1989) y acople-desacople (Cushing, 1990; 1996). Todas estas hipótesis resaltan la importancia de los procesos oceanográficos físicos en la supervivencia y tamaño poblacional (Anderson, 1988; Connell y Guillarders, 2007). Según Longhurst (1981; 2007), la distribución en parches del zooplancton, incluido el ictioplancton, es una condición necesaria para la vida en el medio acuático y, es probablemente la razón fundamental de porqué los mecanismos y procesos que controlan la distribución y abundancia del zooplancton son estudiados.

La percepción del ambiente por parte de los individuos del zooplancton e ictioplancton, depende de las escalas espacial y temporal a las cuales el o los individuos operan, así la escala, depende del movimiento en relación al ambiente marino (corrientes y densidad), ya que los organismos con tallas inferiores a 1 mm viven en un ambiente advectivo, dominado por la viscosidad y son transportados junto con la parcela de agua en la cual se encuentran, mientras que organismos con tallas superiores viven en un ambiente inercial, y se pueden mover relativamente independientemente dentro de la parcela de agua. Este límite es definido por el número de Reynolds igual a 1 el cual relaciona las fuerzas de fricción inercial y viscosa (Franks, 1992b; Mullin, 1993; Naganuma, 1996; Kingsford y Suthers, 1996).

En todo el mundo se a observado alta producción biológica asociada a los proceso físicos denominados frentes oceánicos: estos ocurren a diversa escalas y presentan alta variabilidad espacio-temporal, su estructura física presenta gradientes y corrientes que inducen condiciones ambientales (hábitats) dentro de la columna de agua, que permiten una alta producción biológica (Hamner y Carleton, 1979; Legendre y Demers, 1984; Mackas *et al.*, 1985; Davis *et al.*, 1991; Kingsford *et al.*, 1991; Franks, 1992(b); Olson *et al.*, 1994; Largier, 1993; Lara-López, 2001).

Mi interés, en esta tesis, es probar que la estructura frontal producida por las descargas del sistema de ríos Grijalva–Usumacinta y el flujo geostrófico asociado a dicha estructura frontal, crea hábitats, algunos de los cuales mantienen una alta abundancia de zooplancton e ictioplancton dentro de la zona de influencia de la pluma del sistema de ríos Grijalva–Usumacinta.

Planteamiento del Problema

En esta tesis se exploran los aspectos teóricos y prácticos de la distribución espacial de la abundancia de mesozooplancton e ictioplancton y su relación con un frente oceánico. Esto implica establecer una conexión entre el flujo geostrófico asociado a la estructura frontal y la abundancia de mesozooplancton e ictioplancton, que nos permitan inferir procesos de dispersión/retención que expliquen la distribución espacial de la abundancia biológica.

El trabajo de Tesis se divide en cuatro partes:

1. La primera parte consiste en identificar y describir la estructura frontal, asociada a la descarga del sistema de ríos Grijalva – Usumacinta y la topografía del fondo, en la Bahía de Campeche.
2. La segunda parte está dedicada a establecer una correlación entre los patrones de distribución espacial de la abundancia del mesozooplancton e ictioplancton con la estructura frontal.
3. La tercera parte intenta establecer una conexión o relación entre la circulación geostrófica asociada a la estructura frontal y la abundancia de mesozooplancton e ictioplancton, para inferir posibles procesos de dispersión/retención en la bahía de Campeche.
4. La cuarta parte brinda un modelo conceptual de la dinámica y conexiones entre los procesos físico – biológicos que explique la abundancia biológica en función de la estructura frontal.

Relevancia

La importancia del presente estudio no sólo radica en su perspectiva académica y/o teórica en cuanto a oceanografía física y biológica. Trata de incidir en la comprensión de la conectividad entre procesos físico – biológicos que se presentan en una región de importancia estratégica para México, ya que la porción sur del Golfo de México y/o la Bahía de Campeche es una zona de importancia económico – social en recursos bióticos (e.g. pesquerías de peces demersales, camarón, pulpo) y abióticos (e.g. explotación de hidrocarburos). La importancia práctica radica en delinear cómo se relacionan las zonas de alta concentración ictioplanctónica con las corrientes geostróficas en el frente oceánico. Esto nos brindará información de la conectividad en los procesos físicos y biológicos para construir un modelo conceptual que ayude a la conservación de los recursos marinos.

II.- Hipótesis y Objetivos

II.1. Hipótesis

El patrón de distribución espacial del zooplancton e ictioplancton está determinado por la circulación geostrófica en la zona de influencia de los ríos Grijalva–Usumacinta.

II.2. Objetivo General

- Estudiar la influencia de las corrientes geostróficas sobre el patrón de distribución espacial del zooplancton en la región de influencia de los ríos Grijalva–Usumacinta.

II.3. Objetivos Específicos

- a) Analizar el patrón de variabilidad de las características físicas de la columna de agua con base en datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, densidad ($\sigma\text{-t}$, kg m^{-3}) y profundidad (m), para identificar y ubicar espacialmente el frente formado por las descargas del sistema de ríos Grijalva – Usumacinta.
- b) Estimar las corrientes geostróficas con base en los datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, densidad (kg m^{-3}) y presión (dbar), mediante el método inverso para determinar las corrientes geostróficas dentro del área de estudio.
- c) Obtener la abundancia en biomasa (peso húmedo) de mesozooplancton (gramos/100 m^3) mediante arrastres oblicuos con redes de apertura cierre, sin la fracción de ictioplancton, para construir la distribución espacial de la abundancia de mesozooplancton dentro del área de estudio.

- d) Cuantificar la abundancia en número de ictioplancton (número larvas de pez/100 m³) mediante arrastres oblicuos con redes de apertura cierre, sin la fracción de zooplancton, para construir la distribución espacial de la abundancia de ictioplancton dentro del área de estudio.
- e) Elaborar diagramas T-S con los parámetros físicos, con la sobreposición de los datos de biomasa de mesozooplancton (gramos/100 m³) y abundancia de ictioplancton (números de larvas de pez/100 m³), para determinar si la distribución espacial de la abundancia y biomasa se asocian a la estructura frontal y hábitats identificados dentro del área de estudio.
- f) Construir gráficas de planos horizontales, con datos de velocidades geostróficas en capas de 10 m, con la sobreposición de los datos de biomasa de mesozooplancton (gramos/100 m³) y abundancia de ictioplancton (números de larvas de pez/100 m³), para determinar si la distribución espacial de abundancia y biomasa se asocian a las corrientes geostróficas dentro del área de estudio.

III.- Área de Estudio

III.1. Localización Geográfica

El área de estudio se localiza en la parte sur del Golfo de México, entre los paralelos 18° 24' (18.4°) y 19° 36' (19.6°) latitud norte y los meridianos 92° 00' (92.0°) y 93° 12' (93.2°) longitud oeste (fig. 3.1). El área estudiada es de aproximadamente 13 582.42 km² (3960 MN²). Para cubrirla se ubicaron 35 estaciones, donde se realizaron los muestreos oceanográficos y biológicos durante la campaña oceanográfica PROMEBIO-I. La zona es de importancia económica para México por su alta producción pesquera y petrolera. Además está influenciada por las descargas de agua dulce de los ríos Grijalva, Usumacinta, San Pedro y San Pablo y caracterizada por planicies fluviales y deltaicas, con gran aporte de sedimentos terrígenos (Rosales-Hoz *et al.*, 1992). Los ríos Grijalva y Usumacinta son dos de los ríos más caudalosos de México que desembocan al Golfo de México en un delta común, por lo que de aquí en adelante nos referiremos a ellos como el sistema Grijalva – Usumacinta.

III.2. Batimetría del Área

La batimetría del área de estudio (fig. 3.1), se construyó con base en los datos de profundidad del fondo de las 35 estaciones de muestreo, realizada del 15 al 18 de agosto de 1999. En la estación 46 se registró el fondo a 10 m de profundidad (mínima), cerca de la costa. En la estación 64 el fondo se registró a 800 m de profundidad (máxima) y es la estación más lejana de la costa. En las estaciones 58, 59, 69 y 70 que se ubicaron frente a la desembocadura del sistema Grijalva – Usumacinta, el fondo se registró a 20 ±5 m de profundidad.

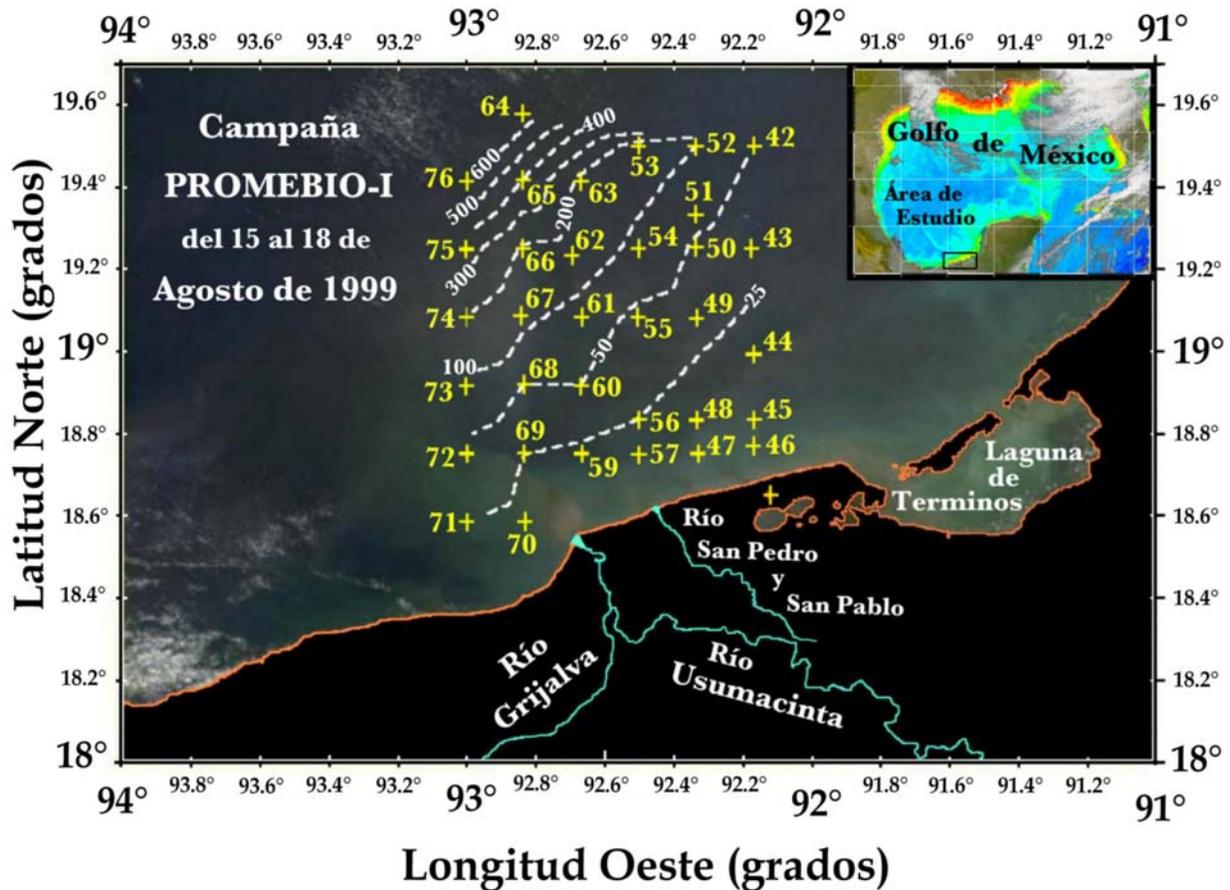


Figura 3.1. Localización del área de estudio dentro del Golfo de México (recuadro). Ubicación geográfica de las estaciones que conforman la campaña PROMEBIO-I. Las cruces indican dónde fueron realizadas las estaciones oceanográficas y el número cercano indica la estación. Las isóbatas están indicadas con líneas entrecortadas con su respectiva profundidad en metros. En la imagen de satélite se puede observar la zona costera que es influenciada por las descargas del sistema Grijalva-Usumacinta y la Laguna de Términos; así como, la desembocadura y parte del cauce del sistema Grijalva-Usumacinta. (Imagen MODIS del satélite “Terra”, tomada el 6 de octubre del 2001, cortesía de Jacques Descloitres, NASA/GSFC).

III.3. Antecedentes

La dinámica del sur del Golfo de México es el resultado de la interacción del efecto del viento, la Corriente de Lazo, la fuerza de Coriolis, la topografía del fondo, los giros, la precipitación pluvial y las descargas del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta.

Meteorología: Viento

En el Golfo de México, los patrones del esfuerzo de viento y del rotacional del esfuerzo del viento, indican que la transferencia de momentum es en dirección oeste en forma general, con excepción de la parte sur-oeste del golfo, donde el viento y el esfuerzo de viento son hacia el sur. El patrón estacional del rotacional del esfuerzo de viento presenta valores negativos en la porción noreste y positiva sobre la porción suroeste del Golfo de México, con líneas nodales que se extienden desde la península de Yucatán hacia la frontera entre México y EUA. La existencia de un área con valores negativos del rotacional del esfuerzo de viento, es compatible con la formación y semi-permanencia del giro ciclónico presente en la Bahía de Campeche (Gutiérrez de Velasco y Winant, 1996).

El clima es tropical, con precipitación mayor a 1500 mm anuales. Tres estaciones climáticas son identificables en el área: (1) estación seca de febrero a mayo; (2) estación lluviosa de junio a septiembre y (3) estación de tormentas invernales o “nortes” de octubre a febrero, con lluvias ocasionales (Yáñez-Arancibia y Day, 1982; Rosales-Hoz *et al.*, 1992).

Pluma del Sistema de Ríos Grijalva – Usumacinta

Los aportes de agua dulce descargados al mar forman una pluma la cual desarrolla un frente y una zona frontal. El frente está formado por la zona de contacto entre las dos masas de agua. Dichos frentes pueden ser llamados frentes halinos (Bowman y Esaias, 1978; Fedorov, 1986; Czitrom, 1986; Czitrom *et al.*, 1988; Franks, 1992 a; b).

Lo característico de este tipo de frentes es el contraste de densidad causado por la diferencia de temperatura y salinidad entre el agua dulce del río y el agua de mar. Otra característica es que el tipo de agua ligera, en este caso el agua dulce del sistema Grijalva–Usumacinta, tiende a fluir sobre el agua de mar característica de la Bahía de Campeche, así que la pluma del río es visible (fig. 3.2) por los satélites, ya que tiene otro color por los sedimentos que arrastra hacia el mar. En los frentes como el del sistema Grijalva–Usumacinta, las piconclinas tienden a curvarse hacia la desembocadura del río para definir la profundidad a la que llega la pluma. En el plano horizontal la pluma se forma perpendicular a la desembocadura del río y en la mayoría de los casos se deforma dependiendo de las corrientes e influencia del viento, como en el caso del sistema Grijalva–Usumacinta (Padilla *et al.*, 1985; Alatorre-Mendieta *et al.*, 1989; Czitrom *et al.*, 1986 a, b; Shirasago-German, 1991; Monreal-Gómez *et al.*, 1992).

En la porción sur del Golfo de México Padilla-Pilotze *et al.* (1985) describieron el campo termohalino de la zona costera en primavera y detectaron dos estructuras frontales. Una ubicada al norte y al oeste de la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta, la cual presentó un cambio de salinidad de 35.5 a 36.1 en la zona del frente, los datos mostrados posteriormente por Czitrom *et al.* (1986 a; b), Alatorre-Mendieta *et al.* (1989), Shirasago-German, 1991 y Monreal-Gómez *et al.* (1992), confirman lo anterior.

La estructura frontal fue identificada en el campo de densidad (Sigma-t) y salinidad. Sin embargo, no fue identificada en el campo de temperatura (Czitrom *et al.*, 1986; Czitrom y Simpson, 1988; Alatorre-Mendieta *et al.*, 1989; Monreal-Gómez *et al.*, 1992; Salas de León *et al.*, 1998).

Czitrom *et al.* (1986) sugirieron que el frente del sistema Grijalva-Usumacinta es intermitente o estacional, e indicaron que es fácilmente reconocible en abril (primavera) y desaparece en septiembre (otoño) (fig. 3.2). Czitrom *et al.* (1986 a; b) y Alatorre-Mendieta *et al.* (1989) reconocieron que el frente subsiste a las tormentas (“nortes”) y procesos de mezcla, e indicaron que sólo se hunde, por lo que no es identificable en la superficie. Los datos de Padilla-Pilotze *et al.* (1985), Czitrom *et al.* (1986 a, b), Alatorre-Mendieta *et al.* (1989), Shirasago-German (1991) y Monreal-Gómez *et al.* (1992) indicaron que la pluma y la zona frontal se encuentran confinadas a los primeros 50 m de profundidad.

Czitrom *et al.* (1986 a; b) mencionaron que el frente se ubica a aproximadamente 46 km en dirección perpendicular de la costa y paralelo a la línea de costa por aproximadamente 129 km, con una zona de gradientes o zona frontal de aproximadamente 9 km de amplitud o ancho, en donde se observó un cambio de una unidad en los valores de salinidad. Monreal-Gómez *et al.* (1992) ubicaron el frente a una distancia de la costa de 42 km, la zona frontal presentó un gradiente de salinidad de 0.07 ppm km^{-1} y un gradiente de densidad de $0.06 \text{ kg m}^{-3} \text{ km}^{-1}$ en banda de 26.82 km en dirección perpendicular a la costa. Paralelo a la costa en una banda de 10 km se presentaron gradientes de salinidad de 0.13 ppm km^{-1} y de densidad de $0.15 \text{ kg m}^{-3} \text{ km}^{-1}$.

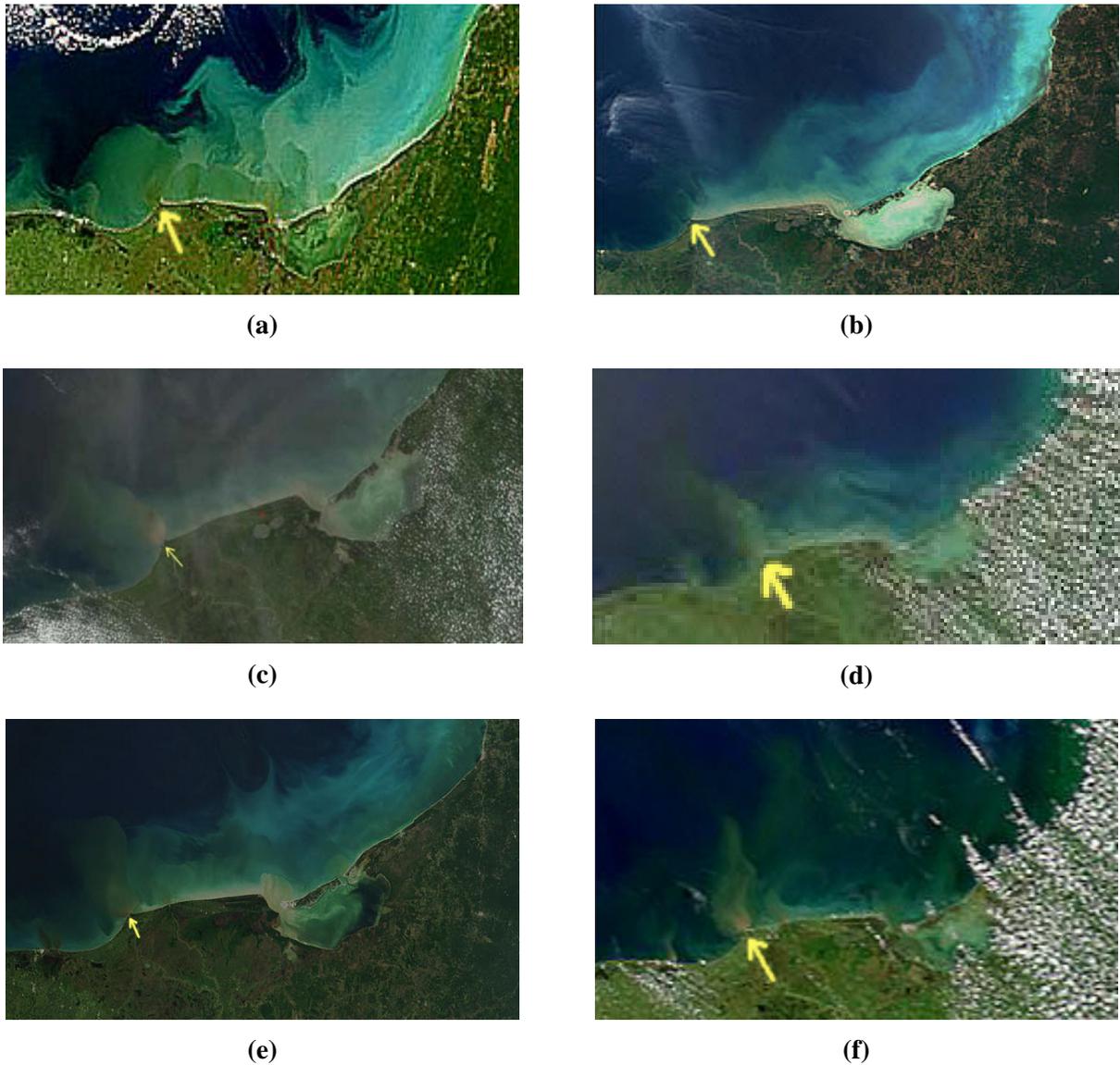


Figura 3.2. Variabilidad de la pluma formada por las descargas del sistema de ríos Grijalva–Usumacinta en primavera, verano, otoño e invierno en diferentes años. Las imágenes de satélite fueron tomadas en: (a) 12 de enero de 1999 con el sensor MODIS; (b) 3 de abril del 2000 con el sensor SeaWiFS; (c) 6 de octubre del 2001 con el sensor MODIS; (d) 22 de junio del 2000 con el sensor SeaWiFS; (e) 19 de diciembre del 2002 con el sensor MODIS; (f) 23 de septiembre del 2000 con el sensor SeaWiFS (Las imágenes son cortesía de Jacques Desclotres, Nasa/Goddard Space Flight Center y ORBIMAGE).

Circulación en el Golfo de México

El patrón de circulación superficial dentro del Golfo de México está determinado por la Corriente de Lazo y los giros o remolinos ciclónicos y anticiclónicos que se desprenden de él. Sin embargo, la porción sur del Golfo de México presenta una dinámica propia marcadamente estacional (Monreal-Gómez y Salas de León, 1990; 1997; Monreal-Gómez *et al.*, 1992; Salas de León *et al.*, 1992; Salas de León *et al.*, 1998).

En primavera el régimen de circulación indica que la corriente entra por el Canal de Yucatán, desplazándose sobre la plataforma continental, siguiendo la costa en dirección hacia el oeste. En otoño el patrón de circulación es similar al de primavera; sin embargo, comienza a formarse un giro ciclónico en la porción sureste de la Bahía de Campeche, frente a las costas de Campeche y Tabasco. De otoño a invierno el giro ciclónico se desarrolla y comienza a migrar de la parte sureste de la Bahía de Campeche hacia el oeste de la misma. En invierno el giro ciclónico está bien desarrollado y se encuentra ubicado en la porción oeste de la Bahía (Salas de León *et al.* 1998).

Zooplankton e Ictioplankton

Flores-Coto y Ordóñez-López (1991) estudiaron el patrón de distribución del ictioplankton en la porción sur de Golfo de México. Sus resultados indican que la mayor abundancia y ocurrencia de larvas de peces (ictioplankton) se distribuye siguiendo el borde entre el talud continental y la plataforma continental frente a las costas de Campeche, Tabasco y Veracruz. Indican que de las 28 especies identificadas, 10 presentaron una evidente estacionalidad en su abundancia y sugieren que el desove de las 28 especies estudiadas se realiza en zonas profundas y las larvas migran con ayuda de las corrientes hacia la zona de mezcla entre aguas neríticas y oceánicas.

Salas de León *et al.* (1998) resumen y contrastan el frente halino formado por el sistema Grijalva-Usumacinta con los patrones de circulación de largo periodo y los patrones de abundancia del zooplankton e ictioplankton, en la porción sur del Golfo de México en forma estacional. Cabe señalar que el patrón de circulación de largo periodo es el transporte medio

horizontal entre la superficie y la pycnoclina, que estimaron mediante un modelo bidimensional, horizontal con gravedad reducida. Sus resultados arrojan que la distribución de la biomasa y densidad del zooplancton e ictioplancton están fuertemente influenciadas por el patrón de circulación de la región en cada época del año. En primavera el patrón de circulación de la corriente es en dirección este-oeste por lo que la pluma y frente formados por el sistema Grijalva-Usumacinta, son desplazados hacia el oeste de la desembocadura del sistema. Las biomásas más altas de zooplancton ($20 - 60 \text{ g/m}^3$) e ictioplancton ($140 - 3000 \text{ ind/m}^3$) estaban asociadas a la zona del frente. En verano se comienza a formar un giro ciclónico en la porción sur-este de la Bahía de Campeche, también existe un mayor aporte de agua dulce del sistema Grijalva-Usumacinta, por lo que se desarrolla un frente más intenso perpendicular a la desembocadura del sistema. Así mismo, existe una mayor abundancia de zooplancton ($40 - 110 \text{ g/m}^3$) e ictioplancton ($1000 - 3000 \text{ ind/m}^3$) asociados a la zona del frente halino. En invierno el giro ciclónico se encuentra bien desarrollado y ha migrado de la parte sureste al oeste de la Bahía de Campeche, las comunidades planctónicas son desplazadas hacia el este de la misma. En esta época del año los aportes de agua dulce del sistema Grijalva-Usumacinta son débiles o escasos; sin embargo, el frente formado por los aportes permanece. Nuevamente los valores máximos de biomasa zooplanctónica ($10-60 \text{ g/100 m}^3$) y abundancia ictioplanctónica ($200-300 \text{ ind/100 m}^3$) están asociados al frente halino. Por lo que Salas de León *et al.* (1998) concluyen que la máxima abundancia de zooplancton e ictioplancton está asociada al frente halino formado por los aportes de agua dulce del sistema Grijalva-Usumacinta, en el plano horizontal. Sin embargo, se desconoce la distribución vertical de la abundancia con respecto a la zona del frente halino.

IV.- Metodología

IV.1. Diseño de muestreo

La distribución de estaciones se estableció a partir de la información recabada en investigaciones previas, sobre la ubicación de la pluma del Sistema Grijalva–Usumacinta. La pluma puede llegar hasta 46 km de distancia en forma perpendicular a la costa y 129 km de distancia en forma paralela a la costa, la amplitud de la zona frontal alcanza de 9 a 10 km (borde irregular de la pluma). En cuanto a la escala temporal, se sabe que la pluma depende de las descargas del sistema Grijalva–Usumacinta, las cuales están relacionadas a las lluvias, por lo que se muestreó durante agosto a mitad del periodo de lluvias (canícula) de junio-septiembre de 1999.

IV.2. Datos y Muestras

La campaña oceanográfica PROMEBIO – I, se realizó del 5 al 21 de agosto de 1999 a bordo del buque oceanográfico “Justo Sierra” de la Universidad Nacional Autónoma de México. El área de estudio fue de 122.232 km (66 MN) por 111.12 km (60 MN), dentro de la cual se ubicó un red de 35 estaciones (fig.3.1)

Estructura Frontal

Los datos de temperatura, conductividad y presión correspondientes a la columna de agua para cada estación fueron obtenidos con un CTD Neil-Brown Mark III. A partir de estos datos se estimó la salinidad y la densidad mediante el programa del CTD (Software General Oceanics, 1996; Fofonoff y Millard, 1983; 1991).

Los parámetros derivados: Frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos/hora) y Vorticidad Potencial ($10^{-12}m^{-1}s^{-1}$) fueron estimados con el programa Ocean Data View (Schlitzer, 2009).

Fracción de Agua Dulce

La cuantificación de la fracción de agua dulce de la pluma en muestras de agua (F), se realizó con la expresión matemática (Parsons *et al.*, 1990):

$$F = \left[1 - \left(\frac{S}{S_0} \right) \right] \quad (1)$$

Dónde: S = salinidad de la muestra

S_0 = salinidad promedio

Aguas con salinidad entre 8 y 33 son consideradas aguas salobres o mezcladas, típicas en estuarios y cerca de las desembocaduras de los ríos; mientras que el agua dulce presenta salinidad inferior a 8 (Parsons *et al.*, 1990; Speight y Henderson, 2010). En el presente estudio se consideró S_0 igual a 34. Las unidades en que se reporta la fracción de agua dulce es porcentaje (%).

Estratificación y Estabilidad Estática

La estabilidad es frecuentemente expresada en términos de la llamada frecuencia de Brunt-Väisälä, boyancia o frecuencia de flotabilidad (N) (Talley *et al.*, 2012). Cuya expresión matemática es:

$$N^2 = - \frac{g}{(\rho)} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (2)$$

donde:

$\bar{\rho}$ = densidad promedio en el transecto

ρ = densidad de la muestra

g = gravedad (981 cm s^{-2})

z = profundidad

Sí:

$\frac{\partial \rho}{\partial z} > 0$ Agua menos densa bajo agua más densa (inestable o estabilidad negativa)

$\frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$ Estabilidad neutra

$\frac{\partial \rho}{\partial z} < 0$ Agua más densa bajo agua menos densa (estabilidad positiva)

Valores altos de la *frecuencia de Brunt-Väisälä*, son usualmente encontrados en la zona de la picnoclina, donde el gradiente de densidad vertical es alto, normalmente está asociado a la termoclina en aguas oceánicas y a la haloclina en aguas costeras (Cushman-Roisin, 1994; Cushman-Roisin y Beckers, 2011; Talley *et al.*, 2012; Imberger, 2013).

La Frecuencia de Brunt-Väisälä, fue estimada a partir de los datos de temperatura, salinidad y presión registrados con el CTD y con el algoritmo EOS80 del Programa Ocean Data View (ODV) (Schlitzer, 2009; Talley *et al.*, 2012).

Vorticidad Potencial

La vorticidad en el océano es el resultado del efecto de la rotación terrestre (vorticidad planetaria), de la rotación debida al movimiento relativo dentro del fluido (vorticidad relativa) y, al cambio vertical de densidad (ancho de la capa). En regiones donde las corrientes son débiles la vorticidad relativa es pequeña, la vorticidad potencial, puede ser aproximada como (Schlitzer, 2009; Talley *et al.*, 2012):

$$Q \approx -\left(\frac{f}{\rho}\right) \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3)$$

De aquí en adelante consideraremos a Q como la vorticidad potencial. Si la derivada en la vertical de la densidad es calculada con respecto a la densidad potencial local, entonces se puede expresar en función de la frecuencia de Brunt-Väisälä. Su expresión matemática es:

$$Q = \left(\frac{f}{g}\right) N^2 \quad (4)$$

La vorticidad potencial, se estimó a partir de los datos de Frecuencia de Brunt-Väisälä con el Programa Ocean Data View (ODV).

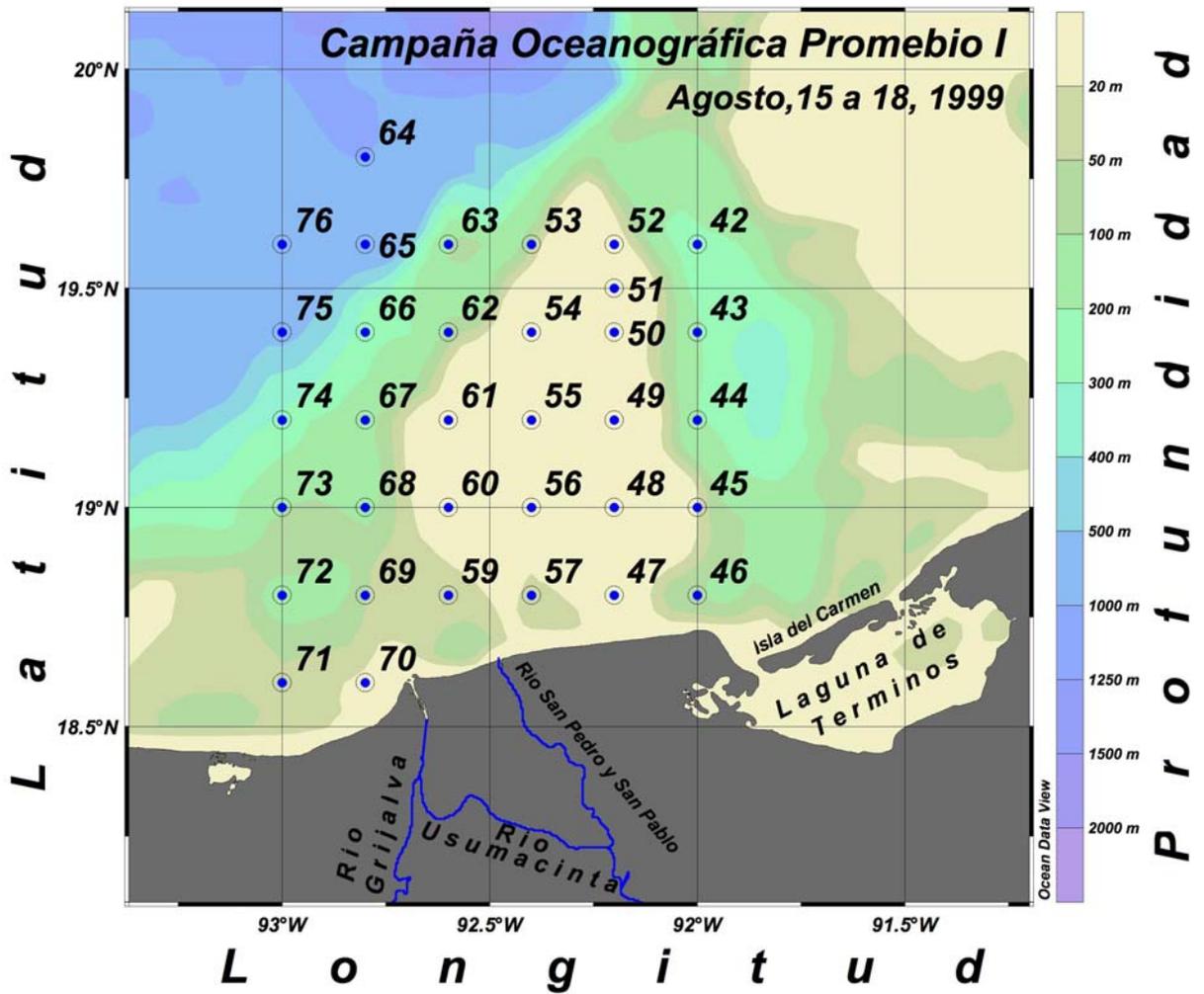


Figura 4.1.- Distribución regular y equidistante de las estaciones que se utilizó para estimar las corrientes geostroficas, el punto azul indica la ubicación espacial y el número la estación.

Patrón de Flujo Geostrófico

La circulación geostrófica fue inferida mediante el método inverso descrito por Tziperman y Hecht (1988) y aplicado por Tziperman (1988), Colunga-Enríquez (1990) y Salas de León *et al.* (1992). Para poder aplicar el modelo fue necesario crear una matriz con una distribución regular de las estaciones las cuales quedaron separadas en el plano horizontal a 17.5 km (9.4 MN) en dirección sur – norte y 18.5 km (10 MN) en dirección este – oeste aproximadamente (fig. 4.1). Mientras que en el plano vertical la separación de las capas fue de 10 metros.

Los procesos geostróficos ocurren cuando el gradiente de presión horizontal es balanceado por la fuerza de Coriolis, las fuerzas dominantes actúan en sentido vertical (siguiendo la dirección de la fuerza de gravedad terrestre) y son el gradiente de presión vertical y el peso del agua. Las fuerzas dominantes en sentido horizontal son el gradiente de presión horizontal y la fuerza de Coriolis. El balance en sentido vertical y horizontal requiere que los términos no lineales y viscosidad en las ecuaciones de movimiento sean despreciables.

Dichas ecuaciones son:

$$fv = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} \text{ gradiente de presión horizontal en el eje x} \quad (5)$$

$$fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} \text{ gradiente de presión horizontal en el eje y} \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \text{ gradiente de presión vertical, eje z} \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \text{ ecuación de continuidad} \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \text{ flujo no divergente} \quad (9)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_V(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + K_H(z) \nabla_H^2 T \quad (10)$$

$$u \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_V(z) \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial z} \right] + K_H(z) \nabla_H^2 \mathcal{S} \quad (11)$$

Dado que el área estudiada es pequeña, la consideramos como un “plano- f ” o superficie plana (Cushman-Roisin, 1994), esto permite hacer varias consideraciones más: usar el valor promedio de la gravedad (9.81 m s^{-1}) y el parámetro de Coriolis ($f = 2 \Omega \sin\phi = 4.79 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) en 19.22° N , como una buena aproximación, las corrientes geostróficas se consideran no divergentes ($u_x + v_y = 0$), la mezcla de sal y calor fueron parametrizados como valores constantes de los coeficiente de difusión turbulenta en los planos horizontal ($K_H = 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) y vertical ($K_V = 10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) (Munk, 1966; Tzipermant y Hecht, 1988; Salas de León *et al.*, 1992; Talley *et al.*, 2012).

Al obtener las derivadas de las ecuaciones (5) y (6) con respecto a la profundidad y eliminar la derivada de la presión con respecto a la profundidad ($\partial P / \partial z$) con la ecuación (7), se tiene:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = - \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = + \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (13)$$

Lo cual implica que el gradiente horizontal de densidad se encuentra en estado estacionario, la fuerza de Coriolis mantiene al sistema en equilibrio y la velocidad debe cambiar con respecto a la altura de la columna de agua o profundidad. Estas ecuaciones también son conocidas como de Viento Termal o Flujo Baroclínico (Pond y Pickard, 1978; Cushman-Roisin, 1994; Cushman-Roisin y Beckers, 2011; Simpson y Sharples, 2012; Imberger, 2013).

La circulación en cada profundidad, está definida por la estructura vertical de la densidad y se obtiene al integrar las ecuaciones (12) y (13) con respecto a las profundidades del nivel de

referencia (z_0) y la profundidad de interés (z), que es el espesor de la capa. Las expresiones obtenidas son:

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (14)$$

$$u(x, y, z) = u(x, y) + \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \quad (15)$$

Donde $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$ son las velocidades en el nivel de referencia, se tomaron como la superficie libre y ρ_0 corresponde a la densidad promedio de la columna de agua.

Si consideramos que la velocidad vertical es pequeña, entonces los términos $w(\partial T/\partial z)$ y $w(\partial S/\partial z)$ pueden ser despreciados y las ecuaciones (10) y (11) se convierten en:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_V(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + K_H(z) \nabla_H^2 T \quad (16)$$

$$u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_V(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] + K_H(z) \nabla_H^2 S \quad (17)$$

Otra forma de expresarlas es:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = K_V(z) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + K_H(z) \nabla_H^2 T \quad (18)$$

$$u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = K_V(z) \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + K_H(z) \nabla_H^2 S \quad (19)$$

Si se sustituyen las ecuaciones (14) y (15) en las ecuaciones (10) y (11) se obtiene:

$$u_0(x, y) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + v_0(x, y) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_V(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + K_H(z) \nabla_H^2 T \quad (20)$$

$$u_0(x, y) \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + v_0(x, y) \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_V(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] + K_H(z) \nabla_H^2 S \quad (21)$$

o

$$u_0(x, y) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + v_0(x, y) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz = K_V(z) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + K_H(z) \nabla_H^2 T \quad (22)$$

$$u_0(x, y) \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + v_0(x, y) \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz = K_V(z) \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + K_H(z) \nabla_H^2 S \quad (23)$$

Reordenando los términos obtenemos:

$$u_0(x, y) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + v_0(x, y) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = K_V(z) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + K_H(z) \nabla_H^2 T - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (24)$$

$$u_0(x, y) \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) + v_0(x, y) \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) = K_V(z) \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + K_H(z) \nabla_H^2 S - \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (25)$$

Si el flujo es no divergente entonces

$$u_0(x, y) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + v_0(x, y) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (26)$$

$$u_0(x, y) \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) + v_0(x, y) \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) = 0 \quad (27)$$

Por lo tanto:

$$0 = K_V(z) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + K_H(z) \nabla_H^2 T - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (28)$$

$$0 = K_V(z) \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + K_H(z) \nabla_H^2 S - \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (29)$$

Las ecuaciones (28) y (29) representan la advección de temperatura y salinidad respectivamente y las integrales de la variación de densidad corresponden a las velocidades “ u ” y “ v ” dentro de la capa z , conocemos todos los términos menos las integrales, pero tenemos un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, el cual se puede resolver por medio de un sistema matricial el cual queda definido de la forma siguiente:

$$-K_V(z) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - K_H(z) \nabla_H^2 T = - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (30)$$

$$-K_V(z) \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} - K_H(z) \nabla_H^2 S = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (31)$$

Los valores constantes en las ecuaciones anteriores son:

$K_V(z) = 10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ Coeficiente de difusión turbulento en el plano vertical

$K_H(z) = 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ Coeficiente de difusión turbulento en el plano horizontal

$g = 981 \text{ cm s}^{-1}$ fuerza de gravedad terrestre

$\rho_0 =$ densidad promedio de la columna de agua en el transecto correspondiente

$f = 2\Omega \text{ sen}\phi = 2 \left(\frac{2\pi}{86164 \text{ s}} \right) \text{ sen}\phi = 4.79009 \times 10^{-5}$ parámetro de Coriolis, en 18° LN

Y las incógnitas a conocer o estimar son:

$$\int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \quad \text{velocidad geostrófica en dirección sur-norte}$$

$$\int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad \text{velocidad geostrófica en dirección oeste-este}$$

Si definimos:

$$at = -K_V(z) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - K_H(z) \nabla_H^2 T \quad (32)$$

$$as = -K_V(z) \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} - K_H(z) \nabla_H^2 S \quad (33)$$

$$bt = -\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \quad (34)$$

$$bs = -\left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \quad (35)$$

$$ct = \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \quad (36)$$

$$cs = \left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) \left(\frac{g}{\rho_0 f} \right) \quad (37)$$

$$v = \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \quad (38)$$

$$u = \int_{z_0}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (39)$$

Al sustituir las ecuaciones (32) a (39) en las ecuaciones (30) y (31), obtenemos el sistema de ecuaciones siguientes:

$$at = (bt * v) + (ct * u) \quad (40)$$

$$as = (bs * v) + (cs * u) \quad (41)$$

Si arreglamos este sistema de ecuaciones en forma matricial queda como:

$$\begin{bmatrix} at \\ as \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} bt & ct \\ bs & cs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ u \end{bmatrix} \quad (42)$$

Para saber si el sistema tiene solución el determinante de la matriz de los coeficientes de las velocidades (v, u) debe ser diferente de cero:

$$\det[(bt \times cs) - (ct \times bs)] \neq 0 \quad (43)$$

Si es así, entonces:

$$\begin{bmatrix} bt & ct \\ bs & cs \end{bmatrix}^{-1} = \left(\frac{1}{\det bc} \right) \begin{bmatrix} cs & -ct \\ -bs & bt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{cs}{\det bc} \right) & \left(\frac{-ct}{\det bc} \right) \\ \left(\frac{-bs}{\det bc} \right) & \left(\frac{bt}{\det bc} \right) \end{bmatrix} \quad (44)$$

Al despejar las velocidades en la ecuación (42), obtenemos un sistema, que se resuelve fácilmente por el método de matriz inversa y su solución es:

$$\begin{bmatrix} bt & ct \\ bs & cs \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} at \\ as \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ u \end{bmatrix} \quad (45)$$

El cual es un sistema fácil de evaluar para obtener “ u ” y “ v ”, que son las velocidades geostroáficas que nos interesan, en cada estación y capa. Las diferenciales que necesitan ser calculadas son:

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad \text{Operador de gradiente o Nabla}$$

$$\nabla^2 = i \frac{\partial^2}{\partial x^2} + j \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \text{Operador de Laplace}$$

$$\nabla_H^2 T = i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + j \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{Laplaciano de Temperatura}$$

$$\nabla_H^2 S = i \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + j \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad \text{Laplaciano de Salinidad}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad \text{primera derivada de la temperatura en dirección } x$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad \text{primera derivada de la temperatura en dirección } y$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{segunda derivada de la temperatura en dirección } z$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \quad \text{primera derivada de la salinidad en dirección } x$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial y} \right) \quad \text{primera derivada de la salinidad en dirección } y$$

$\frac{\partial^2 S}{\partial z^2}$ segunda derivada de la salinidad en dirección z

$\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)$ primera derivada de la densidad en dirección x

$\left(\frac{\partial \rho}{\partial y}\right)$ primera derivada de la densidad en dirección y

Las derivadas fueron evaluadas o estimadas mediante el método de diferencias finitas centradas, con base en la red de estaciones y su ubicación horizontal en los seis niveles en que nos interesó conocer las velocidades geostróficas, con base en los campos de temperatura, salinidad y densidad.

El método de diferencias finitas centradas permitió resolver numéricamente cualquier ecuación diferencial parcial dentro de un dominio espacio-tiempo continuo, para esto debemos reemplazar el dominio continuo por una red de dominio discreto y, así podemos aplicar el teorema de Taylor para definir variables dependientes y sus derivadas dentro del dominio discreto. Suponiendo que la función $c(x)$ y sus derivadas son finitas y continuas; entonces si $c(x)$ es dada en el punto x , puede ser definida en el punto $(x+h)$ por las series:

$$c(x+h) = c(x) + h \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{h^3}{3!} \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + O(h^4) \quad (46)$$

y en el punto $(x-h)$ como:

$$c(x-h) = c(x) - h \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{h^3}{3!} \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + O(h^4) \quad (47)$$

A partir de la ecuación (46) la primera derivada de $c(x)$ en el punto (x) es:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c(x+h) - c(x)}{h} + O(h) \quad (48)$$

A partir de la ecuación (47) la primera derivada de $c(x)$ en el punto (x) es:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c(x) - c(x-h)}{h} + O(h) \quad (49)$$

Las ecuaciones (48) y (49) son denominadas derivada adelantada y derivada atrasada, respectivamente. La substracción de las dos series da:

$$c(x+h) - c(x-h) = 2h \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{2h^3}{3!} \frac{\partial^3 c}{\partial x^3} + O(h^5) \quad (50)$$

y por lo tanto la primera derivada es:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c(x+h) - c(x-h)}{2h} + O(h^2) \quad (51)$$

Esta forma numérica es denominada derivada centrada. Las tres expresiones no solo difieren en la forma sino también en la aproximación (orden de precisión). Cada derivada es expresada por la forma de diferencia, por lo tanto $(\partial c / \partial x)$ es el límite de las proporciones de las diferencias cuando $h \rightarrow 0$, un mayor orden de precisión es obtenido mediante la forma de diferencia centrada, porque el error de aproximación en la ecuación (51) es proporcional a (h^2)

La fórmula de la diferencia para la derivada de segundo orden puede ser introducida mediante la agregación o adición de series en la ecuación (46) y la ecuación (47), para obtener:

$$c(x+h) + c(x-h) = 2c(x) + h^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + O(h^4) \quad (52)$$

Y a partir de la ecuación (52) la segunda derivada de $c(x)$ en el punto (x) es:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{c(x+h) - 2c(x) + c(x-h)}{h^2} + O(h^2) \quad (53)$$

Ahora, el primer paso para la construcción de los algoritmos numéricos es remplazar el dominio continuo por un dominio discreto. Los puntos de la red numérica son definidos mediante las coordenadas en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} x_j &= jh, & j &= 1, 2, 3, \dots \\ y_k &= kh, & k &= 1, 2, 3, \dots \\ z_l &= lh, & l &= 1, 2, 3, \dots \\ t_m &= mT, & m &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

Dos parámetros importantes de la red numérica son el intervalo de espacio (h) y el de tiempo (t). Ambos son constantes dentro del dominio de integración. Previamente se ha trabajado con la función continua $c(x)$ en los puntos discretos x_j , para considerar los errores dentro de la función discreta $c_{j,k,l}^m$, la cual será definida dentro del espacio discreto.

En el presente trabajo, se consideró que el muestreo es sinóptico por lo cual la diferencia en tiempo puede ser despreciada y se considera que todos los datos fueron obtenidos al mismo tiempo de forma quasi-instantánea. Y dado que se muestreó de forma discreta, la malla de puntos está predeterminada por las estaciones de muestreo (latitud, longitud, profundidad, parámetro). Sólo se usarán las variaciones espaciales.

Las coordenadas del punto en el plano (x,y,z) son jh , kh , lh , para acortar la notación únicamente escribiremos las coordenadas (j, k, l).

Esta notación corta se adopta para las derivadas, las cuales en el “eje x ” toman la forma:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c_{j+1} - c_{j-1}}{2h} + O(h^2) \quad (54)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{c_{j+1} - 2c_j + c_{j-1}}{h^2} + O(h^2) \quad (55)$$

en el “eje y” toman la forma:

$$\frac{\partial c}{\partial y} = \frac{c_{k+1} - c_{k-1}}{2h} + O(h^2) \quad (56)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = \frac{c_{k+1} - 2c_k + c_{k-1}}{h^2} + O(h^2) \quad (57)$$

en el “eje z” toman la forma:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{c_{l+1} - c_{l-1}}{2h} + O(h^2) \quad (58)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{c_{l+1} - 2c_l + c_{l-1}}{h^2} + O(h^2) \quad (59)$$

Al sustituir la “función c ” con la temperatura (T) y la distancia entre estaciones (h) en el dominio (j, k, l), el cual corresponde a las direcciones j (oeste – este), k (sur – norte) y l (profundidad) entonces las derivadas centradas toman la forma:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{(j+1),k,l} - T_{(j-1),k,l}}{2h} + O(h^2) \quad \text{Primera derivada de la temperatura (oeste-este)} \quad (60)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{(j+1),k,l} - 2T_{j,k,l} + T_{(j-1),k,l}}{h^2} + O(h^2) \quad \text{Segunda derivada de la temperatura (oeste-este)} \quad (61)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{j,(k+1),l} - T_{j,(k-1),l}}{2h} + O(h^2) \quad \text{Primera derivada de la temperatura (sur-norte)} \quad (62)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{j,(k+1),l} - 2T_{j,k,l} + T_{j,(k-1),l}}{h^2} + O(h^2) \quad \text{Segunda derivada de la temperatura (sur-norte)} \quad (63)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_{j,k,(l+1)} - T_{j,k,(l-1)}}{2h} + O(h^2) \quad \text{Primera derivada de la temperatura (vertical-profundidad)} \quad (64)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{j,k,(l+1)} - 2T_{j,k,l} + T_{j,k,(l-1)}}{h^2} + O(h^2) \quad \text{Segunda derivada de la temperatura (profundidad)} \quad (65)$$

Al sustituir la “función c ” con la salinidad (S) y la distancia entre estaciones (h) en el dominio (j, k, l), el cual corresponde a las direcciones j (oeste – este), k (sur – norte) y l (profundidad) entonces las derivadas centrales toman la forma:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{S_{(j+1),k,l} - S_{(j-1),k,l}}{2h} + O(h^2) \quad \text{Primera derivada de la salinidad (oeste-este)} \quad (66)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \frac{S_{(j+1),k,l} - 2S_{j,k,l} + S_{(j-1),k,l}}{h^2} + O(h^2) \quad \text{Segunda derivada de la salinidad (oeste-este)} \quad (67)$$

$$\frac{\partial S}{\partial y} = \frac{S_{j,(k+1),l} - S_{j,(k-1),l}}{2h} + O(h^2) \quad \text{Primera derivada de la salinidad (sur-norte)} \quad (68)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial y^2} = \frac{S_{j,(k+1),l} - 2S_{j,k,l} + S_{j,(k-1),l}}{h^2} + O(h^2) \quad \text{Segunda derivada de la salinidad (sur-norte)} \quad (69)$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S_{j,k,(l+1)} - S_{j,k,(l-1)}}{2h} + O(h^2) \quad \text{Primera derivada de la salinidad (profundidad)} \quad (70)$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = \frac{S_{j,k,(l+1)} - 2S_{j,k,l} + S_{j,k,(l-1)}}{h^2} + O(h^2) \quad \text{Segunda derivada de la salinidad (profundidad)} \quad (71)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\rho_{(j+1),k,l} - \rho_{(j-1),k,l}}{2h} + O(h^2) \quad \text{Primera derivada de la densidad (oeste-este)} \quad (72)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\rho_{j,(k+1),l} - \rho_{j,(k-1),l}}{2h} + O(h^2) \quad \text{Primera derivada de la densidad (sur-norte)} \quad (73)$$

La ecuaciones (60) a (73), permiten calcular las diferenciales necesarias para obtener los valores que se ingresarán en el sistema matricial de ecuaciones (43) y (45), a partir del cual se estimaron las corrientes geostróficas.

IV.3. Variables Biológicas

El zooplancton está conformado por una amplia variedad de organismos, incluye estadios juveniles, larvarios y adultos de casi todos los taxa. Dichos organismos viven suspendidos en la columna de agua y son transportados pasivamente junto con las masas de agua por las corrientes (Parsons *et al.*, 1990; Lalli y Parsons, 1997; Miller, 2004; Levinton, 2009).

El zooplancton puede ser clasificado de diversas formas: en función de su ciclo de vida holoplancton (organismos que pasan toda su vida en el plancton), o meroplancton (organismos que solo pasan el desarrollo larval en el plancton); por talla o tamaño [microzooplancton (< 0.2 mm), mesozooplancton ($0.2 < 10$ mm), macrozooplancton (> 10 mm)]; por distribución vertical: ciclo nictimeral, ciclo diurno, epipelágico ($0 < 150$ m profundidad), mesopelágicos ($150 < 1000$ m profundidad), batipelágico ($1000 < 4000$ m profundidad), abisopelágico ($4000 < 6000$ m profundidad) (Parsons *et al.*, 1990; Strathmann, 1990 y 1993; Williams *et al.*, 1994; Lalli y Parsons, 1997; Levinton, 2009).

Algunos de los organismos que conforman el zooplancton son: sifonóforos, ctenóforos, copépodos, quetognatos, anfípodos, eufasidos, pterópodos, larvas veliger de moluscos, larvas zoeas, nauplios, mysis y filosomas de crustáceos, larvas trocóforas de poliquetos, huevos y larvas de peces. La importancia ecológica del zooplancton radica en que enlazan niveles tróficos altos (consumidores terciarios) con los niveles bajos (productores primarios), esto permiten el flujo de energía en la red trófica y el ecosistema, desde un punto antrópico, juega un papel preponderante en las pesquerías al influenciar la sobrevivencia y reclutamiento poblacional (Levin, 1983; 1990; Bahud, 1988; Parsons *et al.*, 1990; Strathman, 1990; 1993; Mullin, 1988; 1993; Williams *et al.*, 1994; González y Bradley, 1994; Naganuma, 1996; Lalli y Parsons, 1997; Levinton, 2009).

Las corrientes en el océano son las principales responsables de la dispersión y advección de zooplancton, huevos y larvas; así como, de las migraciones de juveniles en forma parcial y, ocurren en una amplia escala de tiempo y espacio (Mullin, 1988; 1993; Sammarco y Heron, 1994; Levinton, 2009).

La supervivencia y tamaño de las poblaciones de zooplancton y peces se refleja en la abundancia de mesozooplancton e ictioplancton (larvas de peces). En el presente trabajo sólo se

analizó la abundancia de la comunidad del mesozooplankton medida como biomasa (g/100 m³) y la abundancia de la comunidad del ictioplankton (larvas de peces) medida como concentración de larvas (número de larvas/100 m³).

Muestreo Biológico: Zooplankton e Ictioplankton

Muestreo en el campo

Para obtener las muestras de zooplankton se emplearon redes de apertura–cierre con un diámetro en la boca de 75 cm y 500 µm de luz de malla. Cada red muestreó un estrato o columna de agua de 10 m de espesor.

La columna de agua fue dividida en 6 estratos, las profundidades preestablecidas fueron: 0-10m (Nivel 1), 10-20m (Nivel 2), 20-30m (Nivel 3), 30-40m (Nivel 4), 40-60m (Nivel 5) y 60-80m (Nivel 6). Se dejó un margen de seguridad para no tocar el fondo. Tanto el margen de seguridad como el número de estratos de muestreo variaron en función de la batimetría en cada estación. Los arrastres fueron de tipo doble oblicuo a una velocidad de 2 a 3 nudos durante 15 minutos. El volumen filtrado por la red fue estimado a partir de flujómetros General Oceanics calibrados, colocados en la boca de cada red.

Las muestras de zooplankton fueron fijadas con formalina al 4%, neutralizada con borato de sodio. Después de 24 horas de haber sido fijadas las muestras, la formalina fue sustituida por alcohol al 70%, para preservación de la muestra. Posteriormente las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Zooplankton en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, para su procesamiento. En el presente estudio solo se utilizan los datos de las tres primeras capas (0 a 30 m).

Determinación de la abundancia de larvas de pez y la biomasa de zooplankton

Las larvas de peces (ictioplankton) fueron removidas y contadas de todas las muestras de zooplankton. La abundancia estimada de larvas de pez se reporta como concentración en número

de larvas en cien metros cúbicos (número de larvas/100m³).

Se estimó la biomasa total de todas y cada una de las muestras de zooplancton obtenidas siguiendo la técnica descrita por Zavala-García y Flores-Coto (1989). La biomasa se reporta como peso húmedo expresado en gramos en cien metros cúbicos (g/100 m³).

Relación físico – biológica

Dado que el ambiente en el que vive el zooplancton e ictioplancton es la columna de agua, este ambiente es caracterizado por la temperatura, la salinidad y la densidad, pero estos parámetros también definen las propiedades de los tipos de agua en el océano. Para relacionar los tipos de agua con la abundancia de zooplancton e ictioplancton, se construyeron diagramas T-S, donde se ubicaron los tipos de agua y se sobreponen las abundancias de zooplancton e ictioplancton, en el diagrama T-S.

El patrón espacial de abundancia de zooplancton e ictioplancton, fue examinado en seis superficies que indican el promedio de abundancia de zooplancton e ictioplancton. Las primeras tres capas tienen un espesor de 10 m y fueron centradas a 5, 15 y 25 m de profundidad, mientras que las capas 4, 5 y 6, tienen un espesor de 20 m, centradas a 50, 70 y 90 m de profundidad. Las primeras tres capas de abundancia de zooplancton e ictioplancton se sobrepusieron al campo de velocidades geostroficas y al patrón de circulación geostrofica para observar la asociación.

V.- Resultados

V.1. Estructura Frontal

Se analizaron todos los datos físicos, transectos y estaciones dentro del área de estudio, pero únicamente se reportan aquellos transectos en los cuales se detectó la presencia de la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta, en los primeros 50 m de profundidad y que son relevantes para el presente estudio.

Transectos Sur – Norte

Transecto 71 sur – 76 norte

En el transecto que va de la estación 71 (sur) hacia la estación 76 (norte), se analizó la capa de agua superficial (fig. 5.1).

La temperatura presentó un patrón estratificado de la columna de agua (figs. 5.1a), en general disminuyó con la profundidad. Fue posible identificar agua cálida delimitada por la isoterma de 29° C, que dominó la capa superficial en la zona oceánica. Sobre la plataforma continental se observó el curvado de las isotermas entre 28° y 29° C, hasta intersectar la superficie del mar lo que indicó la presencia de un frente oceánico, las isotermas de 21° a 23° C también se curvaron, pero hacia el fondo hasta interceptarlo, esto es característico de un frente topográfico.

La salinidad también presentó una estructura estratificada de la columna de agua (fig. 5.1b), en general aumentó con la profundidad. La distribución de la isohalina de 36.5 fue similar a la isoterma de 29° C en la zona oceánica, esto corroboró la existencia del frente oceánico, identificado en el campo de temperatura. Las isohalinas de 36.2 y 36.3 indicaron la presencia de una intrusión paralela a la plataforma hacia la zona oceánica alrededor de los 50 m de profundidad.

La densidad mostró un patrón estratificado de la columna de agua (figs. 5.1c), en general aumento con la profundidad. La isopicna de 24 kg m⁻³ delimitó el agua cálida y salina observada

en la zona oceánica. Una capa de agua superficial menos densa definida por la isopicna de 23 kg m^{-3} se observó sobre la plataforma continental y, las isopicnas entre 25 y 25.5 kg m^{-3} se curvaron hacia el fondo e indicaron la presencia del frente topográfico identificado en el campo de temperatura y que no se observó en el campo de salinidad.

La pluma de agua dulce producto de las descargas del sistema de ríos Grijalva - Usumacinta fue visible en los primeros 5 m (fig. 5.1c), caracterizada con densidad menor a 23 kg m^{-3} , salinidad menor a 36 (fig. 5.1b) y, temperatura entre 27° y 28°C (fig. 5.1a).

La facción de agua dulce (figs. 5.1d) permitió identificar una capa de agua menos salina, definida por la isopleta de -6% sobre la plataforma continental y una intrusión de agua mezclada definida por la isopleta de -7% desde la plataforma continental hacia aguas oceánicas, por debajo del agua cálida, salina y menos densa en la zona oceánica.

La frecuencia de Brunt-Väisälä (figs. 5.1e) indicó un potencial de oscilación de las isopicnas. Valores negativos de boyancia indicaron inestabilidad cerca del fondo. Los valores positivos indicaron gran potencial de oscilación y estabilidad de la columna de agua. Oscilaciones de $N > 5$ ciclos/hora, se asociaron a la intrusión de agua mezclada desde la plataforma continental hacia la zona oceánica.

Vorticidad potencial mayor a $1\ 000 \times 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ se asoció a la intrusión identificada, desde la plataforma continental hacia la zona oceánica (figs. 5.1f), los valores positivos de vorticidad indicaron la tendencia del agua a girar a la izquierda (cyclónico) y bombeo de agua hacia la superficie. No se presentaron valores negativos pero se observaron zonas delimitadas por la isopleta de cero de vorticidad con posibles valores negativos las cuales indicaron que la tendencia del agua fue a girar hacia la derecha (anticiclónico) por lo que el bombeo de agua en esa zona es hacia el fondo.

El curvado de las isopicnas, isohalinas e isotermas hacia arriba, definió a los frentes oceánicos y pluma del río Grijalva-Usumacinta (figs. 5.1 a,b,c). Mientras que la densidad (fig. 5.1c) definió la profundidad a la cual se hunde y penetra el agua mezclada desde la plataforma continental hasta la zona oceánica, esto fue sugerido por los patrones de frecuencia de Brunt-Väisälä y vorticidad potencial (figs. 5.1 e, f). El curvamiento de las isopicnas hacia el fondo en el campo de densidad indica la presencia de un frente topográfico.

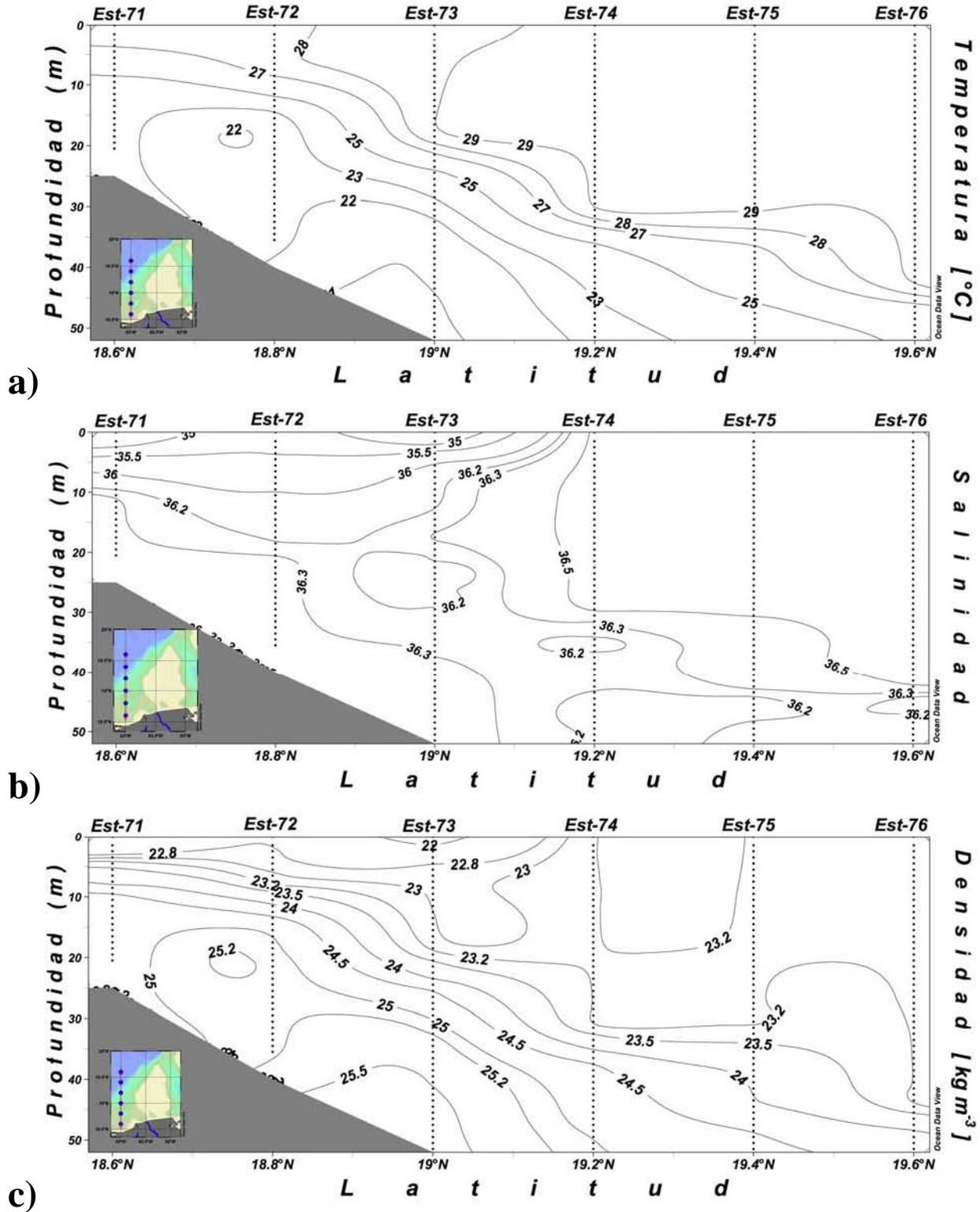


Figura 5.1. Patrón espacial de: a) temperatura (°C), b) salinidad, c) densidad sigma-t (kg m⁻³), en los primeros 50 m de profundidad. Transecto entre las estaciones 71 (sur) – 76 (norte) a través de la plataforma continental en la Bahía de Campeche.

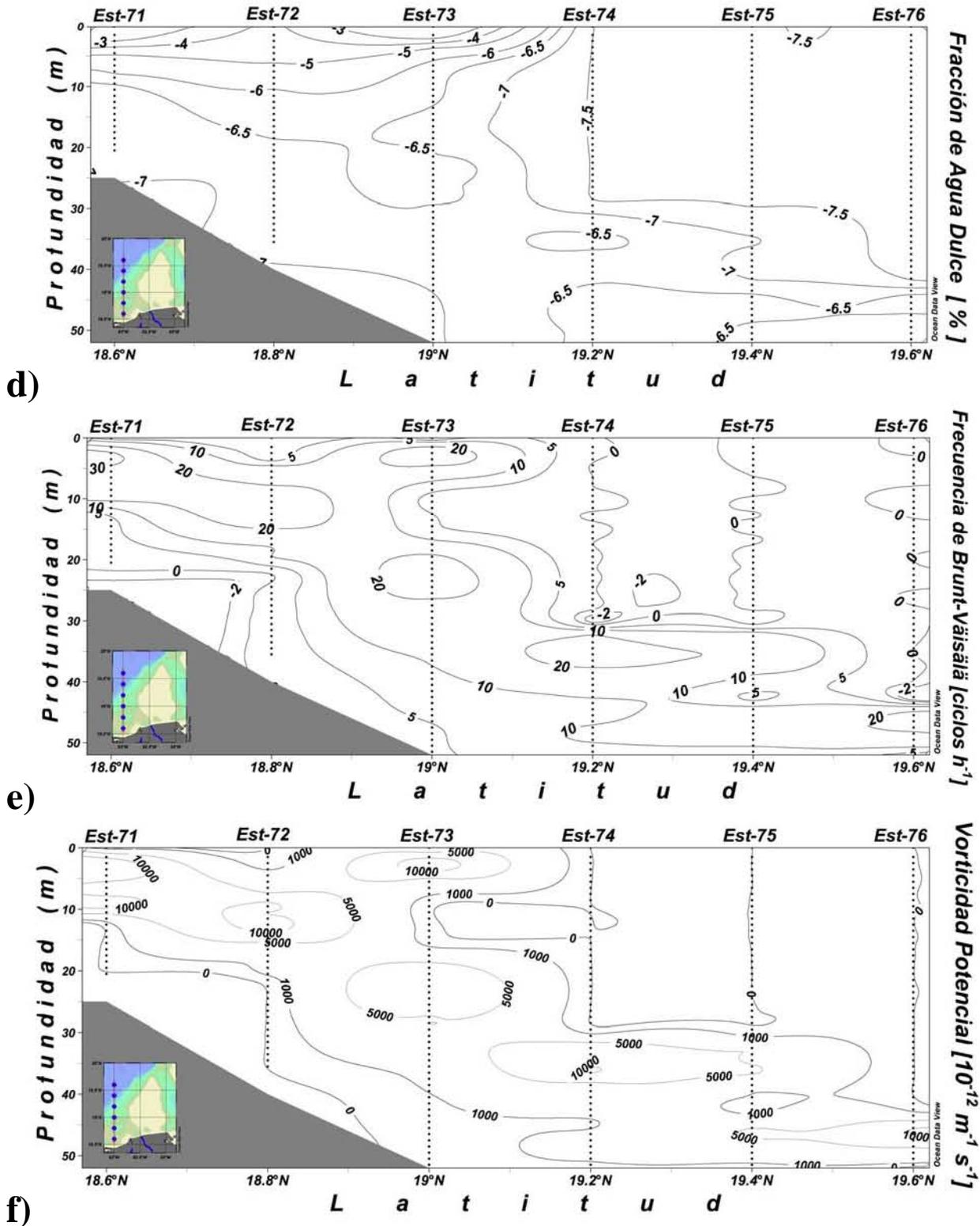


Figura 5.1. Patrón espacial de: d) fracción de agua dulce (%), e) frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos h⁻¹) y f) vorticidad potencial (m⁻¹s⁻¹), en los primeros 50 m de profundidad. Transecto entre las estaciones 71 (sur) – 76 (norte) a través de la plataforma continental en la Bahía de Campeche.

Transecto 70 sur – 64 norte

En el transecto que va desde la estación 70 al sur hacia la estación 64 al norte (fig. 5.2), se analizaron los primeros 100 y 50 m de profundidad (figs. 5.2). La zona sobre la plataforma continental abarcó de la estación 66 a la 70 y la zona oceánica abarcó las estaciones 64 y 65.

La temperatura (figs. 5.2a) disminuyó conforme aumentó la profundidad, en general la columna de agua estuvo estratificada. Se observó agua cálida delimitada por la isoterma de 29° C, la cual se curvó hasta intersectar la superficie, e indicó la presencia de un frente oceánico y un gradiente de temperatura desde la zona oceánica hacia la zona sobre la plataforma continental, a la profundidad de 20 m. Las isotermas de 21° a 24° C, se curvaron hasta intersectar el fondo, lo cual es característico de un frente topográfico.

En general, la salinidad exhibió un patrón estratificado (figs. 5.2b). Se observó agua con salinidad inferior a 34 cerca de la superficie la cual definió a la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta, delimitada por la isohalina de 36, el curvado de las isohalinas inferiores a 36, indicó que es una pluma boyante, que no sobrepasa los 10 m de profundidad e indica la zona del frente por pluma de río. Agua cálida con salinidades superiores a 36.4 corrobora la presencia del frente oceánico. Lentes de agua con salinidades entre 36 y 36.4, se desplazaron desde la plataforma continental hacia la zona oceánica, entre los 50 y 100 m de profundidad.

La densidad (figs. 5.2c) en general, aumentó con la profundidad. Se identificó agua con densidad inferior a 22 kg m⁻³, la isopicna de los 23 kg m⁻³, se curvó hasta intersectar la superficie, esto confirmó la presencia del frente y pluma de río del sistema Grijalva-Usumacinta. La isopicna de 23.2 kg m⁻³ delimitó al agua cálida y salina, cerca de la superficie en la zona oceánica y las isopicnas entre 24.6 y 25.4 kg m⁻³, indicaron una interacción con el fondo similar a la isoterma de 22° C, lo cual confirmó la presencia de un frente topográfico.

La fracción de agua dulce (figs. 5.2d) permitió apreciar la capa de agua dulce producto de las descargas del río, definida por la isopletras de -5% y -6% que confirma la presencia de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta la cual sólo alcanzó los 10 m de profundidad. La isopletra de -7% corroboró la existencia del frente oceánico identificado en los campos de temperatura y salinidad. El agua producto de la mezcla entre el agua de la pluma y agua del Golfo de México,

presentó valores entre -6% y -7%, y se distribuyó desde la pluma hacia la zona oceánica entre los 20 y 80 m de profundidad.

La frecuencia de Brunt-Väisälä (figs. 5.2e), indicó el potencial de oscilación de las isopícnas. Dos zonas con valores negativos ($N < 0$ ciclos/hora) de boyancia indicaron inestabilidad. Por otro lado, fueron identificados una zona cerca del fondo donde las isopícnas e isotermas se curvaron e indicaron la presencia del frente topográfico y, otra zona con valores inferiores a -10 ciclos/hora cerca de la superficie, ambas zonas sobre la plataforma continental. Valores positivos de boyancia entre 30 a 40 ciclos/hora, delimitaron la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta y las oscilaciones de 10 a 20 ciclos/hora indicaron la distribución del agua mezclada como intrusión desde la plataforma hacia la zona oceánica, entre los 20 y 80 m de profundidad.

La vorticidad potencial (figs. 5.2f), con valores entre $10\ 000$ y $20\ 000 \times 10^{-12} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ cerca de la superficie, reafirmaron la presencia del frente y pluma del sistema Grijalva-Usumacinta. El agua mezclada fue delimitada por valores entre $1\ 000$ y $10\ 000 \times 10^{-12} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ de vorticidad potencial, que se extendió como intrusión desde la plataforma continental hasta la zona oceánica, alrededor de los 50 m de profundidad. Valores positivos de vorticidad indicaron la tendencia del agua a rotar hacia la izquierda (ciclónico). La isopleta de $10^{-12} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ de vorticidad potencial, delimitó zonas con posibles valores negativos lo que indicó que el agua giró hacia la derecha (anticiclónico), en áreas donde las isotermas e isopícnas se curvaron hacia el fondo y la boyancia presentó valores negativos lo que reafirmó la presencia de un frente topográfico.

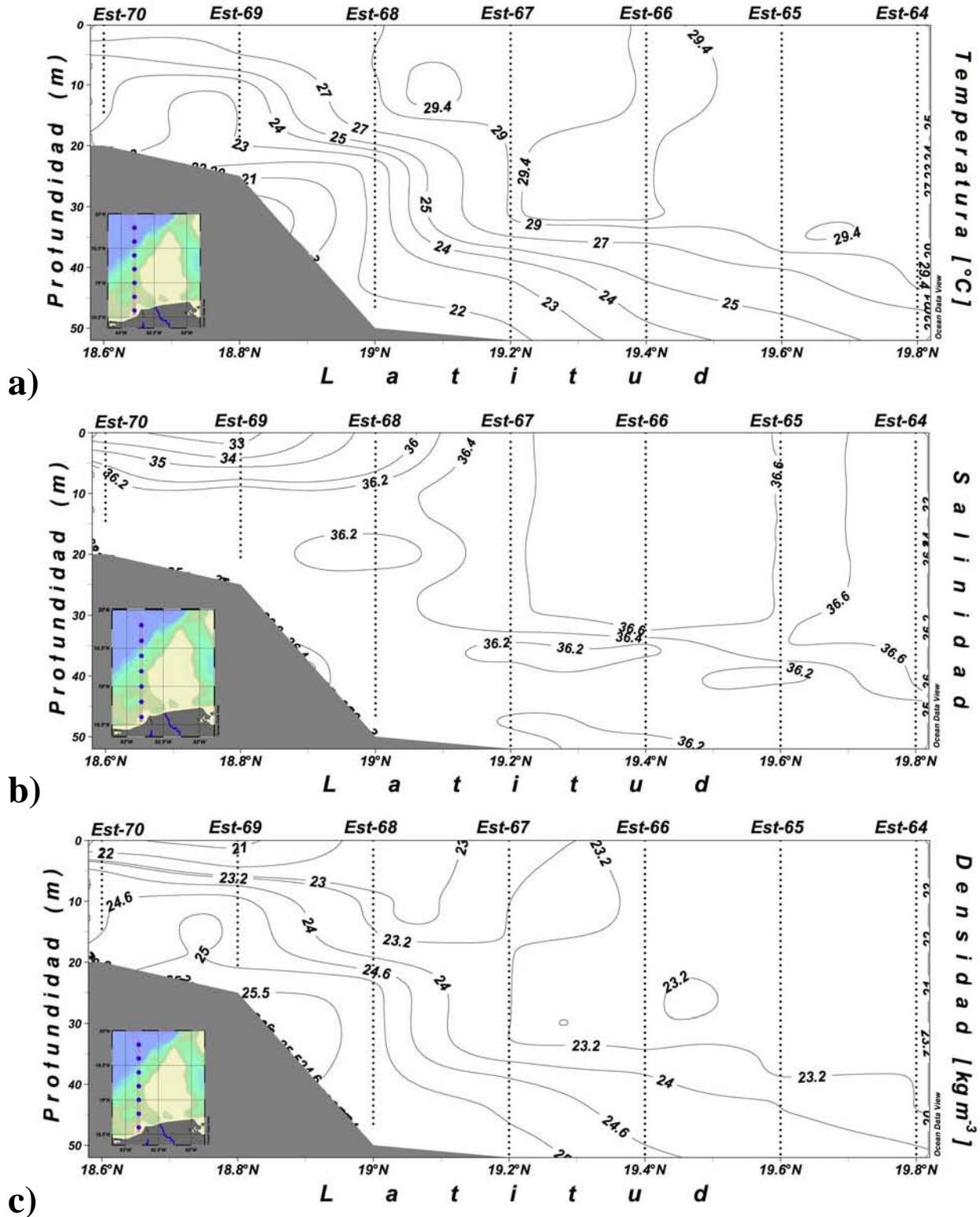


Figura 5.2. Patrón espacial de: a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) salinidad, c) densidad sigma-t (kg m^{-3}), en los primeros 50 m de profundidad. Transecto entre las estaciones 70 (sur) – 64 (norte) a través de la plataforma continental en la Bahía de Campeche.

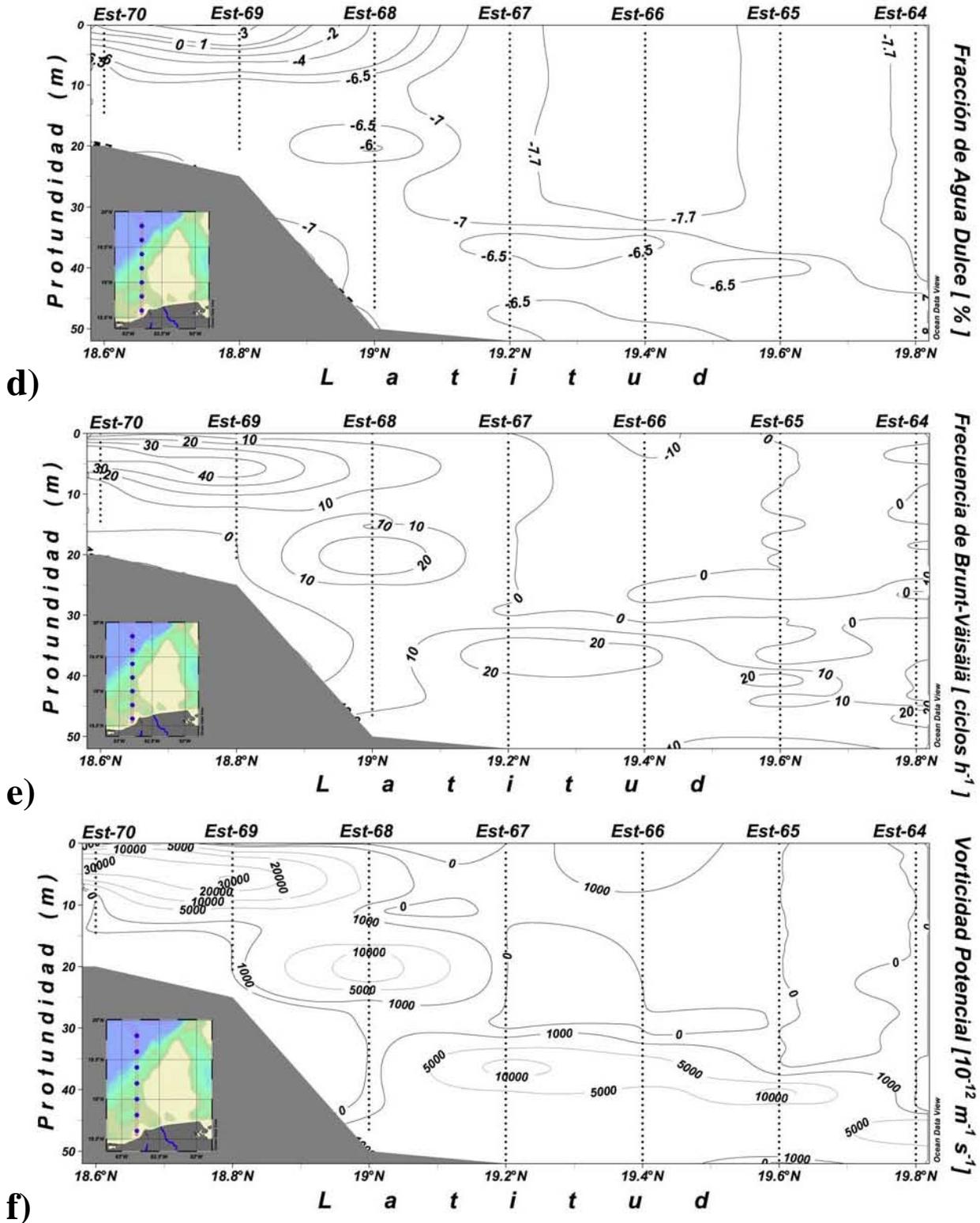


Figura 5.2. Patrón espacial de: d) fracción de agua dulce (%), e) frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos h^{-1}) y f) vorticidad potencial ($\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$), en los primeros 50 m de profundidad. Transecto hidrográfico entre las estaciones 70 (sur) – 64 (norte) a través de la plataforma continental en la Bahía de Campeche.

Transecto 59 sur – 63 norte

En el transecto que va de la estación 59 a la estación 63 (fig. 5.3), todas las estaciones estuvieron sobre la plataforma continental, la profundidad máxima de muestreo fue de 170 m. Se analizaron los primeros 50 m de profundidad.

La temperatura (fig. 5.3a) mostró un patrón estratificado y disminuyó conforme aumentó la profundidad. La isoterma de 29° C, se curvó hasta intersectar la superficie, lo que indicó la presencia del frente oceánico.

La salinidad (fig. 5.3b) disminuyó al aumentar la profundidad. Se observó que la isohalina de 36.6 se curvó hasta la superficie, lo que corroboró la presencia del frente oceánico, mostrando agua con salinidad superior a 36.5 cerca de la superficie. La isohalinas de 36.2 y 36.4 se curvaron hacia la superficie e indicaron la presencia de agua mezclada menos salina. Lentas con salinidad entre 36.0 y 36.4 se distribuyeron por toda la columna.

La densidad (fig. 5.3c) presentó una estructura estratificada y aumentó con la profundidad. Se identificó agua con densidad inferior a 23 kg m^{-3} esta isopícnica se curvó hasta intersectar la superficie e indicó la presencia de agua mezclada.

La fracción de agua dulce (fig. 5.3d) presentó valores inferiores a -6.4% cerca de la superficie, la columna de agua estuvo caracterizada por valores entre -6.5% y -6.9%, lo que permitió suponer que agua mezclada se desplazó desde la superficie hacia aguas más profundas como una intrusión, entre las isopletas de -6.4 a -7%. Valores superiores a -7.5%, corroboran la presencia de un frente oceánico.

La frecuencia de Brunt-Väisälä (fig. 5.3e) presentó valores de 20 a 30 ciclos/hora debajo de agua menos salina y oscilaciones de 10 a 20 ciclos/hora se asociaron al desplazamiento de agua mezclada en forma de intrusión. Fue posible apreciar zonas con valores negativos de boyancia, entre 0 y -10 ciclos/hora, esto indicó inestabilidad.

La vorticidad potencial (fig. 5.3f) presentó valores superiores a $4\,000 \times 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ debajo de la capa de agua menos salina y valores entre $1\,000$ y $4\,000 \times 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ en la zona con agua mezclada, lo que indicó una tendencia del agua a girar hacia la izquierda (ciclónico). La isopleta

de $10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ delimito zonas de vorticidad potencial negativa lo que indicó una tendencia del agua a girar hacia la derecha (anticiclónico) y producir hundimiento de agua.

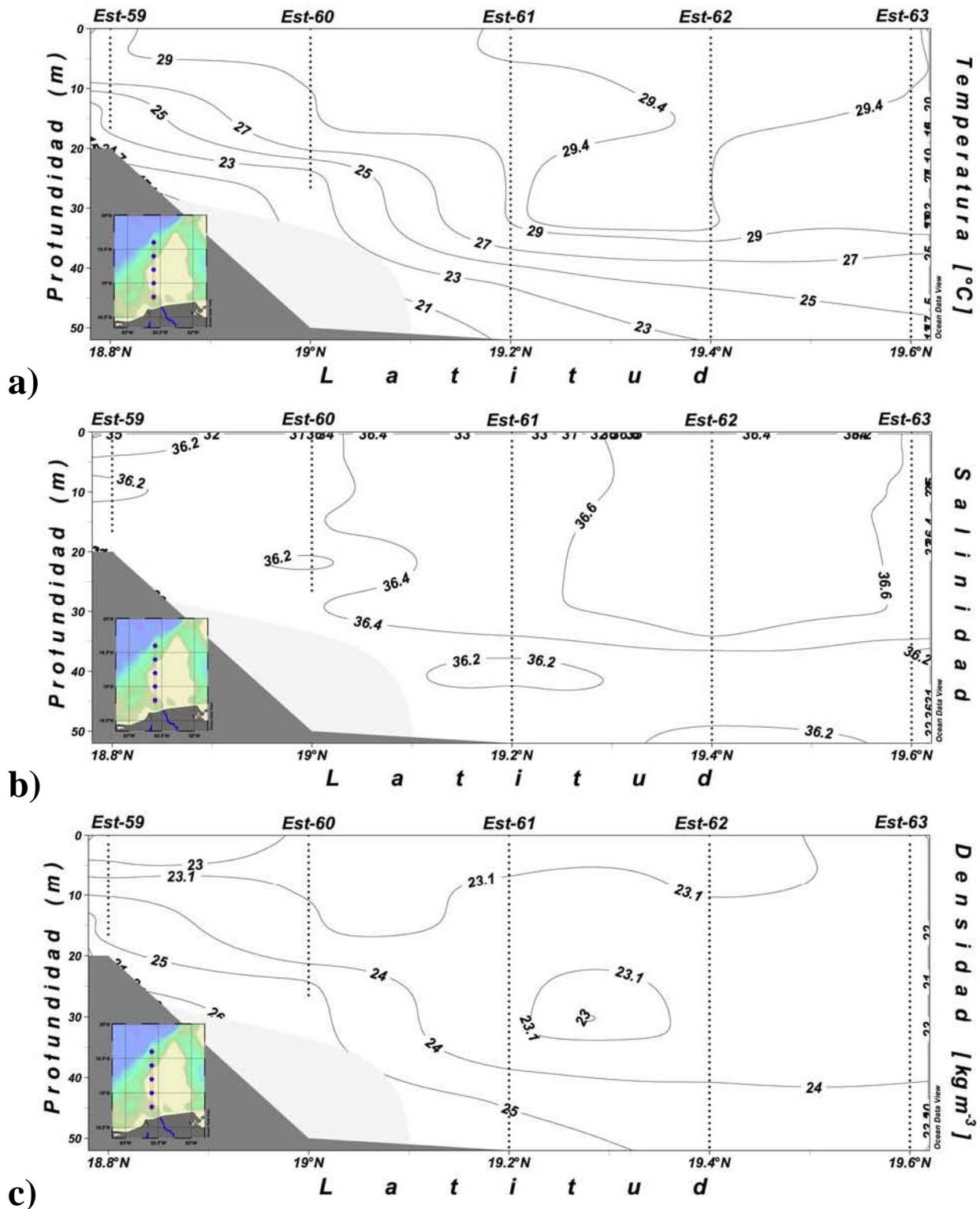


Figura 5.3. Patrón espacial de: a) Temperatura (°C), b) Salinidad, c) Densidad sigma-t (kg m⁻³), en los primeros 50 m de profundidad. Transecto hidrográfico entre las estaciones 59 (sur) – 63 (norte), a través de la plataforma continental en la Bahía de Campeche

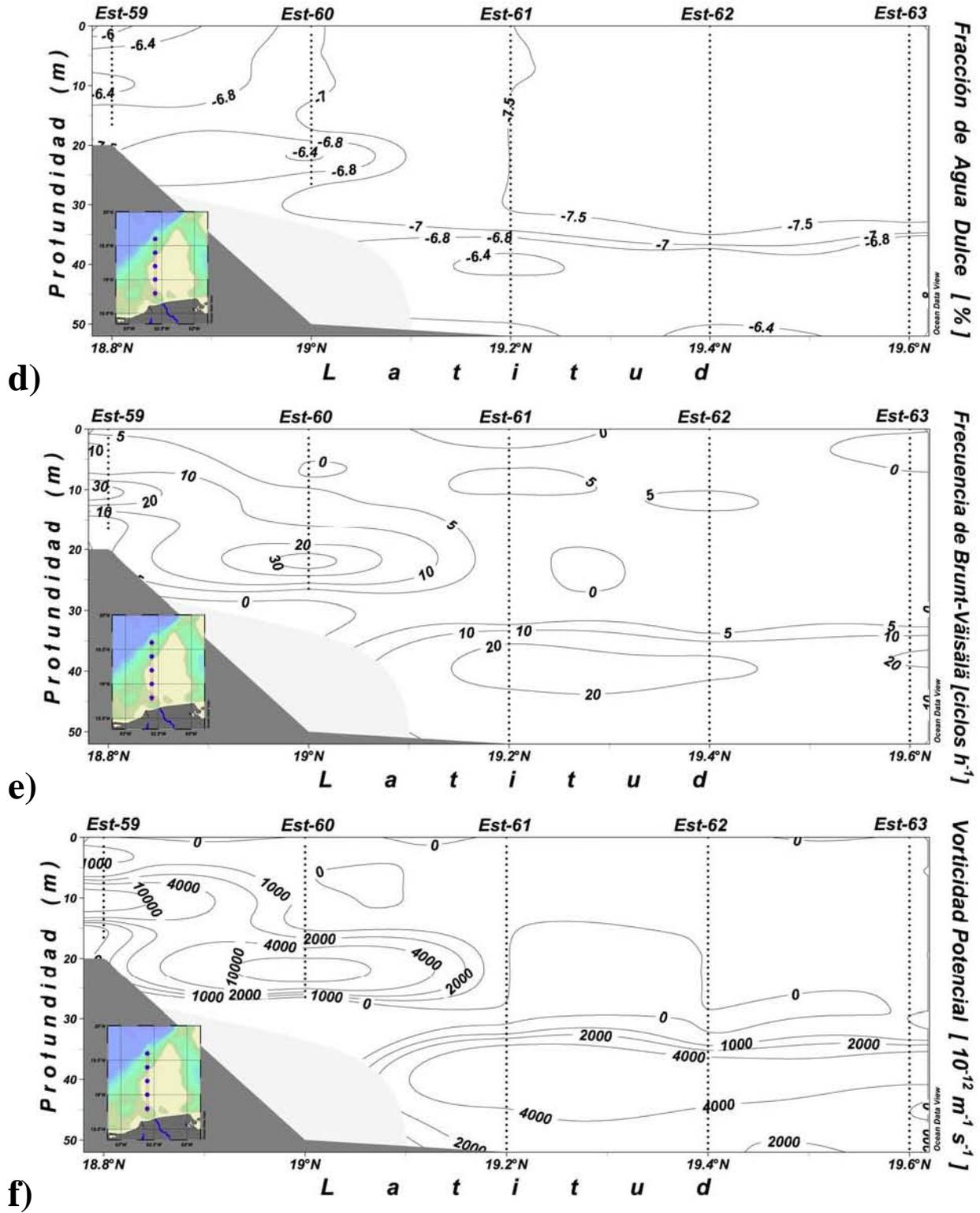


Figura 5.3. Patrón espacial de: d) Fracción de agua dulce (%), e) Frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos h⁻¹) y f) Vorticidad potencial (m⁻¹ s⁻¹), en los primeros 100 m de profundidad. Transecto entre las estaciones 59 (sur) – 63 (norte) a través de la plataforma continental en la Bahía de Campeche.

Transectos Oeste – Este

Transecto 71 oeste – 70 este

El transecto inició en la estación 71 (oeste) y terminó en la estación 70 (este) (fig. 5.4) abarcó sólo dos estaciones, fue el más cercano a la línea de costa y al oeste de la desembocadura del sistema de Ríos Grijalva-Usumacinta, la profundidad máxima de muestreo fue de 21.5 m.

La temperatura (fig. 5.4a) en general disminuyó de la superficie hacia el fondo y exhibió un patrón estratificado en toda la columna de agua. La isoterma de 23.5°C se curvó muy ligeramente hacia el fondo hasta intersectarlo. La salinidad (fig. 5.4b) disminuyó conforme aumentó la profundidad y la columna de agua estuvo bien estratificada. Se identificó agua menos salina delimitada por la isohalina de 34 y agua con salinidad entre 36.5 y 36.8 cerca del fondo. La densidad (fig. 5.4c), presentó un patrón estratificado de la columna de agua. Se observó agua con densidad inferior a 22 kg m⁻³ en la superficie y agua con densidad mayor a 25 kg m⁻³ cerca del fondo. La salinidad de 34 y densidad de 22 kg m⁻³ indicó la presencia de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta.

La fracción de agua dulce (fig. 5.4d), resaltó la forma convexa de las isopleas en las isolíneas de -6 a -4% que definieron la zona con agua menos densa, mientras que las isolíneas de -1% a 1% se curvaron hasta intersectar la superficie y definieron la pluma de los ríos Grijalva-Usumacinta, en la estación 70. La isoplea de -7% se asoció a agua más densa y salina cerca del fondo.

La frecuencia de Brunt-Väisälä (fig. 5.4e) presentó valores mayores a 30 ciclos/hora, asociados a las isopícnas de 22 a 24 kg m⁻³, que definieron la base de la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta. En general la boyancia disminuyó con la profundidad, la isoplea de 10 ciclos/hora, indicó la oscilación de la isohalina de 36.

La vorticidad potencial (fig. 5.4f) mostró valores mayores a $20\,000 \times 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ en la base de la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta. Valores de vorticidad potencial entre 10 000 y $20\,000 \times 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ indicaron la presencia de pequeños giros ciclónicos, asociados al agua mezclada. En general la vorticidad potencial disminuyó con la profundidad.

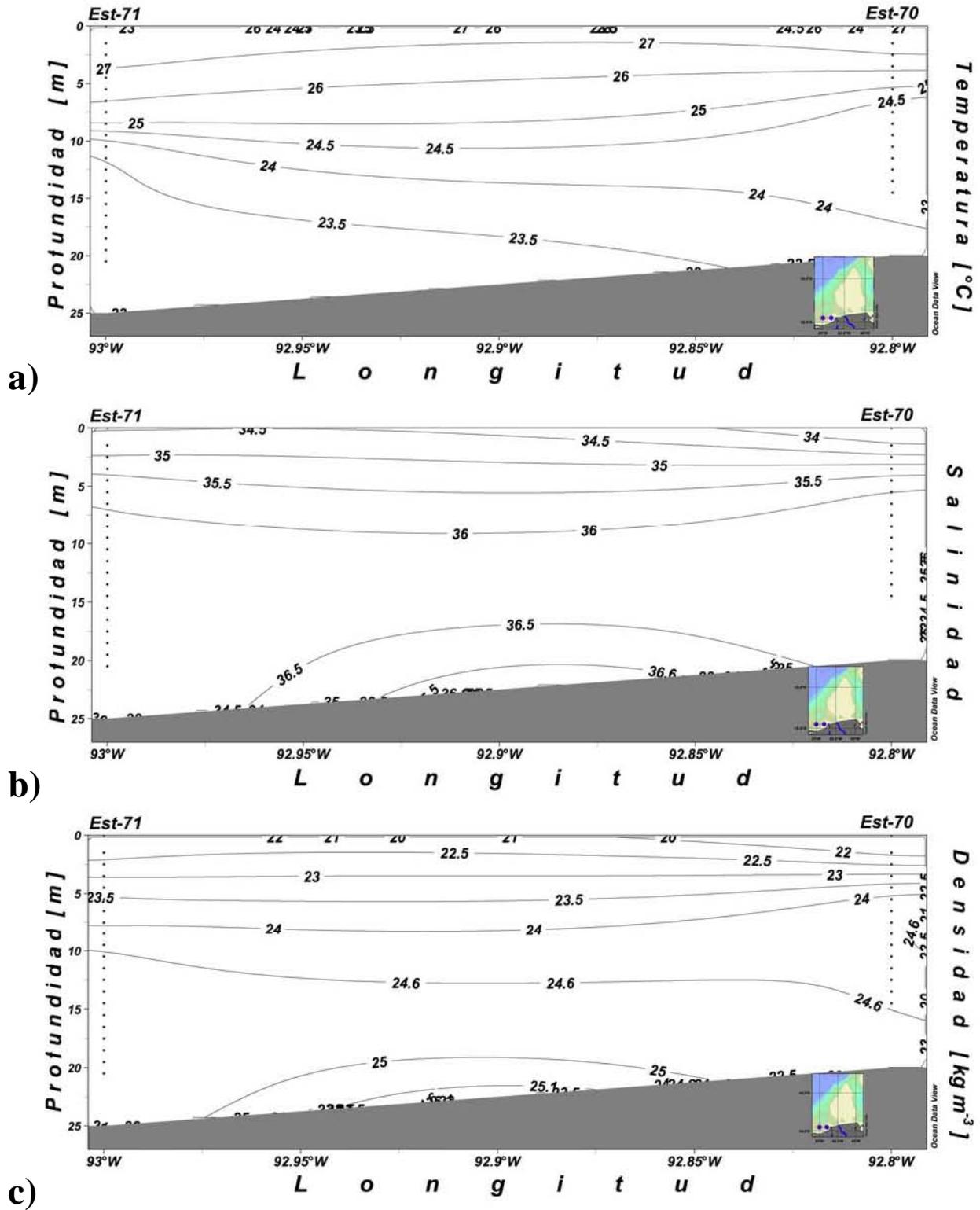


Figura 5.4. Patrón espacial de: a) Temperatura (°C), b) Salinidad, c) Densidad sigma-t (kg m⁻³). Transecto hidrográfico entre las estaciones 71 (oeste) – 70 (este) a lo largo de la plataforma continental paralelo a la costa, en la Bahía de Campeche.

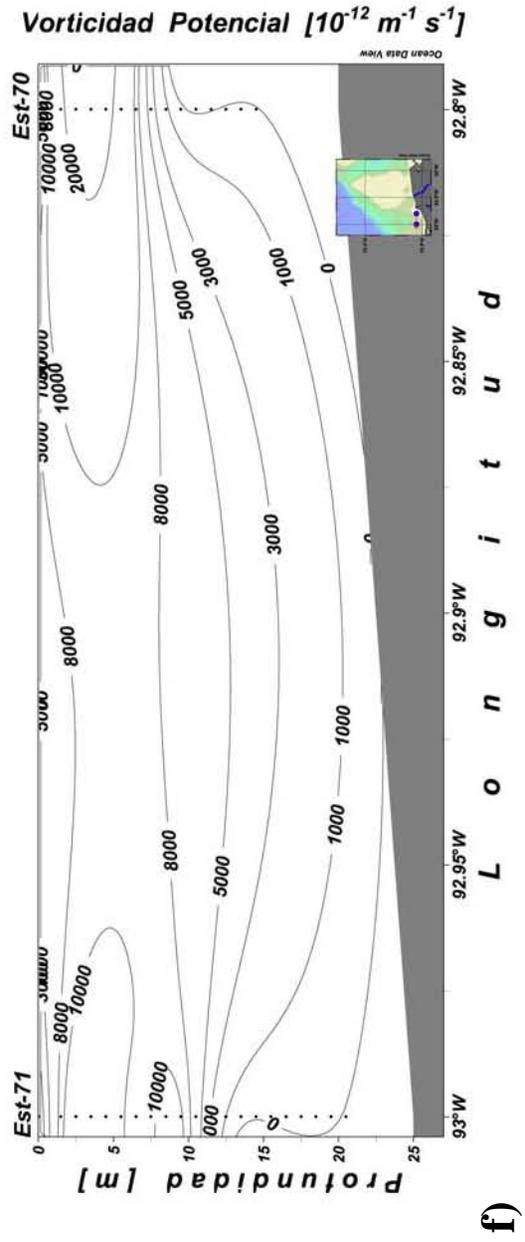
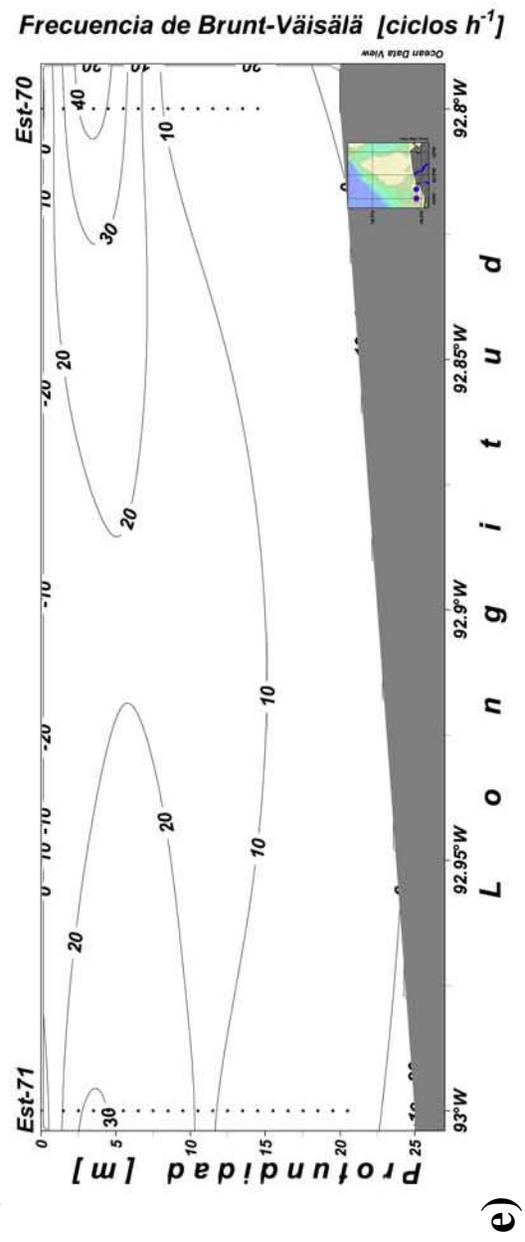
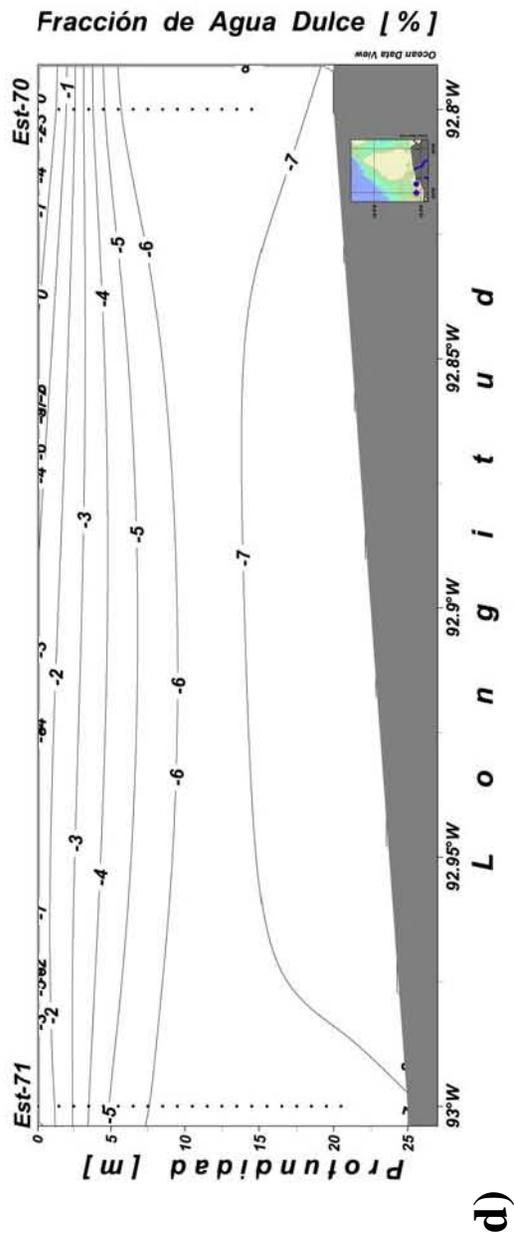


Figura 5.4. Patrón espacial de: d) Fracción de agua dulce (%), e) Frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos h⁻¹) y f) Vorticidad potencial ($\text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$). Transecto hidrográfico entre las estaciones 71 (oeste) – 70 (este) a lo largo de la plataforma continental paralelo a la costa, en la Bahía de Campeche.

Transecto 72 oeste – 46 este

El transecto inició en la estación 72 (oeste) y terminó en la estación 46 (este) (fig. 5.5), quasi-paralelo a la línea de costa, la profundidad máxima de muestreo fue de 36.5 m.

La temperatura (fig. 5.5a), disminuyó de este a oeste y con la profundidad. Se observó agua cálida delimitada por la isoterma de 28° C, e indicó la presencia de un frente y agua fría cerca del fondo definida por las isotermas entre 23° y 20° C, las cuales se curvaron hasta intersectar el fondo.

La salinidad (fig. 5.5b) inferior a 34, indicó la presencia de la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta, delimitada por la isohalina 35. La isohalina de 36.2 sugirió que agua mezclada fluyo hacia el este y oeste, entre los 10 y 20 m de profundidad.

La densidad (fig. 5.5c) inferior a 22 kg m⁻³, confirmó la ubicación de la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta, definida por las isopicnas de 22.5 y 23 kg m⁻³, las cuales se curvaron hasta intersectar la superficie del mar. Sin embargo, la isopicna de 23 kg m⁻³, también indicó la presencia de agua mezclada, en donde se observó agua menos salina. Se observó agua más densa cerca del fondo, delimitada por la isopicna de 25 kg m⁻³, la cual se curvó hasta intersectar el fondo, lo cual indicó la presencia del frente topográfico.

La fracción de agua dulce (fig. 5.5d) reafirmó la ubicación de la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta, caracterizada por la isopleta de 0% y delimitada por las isopleta de -5% y -6 %, hasta los 10 m de profundidad. Mientras que el agua mezclada producto de la interacción del agua del golfo y la pluma, quedó definida por las isopletas de -6 a -6.8 %.

La frecuencia de Brunt-Väisälä (fig. 5.5e) con valores mayores a 50 ciclos/hora, sugirió una fuerte interacción entre el fondo y agua mezclada. Oscilaciones entre 30 a 40 ciclos/hora se observaron en la base de la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta y oscilaciones de 10 ciclos/hora delimitaron la zona de agua mezclada. La isopleta de 0 ciclo/hora delimitó zonas con boyancia negativa lo que indicó inestabilidad.

La vorticidad potencial (fig. 5.5f) entre 5 000 y 20 000 × 10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹, delimitó la zona de agua mezclada, mientras que la isopleta de 20 000 × 10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹ se asoció a la base de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta. Vorticidad potencial mayor a 40 000 × 10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹, se observó donde se identificó agua más densa cerca del fondo y reforzó la idea de una corriente de turbidez.

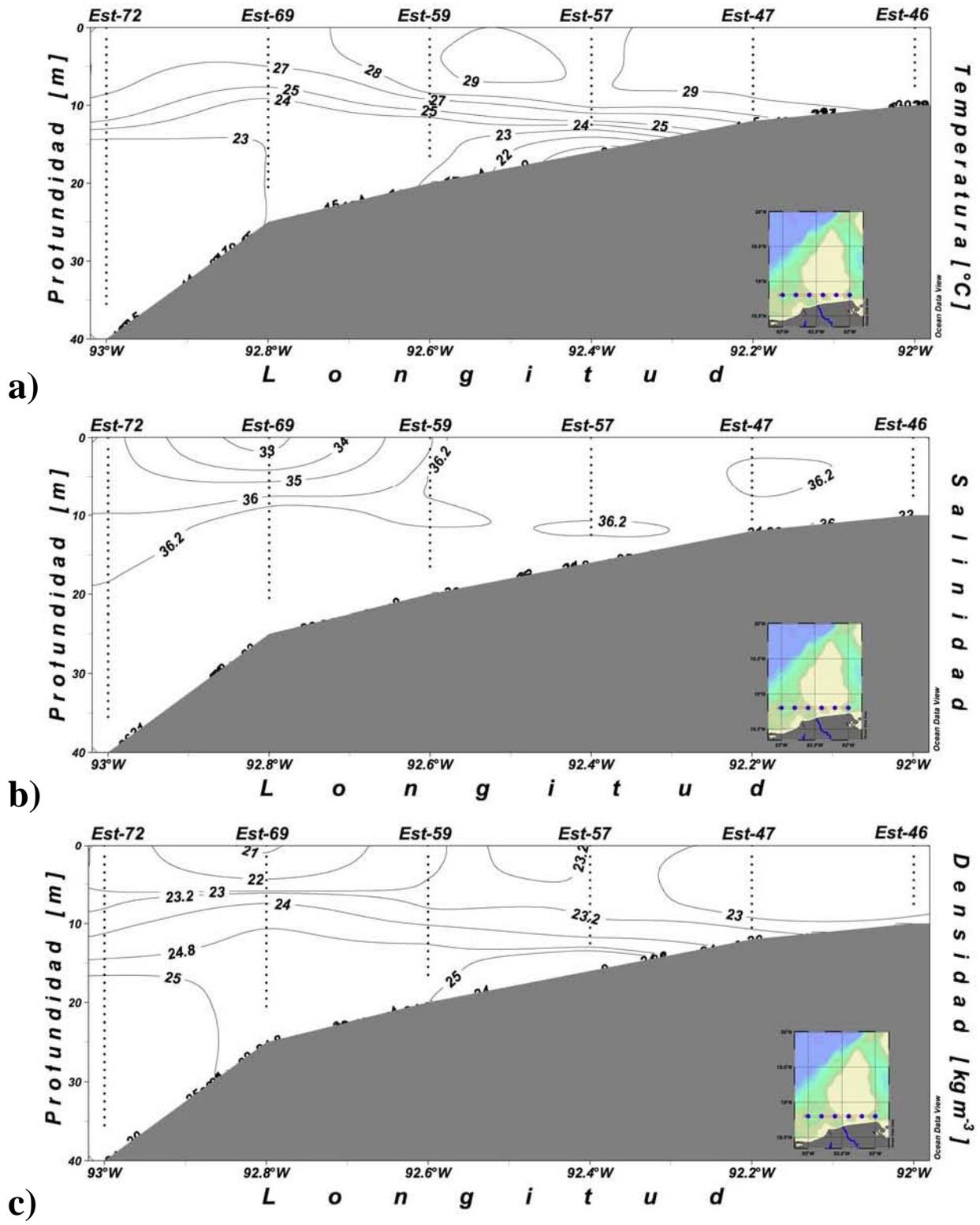


Figura 5.5. Patrón espacial de: a) Temperatura (°C), b) Salinidad, c) Densidad sigma-t (kg m⁻³). Transecto hidrográfico entre las estaciones 72 (oeste) – 46 (este) a lo largo de la plataforma continental paralelo a la costa, en la Bahía de Campeche.

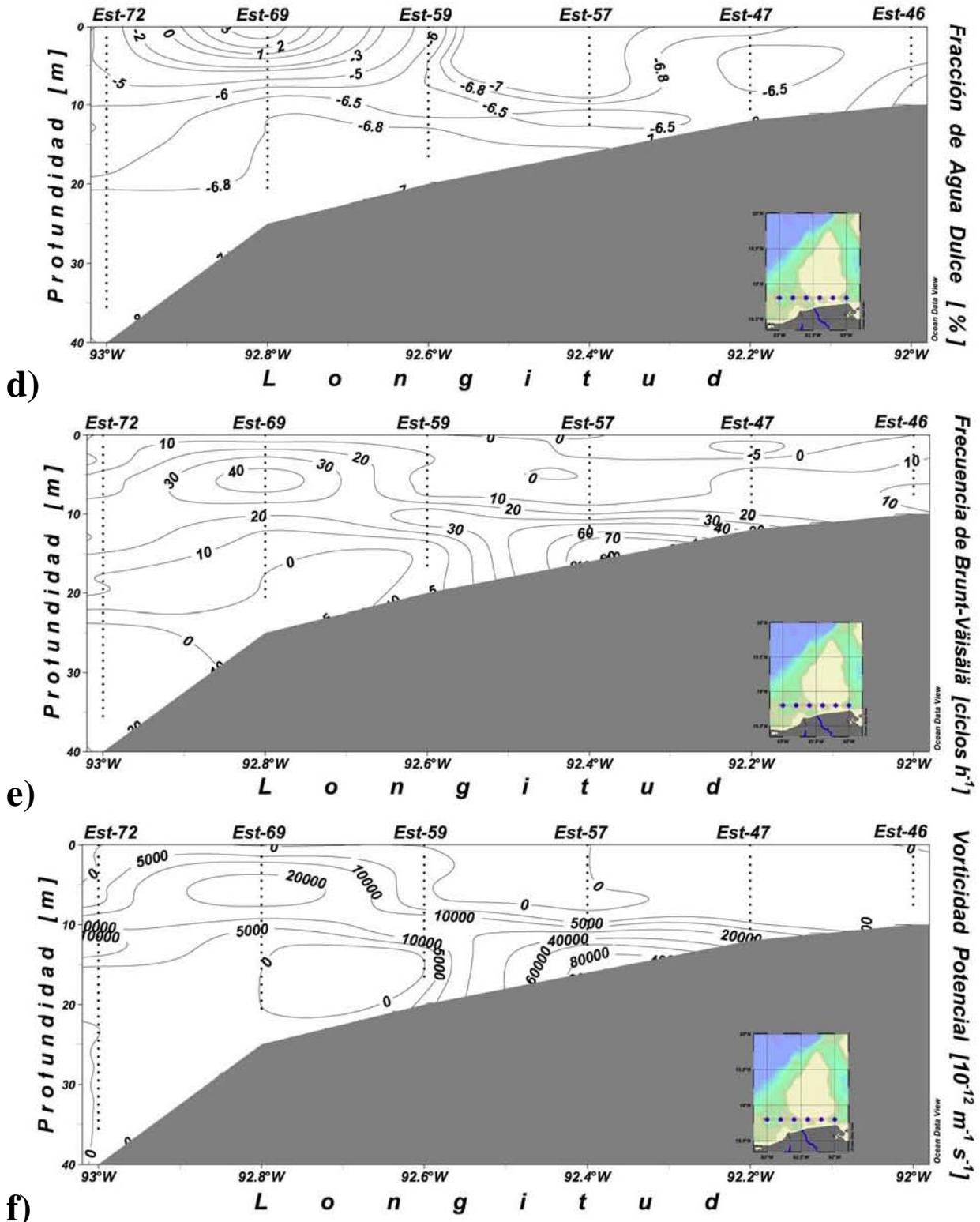


Figura 5.5. Patrón espacial de: Fracción de agua dulce (%), e) Frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos h^{-1}) y f) Vorticidad potencial ($m^{-1} s^{-1}$). Transecto hidrográfico entre las estaciones 72 (oeste) – 46 (este) a lo largo de la plataforma continental paralelo a la costa, en la Bahía de Campeche.

Transecto 73 oeste – 45 este

En el transecto que inicio en la estación 73 (oeste) y terminó en la estación 45 (este) (fig. 5.6), quasi-paralelo a la línea de costa, la profundidad máxima de muestreo fue de 72.2 m.

En este transecto la temperatura (fig. 5.6a) muestra un patrón estratificado y en general disminuyó con la profundidad. Se observó que la isoterma de 29° C se curvó hacia la superficie hasta intersectarla, y la isoterma de 22° C se curvó hacia el fondo sin intersecarlo. Agua con temperatura inferior a 20° C se observó cerca del fondo. La salinidad (fig. 5.6b), inferior a 35 indicó la presencia de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta, delimitada por la isohalina de 36 y agua mezclada se identificó entre las isohalina de 36 y 36.4. La densidad (fig. 5.6c), aumentó conforme la profundidad aumentó y presentó un patrón estratificado. Se identificó agua con densidad inferior a 22 kg m⁻³, que se curvó hasta intersectar la superficie lo que confirmó la presencia de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta delimitada por las isopicnas de 22.5 y 23 kg m⁻³. Las isopicnas de 25 kg m⁻³ y 25.3 kg m⁻³ se comportaron igual que las isotermas de 22°C y 23°C, en la misma zona y profundidad. Agua con densidad superior a 26 kg m⁻³, se identificó cerca del fondo en la misma zona donde se observó agua fría.

La fracción de agua dulce (fig. 5.6d) confirmó la presencia de la pluma del sistema de los ríos Grijalva-Usumacinta, delimitada por la isopleta de -6.3%. El agua mezclada se distribuyó entre las isopletas -6.3 a -7%. La isopleta de -7% delimitó al agua más salina y cálida cerca de la superficie.

La frecuencia de Brunt-Väisälä (fig. 5.6e), dividió a la sección en dos capas. Se observaron frecuencias entre 10 y 20 ciclos/hora, asociadas a la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta. El agua mezclada se caracterizó con frecuencias entre 10 y 30 ciclos/hora. Frecuencias mayores a 40 ciclos/hora se observaron en la zona donde se identificó agua fría y densa, lo cual sugiere la presencia de una corriente de turbidez. Fue visible una zona con frecuencias entre 0 y -4 ciclos/hora, esto indicó inestabilidad en la misma zona y profundidad en que las isotermas de 22 y 23 °C e isopicnas de 25 y 25.3 kg m⁻³ se curvaron.

Vorticidad potencial (fig. 5.6f) entre 5 000 y 10 000 × 10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹, se asoció a la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta. Valores entre 5000 y 20000 × 10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹ de vorticidad

potencial indicaron la distribución del agua mezclada. Se observó vorticidad potencial superior a $20\,000 \times 10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, en la zona donde se identificó agua fría y densa cerca del fondo, esto refuerza la idea de una corriente de turbidez. La isopleta de $10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ de vorticidad potencial, delimitó zonas con probable vorticidad negativa.

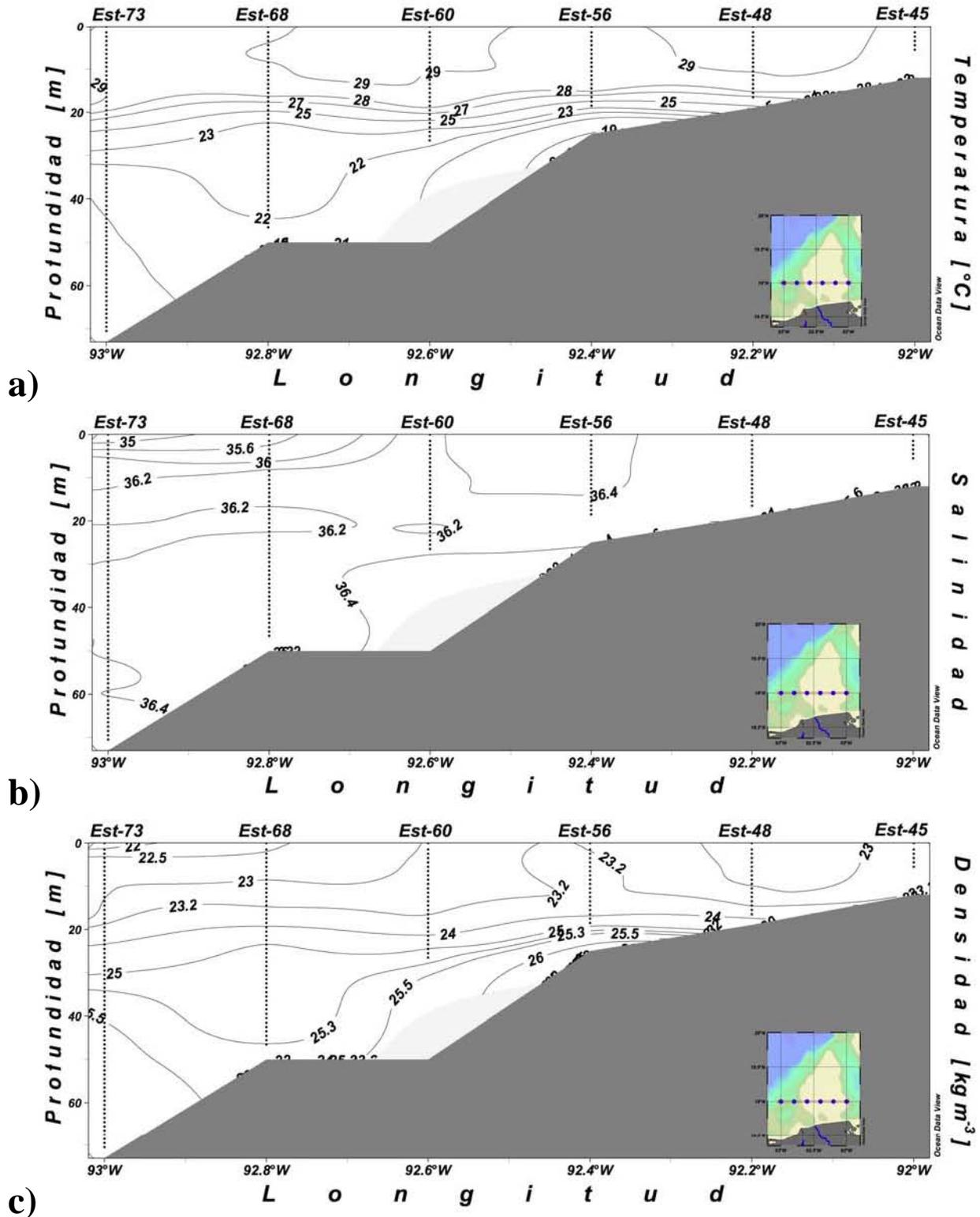


Figura 5.6. Patrón espacial de: a) Temperatura (°C), b) Salinidad, c) Densidad sigma-t (kg m⁻³). Transecto hidrográfico entre las estaciones 73 (oeste) – 45 (este) a lo largo de la plataforma continental paralelo a la costa, en la Bahía de Campeche.

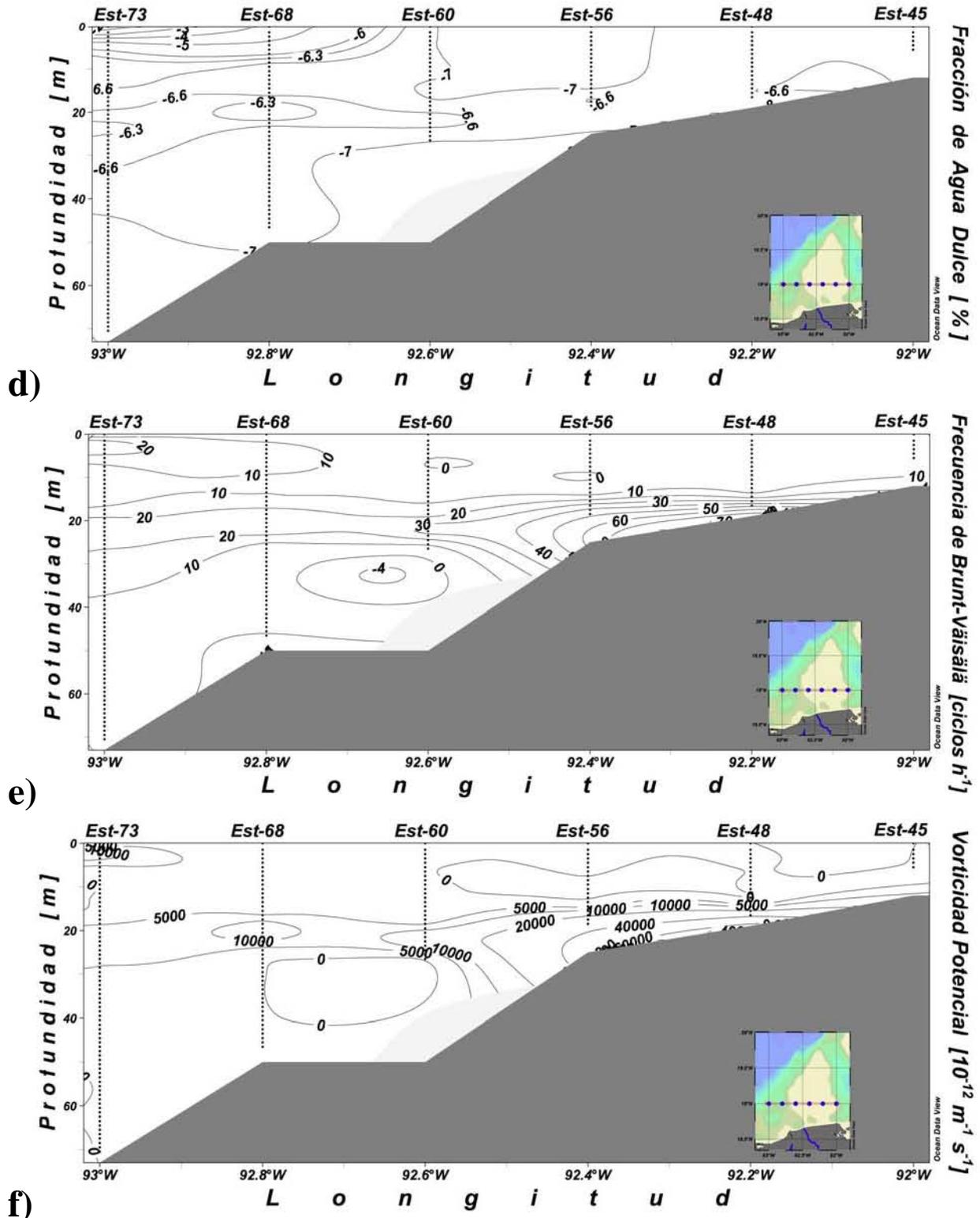


Figura 5.6. Patrón espacial de: d) Fracción de agua dulce (%), e) Frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos h⁻¹) y f) Vorticidad potencial (m⁻¹ s⁻¹). Transecto hidrográfico entre las estaciones 73 (oeste) – 45 (este) a lo largo de la plataforma continental paralelo a la costa, en la Bahía de Campeche.

V.2. Estructura Físico – Biológica

La columna de agua como hábitat puede ser definido por su temperatura, salinidad y densidad, los cuales tienen implicaciones fisiológicas para los organismos y definen los tipos de agua e indican su origen y probable destino (Tomczak, 1999; Connell y Guillarders, 2007).

Los datos permitieron definir 5 tipos de agua como hábitat del zooplancton y larvas de pez, las cuales llamaremos (Fig. 5.7 a, b, c):

1. Agua del Banco de Campeche (CBW)
2. Agua de la Pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta (GUPW)
3. Agua Mezclada del Frente por Densidad (FMW)
4. Agua del Frente Topográfico (TFW)
5. Agua similar a la surgencia de Yucatán (YUW)

Los valores de temperatura, salinidad y densidad que caracterizaron a cada uno de estos tipos de agua y hábitats presentes en el área de estudio, se definen en la tabla (5.1) y se indican en el diagrama T-S (Fig. 5.7b), por un rectángulo y su acrónimo, la densidad se reportó con la misma escala usada en los transectos para facilitar comparaciones. El agua tipo similar a la surgencia de Yucatán no fue usada en el presente estudio y no se reportaron sus características.

Tabla 5.1. Definición de hábitats presentes en la zona de estudio

Hábitat (tipo de agua)	Acrónimo	Salinidad	Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)
<i>Agua del Banco de Campeche</i>	<i>CBW</i>	36.3 a 36.4	> 29	23 a 23.4
<i>Agua de Pluma del Sistema de ríos Grijalva-Usumacinta</i>	<i>GUPW</i>	32 a 36	25 a 28	20 a 24.6
<i>Agua Mezclada del Frente por Densidad</i>	<i>FMW</i>	35 a 36.5	23 a 29	22 a 24.5
<i>Agua del Frente Topográfico</i>	<i>TFW</i>	36 a 36.3	20 a 23	24.5 a 25.5

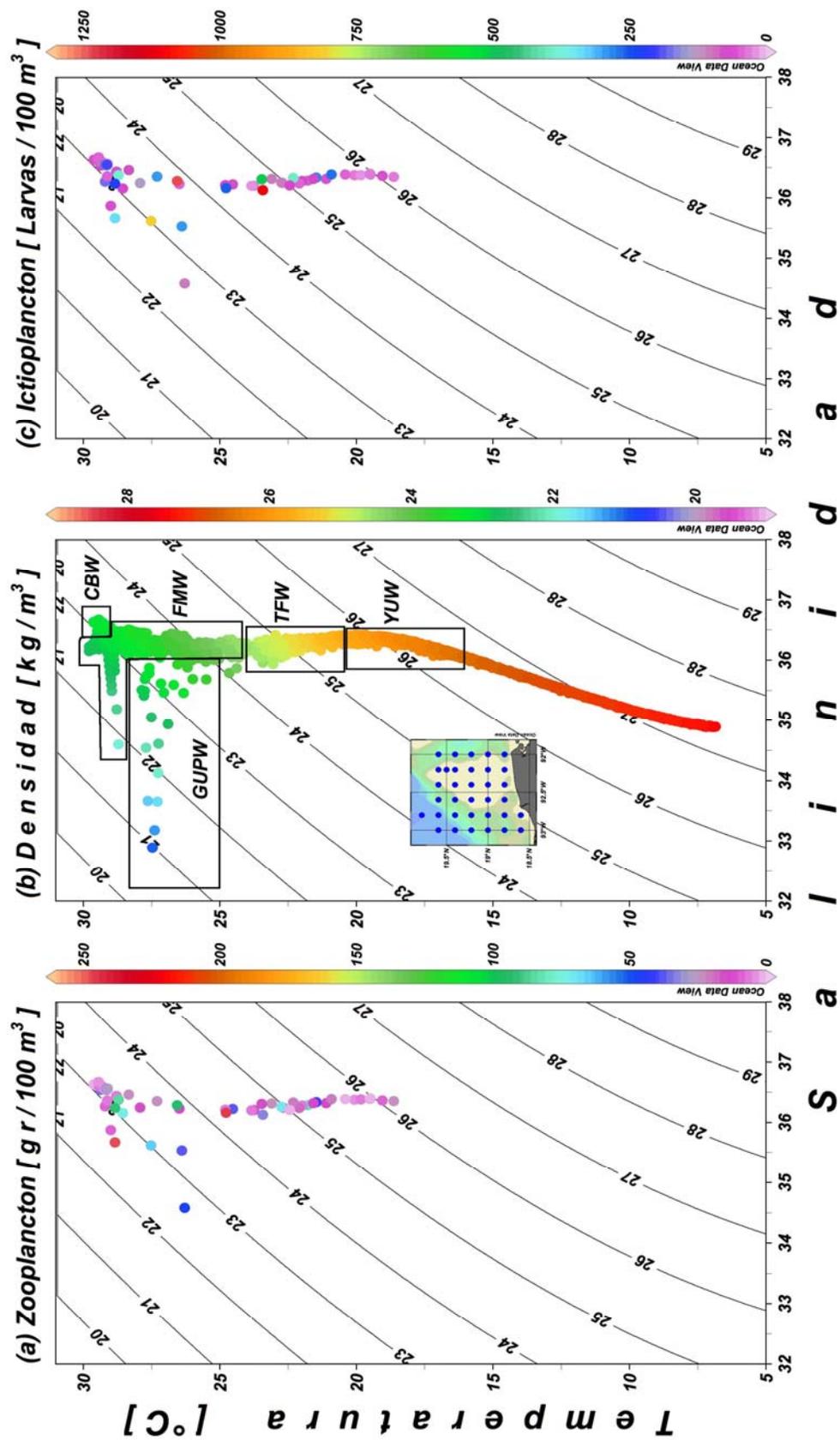
Hábitats y Abundancia de Zooplancton e Ictioplancton

Los hábitats Agua de la Pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta (GUPW), Agua Mezclada del Frente por Densidad (FMW) y Agua del Frente Topográfico (TFW) presentaron las máximas abundancias de ictioplancton (fig. 5.7c; tabla 5.2) y biomasa de zooplancton (fig. 5.7a); así como, los máximos de frecuencia de Brunt-Väisälä (fig. 5.8a) y vorticidad potencial (fig. 5.8c).

En la primera capa (0 a 10 m) centrada a 5 m, los máximos de abundancia de zooplancton e ictioplancton se observaron en los hábitats GUPW y FMW (figs. 5.9a y 5.10a; tabla 5.2). En la segunda capa (10 a 20 m) centrada a 15 m, los máximos de abundancia de zooplancton e ictioplancton se presentaron en el hábitat FMW (figs. 5.9b y 5.10b; tabla 5.2). En la tercera capa (20 a 30 m) centrada a 25 m, los máximos de abundancia de zooplancton e ictioplancton se observaron en los hábitats FMW y TFW (figs. 5.9c y 5.10c; tabla 5.2).

Tabla 5.2. Abundancia de biomasa del zooplancton (g/100m³) e ictioplancton (larvas de pez/100m³), con relación a la estación, capa (profundidad) y hábitat, para toda el área de estudio.

Estación	Capa 1: 0 a 10 m de profundidad			Capa 2: 10 a 20 m de profundidad			Capa 3: 20 a 30 m de profundidad		
	Zooplancton (g/100 m ³)	Ictioplancton (larvas/100 m ³)	Hábitat acrónimo	Zooplancton (g/100 m ³)	Ictioplancton (larvas/100 m ³)	Hábitat acrónimo	Zooplancton (g/100 m ³)	Ictioplancton (larvas/100 m ³)	Hábitat acrónimo
48	8.8	178	FMW	sd	sd	sd	sd	sd	sd
49	23.4	77	CBW	12.0	44	FMW	sd	sd	sd
50	7.8	89	FMW	12.0	220	CBW	6.4	113	CBW
54	1.3	3	CBW	8.6	20	CBW	11.8	326	CBW
55	10.6	241	CBW	25.4	307	CBW-FMW	92.8	1238	FMW
56	5.4	50	CBW	23.5	285	FMW	sd	sd	sd
59	73.0	69	FMW	sd	sd	sd	sd	sd	sd
60	5.1	46	FMW	84.4	385	FMW-CBW	sd	sd	sd
61	34.1	70	CBW	13.0	10	CBW	2.1	152	CBW
62	1.3	75	CBW	1.8	38	CBW	1.6	222	CBW
63	5.0	37	CBW	9.1	48	CBW	4.0	88	CBW
65	5.6	125	CBW	4.0	92	CBW	6.2	100	CBW
66	4.2	51	CBW	2.8	37	CBW	4.5	37	CBW
67	3.9	172	CBW	34.0	10	CBW	21.8	31	CBW
68	7.6	51	FMW	14.8	133	FMW	68.8	104	TFW
69	47.0	104	GUPW	22.7	98	FMW-TFW	sd	sd	sd
71	36.1	286	GUPW	16.4	504	FMW	sd	sd	sd
72	65.8	811	GUPW	31.3	1111	FMW	19.6	403	TFW
73	246.4	342	FMW	91.3	221	FMW	245.7	258	FMW
74	19.2	129	CBW	32.7	117	CBW	26.2	190	CBW



S a l i n i d a d

Figura 5.7. Sobreposición de: (a) Biomasa de zooplankton (gr/100 m³, escala en color a la derecha); (b) Densidad sigma-t (kg/m³, escala en color a la derecha) y Hábitats: CBW, GUPW, FMW, TFW (indicadas por los rectángulos). (c) Abundancia de ictioplankton (número de larvas de peces/100 m³, escala en color a la derecha). Se muestran todos los datos.

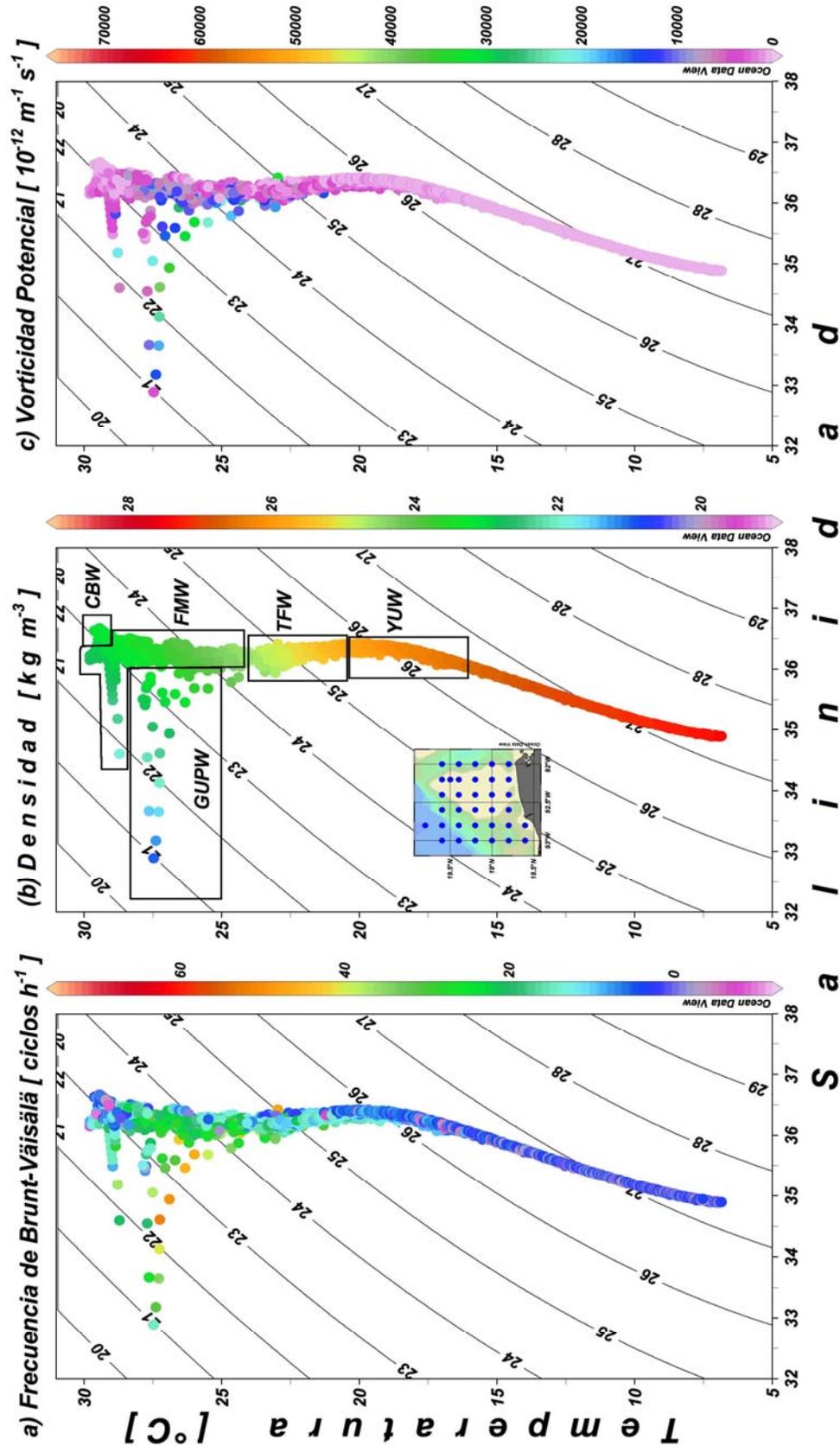


Figura 5.8. Sobreposición de: (a) Frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclos h⁻¹), escala en color a la derecha); (b) Densidad sigma-t (kg/m³, escala en color a la derecha) y Hábitats: CBW, GUPW, FMW, TFW (indicadas por los rectángulos). (c) Vorticidad Potencial (10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹, escala en color a la derecha). Se muestran todos los datos.

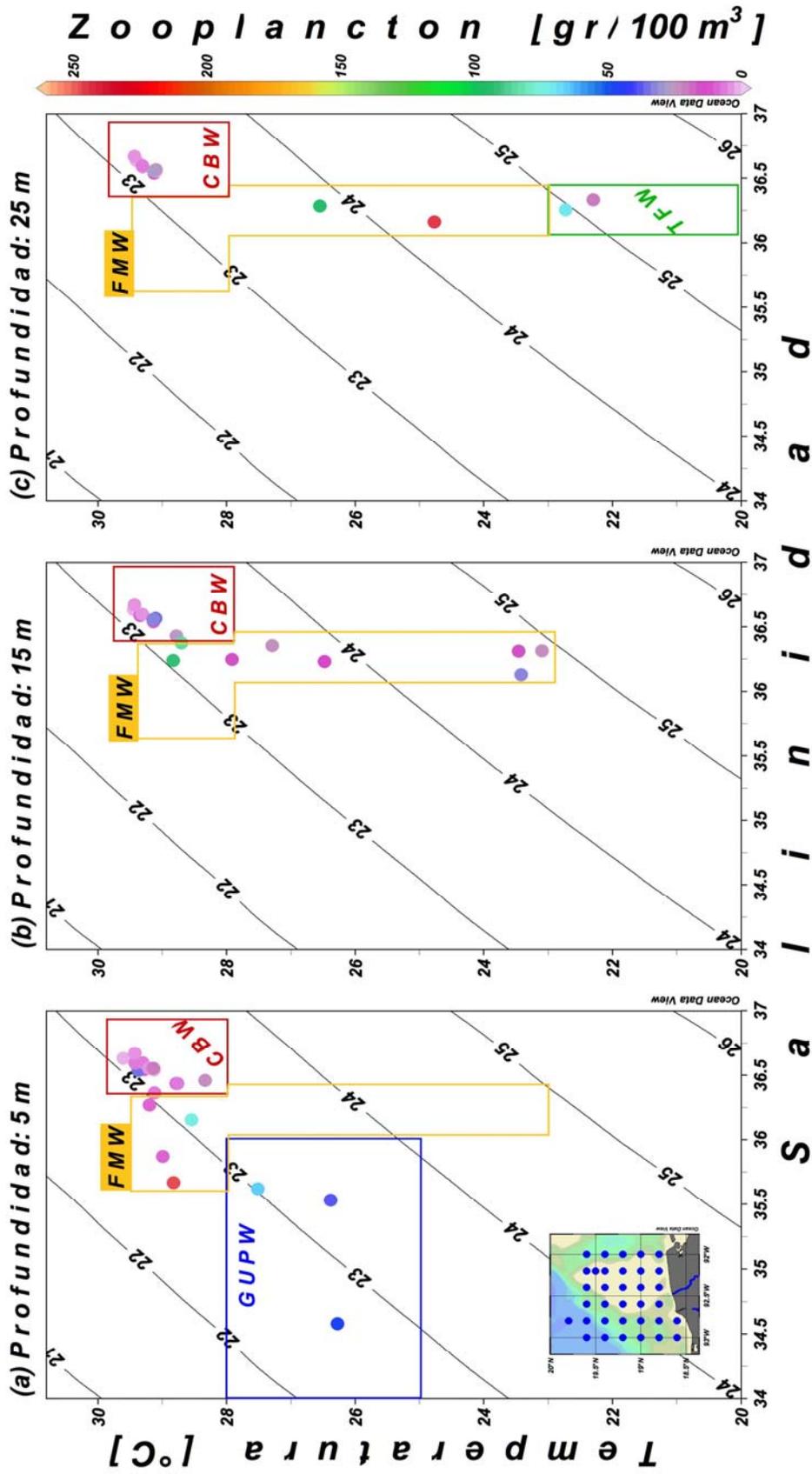


Figura 5.9. Sobreposición de la Biomasa de zooplancton (gr/100 m³, escala en color a la extrema derecha); (a) Capa 1 de 0 a 10 metros de profundidad centrada a 5 m de profundidad; (b) Capa 2 de 10 a 20 metros de profundidad centrada a 15 m de profundidad; (c) Capa 3 de 20 a 30 metros de profundidad centrada a 15 m de profundidad. Hábitats: GUPW, CBW, FMW TFW

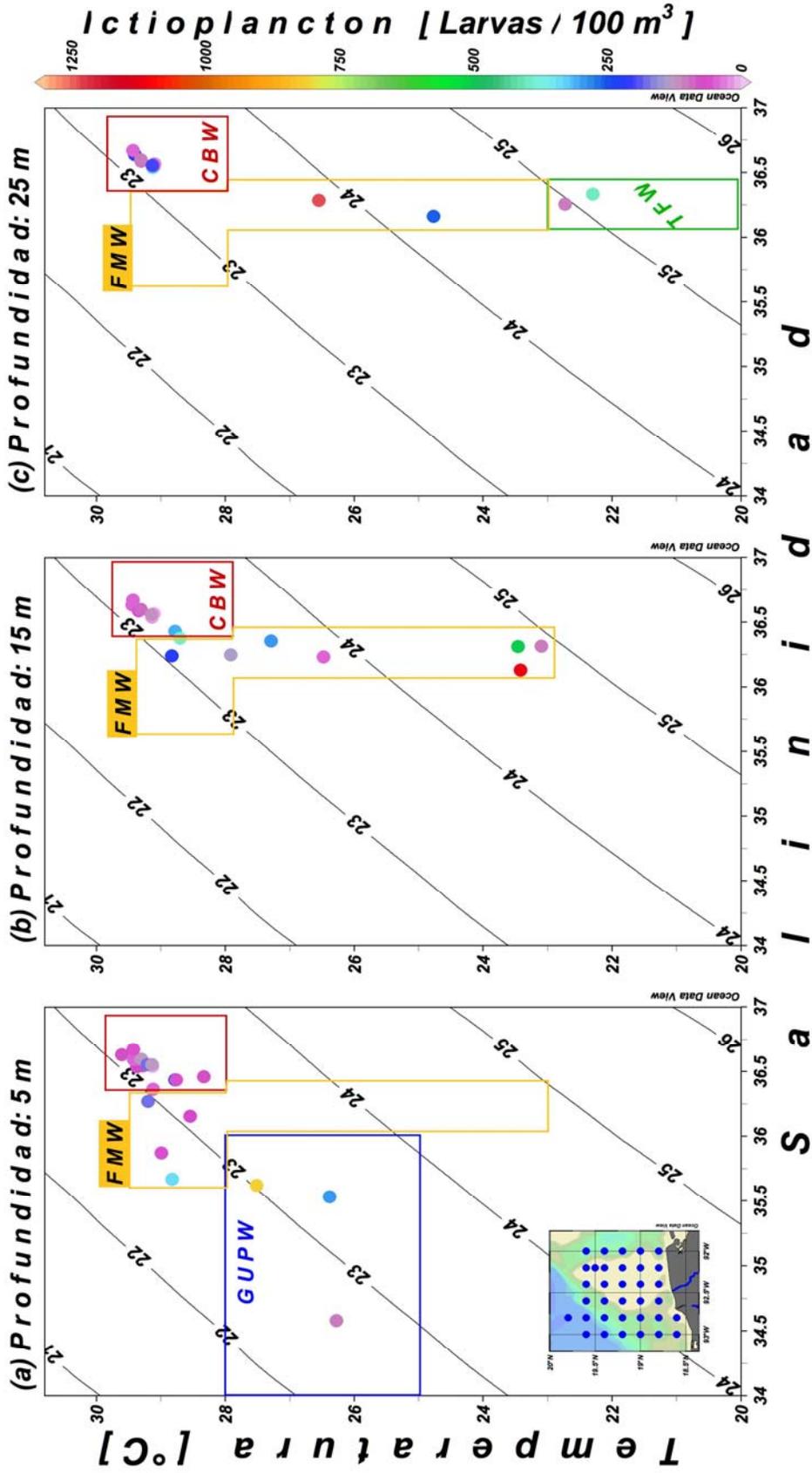


Figura 5.10. Sobreposición de la abundancia de ictioplanctón (número de larvas /100 m³, escala en color a la extrema derecha); (a) Capa 1 de 0 a 10 metros de profundidad centrada a 5 m de profundidad; (b) Capa 2 de 10 a 20 metros de profundidad centrada a 15 m de profundidad; (c) Capa 3 de 20 a 30 metros de profundidad centrada a 25 m de profundidad. Hábitats: GUPW, CBW, FMW, TFW.

Biogeografía: hábitats, zooplancton e ictioplancton

En las figuras 5.11 a 5.22 se presenta la distribución espacial de la abundancia de zooplancton (biomasa) e ictioplancton (número de larvas de pez) dentro de los hábitats con relación a la temperatura, salinidad, densidad, frecuencia de Brunt-Väisälä y vorticidad potencial, en los primeros 30 m de profundidad.

En la primera capa 1 (0 a 10 m) centrada a 5 m de profundidad se identificaron tres hábitat, su ubicación geográfica se observa en las figuras 5.11 a 5.14 (ver tabla 5.2). El hábitat Agua del Banco de Campeche (CBW), presentó una biomasa de zooplancton promedio de 10.4 ± 10.2 g/100 m³, con mínima de 1.3 g/100 m³ (estación 54) y máxima de 34.1 g/100 m³ (estación 61) (figs. 5.11 y 5.12). La abundancia de ictioplancton promedio fue de 93 ± 65 larvas/100 m³, con mínima de 3 larvas/100 m³ (estación 54) y máxima de 241 larvas/100 m³ (estación 55) (fig. 5.13 y 5.14). En el hábitat Agua de la Pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta (GUPW), se observó una biomasa de zooplancton promedio de 49.7 ± 15 g/100 m³, con mínima 36.1 g/100 m³ (estación 71) y máxima de 65.8 g/100 m³ (estación 72) (figs. 5.11 y 5.12). La abundancia de ictioplancton promedio fue de 400 ± 367 larvas/100 m³, mínima 104 larvas/100 m³ (estación 69) y máxima 811 larvas/100 m³ (estación 72) (figs. 5.13 y 5.14) y, en el hábitat Agua Mezclada del Frente por Densidad (FMW), se registró una biomasa de zooplancton promedio de 68.2 ± 103.2 g/100 m³, con mínima 5.1 g/100 m³ (estación 60) y máxima 246.4 g/100 m³ (estación 73) (figs. 5.11 y 5.12). La abundancia de ictioplancton promedio fue de 137 ± 126 larvas/100 m³, mínima 46 larvas/100 m³ (estación 60) y máxima 342 larvas/100 m³ (estación 73) (figs. 5.13 y 5.14).

La máxima abundancia registrada de zooplancton fue de 246.4 g/100 m³ (estación 73) y de ictioplancton fue de 811 larvas/100 m³ (estación 72), estas se asociaron a gradientes en todos los parámetros físicos, en los tres hábitat (figs. 5.11 a 5.14). El promedio mayor de la abundancia de zooplancton e ictioplancton se registró en el hábitat FMW.

En la segunda capa (10 a 20 m), centrada a 15 m de profundidad, se observaron dos hábitats bien definidos, su ubicación geográfica se observa en las figuras 5.15 a 5.18 (ver tabla 5.2).

En el hábitat Agua del Banco de Campeche (CBW), se registró una biomasa promedió de zooplancton fue de 14.4 ± 12.1 g/100 m³, con mínima de 1.8 g/100 m³ (estación 62) y máxima 34.0 g/100 m³ (estación 67) (figs. 5.15 y 5.16). La abundancia promedio de ictioplancton fue de

90 \pm 100 larvas/100 m³, el mínimo 10 larvas/100 m³ (estación 61) y máximo 307 larvas/100 m³ (estación 55) (figs. 5.17 y 5.18). El hábitat Agua Mezclada del Frente por Densidad (FMW), presentó una biomasa promedio de zooplancton 37.1 \pm 32 g/100 m³, con mínima 12.0 g/100 m³ (estación 49) y máxima 91.3 g/100 m³ (estación 73) (figs. 5.15 y 5.16). La abundancia promedio de ictioplancton fue de 348 \pm 344 larvas/100 m³, mínima de 44 larvas/100 m³ (estación 49) máxima de 1111 larvas/100 m³ (estación 72) (figs. 5.17 y 5.18).

Las mayores abundancias de zooplancton e ictioplancton se presentaron en el hábitat FMW, asociadas a gradientes en todos los parámetros físico (figs. 5.15 a 5.18).

En la tercera capa (20 a 30 m), centrada a 25 m de profundidad, se identificaron tres hábitats y su ubicación geográfica se observa en las figuras 5.19 a 5.22 (ver tabla 5.2).

En el hábitat Agua del Banco de Campeche (CBW), se observó una biomasa promedio de zooplancton fue de 9.4 \pm 8.9 gr/100 m³, con mínima de 1.6 gr/100 m³ (estación 62) y máxima de 26.2 gr/100 m³ (estación 74) (figs. 5.19 y 5.20). La abundancia promedio de ictioplancton fue de 140 \pm 94 larvas/100 m³, con mínima de 31 larvas/100 m³ (estación 67) y máxima de 326 larvas/100 m³ (estación 54) (figs. 5.21 y 5.22). El Hábitat Agua Mezclada del Frente por Densidad (FMW), presentó una biomasa promedio de zooplancton fue de 169.2 \pm 108.1 gr/100 m³, con mínima de 92.8 gr/100 m³ (estación 55) y máxima de 245.7 gr/100 m³ (estación 73) (figs. 5.19 y 5.20). La abundancia promedio de ictioplancton fue de 748 \pm 693 larvas/100 m³, con mínima de 258 larvas/100 m³ (estación 73) y máxima de 1238 larvas/100 m³ (estación 55) (figs. 5.21 y 5.22). En el Hábitat Agua del Frente Topográfico (TFW), se registró una biomasa promedio de zooplancton de 44.2 \pm 34.8 gr/100 m³, con mínima de 19.6 gr/100 m³ (estación 72) y máxima de 68.8 gr/100 m³ (estación 68) (figs. 5.19 y 5.20). La abundancia promedio de ictioplancton fue de 253 \pm 211 larvas/100 m³, con mínima de 104 larvas/100 m³ (estación 68) y máxima de 403 larvas/100 m³ (estación 72) (figs. 5.21 y 5.22).

Las mayores abundancias de zooplancton e ictioplancton se presentaron en el hábitat FMW, asociadas a fuertes gradientes en todos los parámetros físicos (figs. 5.19 a 5.22).

Capa 1: 0 a 10 m de profundidad

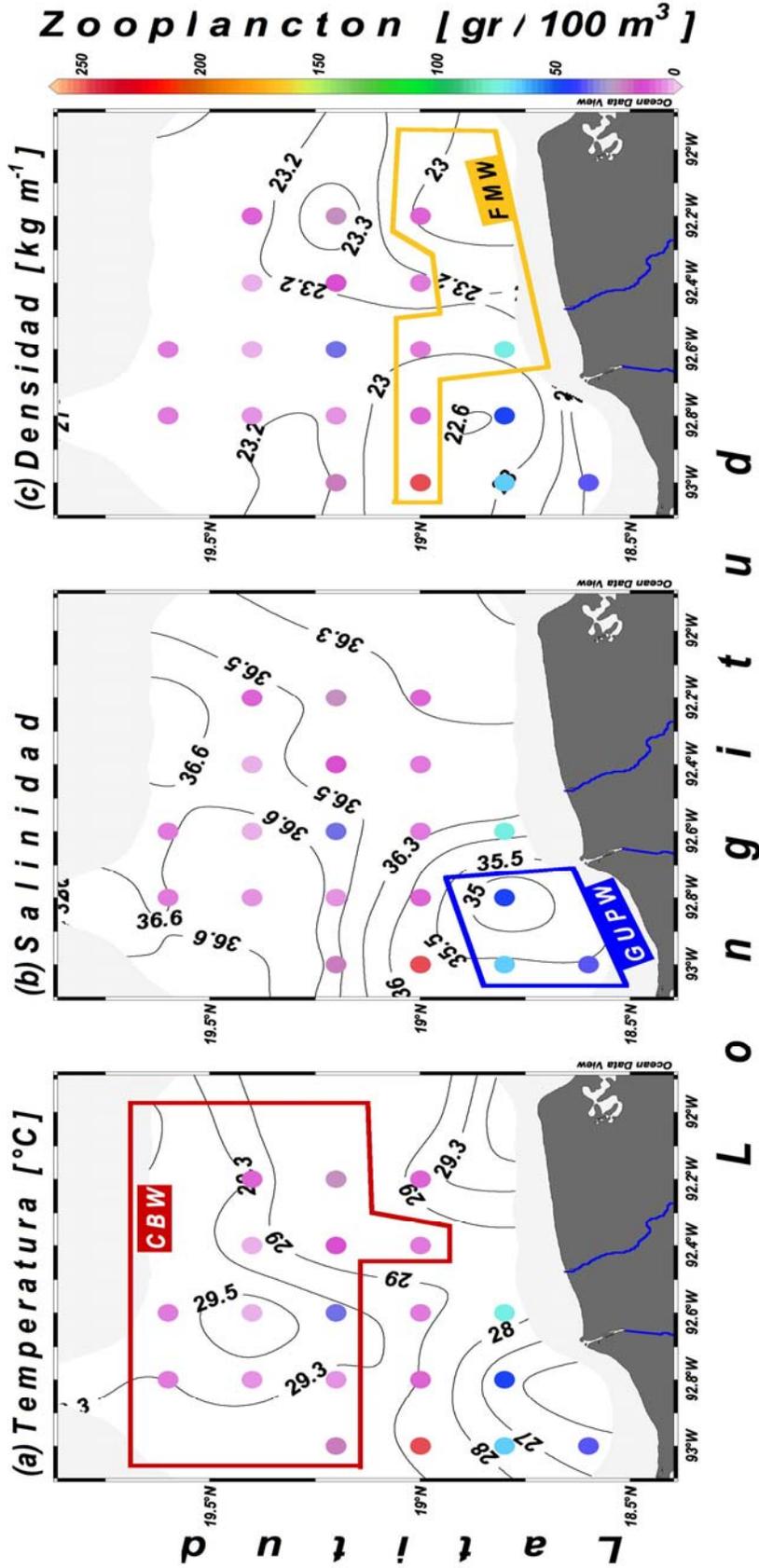


Figura 5.11. Distribución espacial de la abundancia de zooplancton ($\text{gr}/100 \text{ m}^3$, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Temperatura promedio [$^{\circ}\text{C}$]; (b) Salinidad promedio; (c) Densidad promedio [kg m^{-3}]. Hábitats: Agua de la Pluma de los ríos Grijalva-Usumacinta (GUPW), Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW).

Capa 1: 0 a 10 m de profundidad

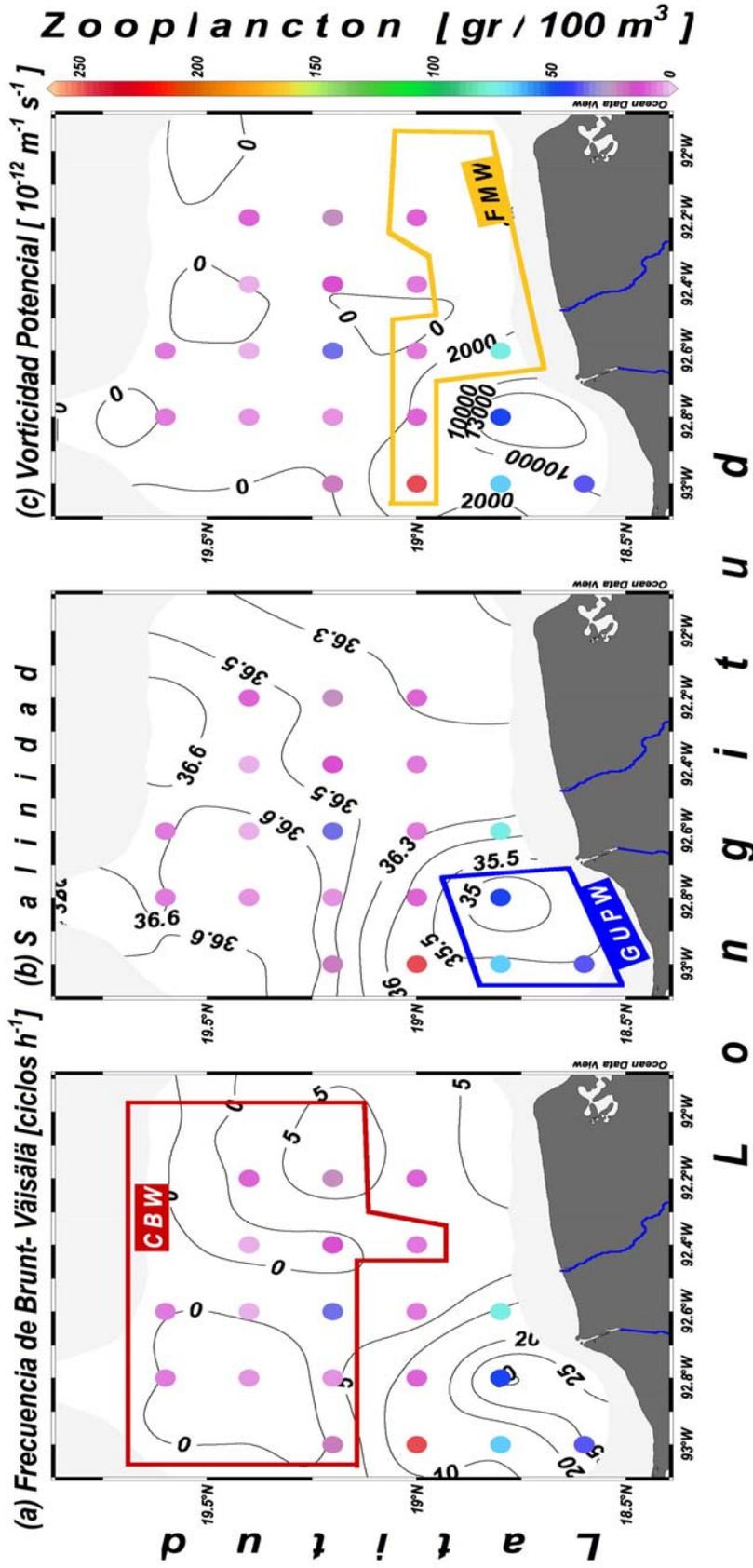


Figura 5.12. Distribución espacial de la abundancia de zooplancton ($\text{gr}/100 \text{ m}^3$, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Frecuencia de Brunt-Väisälä promedio [ciclos h^{-1}]; (b) Salinidad promedio; (c) Vorticidad potencial promedio [$10^{-12} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$]. Hábitats: Agua de la Pluma de los ríos Grijalva-Usumacinta (GUPW), Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW).

Capa 1: 0 a 10 m de profundidad

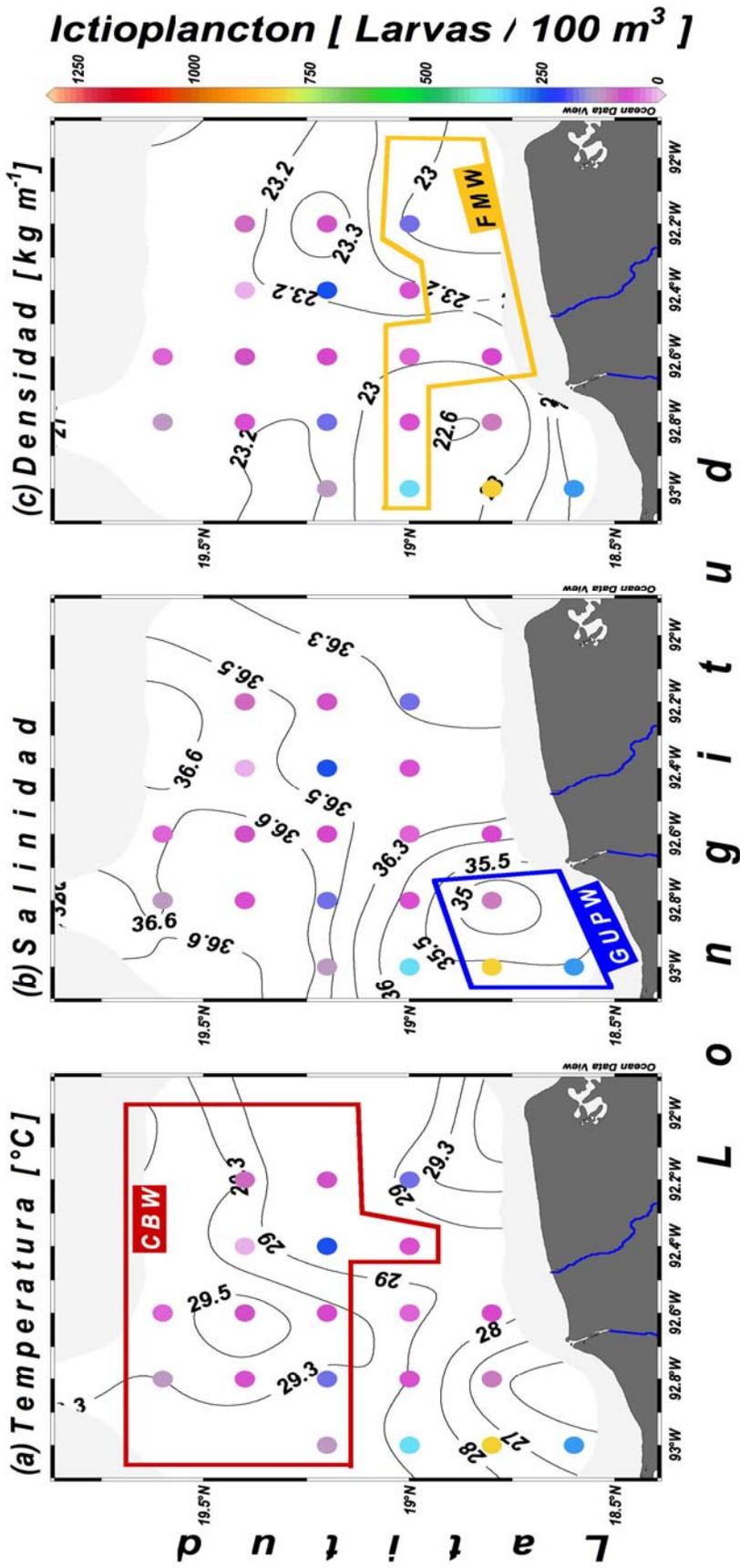


Figura 5.13. Distribución espacial de la concentración de ictioplancton (larvas de pez/100m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Temperatura promedio [°C]; (b) Salinidad promedio; (c) Densidad promedio [kg m⁻³]. Hábitats: Agua de la Pluma de los ríos Grijalva-Usumacinta (GUPW), Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW).

Capa 1: 0 a 10 m de profundidad

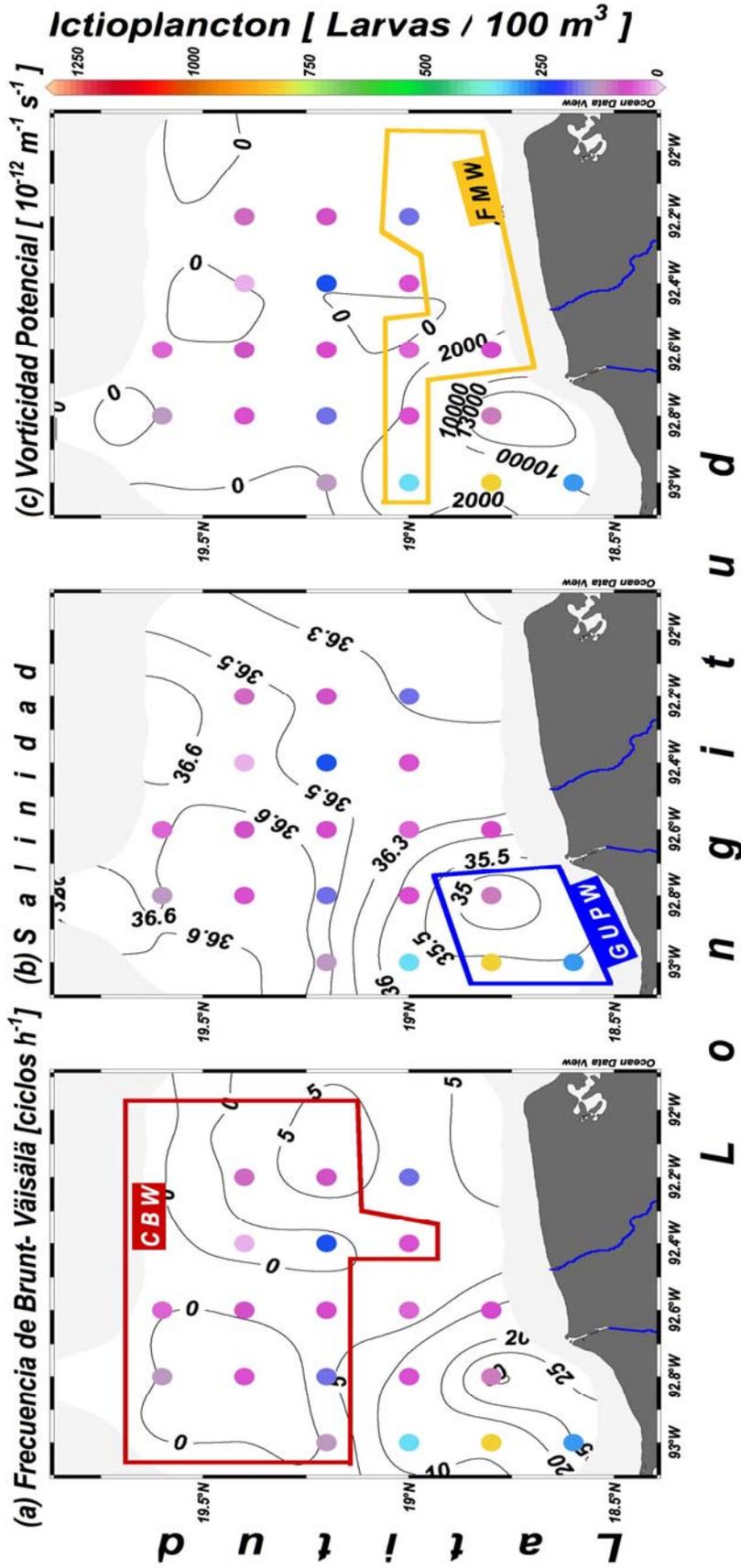
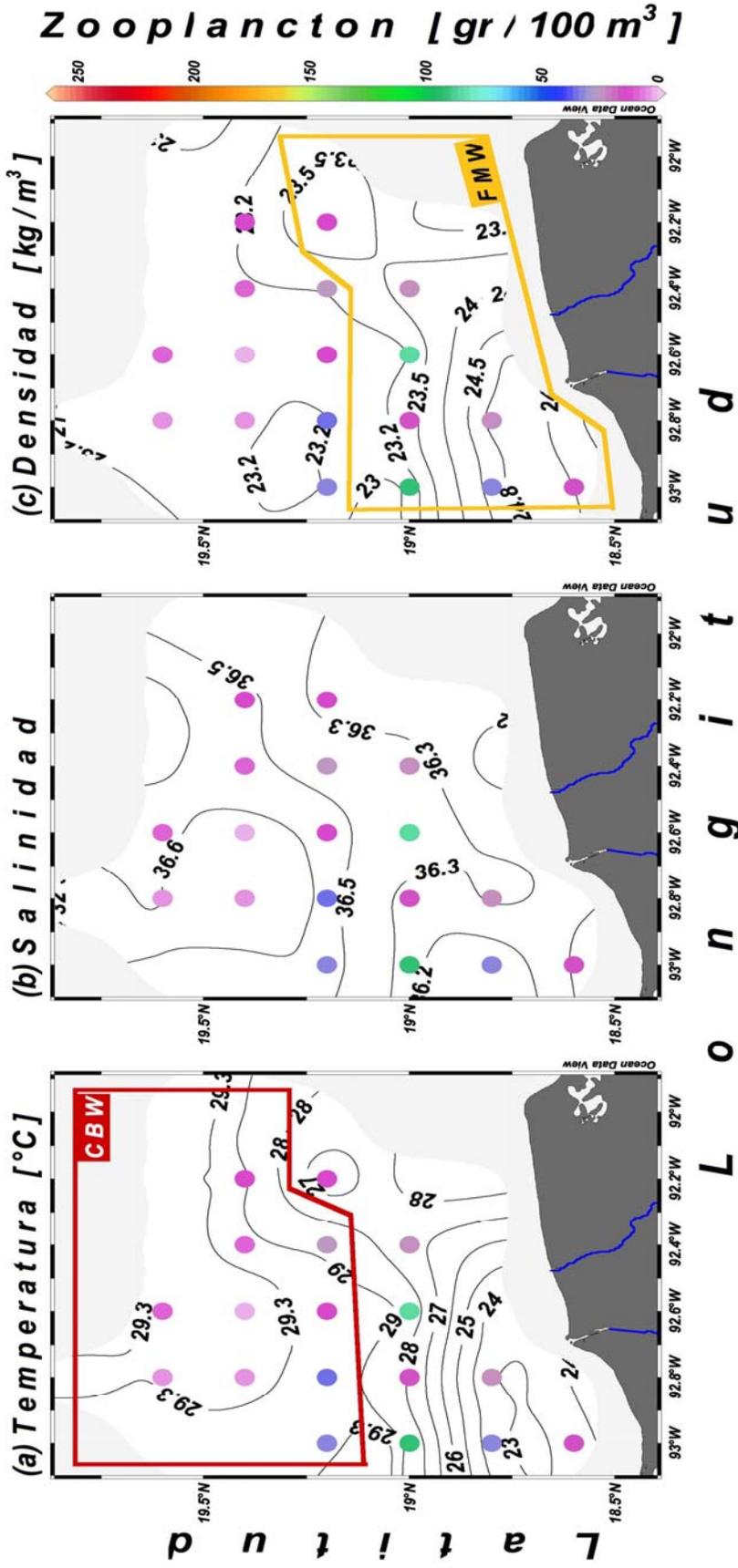


Figura 5.14. Distribución espacial de la concentración de ictioplancton (larvas de pez/100 m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Frecuencia de Brunt-Väisälä promedio [ciclos h⁻¹]; (b) Salinidad promedio; (c) Vorticidad potencial promedio [10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹]. Hábitats: Agua de la Pluma de los ríos Grijalva-Usumacinta (GUPW), Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW).

Capa 2: 10 a 20 m de profundidad



L o n g i t u d

Figura 5.15. Distribución espacial de la abundancia de zooplancton ($\text{gr}/100 \text{ m}^3$, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Temperatura promedio [$^{\circ}\text{C}$]; (b) Salinidad promedio [kg m^{-3}]. Hábitats: Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW).

Capa 2: 10 a 20 m de profundidad

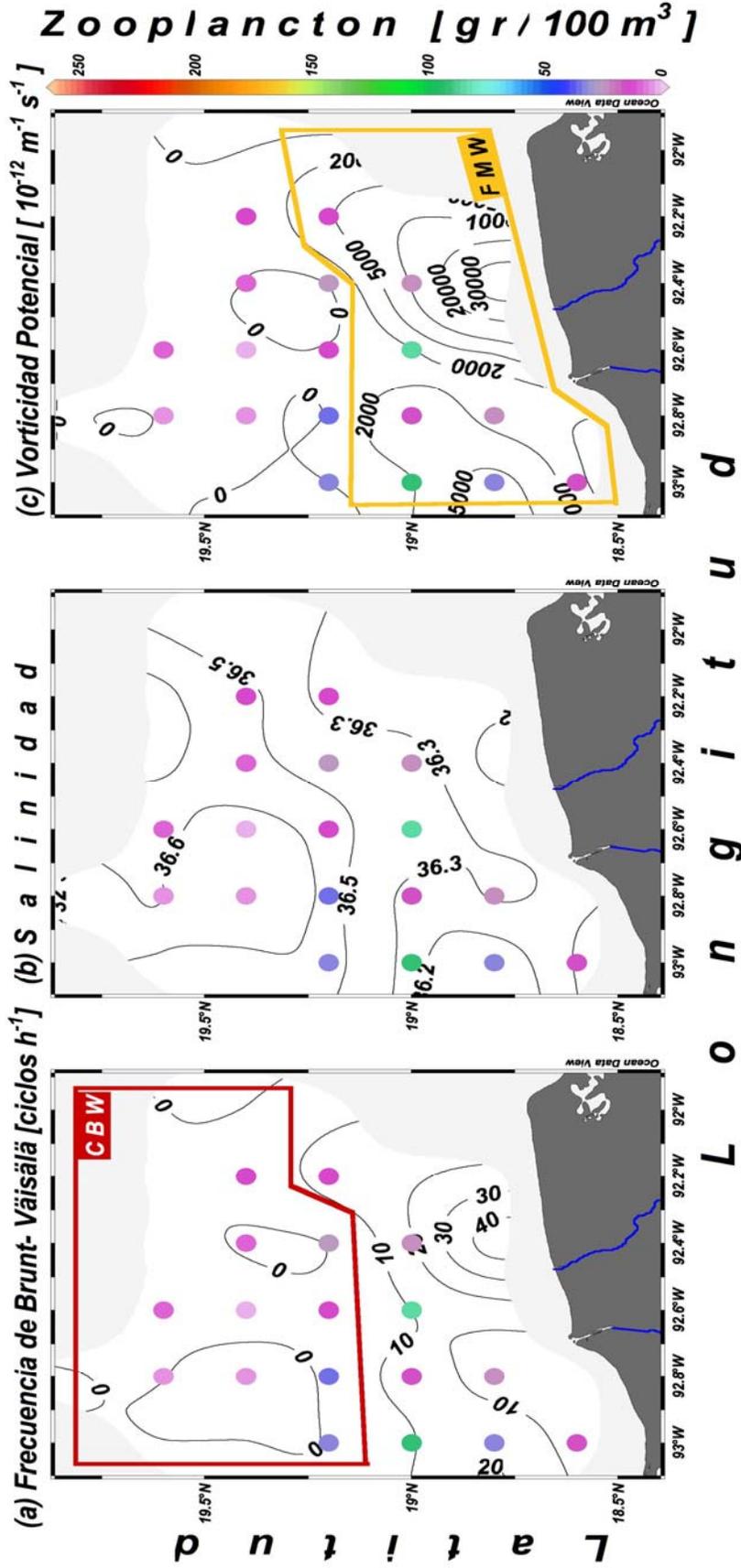


Figura 5.16. Distribución espacial de la abundancia de zooplankton (gr/100 m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Frecuencia de Brunt-Väisälä promedio [ciclos h⁻¹]; (b) Salinidad promedio; (c) Vorticidad Potencial promedio [10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹]. Hábitats: Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW).

Capa 2: 10 a 20 m de profundidad

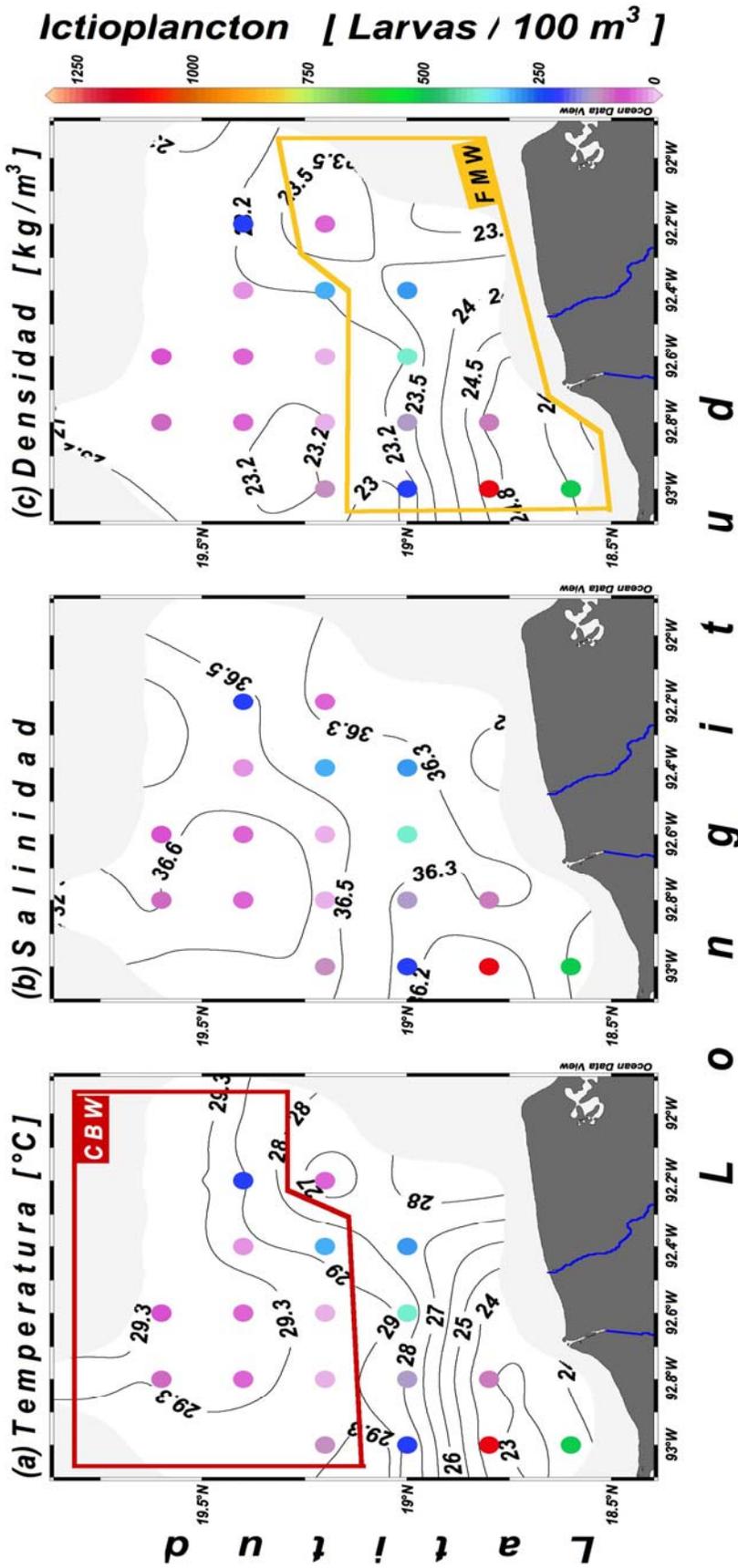


Figura 5.17. Distribución espacial de la concentración de ictioplancton (larvas de pez/100 m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Temperatura promedio [°C]; (b) Salinidad promedio; (c) Densidad promedio [kg m⁻³]. Hábitats: Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW).

Capa 2: 10 a 20 m de profundidad

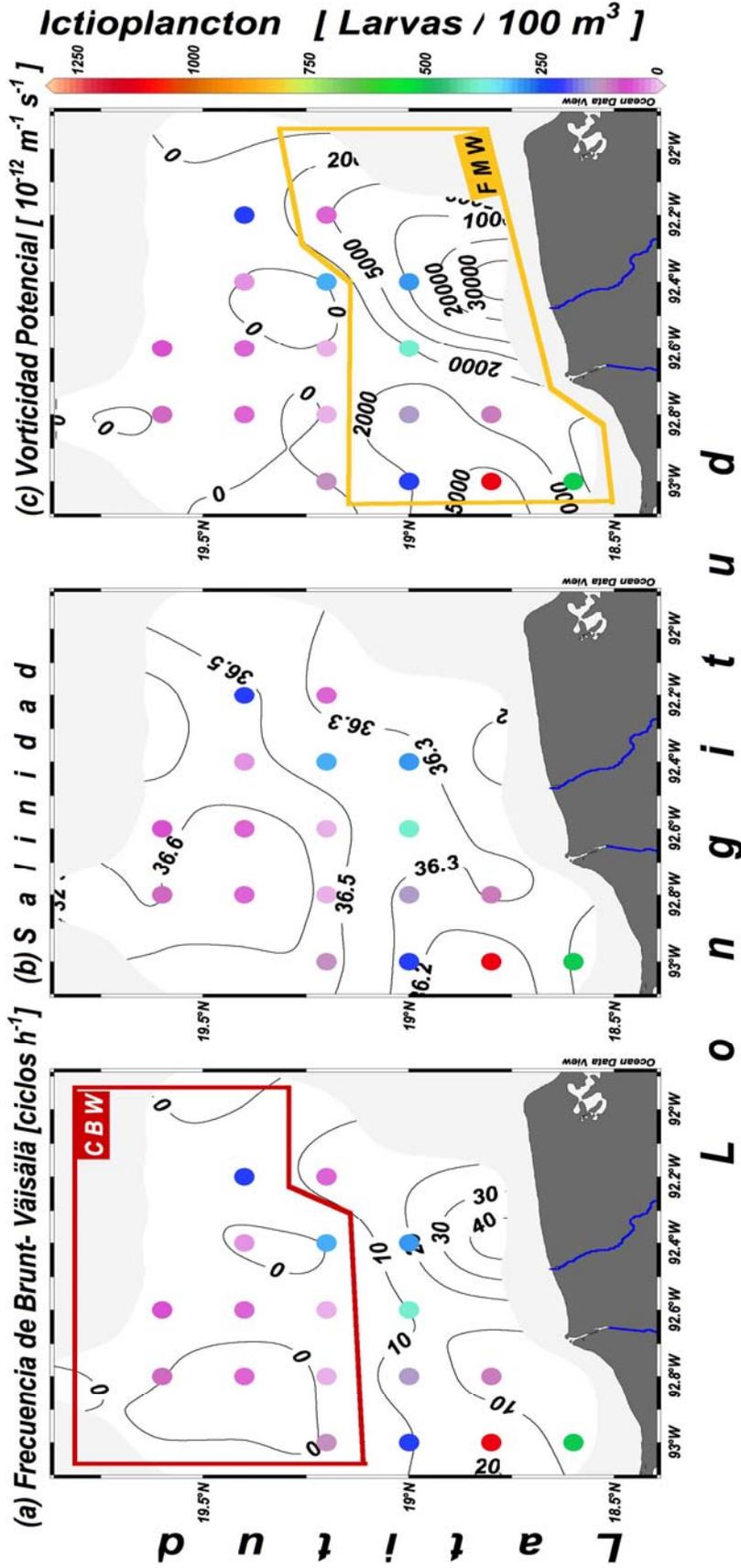
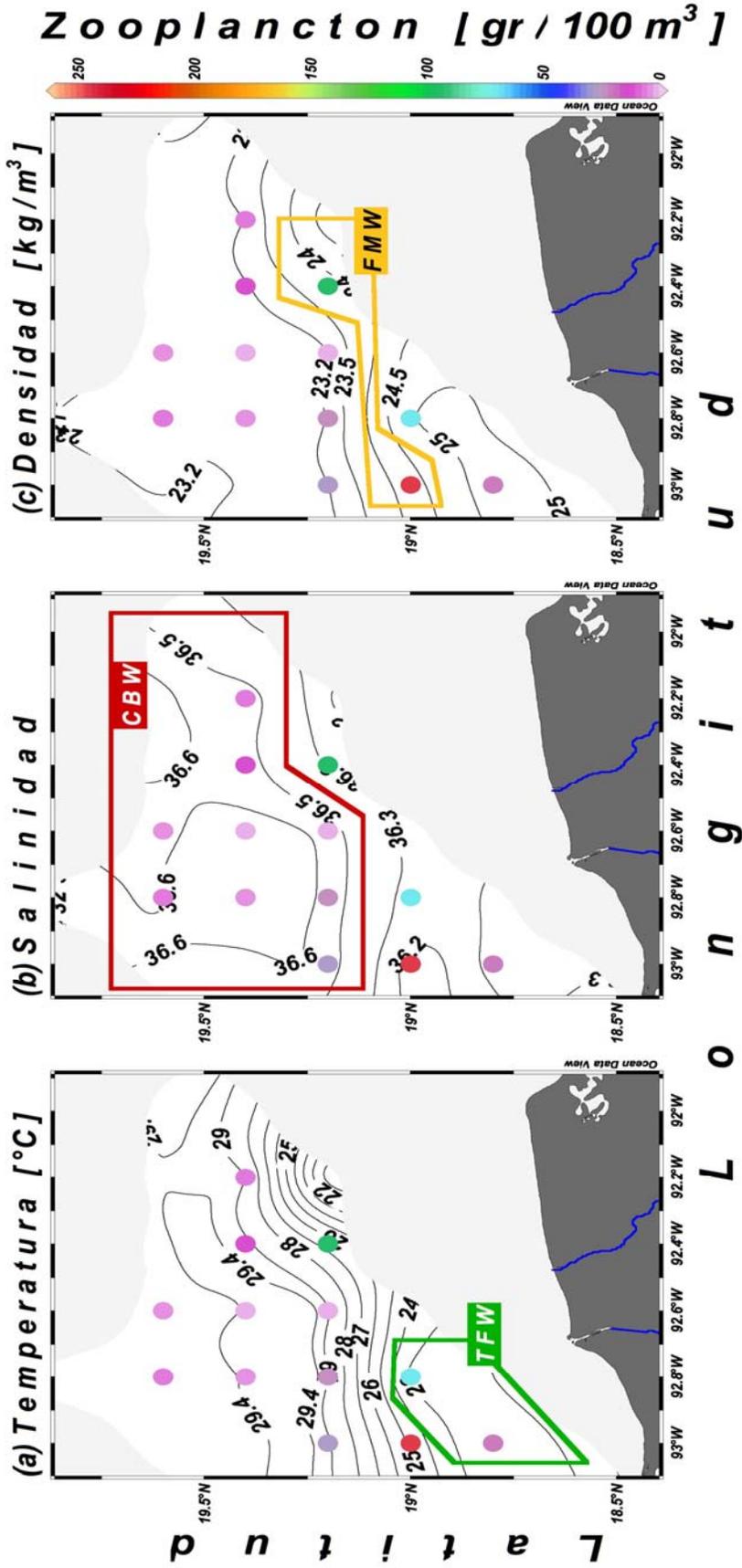


Figura 5.18. Distribución espacial de la concentración de ictioplancton (larvas de pez/100 m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Frecuencia de Brunt-Väisälä promedio [ciclos h⁻¹]; (b) Salinidad promedio; (c) Vorticidad potencial promedio [10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹]. Hábitats: Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW).

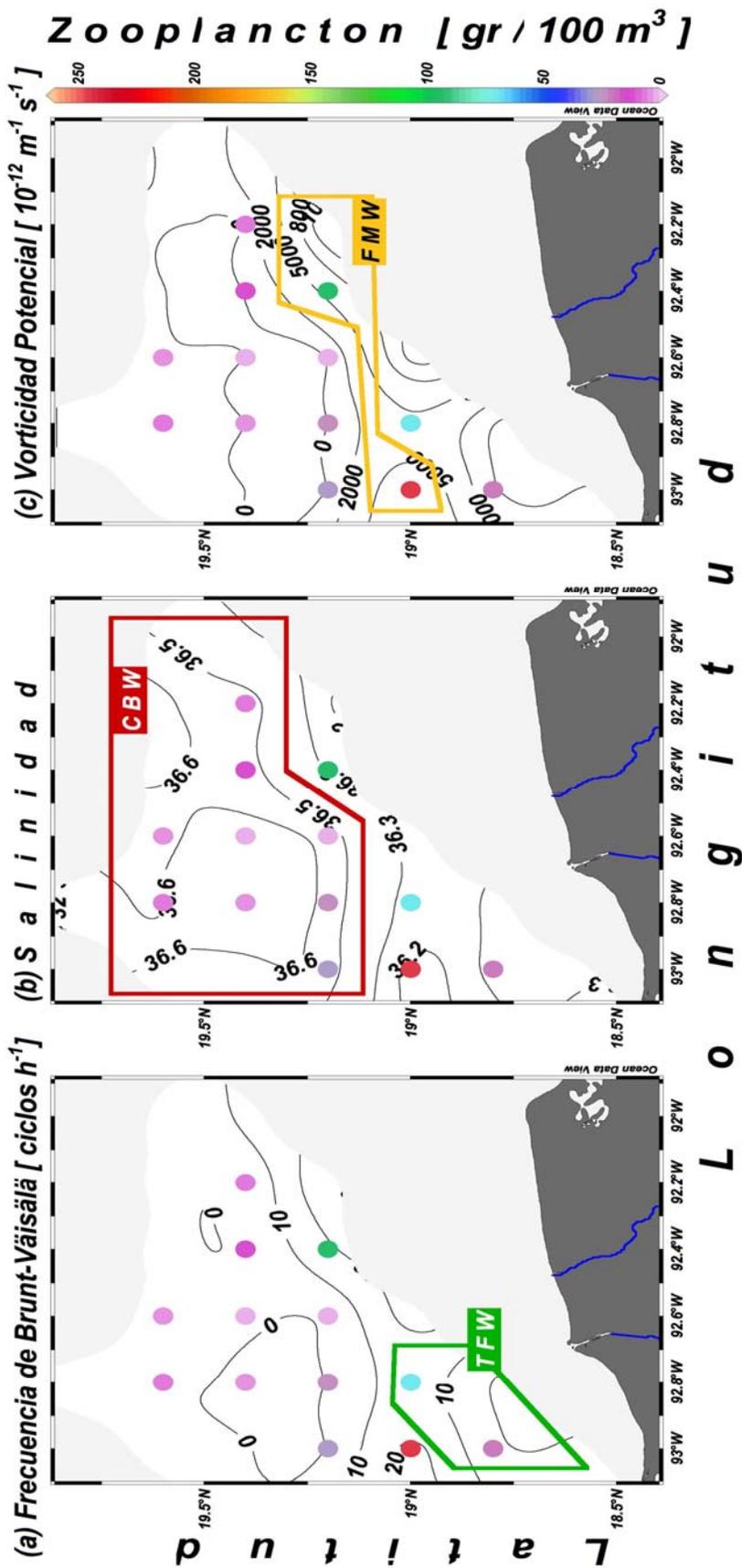
Capa 3: 20 a 30 m de profundidad



L o n g i t u d

Figura 5.19. Distribución espacial de la abundancia de zooplancton (gr/100m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Temperatura promedio [°C]; (b) Salinidad promedio [kg m⁻³]. Hábitats: Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW), Agua del Frente Topográfico (TFW).

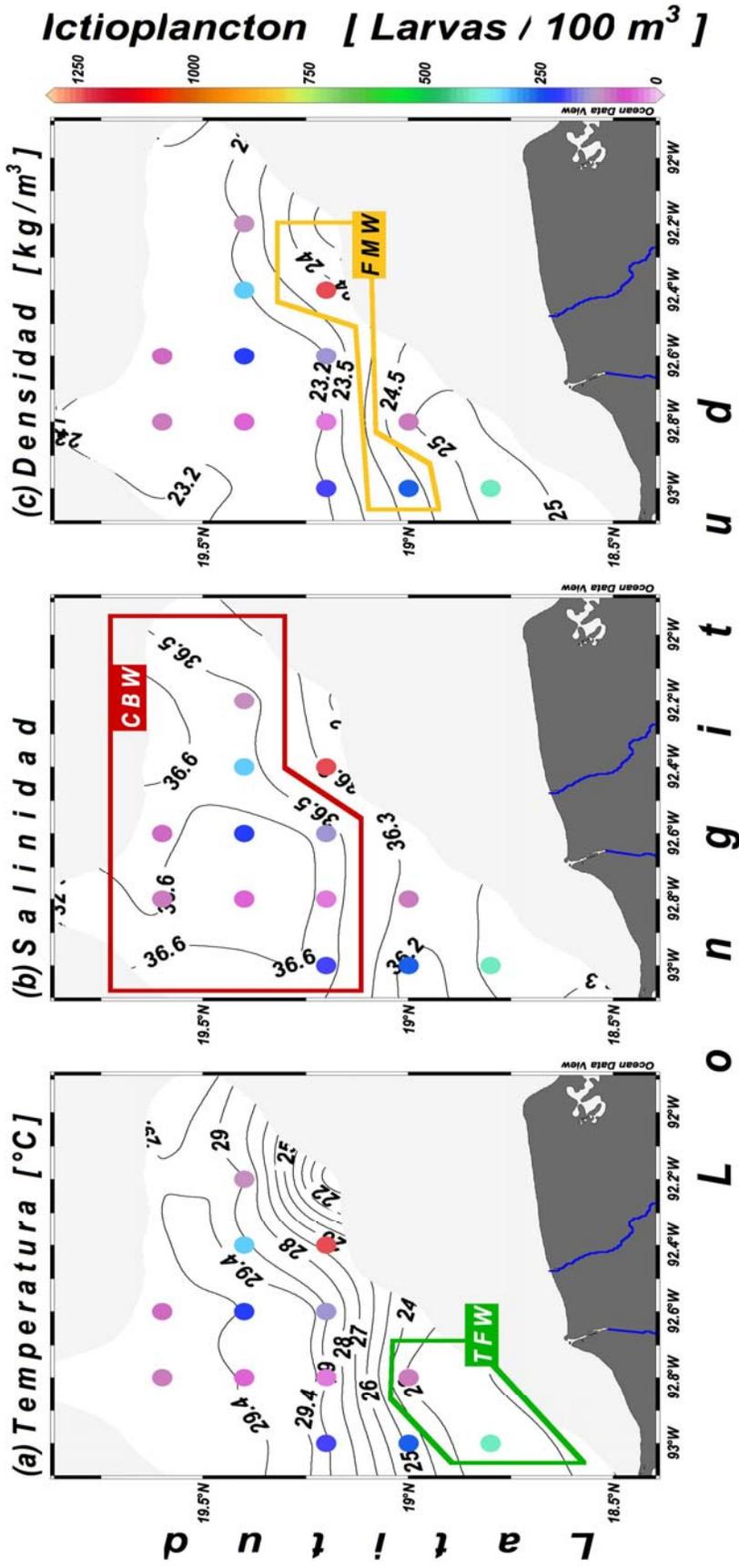
Capa 3: 20 a 30 m de profundidad



L o n g i t u d

Figura 5.20. Distribución espacial de la abundancia de zooplancton (gr/100m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Frecuencia de Brunt-Väisälä promedio [ciclos h⁻¹]; (b) Salinidad promedio; (c) Vorticidad potencial promedio [10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹]. Hábitats: Agua Mezclada del Frente por densidad (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW), Agua del Frente Topográfico (TFW).

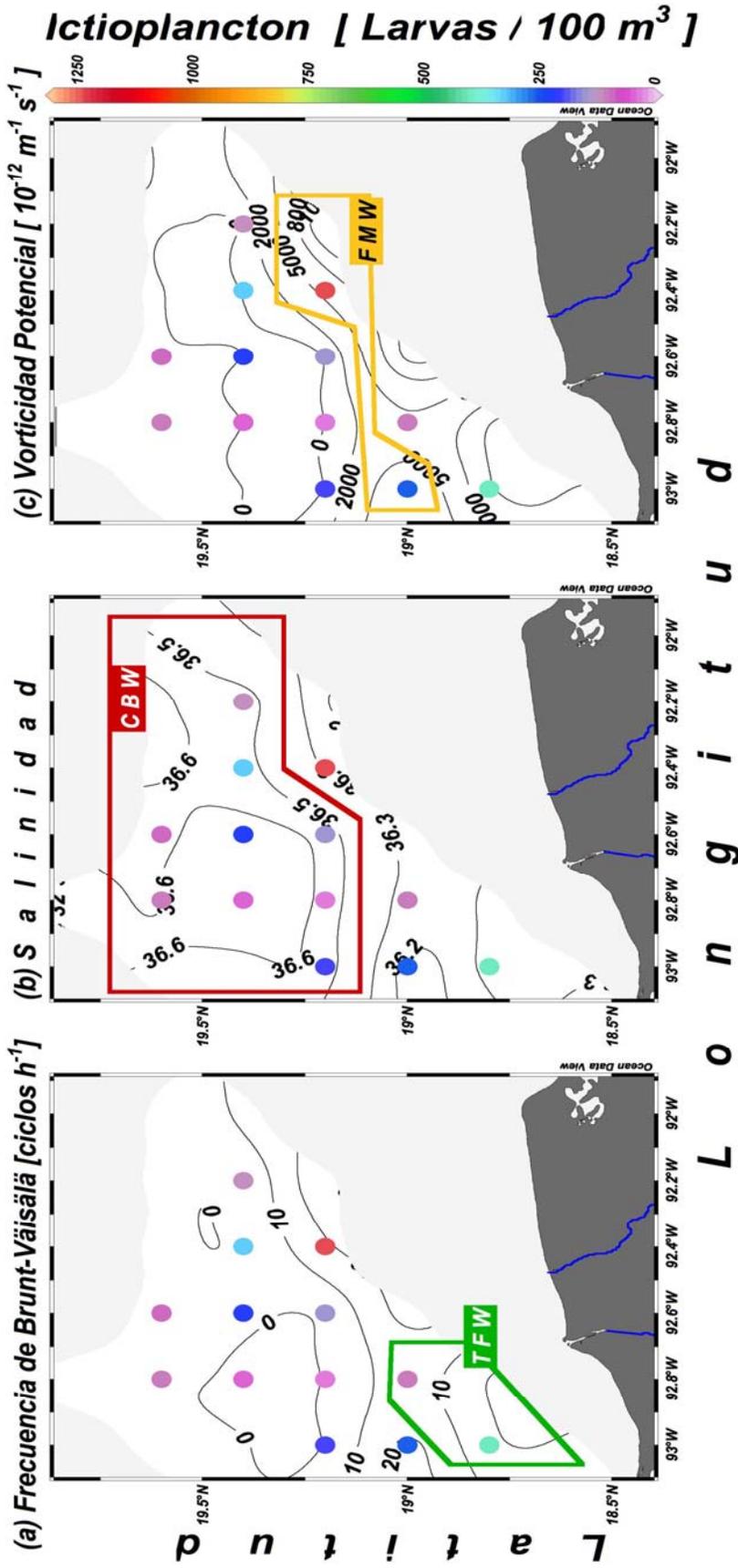
Capa 3: 20 a 30 m de profundidad



L o n g i t u d

Figura 5.21. Distribución espacial de la concentración de ictioplancton (larvas de pez/100m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Temperatura promedio [°C]; (b) Salinidad promedio; (c) Densidad promedio [kg m⁻³]. Hábitats: Agua Mezclada del Frente (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW), Agua del Frente Topográfico (TFW).

Capa 3: 20 a 30 m de profundidad



L o n g i t u d

Figura 5.22. Distribución espacial de la concentración de ictioplancton (larvas de pez/100m³, escala en color a la extrema derecha) sobrepuesta en: (a) Frecuencia de Brunt-Väisälä promedio [ciclos h⁻¹]; (b) Salinidad promedio; (c) Vorticidad potencial promedio [10⁻¹² m⁻¹ s⁻¹]. Hábitats: Agua Mezclada del Frente (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW), Agua del Frente Topográfico (TFW).

V.3. Patrón de circulación geostrófica

Campo de Velocidades Geostróficas

Por la escala, únicamente se representaron gráficamente, en la primera capa, velocidades superiores a 2.3 cm s^{-1} , la velocidad máxima estimada fue de 31.4 cm s^{-1} y se encontró en la estación 57 (fig. 5.23a); en la segunda capa se obtuvieron velocidades superiores a 1.8 cm s^{-1} , la velocidad máxima estimada fue de 41 cm s^{-1} en la estación 44 (fig. 5.23b) y, en la tercera capa, las velocidades fueron superiores a 4 cm s^{-1} , la dos velocidades más alta estimadas fueron 43.3 cm s^{-1} , en la estación 53 y 32.5 cm s^{-1} , en la estación 66 (fig. 5.23c).

El campo de velocidades geostróficas únicamente permite inferir la posible circulación en el área de estudio dentro de cada una de las tres capas establecidas (fig. 5.23). En la primera capa se identificaron tres patrones de circulación: “g”, hacia el noroeste, “h”, giro o lazo ciclónico, ambos se originan en la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta y relacionan a los hábitats Agua de la Pluma del Sistema Grijalva-Usumacinta (GUPW), Agua Mezclada del Frente (FMW), Agua del Banco de Campeche (CBW) y “k” hacia el sureste dentro del hábitat CBW (figs. 5.23a y 5.24a).

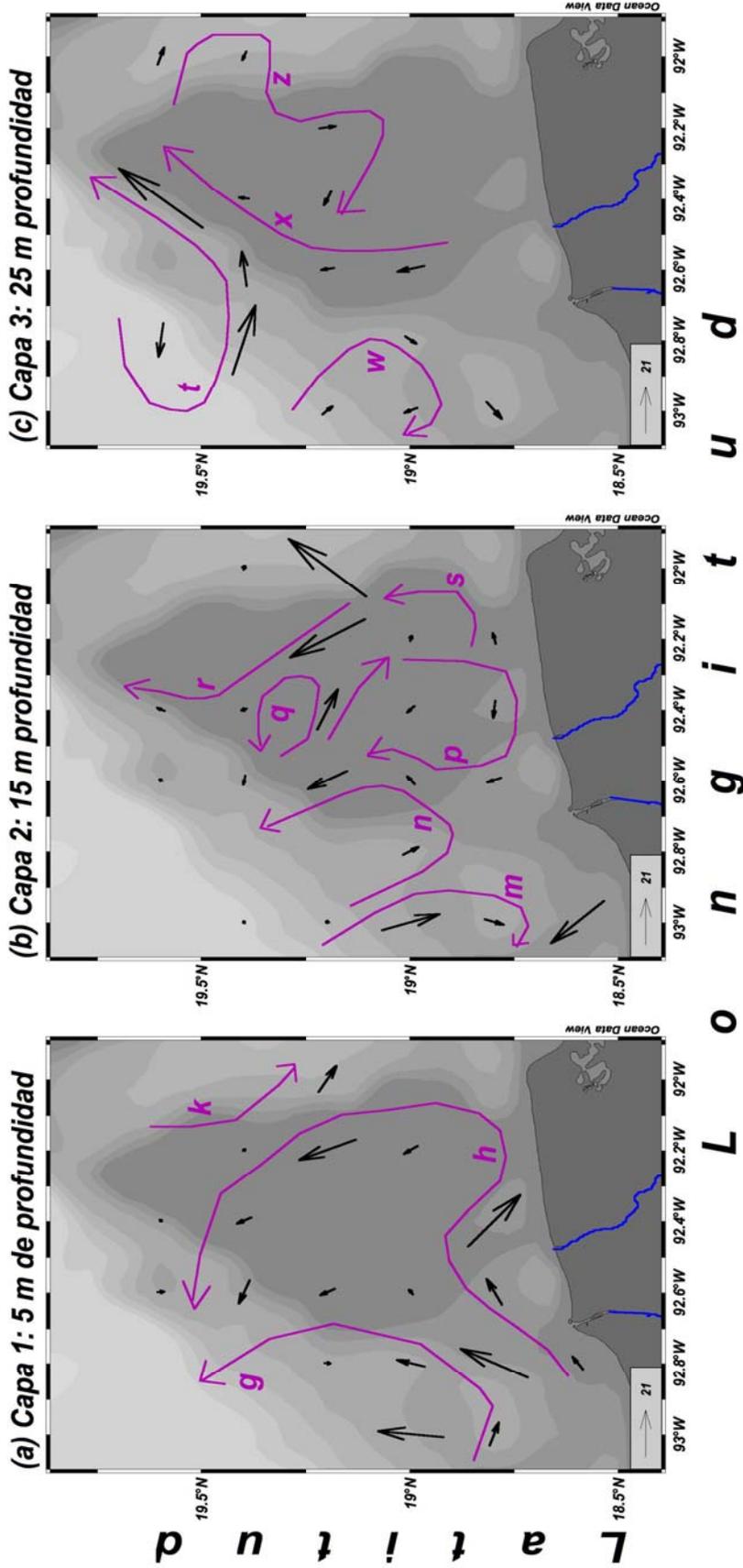
En la segunda capa se observaron seis patrones de circulación: “m”, giro anticiclónico; “n”, giro ciclónico; “p”, giro anticiclónico; “q”, giro ciclónico; “s”, lazo ciclónico y “r”, hacia el norte, de los cuales “m, n, p y r”, se relacionan con los hábitats Agua Mezclada del Frente (FMW) y Agua del Banco de Campeche (CBW) (figs. 5.23b y 5.25b).

En la tercera capa se definieron cuatro patrones de circulación: “w”, giro anticiclónico, éste relacionado a los hábitats Agua del Banco de Campeche (CBW), Agua Mezclada del Frente (FMW) y Agua del Frente Topográfico (TFW); “z” y, “x” juntos forman un giro anticiclónico, que interacciona con la topografía del fondo y relaciona a los hábitats CBW y FMW; “t” forma un lazo con dirección noreste, dentro del hábitat CBW (figs. 5.23c y 5.26c).

La abundancia de zooplancton ($\text{g}/100\text{m}^3$) e ictioplancton (número de larvas/ 100m^3) no permiten hacer inferencias tróficas o relaciones entre las dos entidades ecológicas, por estar en

unidades de abundancia diferentes. Sin embargo, es posible relacionar las abundancias a factores físicos como la circulación geostrófica, hábitat, boyancia y vorticidad potencial.

Patrón de corrientes geostróficas



L o n g i t u d

Figura 5.23. Patrón de circulación Geostrofica ($m s^{-1}$): (a) capa 1 de 0 a 10 metros de profundidad; (b) Capa 2 de 20 a 30 metros de profundidad; c) Capa 3 de 20 a 30 metros de profundidad. Escala del tamaño de la flecha en el recuadro equivale a $21 cm s^{-1}$.

Circulación Geostrófica, Zooplancton e Ictioplancton

La abundancia de zooplancton (fig. 5.24b; tabla 5.2) en la primera capa (10 m), se observó que fue de 246.4 g/100 m³ (estación 73) y representó el 40.3% de la biomasa total; 72.95 g/100 m³ (estación 59), que representó 11.9% de la biomasa total, estas dos abundancias se encontraron dentro del hábitat Agua Mezclada del Frente (FMW) y representaron el 52.2% de la biomasa total en la capa; mientras que la biomasa de zooplancton en el hábitat Agua de la Pluma del Sistema Grijalva-Usumacinta, mostró valores de 65.8 g/100 m³ (estación 72), que representó el 10.8% de la biomasa total; 47g/100 m³ (estación 69), con el 7.7% de la biomasa total y 36.1 g/100 m³ (estación 71), que es el 5.9% de la biomasa total, en conjunto estas tres estaciones representaron el 24.4% de la biomasa total.

La concentración de ictioplancton (fig. 5.24c; tabla 5.2) dentro de los primeros 10 m de profundidad, mostró que 811 larvas de pez/100 m³ (estación 72) son el 27% de la abundancia total y 286 larvas de pez/100 m³ (estación 71) ocuparon el 9.5% de la abundancia total, ambas abundancias se ubicaron dentro del hábitat Agua de la Pluma del Sistema Grijalva-Usumacinta y juntas representaron 36.5% de la abundancia total de larvas de pez. En el hábitat Agua Mezclada del Frente (FMW), se observó que 342 larvas de pez/ 100 m³ (estación 73) representaron el 11.4% de la abundancia total y, en el hábitat Agua del Banco de Campeche se observaron 241 larvas de pez/100 m³ (estación 55), que representa el 8% de la abundancia total.

En conjunto la biomasa en registrada en las estaciones 59, 69, 71, 72 y 73 representó el 76.6% de la biomasa total de zooplancton registrada y la concentración de larvas de pez observada en las estaciones 55, 71, 72, y 73 representó el 55.9% de la abundancia total de larvas de pez. Todas estas abundancias se ubicaron en la zona de contacto entre los tres hábitat, asociadas a gradientes de boyancia (frecuencia de Brunt-Väisälä) y vorticidad potencial, donde se originan los dos patrones de circulación geostrofica (fig. 5.24), que es la zona frontal de la pluma del sistema de ríos Grijalva - Usumacinta.

En la segunda capa (10 a 20 m de profundidad), la abundancia de zooplancton (fig. 5.25^a; tabla 5.2) indicó que la biomasa de 91.3 g/100 m³ (estación 73), representó el 20.8% de la biomasa total; 31.3 g/100 m³ (estación 72), representaron el 7.1% de la biomasa total, juntas constituyeron el 27.9% de la biomasa total y se relacionó con el patrón “m” de circulación

geostrófica. La abundancia de 84.4 g/100 m³ (estación 60), representó el 19.2% de la biomasa total, registrada entre los patrones “n” y “p” de circulación geostrofica. Las tres estaciones se encuentran dentro del hábitat Agua Mezclada del Frente (FMW) y en conjunto representaron el 47.1% de la biomasa total; mientras que en el hábitat Agua del Banco de Campeche (CBW), ninguna estación presentó más del 8% de abundancia de zooplancton.

La abundancia de ictioplancton (fig. 5.25c; tabla 5.2) mostró que 1111 larvas de pez/100 m³ (estación 72), representaron el 30.2% de la abundancia total y 504 larvas de pez/100 m³ (estación 71), representaron el 13.7% de la abundancia total; en conjunto representaron el 43.9% de la biomasa total relacionada al patrón “m” de circulación geostrofica. La abundancia de 385 larvas de pez/100 m³ (estación 60), representó el 10.5% de la abundancia total y, 285 larvas de pez/100 m³ (estación 56), representó un 7.7% de la abundancia total, juntas representaron el 18.2% de la biomasa total y se relacionan con los patrones “n” y “p” de circulación geostrofica. Las cuatro estaciones se ubicaron dentro del hábitat Agua Mezclada del Frente (FMW) y representaron el 62.1% de la biomasa total en la capa. Dentro del hábitat Agua del Banco de Campeche, 307 larvas de pez/100 m³ (estación 55), representaron 8.3% de la abundancia total, que se relacionan con los patrones “p” y “q” de circulación geostrofica. En suma las cinco estaciones contienen el 70.4% de la biomasa total en la segunda capa y se relacionaron a cuatro de los patrones identificados (fig. 5.25).

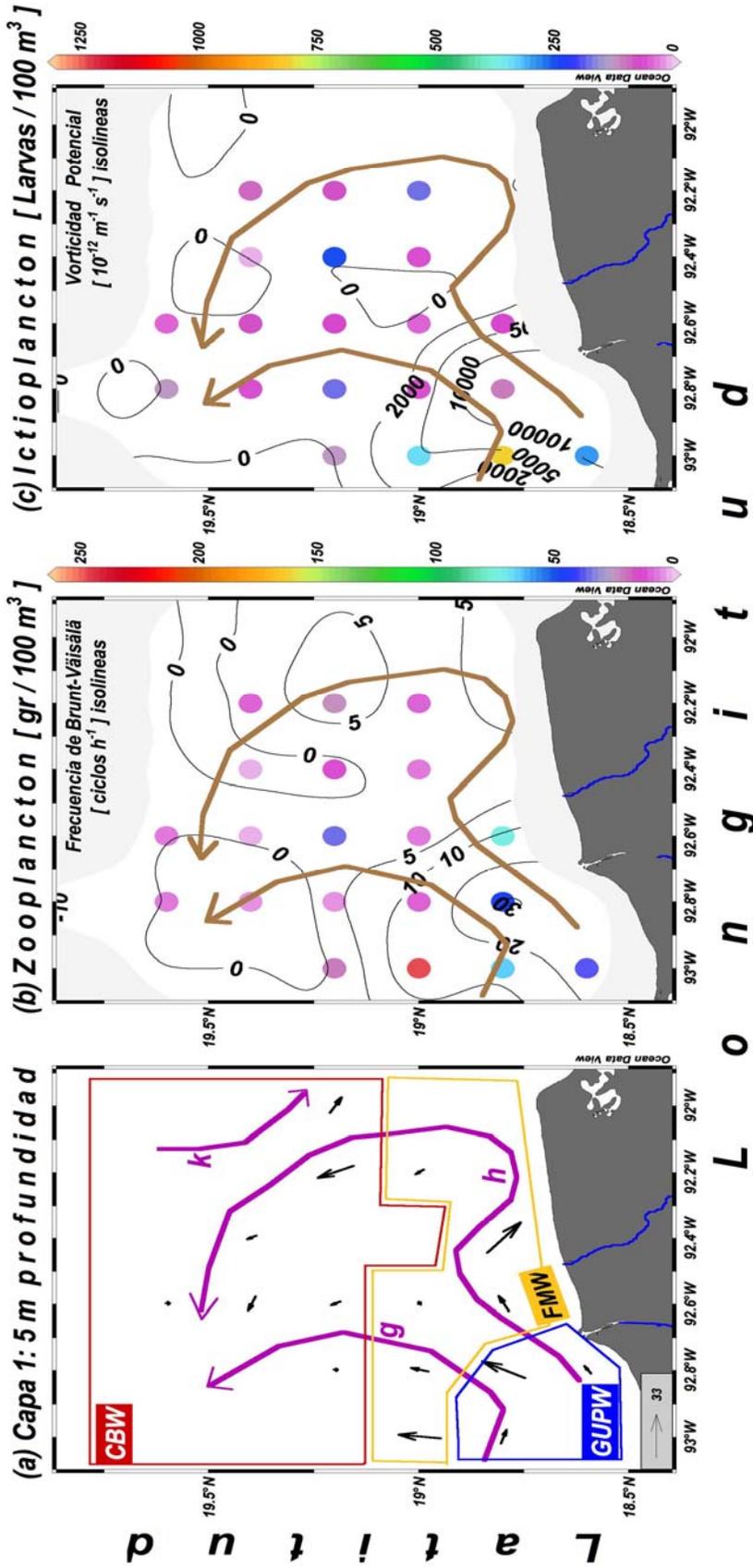
En la tercera capa (20 a 30 m) se registró que dentro del hábitat Agua Mezclada del Frente, una biomasa de zooplancton de 245.7 g/100 m³ (estación 73), que representó un 48% de la biomasa total que se asoció al patrón “w” de circulación geostrofica y 92.8 gr/100 m³ (estación 55), lo cual representó 18.1% de la biomasa total relacionada a los patrones “z” y “x” de circulación geostrofica, juntas registraron 66.1% de la biomasa total. En el hábitat Agua del Frente Topográfico, la biomasa fue de 68.8 g/100 m³ (estación 68) y representó 13.5% de la biomasa total, asociada al patrón “w” de circulación geostrofica. En conjunto estas tres estaciones representaron el 79.6% de la biomasa total de zooplancton y están asociada a los patrones “w, x, z” de la circulación geostrofica (fig. 5.26a).

La abundancia de ictioplancton (fig. 5.26c; tabla 5.2) mostró dentro del hábitat Agua Mezclada del Frente (FMW) una concentración de 1238 larvas de pez/100 m³ (estación 55) que representó 37.9% de la biomasa total, relacionada con los patrones “z” y “x” de la circulación geostrofica y 258 larvas de pez/100 m³ (estación 73), que representaron el 7.9% de la biomasa

total, asociada al patrón de circulación geostrófica “w”; juntas registraron 45.8% de la biomasa total en la capa. En el hábitat Agua del Frente Topográfico, se registró una concentración de 403 larvas de pez/100 m³ (estación 72), representando el 12.3% de la biomasa total, asociada al patrón “w” de circulación. En el hábitat Agua del Banco de Campeche (CBW) se registró una concentración de 326 larvas de pez/100 m³ (estación 54), que representó el 10% de la biomasa total, biomasa relacionada con al patrón “x” de circulación y, 222 larvas de pez/100 m³ (estación 62), que representó el 6.8% de la biomasa total entre los patrones “x” y “t” de circulación; estas dos estaciones representaron el 16.8% de la biomasa total.

En conjunto estas cinco estaciones representaron el 74.9% de la biomasa total en la capa, asociada a los patrones “w, x, z” de circulación geostrófica (fig. 5.26).

Patrón de circulación geostrófica



L o n g i t u d

Figura 5.24. Primera capa (0 a 10 m). (a) Campo de velocidades geostróficas (escala el tamaño de la flecha en el recuadro equivale a 33 cm s⁻¹) y patrón de circulación geostrófica; Sobreposición del patrón de circulación geostrófica y (b) biomasa de zooplankton (gr/100m³, isolineas); (c) abundancia de ictioplankton (larvas/100m³, isolineas). Se indica la posición de frente oceánico formado por la pluma de los ríos Grijalva-Usumacinta (GUPF)

Patrón de circulación geostrofica

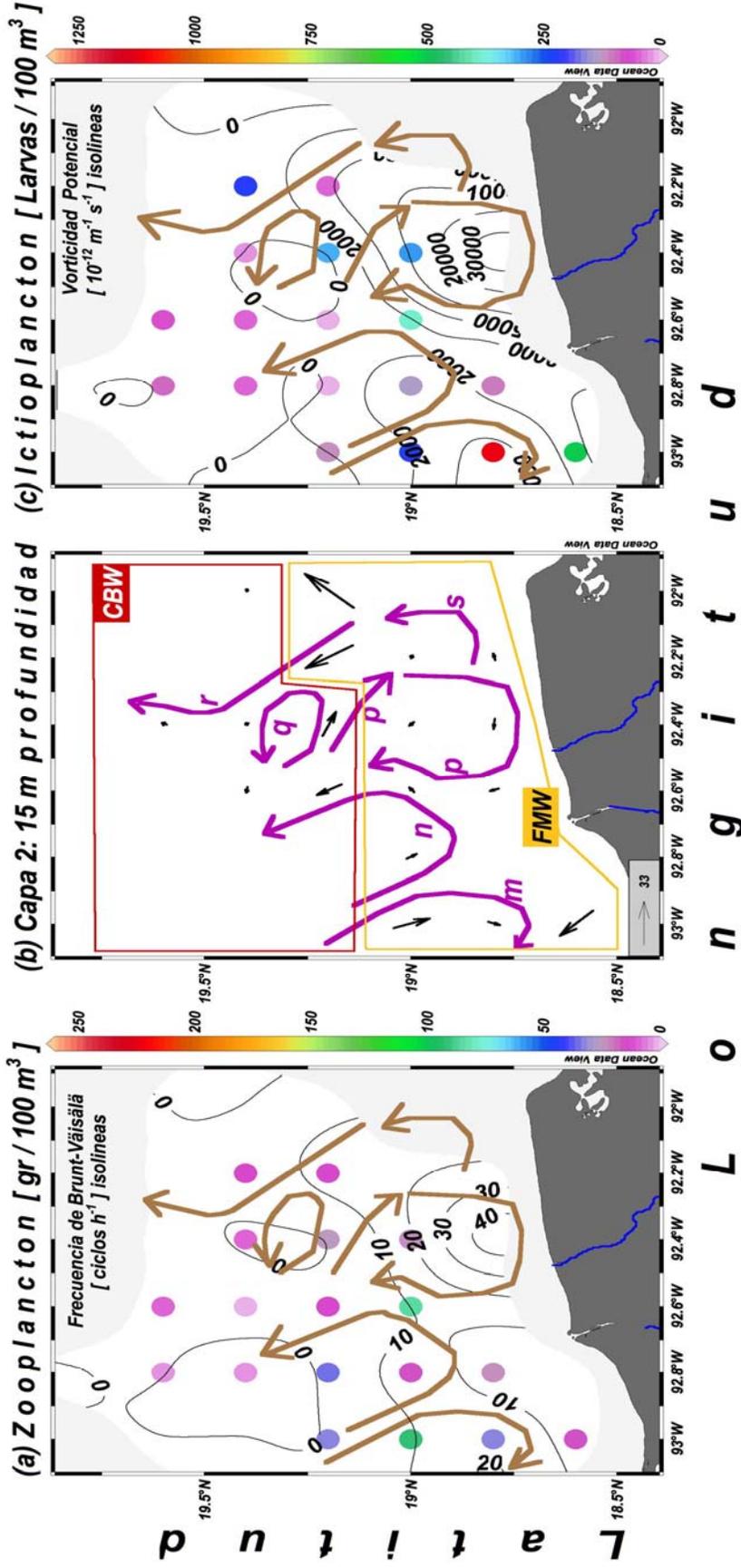


Figura 5.25. Segunda capa (10 a 20 m). (a) Sobreposición del patrón de circulación geostrofica y biomasa de zooplankton ($\text{gr}/100\text{m}^3$, puntos escala a la derecha); (b) Campo de Velocidades geostroficas (escala el tamaño de la flecha en el recuadro equivale a 33 cm/s) y patrón de circulación geostrofica; (c) Sobreposición del patrón de circulación geostrofica y abundancia de ictioplankton ($\text{larvas}/100\text{m}^3$, puntos escala a la derecha).

Patrón de circulación geostrófica

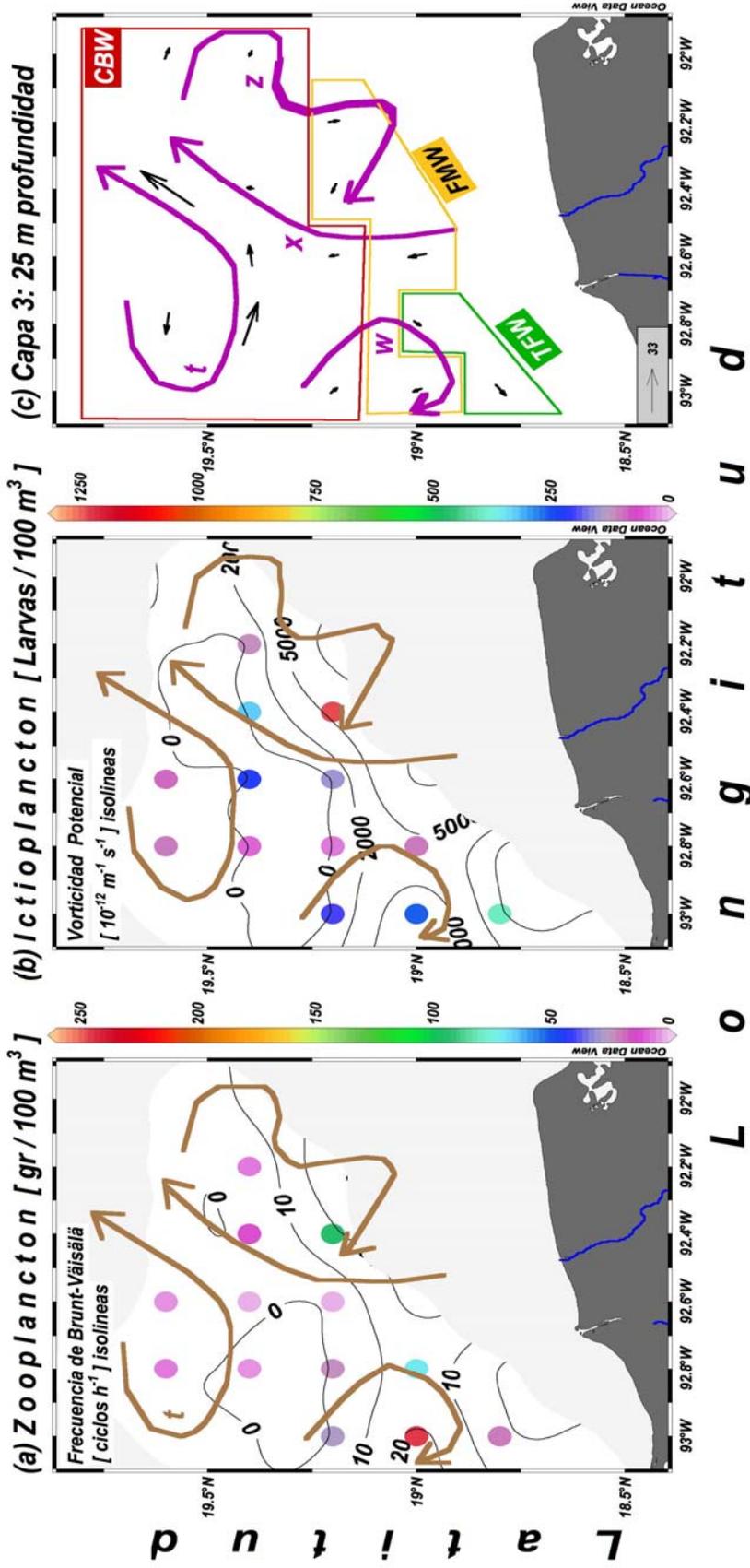


Figura 5.26. Tercera capa (20 a 30 m). Sobreposición del patrón de circulación geostrófica y (a) Biomasa de zooplankton (gr/100m³, puntos escala a la derecha); (b) abundancia de ictioplankton (larvas/100m³, puntos escala a la derecha); (c) Campo de Velocidades geostróficas y patrón de circulación geostrófica.

VI.- Discusión

Las comunidades de zooplancton e ictioplancton se ocurren y se distribuyen en la columna de agua del océano. Diversos estudios han puesto de manifiesto la existencia de regiones caracterizadas por una o varias especies y especies cosmopolitas, estas regiones denominadas provincias o biomas ocurren a diferentes escalas y están caracterizadas por factores físicos como temperatura, salinidad, densidad, radiación solar, latitud, entre otros (Mullin, 1988; 1993; Miller, 2004; Longhurst, 1981; 2007). A gran escala el Golfo de México puede ser considerado una provincia y, a meso-escala esta provincia puede estar constituida a su vez por subprovincias. En la región sur del Golfo de México Flores-Coto *et al.* (2000) y Salas de León *et al.* (1998), han descrito en el plano horizontal cinco agrupamientos de ictioplancton caracterizados por familias, géneros y especies, como: (1) Transición, (2) Nerítico Oeste, (3) Nerítico Este, (4) Influencia Fluvio-Lagunar y (5) Costero con tres subgrupos: Machona, Grijalva y Términos. Flores Flores-Coto *et al.* (2000) buscaron explicar la distribución de la abundancia en el subgrupo Grijalva, que presentó gran abundancia de Góbidos y Engraulidos (septiembre), con base en el hábitat e indicaron en dónde encontraron a los organismos que conformaron la comunidad, pero no explicaron la distribución espacial de la abundancia de biomasa de zooplancton y la concentración de ictioplancton dentro del área de estudio.

El hábitat es definido por factores abióticos como temperatura, salinidad y densidad, que tienen implicaciones fisiológicas sobre los organismos de la comunidad de zooplancton e ictioplancton (Lalli y Parsons, 1997). Estos factores físicos permiten caracterizar la columna de agua en diferentes tipos de agua considerados como hábitats (Lalli y Parsons, 1997; Talley et al., 2012). Así que, los diagramas T-S permiten establecer una mejor relación entre la abundancia de la comunidad de zooplancton e ictioplancton con los hábitats identificados (Kingsford y Suthers, 1996; Reiss *et al.*, 2000; Connell y Guillarders, 2007). En el presente estudio los diagramas T-S permitieron identificar cinco hábitats (GUPW, FMW, CBW, TFW, YUW), y junto con el análisis de la abundancia de biomasa de zooplancton e ictioplancton fue posible identificar que las abundancias superiores a la media de biomasa de zooplancton e ictioplancton se presentaron en los hábitats GUPW, FMW y TFW. Si bien esto no permite explicar porqué más del 50% de la biomasa total de zooplancton e ictioplancton se encuentra localizada en la zona de contacto o

frontera entre los hábitats identificados, si nos permite saber en qué parte del hábitat se encuentra la mayor abundancia de organismos.

Desde el punto de vista ecológico las fronteras o zonas de contacto entre hábitats, biomas o provincias son consideradas ecotonos o zonas de transición. En el océano las zonas de contacto entre dos tipos de agua son consideradas zonas de transición, las cuales están definidas por un gradiente de los parámetros físicos, indicado por la termoclina, haloclina y picnoclina. Si los gradientes se presentan en el plano vertical se le denomina estratificación, pero si los gradientes y las clinas se presentan en el plano horizontal, son llamados frentes. Los frentes ocurren a toda las escalas y son considerados zonas de alta productividad biológica (Bowman y Esaias, 1978; Fedorov, 1986; Kiørboe *et al.* 1988; Olson *et al.*, 1994; Grimes, 2001; Longhurst, 2007; Connell y Guillarders, 2007).

El análisis de los campos de temperatura, salinidad y densidad, confirma la presencia de la pluma formada por las descargas del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta y la zona frontal asociada, descrita en estudios anteriores (Czitrom *et al.*, 1986 a, b; Alatorre-Mendieta *et al.*, 1989; Shirasago-German, 1991; Salas de León *et al.*, 1992). Además, en este trabajo se revela la existencia de dos frentes más. Un frente oceánico y un frente topográfico asociado a la pendiente y topografía del borde de la plataforma continental. Ambos frentes interactúan de forma dinámica con el formado por la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta. Es posible identificar tres zonas de gradientes (triple termoclina, haloclina y picnoclina) por lo que están interactuando cuatro cuerpos de agua con características diferentes. De aquí que, el área de estudio presentó cinco hábitats y tres capas que se asocian a los frentes identificados.

Salas de León *et al.* (1998) y Flores-Coto *et al.* (2000) estudiaron la variación temporal de la abundancia de zooplancton asociada al frente de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta y reportan que fue de 20 a 60 g/100 m³ en primavera, de 40 a 110 g/100 m³ en verano y de 10 a 20 g/100 m³ en invierno; la abundancia de ictioplancton asociada al frente que reportan, fue de 1490 a 3000 larvas/100 m³ en primavera, 1000 a 3000 larvas/100 m³ en verano, 30 a 45 larvas/100 m³ en invierno. Las abundancias de zooplancton que reportan en verano son menores a las registradas en el presente trabajo.

Los datos de esta tesis indican que los gradientes y clinas que definen la zona frontal, sirven de barrera entre las comunidades de zooplancton e ictioplancton lo cual concuerda con lo descrito por Govoni (1993) para la pluma y frente del río Mississippi (USA).

Grimes (2001) encontró densidades superiores a la media de copépodos y larvas de peces, dentro de la zona frontal de la pluma de río Mississippi (USA), su aseveración concuerda con nuestros resultados ya que los valores superiores a la media de abundancias de zooplancton y concentración ictioplancton, se presentan en las zonas frontales identificada y las abundancias máximas dentro de la frente de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta.

Una alta diversidad y abundancia de larvas de pez, cerca de la superficie y sobre la termoclina en el sur del Golfo de México fue observada por Flores-Coto *et al.* (2000). De hecho los resultados obtenidos en el presente trabajo, indican que la temperatura fue menos importante que la salinidad y densidad, para determinar la distribución de la abundancia de zooplancton e ictioplancton, asociada a los frentes, específicamente el formado por la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta. Esto explica por qué las abundancias de zooplancton e ictioplancton fueron mayores al promedio en la zona de los frentes identificados y no en otra parte de los habitas. Lo que no explica es por qué existen diferencias de abundancia de zooplancton e ictioplancton dentro de la misma zona frontal, más aun el patrón general de distribución espacial de la abundancia en tercera dimensión sugirieron que tanto el zooplancton como el ictioplancton se distribuyeron en parches o enjambres.

Los organismos del zooplancton incluidas las larvas de peces incapaces de nadar, están a merced de las corrientes, si se acumulan en la zona frontal y resisten el hundimiento, entonces deben existir mecanismos de transporte-retención que permiten su acumulación dentro de la zona frontal, especialmente en donde exista convergencia (Kjørboe *et al.*, 1988; Kingsford y Suthers, 1996; Grimes, 2001).

La zona frontal es una zona dinámica, dentro de ella ocurren procesos de mezcla, convergencia y corrientes. La mezcla actúa en sentido vertical y trata de eliminar los gradientes, un estimador indirecto es la frecuencia de Brunt-Väisälä, los valores positivos indican que las isopícnas e halopícnas oscilan pero no se rompen las zonas frontales; así que, esto corrobora que los gradientes y frecuencias altas de oscilación de las clinas, funcionan como barreras para el

zooplancton e ictioplancton, ya que abundancias máximas se asociaron valores intermedios de boyancia (0 a 20 ciclos h^{-1}).

La interacción entre dos fluidos en movimiento produce rozamiento y vorticidad en las zonas de contacto. La vorticidad potencial es un trazador de la dinámica frontal y procesos de subducción (Nagai *et al.*, 2008). Los valores altos de vorticidad se presentan en lugares específicos dentro de los frentes identificados. En el frente de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta, se identificaron dos sitios bajo la pluma, esto sitios serían una zona de convergencia y mezcla que puede ser el origen del agua que caracteriza al hábitat Agua Mezclada del Frente. La vorticidad potencial indica en que zona de la columna de agua se encuentra el agua mezclada y como se mueve. Los datos indicaron que el agua mezclada se originó en la pluma y conforme se dirige hacia la zona oceánica se hunde hasta quedar entre los 50 y 70 m de profundidad.

El contraste de densidad entre los dos o más tipos de agua que forman los frentes es causado por la salinidad, el agua de la pluma que es más ligera tiende a fluir por encima del agua más pesada hasta que el gradiente de presión es balanceado por la fuerza de Coriolis creando un balance geostrófico y generando corrientes geostróficas. Los patrones de circulación geostrófica al parecer, se originan en las zonas de alta vorticidad potencial y frecuencia de Brunt-Väisälä y siguen un curso hacia las regiones de baja o nula vorticidad potencial.

Dentro de cada una de las tres capas, las máximas abundancias de zooplancton y concentración de ictioplancton ocurren de la zona de gradientes en los frentes, con valores intermedios de frecuencia de Brunt-Väisälä (10-20 ciclos h^{-1}) donde las corrientes geostróficas convergen y la vorticidad potencial, es intermedia (1000 a $5000 \times 10^{-12} m^{-1} s^{-1}$), estas condiciones crean micro hábitats óptimos con mecanismos de retención del zooplancton e ictioplancton lo cual permiten explicar el patrón en parches o enjambres dentro de las zonas frontales, en particular el frente de la pluma del sistema Grijalva-Usumacinta. También explica por qué encontramos valores bajos de abundancia de zooplancton y concentración de ictioplancton en la mayor parte de los hábitats identificados, las corrientes geostróficas los transportarían (advección) hacia micro hábitats sub-óptimos o no deseables, a partir de las zonas de divergencia y cuando las larvas de pez crecen les permite transportarse hacia otros hábitats, con un menor gasto de energía.

Diversos estudios han puesto de manifiesto el papel de las corrientes, turbulencia y mezcla en el transporte-retención del plancton y las relaciones predador-presa, encuentros y búsqueda

(Platt, 1972; Dower *et al.*, 1997; Denman y Gargett, 1995; Marra, 1980; Haury *et al.*, 1990; Squires y Yamazaki, 1995; Sundby *et al.*, 1994; Sundby, 1995; Osborn, 1995).

Estudios anteriores de distribución y abundancia de ictioplancton y zooplancton en el sur del Golfo de México y nuestros resultados, resaltan que la variación biológica depende de la variabilidad espacio-temporal del ambiente debida a procesos físicos como giros, corrientes, frentes y aporte de agua dulce (Flores-Coto *et al.* 1988; Salas de León *et al.* 1992; Salas de León *et al.* 1998; Flores-Coto *et al.* 1999; Flores-Coto *et al.* 2000).

VII.- Conclusiones

En este trabajo se identificó la pluma del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta, un frente oceánico y un frente topográfico separados por una triple termoclina, haloclina y picnoclina. La zona de estudio estuvo compuesta por cuatro tipos de agua distintos que dan lugar a la formación de cinco hábitats.

A partir de los datos oceanográficos se explica el proceso de mezcla del agua del sistema Grijalva-Usumacinta, con el agua del banco de Campeche en un ambiente nerítico.

Las mayores abundancias de zooplancton e ictioplancton se encontraron en los hábitats Agua de la Pluma del Sistema Grijalva-Usumacinta (GUPW), Agua Mezclada del Frente (FMW) y, Agua del Frente Topográfico (TFW). En resumen la mayor abundancia de zooplancton se encuentre en la capa 1 (0 a 10 m), mientras que la mayor concentración de larvas de peces se presentó en la capa 2 (10 a 20 m). En cuanto a los hábitats la mayor abundancia de zooplancton siempre se presentó en el hábitat Agua Mezclada del Frente (FMW) en las tres capas.

La mayor concentración de larvas se presentó en las capas 2 y 3, pero en la capa 1 la mayor concentración de larvas se presentó en el hábitat Agua de la Pluma del Sistema Grijalva-Usumacinta (GUPW). Estas altas abundancias se encuentran en los ambientes donde la frecuencia de Brunt-Väisälä y la vorticidad potencial son altas, además de estar asociadas al patrón de circulación geostrofica. Los gradientes y las clinas que definen la zona frontal, sirven de barrera entre las comunidades del zooplancton. Las máximas abundancias de zooplancton e ictioplancton, se presentaron dentro de la pluma del río.

Se resalta la importancia biológica de los frentes generados por los ríos al desembocar al mar y los generados por la interacción de las corrientes costeras con la batimetría

VIII.- Referencias

Las referencias se citaron según los criterios de *Oceanography Magazine*, editada por *The Oceanography Society*. <http://www.tos.org/oceanography/guidelines.html>

- Alatorre-Mendieta, M.A., F. Ruiz y D.A. Salas de León, 1989: Efecto del paso de frentes fríos atmosféricos sobre la bahía de Campeche. Pp. 186-193. En: *Unión Geofísica Mexicana*. J. González, F. Medina, M. Romo y M. Martínez, eds, Unión Geofísica Mexicana.
- Anderson, J. T. 1988. A review of size dependent survival during pre-recruit stages of fishes in relation to recruitment. *Journal of Northwest Atlantic Fisheries Science*. 8: 56-66.
- Bahud, M. 1988. La Biologie larvaire chez les invertébrés marins: une question d'actualité (notes de lecture et commentaires). *Vie et Milieu*. 38(1): 19-24.
- Bengetsson, J. 2011. Applied (meta)community ecology: diversity and ecosystem services at the intersection of local and regional processes. Pp. 151-162. In: *Community Ecology: Processes, Models, and Applications*. H.A. Verhoef and P.J. Morin, eds, Oxford University Press.
- Bowman, M.J. and W.E. Esaias, eds. 1978. *Oceanic fronts in coastal processes. Proceedings of a Workshop Held at Marine Science Research Center. (May 25-27, 1977)*. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg New York
- Colunga-Enriquez, G. 1990. Determinación de la Circulación en la Bahía de Campeche Mediante un Modelo Inverso. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California.
- Connell, S. and B.M. Gillanders. 2007. *Marine Ecology*. Oxford University Press.
- Curry, P. and C. Roy. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling area. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 46(4): 670-680.
- Cushing, D.H. 1990. Plankton production and year-class strength in fish populations: an update of the match/mismatch hypothesis. *Advances in Marine Biology*. 26: 249-293.
- Cushing, D.H. 1996. Towards a science of recruitment in fish populations. *Ecology Institute*. D-21385 Oldendorf/Luhe Germany. 177 p.
- Cushman-Roisin, B. 1994. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Cushman-Roisin, B. and J.-M. Beckers 2011. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects* (2nd ed). International Geophysics Series vol.101. Academic Press.
- Czitrom, S.P.R. 1986. The effect of river discharge on the residual circulation in the Eastern Irish Sea. *Continental Shelf Research*. 6(3): 475-485.
- Czitrom, S.P.R., F. Ruiz, M.A. Alatorre and A.R. Padilla. 1986 (a). Preliminary study of a front in the bay of Campeche, Mexico. Pp: 301-311. In: *Marine Interfaces Ecohydrodynamics*. J.C.J. Nihoul, ed, Elsevier Oceanography Series 42.

- Czitrom, S.P.R., F. Ruiz, M.A. Alatorre-Mendieta and A.R. Padilla-Pilotze. 1986 (b). Preliminary Study of front in the bay of Campeche, México. *Draft*
- Czitrom, S.P.R., G. Budéus, and G. Krause. 1988. A tidal mixing front in an area influenced by land runoff. *Continental Shelf Research*. 8(3): 225-237.
- Czitrom, S.P.R. and J.H. Simpson. 1998. Intermittent stability and frontogenesis in an area influenced by land runoff. *Journal of Geophysical Research*. 103(C5): 10369-10376.
- Davis, C.S., G.R. Flierl, P.H. Wiebe and P.J.S. Franks. 1991. Micro patchiness, turbulence and recruitment in plankton. *Journal Marine Research*. 49: 109-152.
- Denman, K.L. and A.E. Gargett. 1995. Biological-physical interactions in the upper ocean: the role of vertical and small scale transport process. *Annual Reviews Fluids Mechanics*. 27: 225-255.
- Dower, J.F., T.J. Miller and W.C. Leggett. 1997. The role of microscale turbulence in the feeding ecology of larval fish. *Advances in Marine Biology*. 31: 169-220
- Duffy, J.E. 2011. Sea Changes: Structure and Functioning of Emerging Marine Communities. Pp. 95-114. In: *Community Ecology: Processes, Models, and Applications*. H.A. Verhoef and P.J. Morin, eds. Oxford University Press.
- Fedorov, K.N. 1986. *The Physical Nature and Structure of Oceanic Fronts*. Lecture Notes on Coastal Estuarine Studies. Vol. 19. Springer-Verlag.
- Flores-Coto, C., L. Sanvicente-Añorve, R. Pineda-Lopez y M. Rodriguez-Vanlier, 1988. Composición, distribución y abundancia ictioplanctonica del sur del Golfo de México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. *Universidad y Ciencia*. 5(9): 65-84.
- Flores-Coto, C. and U. Ordoñez-Lopez. 1991. Larval Distribution and abundance of Myctophidae, Gnostomatidae, and Sternoptychidae from the southern Gulf of Mexico. Pp. 55-64. In: *Proceedings of the Thirteenth Annual Fish Conference. 21-26 mayo, 1989*. R.D. Hoyt, ed, Larval Fish Recruitment and Research in the Americas: Mérida, México. NOAA Technical Report NMFS95. .
- Flores-Coto, C., P. Figueroa-Páez y F. Zavala-García. 1999. Distribución y abundancia de larvas de Scianidae en la columna de agua, en el sur del Golfo de México. Primavera. *Hidrobiológica*. 9(2): 135-144.
- Flores-Coto, C., R. Martínez-Gutiérrez, M. González-Félix, L. Sanvicente-Añorve and F. Zavala-García. 2000. Annual variation of ichthyoplankton assemblages in neritic waters of southern Gulf of Mexico. *Caribbean Journal of Science*. 36(3-4): 233-243.
- Fofonoff, N.P. and R.C. Millard Jr. 1983. *Algorithms for computation of Fundamental Properties of Sea Water*. UNESCO Technical Papers in Marine Science 44.
- Fofonoff, N.P. and R.C. Millard. 1991. *The Calculation of Physical Properties of Seawater*. WHP Operations and Methods Manual. WOCE Reports 68/91. Unpublished Manuscript.
- Franks, P.J.S. 1992(a). Phytoplankton bloom at fronts: patterns scales and physical forcing mechanisms. *Reviews in Aquatic Sciences*. 6(2): 212-137.
- Franks, P.J.S. 1992(b). Sink or swim: accumulation of biomass at fronts. *Marine Ecology Progresses Series*. 82: 1-12.

- Fukami, T. 2011. Community Assembly Dynamics in Space. Pp. 45-54. In: *Community Ecology: Processes, Models, and Applications*. H.A. Verhoef and P.J. Morin, eds, Oxford University Press.
- General Oceanics, 1996. Oceansoft I. MK IV/SCTD Acquisition Software Manual. P/N Manul-10239 (<http://www.business1.com/genocean>).
- Gonzalez, C.R.M. and B.P. Bradley. 1994. Salinity Stress Proteins in *Eurytemora affinis*. Pp. 461-468. In: *Ecology and Morphology of Copepods*. F.D. Ferrari and B.P. Bradley, ed, *Hidrobiologia*. 292/293. Kluwer Academic Publishers.
- Govoni, J.J. 1993. Flux of Larval Fishes Across Frontal Boundaries: Examples from Mississippi River Plume Front and Western Gulf Stream Front in Winter. *Bulletin of Marine Science*. 53(2): 538-566.
- Grimes, C.B. 2001. Fishery Production and the Mississippi River Discharge. *Fisheries*. 26(8): 17-26.
- Gutiérrez de Velazco, G. and C.D. Winant. 1996. Seasonal patterns of wind stress and winds stress curl over the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 101(C8): 18,127-18,140.
- Hamner, W.M. and J.H. Carleton. 1979. Copepod swarms: attributes and role in coral reef ecosystems. *Limnology and Oceanography*. 24: 1-14.
- Hassett, R.P. and G.W. Boehlert. 1999. Spatial and Temporal Distributions of Copepods to Leeward and Windward of Oahu, Hawaiian Archipelago. *Marine Biology* 134: 571-584.
- Haury, L.R. and H. Yamazaki. 1995. The dichotomy of scales in the perception and aggregation behavior of zooplankton. *Journal of Plankton Research*. 17: 191-197.
- Haury, L.R., H. Yamazaki and E.C. Itsweire. 1990. Effect of turbulence shears flow on Zooplankton Distribution. *Deep-Sea Research*. 37(3): 447-461.
- Hjort, J. 1914. Fluctuations in the Great Fisheries of Northern Europe Viewed in Light of Biological Research. *Rapport P. -V. Reun. Cons. Perm. Int. Explor. Mer*. 20: 1-228.
- Imberger, J. 2013. *Environmental Fluid Dynamics: Fluid Processes, Scaling, Equations of Motion and Solutions to Environmental Flows*. Academic Press.
- Kaiser, M.J., M.J. Attrill, S. Jennings, D.N. Thomas, D.K.A. Barnes, A.S. Brierley, J.G. Hiddink, H. Kaartokallio, N.V.C. Polunin y D.G. Raffaelli. 2011. *Marine Ecology: Processes, Systems and Impacts* (2nd ed). Oxford University Press.
- Kingsford M.J. and I.M. Shuthers. 1996. The influence of tidal phase on patterns of ichthyoplankton abundance in the vicinity of an estuarine front. Botany bay, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 43: 33-54.
- Kingsford, M., E. Wolanski and J. Choat. 1991. Influence of tidally induced fronts and Langmuir circulations on distribution and movements of presettlement fishes around coral reef. *Marine Biology*. 109: 167-180.
- Kjørboe, T., P. Munk, K. Richardson, V. Christensen and H. Paulsen. 1988. Plankton dynamics and larval herring growth, drift and survival in front area. *Marine Ecology Progresses Series*. 44: 205-219.

- Lalli, C.M. and T.R. Parsons. 1997. *Biological Oceanography: An Introduction* (2nd ed). The Open University Set Book. Butterworth – Heinemann.
- Lara-López, A. L. 2001. Determinación de la biomasa zooplanctonica frente a la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta utilizando un perfilador acústico doppler. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencia. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Largier, J.L. 1993. Estuarine fronts: how important are they?. *Estuaries*. 16(1): 1 – 11.
- Lasker, R. 1975. Field criteria for survival of anchovy larvae: the relation between inshore chlorophyll maximum layers and successful first feeding. *US Fisheries Bulletin*. 73: 453-462
- Lasker, R. 1978. The relation between oceanographic conditions and larval anchovy food in the California current: identification of factors contributing to recruitment failure. *Rapp. P. – V. Reun. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* 173: 212 – 230
- Legendre, L. and S. Demers. 1984. Towards dynamic biological oceanography and limnology. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 41: 2–19.
- Leising, A.W. and J. Yen. 1997. Spacing mechanisms within light-induced copepod swarms. *Marine Ecology Progress Series*. 155: 127–135
- Levin, L.A. 1983. Drift tube studies of bay-ocean water exchange and implications for larval dispersal. *Estuaries*. 6(4): 364-371.
- Levin, L.A. 1990. A Review of methods for labeling and tracking marine invertebrate larvae. *Ophelia*. 32(1-2): 115-144.
- Levinton, J.S. 2009. *Marine Biology: Function, Biodiversity, Ecology* (3rd ed). Oxford University Press.
- Longhurst, A. 1981. Ecological significance of spatial variability. Pp 415–441. In: *Analysis of Marine Ecosystems*. A.R. Longhurst, ed, Academic Press.
- Longhurst, A. 2007. *Ecological Geography of the Sea* (2nd ed). Academic Press
- Mackas, D.L., K.L. Denman and M.R. Abbott. 1985. Plankton patchiness: biology in the physical vernacular. *Bulletin of Marine Science*. 37: 652–674.
- Marra, J. 1980. Vertical mixing and primary production. Pp. 121-137. In: *Primary Productivity in The Sea*. P.G. Falkowski, ed, Plenum Publishing.
- Miller, C. B. 2004. *Biological Oceanography*. Blackwell Publishing.
- Monreal-Gómez, M.A. y D.A. Salas de León. 1997. Circulación y estructura termohalina del Golfo de México (Cap. 9). Pp. 183-199. En: *Contribuciones a la Oceanografía Física de México. Monografía*, No. 3. M.F. Lavin, ed, Unión Geofísica Mexicana. .
- Monreal-Gómez, M. y D.A. Salas de León. 1990. Simulación de la circulación en la bahía de Campeche. *Geofísica Internacional*. 29(2): 101-111.
- Monreal-Gómez, M., D.A. Salas de León, A.R. Padilla-Pilotze and M.A. Alatorre-Mendieta. 1992. Hydrography and estimation of density Currents in the southern part of the Bay of Campeche, Mexico. *Ciencias Marinas*. 18(4): 115-133.

- Moore, E. and F. Sander. 1976. Quantitative and qualitative aspects of the zooplankton and breeding patterns of copepods at two Caribbean coral reef stations. *Estuarine Coastal Marine Science*. 4: 589-607
- Mullin, M.M. 1988. Production and distribution of nauplii and recruitment variability-putting the pieces together. Pp. 297-320. In: *Toward a Theory on Biological-Physical Interactions in the World Ocean*. B.J. Rothschild, ed, Kluwer Academic Publishers.
- Mullin, M.M. 1993. *Webs and Scales: Physical and Ecological Processes in Marine Fish Recruitment*. Washington Sea Grant Program. University of Washington Press.
- Munk, W.H. 1966. Abyss Recipes. *Deep-Sea Research*. 13: 707-730
- Nagai, T., A. Tandon, N. Gruber and J.C. McWilliams. 2008. Biological and Physical impacts of Ageostrophic Frontal Circulations Driven by Confluent Flow and Vertical Mixing. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 45: 229-251.
- Naganuma, T. 1996. Calanoid Copepods: Linking Lower-Higher Trophic Levels by Linking Lower-Higher Reynolds Numbers. *Marine Ecological Progress Series*. 136: 311-313.
- Nee, S., 2008. Metapopulations and their Spatial Dynamics. Pp. 35-45. In: *Theoretical Ecology: Principles and Applications* (3rd ed). R. May and A. McLean, eds, Oxford University Press.
- Olson, D.B., G.L. Hitchcock, A.J. Mariano, C. Ashjian, G. Peng, R.W. Nero and G. Podestá. 1994. Life on the edge: marine life and fronts. *Oceanography Magazine*. 7(2).
- Osborn, T. 1995. Copepod behaviour and turbulence: an evolutionary response? Pp. 27-32. In: *Ecology of Fjords and Coastal Waters*. H.R. Skjoldal, C. Hopkins, K.E. Erikstad and H.P. Leinaas, eds, Elsevier Science B.V.
- Padilla-Pilotze, A.R., M.A. Alatorre-Mendieta, F. Ruiz y S.P.R. Czitrom, 1985. Observaciones recientes de la estructura termohalina en el sur del Golfo de México. *Manuscrito*. 7p
- Parrish, R.H., C.S. Nelson and A. Bakun. 1981. Transport mechanisms and reproductive success of fisheries in the California current. *Biological Oceanography*. 1: 175-203
- Parsons, T.R., M. Takahashi and B. Hargrave. 1990. *Biological Oceanographic Processes* (3rd ed). Pergamon Press.
- Pickard, G.L. 1975. *Descriptive Physical Oceanography An Introduction* (2nd ed). Pergamon Press.
- Platt, T. 1972. Local plankton abundance and turbulence. *Deep-Sea Research*. 19: 183-187.
- Pond, S. and G. Pickard. 1978. *Introductory Dynamic Oceanography*. Pergamon Press.
- Reiss, C. S., G. Panteleev, C.T. Taggart, J. Sheng and B. DeYoung. 2000. The observations on larval fish transport and retention on the Scotian shelf in relation to geostrophic circulation. *Fisheries Oceanography*. 9(3): 195-213.
- Rosales-Hoz, L., A. Carranza-Edwards, S. Arias-Reynada y S. Santiago-Pérez. 1992. Distribución de metales en sedimentos recientes del sureste del Golfo de México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*.

- Salas de León, D.A., M.A. Monreal-Gómez y G. Colunga-Enríquez. 1992. Hidrografía y circulación geostrofica en el sur de la bahía de Campeche. *Geofísica Internacional*. 31(3): 315-323.
- Salas de León, D. A., M.A. Monreal-Gómez, L. Sanvicente-Añorve et C. Flores-Coto. 1998. Influence de la circulation à long-terme sur la répartition de organismes zooplanctoniques dans la baie de Campeche, Mexique. *Oceanologica Acta*. 21(1): 87-93.
- Sammarco, P.W. and M.L. Heron, 1994. The Bio-physics of marine larval dispersal. Coastal and Estuarine Studies. *American Geophysical Union*.
- Sánchez-Ramírez, M. y C. Flores-Coto. 1993. Desarrollo larvario y clave de identificación de algunas especies de la familia Carangidae (Pices) del sur del Golfo de México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México*. 20(1): 1-24.
- Sanvicente-Añorve, L.E. 1990. Comunidades Ictioplanctónicas en el Suroeste del Golfo de México. Tesis de Maestría. UACPyP – CCH. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma México. .
- Schlitzer, R. 2009. Ocean Data View, Software. <http://odv.awi.de>. Alfred Wegener Institute. Columbusstrasse, 27568, Bremerhaven, Germany. E-mail: Reiner.Schlitzer@awi.de
- Shirasago-German, B. 1991. Hidrografía y Análisis Frontogénético en el Sur de la Bahía de Campeche. Tesis de Maestría. UACPyP – CCH. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma México.
- Simpson, J.H. and J. Sharples. 2012. *Introduction to the Physical and Biological Oceanography of the Shelf Seas*. Cambridge University Press.
- Sinclair, M. 1988. *Marine Populations – An essay on population regulation and speciation*. Washington Sea Grant Program, Seattle.
- Speight, M. and P. Henderson. 2010. *Marine Ecology: Concepts and Applications*. Wiley – Blackwell Press.
- Squires, K.D. and H. Yamazaki. 1995. Preferential concentration of marine particles in isotropic turbulence. *Deep-Sea Research I*. 42(11/12): 1989-2004.
- Strathmann, R.R. 1990. Why Lifes histories evolve differently in the sea?. *American Zoologist*. 30: 197-207.
- Strathmann, R. R., 1993. Hypothesis on the origins of marine larvae. *Annals Reviews Ecology Systematics*. 24: 89-117.
- Sundby, S. 1995. Wind climate and foraging of larval and juvenile arcto-Norwegian cod (*Gadus morhua*). In: *Climate Change and Northern Fish Populations*. R.J. Beamish, ed, Canadian Special Publication Fisheries Aquatic Science. 121.
- Sundby, S., B. Ellertsen and P. Fossum. 1994. Encounter rates between fist-feeding cod larvae and their prey during moderate to strong turbulent mixing. *ICES Marine Science Symposium*. 198: 393-405.
- Talley, L.D., G.L. Pickard, W.J. Emery and J.H. Swift. 2012. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction* (6th ed). Academic Press.

- Tomczak, M. (1999). Some historical, theoretical and applied aspects of quantitative water mass analysis. *Journal of Marine Research*. 57: 275 – 303.
- Tziperman, E. 1998. Calculating the time-mean oceanic general circulation and mixing coefficients from hydrographic data. *Journal of Physical Oceanography*. 18: 519-525.
- Tziperman, E. and A. Hecht. 1998. Circulation in the eastern Levantine Basin determined by inverse methods. *Journal of Geophysical Oceanography*. 18: 506-518.
- Williams, R., D.V.P. Conway and H.G. Hunt. 1994. The role of copepods in the planktonic ecosystems of mixed and stratified waters of european shelf seas. Pp. 521-530. In: *Ecology and Morphology of Copepods*. F.D. Ferrari and B.P. Bradley, ed, Hidrobiología 292/293. Kluwer Academic Publishers.
- Yañez-Arancibia, A. and J.W. Day, Jr. 1982. Ecological characterization of Terminos lagoon, a Tropical Lagoon Estuarine System in the Southern Gulf of Mexico. *Oceanológica Acta* (5): 431-500
- Zavala-García, F. and C. Flores-Coto. 1989. Medición de biomasa zooplanctonica. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma México*. 16(2): 273-278