



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

DISTRIBUCIÓN DE LA BIOMASA ZOOPLANCTÓNICA EN EL CAÑÓN DE CAMPECHE, GOLFO DE MÉXICO.

T E S I S

Que para obtener el título de

BIÓLOGA

PRESENTA:

Rosa María Fuentes Martínez

Tutor:

Dr. Erik Coria Monter

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología



Los Reyes Iztacala, Estado de México, Mayo de 2022



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.

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



ÍNDICE

Dedicatorias.....	4
Agradecimientos.....	5
Resumen.....	7
Introducción.....	9
Marco Teórico.....	12
Zooplancton.....	12
Generalidades.....	12
Principales grupos.....	13
Factores abióticos que determinan su distribución y abundancia.....	13
Métodos para coleccionar y estimar su biomasa.....	16
Antecedentes.....	17
Justificación.....	20
Objetivos.....	21
General.....	21
Particulares.....	21
Hipótesis.....	21
Materiales y Métodos.....	22
Resultados y Discusión.....	23
Conclusiones.....	38
Referencias.....	39

DEDICATORIAS

A mis padres, quienes estuvieron siempre dándoles todo por mí, porque sin su apoyo y esfuerzo no estaría donde me encuentro y no sería quien soy, muchos de mis logros se los debo a ustedes, incluyendo éste. Son un claro ejemplo de esfuerzo y dedicación.

Los amo y los admiro infinitamente

A mis hermanos por apoyarme incondicionalmente en todo momento y estar conmigo cuando hubo momentos difíciles, también por todos aquellos bellos momentos que hemos compartido juntos, siempre son un ejemplo a seguir.

A mi soulmate quien llegó cuando más lo necesitaba, estuvo a mi lado en todo momento y no me dejó caer cuando sentía que ya no podía más, quien me motivó a seguir adelante y me acompaña día a día en esta aventura llamada vida, estoy muy agradecida por haberte conocido, ocupas un lugar enorme y muy especial en mi corazón.

Te amo mucho mucho

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al universo, a la vida porque existo, porque me encuentro bien, por lo que tengo y porque pude concretar mis estudios.

A mi madre y padre porque gracias a ellos existo y soy la persona que soy, por todo lo que me han enseñado e inculcado, por su constante apoyo en cada decisión que tomo y sobre todo por su confianza, su cariño y comprensión, sin su apoyo no hubiera sido posible la culminación de mi carrera profesional.

A mis hermanos porque también me brindaron mucho apoyo para que pudiera concretar mis estudios, por darme consejos para afrontar los diferentes retos que se me han presentado y porque son un ejemplo a seguir.

A mis amigos y amigas por siempre creer en mí y apoyarme en todo momento, por todas las alegrías y aventuras que pasamos, por su cariño, por estar conmigo en las buenas y en las malas.

A mi amiga Karina por acompañarme en la realización de este proyecto, porque ambas logramos nuestro objetivo, por ser mi amiga y compañera de trabajo a la vez.

A Milo porque llegó a mi vida en el momento menos pensado y porque me acompañó en un momento crucial y muy difícil en mi vida, porque nunca me dejó sola y me brindó mucho cariño.

Al Dr. Erik Coria Monter, director de tesis, por todo su apoyo, por sus enseñanzas, su paciencia, su valiosa guía y asesoramiento para la realización de este proyecto.

A la Dra. Elizabeth Durán Campos, por sus enseñanzas, por su guía, por la poca convivencia que pudimos compartir durante mi estancia en el Instituto, usted fue también como mi tutora, al igual que el Dr. Erik, muchas gracias por todo su apoyo.

Gracias de todo corazón a todas las personas que me ayudaron de manera directa o indirecta en la realización de este proyecto.

Por último, mis más sinceros agradecimientos a la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, lugar donde recibí la mejor educación y todos los conocimientos que adquirí a lo largo de mi carrera profesional, además de que conocí personas muy valiosas e importantes en mi vida, gracias también a todos los profesores que me enseñaron y me asesoraron.

El muestreo y obtención de los datos provienen de la campaña CAÑON-IV realizada a bordo del buque oceanográfico Justo Sierra. El financiamiento para el tiempo de buque fue cubierto por la Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradecemos el apoyo de la Dra. María Adela Monreal-Gómez y del Dr. David Alberto Salas de León por el acceso a los datos y muestras utilizadas en este proyecto

RESUMEN

El presente proyecto analiza y discute el efecto de estructuras hidrodinámicas en la distribución de la biomasa zooplanctónica del Cañón de Campeche, Golfo de México, durante la época de nortes de 2011. Se realizó un crucero de investigación oceanográfica del 22 al 27 de febrero de 2011 a bordo del B/O Justo Sierra UNAM, donde se adquirieron datos hidrográficos con ayuda de una sonda CTD (conductividad, temperatura y profundidad) SeaBird 19 y se colectaron muestras de zooplancton mediante redes bongo de 303 μm en un total de 48 estaciones de muestreo. La distribución horizontal de los parámetros hidrográficos a diferentes profundidades mostró una serie de núcleos fríos y cálidos, indicativos de la presencia de vórtices ciclónicos y anticiclónicos de mesoescala. Los resultados de la distribución horizontal de la biomasa mostraron valores máximos de 40 g/ 100 m³ presentado la mayor biomasa asociada a los núcleos de baja temperatura. Los resultados obtenidos mostraron que existe una clara dependencia entre la biomasa zooplanctónica y las estructuras hidrodinámicas en el Cañón de Campeche. Como claro ejemplo de esta dependencia se encontró que la distribución horizontal de temperatura, salinidad y densidad estuvo condicionada por la presencia de un vórtice ciclónico, el cual se infirió que favorece la producción biológica, esto se debe a la gran cantidad de nutrimentos que aporta hacia la zona eufótica, provocando un aumento en la biomasa fitoplanctónica y por ende un aumento en la biomasa zooplanctónica. De igual forma, se infirió el efecto que tienen fenómenos atmosféricos como son los nortes, ya que también pueden afectar la distribución de la biomasa zooplanctónica.

Palabras clave: Biomasa, zooplancton, distribución, vórtices, temperatura

ABSTRACT

This project analyzes and discusses the effect of hydrodynamic structures on the distribution of zooplankton biomass in the Campeche Canyon, Gulf of Mexico, during the northern season of 2011. An oceanographic research cruise was carried out from February 22 to 27, 2011 on board the R/V Justo Sierra owned by UNAM, where hydrographic data were acquired with a CTD (conductivity, temperature and depth) SeaBird 19 sonde and zooplankton samples were collected using 303 μm bongo nets in a total of 48 sampling stations. The horizontal distribution of the hydrographic parameters at different depths showed a series of cold and warm cores, indicative of the presence of mesoscale cyclonic and anticyclonic eddies. The results of the horizontal distribution of the biomass showed maximum values of 40 g/100 m³, presenting the highest biomass associated with the low temperature core. The results obtained showed that there is a clear dependence between the zooplankton biomass and the hydrodynamic structures in the Campeche Canyon. As a clear example of this dependence, it was found that the horizontal distribution of temperature, salinity and density was conditioned by the presence of a cyclonic eddy, which was inferred to increase biological production, this is due to the large nutrients concentrations that are upwelled to the euphotic zone, and induce an increase in phytoplankton biomass and therefore an increase in zooplankton biomass. Similarly, the effect of atmospheric phenomena such as "Nortes" was inferred, since they can also affect the distribution of zooplankton biomass.

Keywords: Biomass, zooplankton, distribution, eddies, temperature

INTRODUCCIÓN

El Golfo de México es considerado como un sistema semicerrado, con un notable hidrodinámismo y complejidad el cual ha sido incorporado al grupo de los grandes ecosistemas marinos que se caracterizan por su elevada productividad y diversidad biológica (Yáñez-Arancibia y Day, 2004). Se localiza en la zona subtropical, entre 18° y 30° latitud N y 82° y 98° longitud O, presenta entrada de agua oceánica por el canal de Yucatán y salida por el estrecho de Florida, su profundidad máxima alcanza 3,780 metros en su región central (Fosa de Sigsbee) con una amplia plataforma continental en las penínsulas de Yucatán y de Florida. La plataforma continental en la península de Yucatán es conocida como Banco de Campeche y su porción suroccidental se denomina Sonda de Campeche; en el extremo occidental del Banco de Campeche se encuentra una zona que exhibe cambios muy grandes de profundidad, denominada Cañón de Campeche (Figura 1).

En términos hidrodinámicos, el Golfo de México se caracteriza por la presencia de diversos procesos asociados con la Corriente de Lazo, la cual se deriva de la Corriente de Yucatán, que al penetrar por el estrecho del mismo nombre, forma un meandro, que debido a la inestabilidad en la circulación del agua, se desprende de la corriente principal, dando origen a un vórtice anticiclónico, con un radio promedio de 180 km y una profundidad media de 500 m. Dicho vórtice, durante su travesía hacia el noroeste, transfiere energía al entorno en forma de filamentos; una de las formas de esta pérdida de energía es atribuida a la generación de vórtices ciclónicos subsidiarios de forma tal que en las interfaz de éstos, se presenta un gran aporte de nutrientes que promueve a su vez la productividad biológica (Salas de León *et al.*, 2004; Durán-Campos *et al.*, 2017).

Como un eslabón fundamental en la cadena trófica, el zooplancton representa uno de los organismos más importantes en cualquier ecosistema marino. Compuesto por un grupo heterogéneo de organismos, juega un papel fundamental en la transferencia de carbono y energía al interior de la columna de agua (Brierley, 2017;

Richardson, 2008) y la cuantificación de su biomasa ha sido catalogada por diversos autores como un indicador de la productividad secundaria en el océano.

La biomasa zooplanctónica en el océano está determinada por una serie de factores ambientales y procesos hidrodinámicos que se presentan en la columna de agua a diferentes escalas espacio-temporales, entre los que destacan frentes, surgencias, vórtices, entre otros (McGillicuddy, 2016). Dichos procesos se encuentran vinculados a su vez, con el abastecimiento de nutrimentos hacia las capas superficiales del océano, lo que promueve un incremento en la biomasa fitoplanctónica y, en consecuencia, un incremento en la biomasa zooplanctónica (McGillicuddy *et al.*, 2007).

En la última década, se han realizado algunos estudios sobre el efecto de las variables ambientales y algunos procesos hidrodinámicos en la biomasa zooplanctónica del sur del Golfo de México. Por ejemplo, Vera-Mendoza y Salas de León (2014) determinaron que la biomasa zooplanctónica está modulada por algunos parámetros hidrográficos, en particular la distribución de la salinidad. Zavala-García *et al.* (2016) documentaron que la variabilidad estacional de la biomasa zooplanctónica depende del volumen de agua dulce proveniente de las descargas de aguas epicontinentales.

A pesar de que los estudios realizados hasta el momento han sido muy útiles para evaluar las variaciones espaciales de la biomasa del zooplancton en la porción sur del Golfo de México y su relación con algunas variables ambientales, la gran mayoría se han realizado en los meses más cálidos del año (junio-septiembre) por lo que aún existen incertidumbres acerca del papel que juega la hidrografía en la biomasa del zooplancton durante los meses fríos. En este sentido, el objetivo del presente proyecto es determinar la biomasa zooplanctónica y su relación con los procesos hidrodinámicos presentes en el Cañón de Campeche, durante Febrero de 2011 (época Nortes), un periodo climático en el que las observaciones *in-situ* son limitadas debido a los retos que implica la navegación en una época del año en la que los vientos y las corrientes son extremas y, por lo tanto, la adquisición de datos y muestras de organismos del zooplancton es compleja.

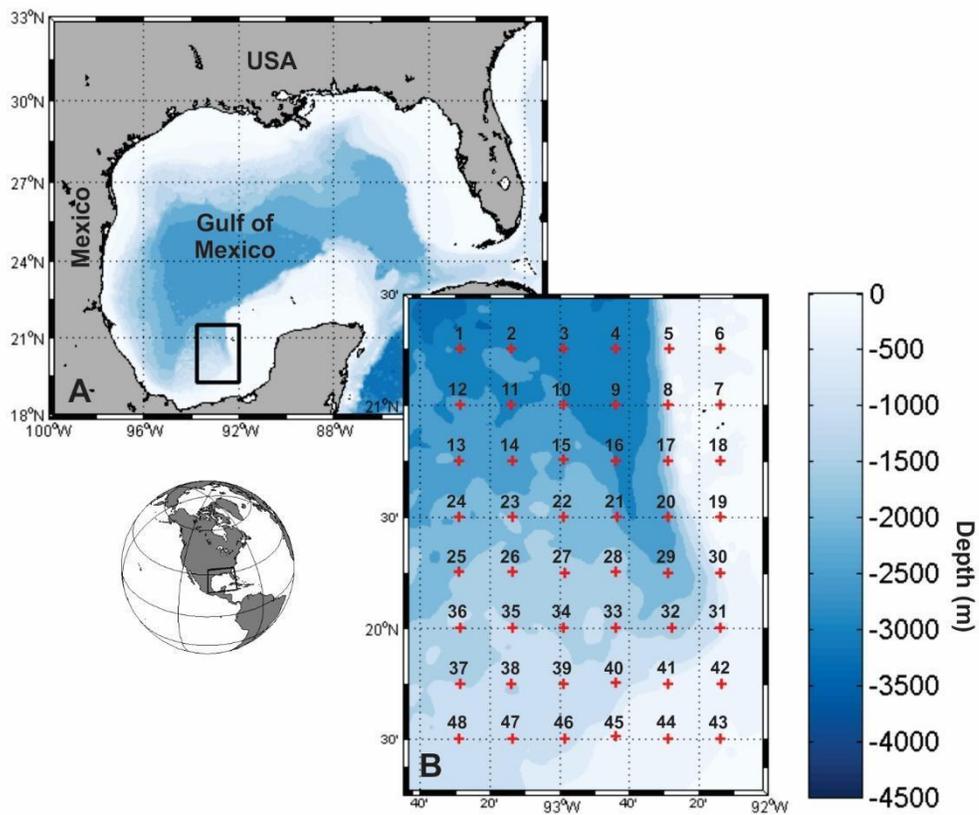


Figura 1. Área de estudio. A) Golfo de México y B) Cañón de Campeche. + representan las estaciones de muestreo. La batimetría se presenta en m.

MARCO TEÓRICO

Zooplancton

Generalidades

El término plancton fue propuesto por Hensen en 1887. Etimológicamente, significa errante y hace referencia a todos los organismos acuáticos que tienen una capacidad limitada para desplazarse en contra de la corriente (Hensen, 1887).

El plancton incluye aquellos organismos que habitan en aguas epicontinentales y marinas suspendidos en la columna de agua que no pueden sobreponerse a las corrientes marinas. Se encuentra dividido en fitoplancton, que incluye a los protozoarios y bacterias fotosintéticas unicelulares y en zooplancton, que incluyen tanto organismos unicelulares como multicelulares (Johnson y Allen, 2012).

La mayoría de las muestras de zooplancton incluyen una mezcla diversa de holoplancton, organismos que pasan toda su vida en el plancton, y meroplancton, zooplancton que pasa solo una parte de su ciclo de vida en la columna de agua, generalmente como estadios larvales, por ejemplo los peces (Johnson y Allen, 2012).

El plancton abarca un intervalo de tamaño de más de ocho órdenes de magnitud. Debido a que el pico y el nanoplancton atraviesan la mayoría de las redes planctónicas, durante mucho tiempo se ignoró su abundancia e importancia ecológica. El microzooplancton incluye una combinación de organismos en el intervalo de tamaño de 20 a 200 μm . El microzooplancton predominante incluye a los protozoos ciliados, flagelados y ameboides y los nauplios de copépodos. El mesozooplancton en el intervalo de tamaño de 0,2 a 20 mm domina la mayoría de las muestras. Los copépodos por sí solos a menudo representan del 50% al 90% de las capturas, con densidades de hasta 1 millón por metro cúbico (m^3). Macrozooplancton (2–20 cm) incluye a los camarones, larvas de peces y otros animales grandes y móviles, aunque comunes, tienden a ser menos abundantes y menos susceptibles de captura (Johnson y Allen, 2012).

Por definición, el plancton es arrastrado de un lado a otro por las corrientes. Muchos son nadadores capaces de realizar maniobras de escape rápidas y extensas excursiones verticales. Si bien las velocidades generales de natación rara vez superan los 5 cm por segundo, estas velocidades son más impresionantes cuando es considerado el tamaño de los animales. Por ejemplo, algunos ciliados y rotíferos, aunque son impulsados por cilios, pueden alcanzar velocidades de más de 10 longitudes corporales por segundo. Los copépodos más rápidos nadan a más de 100 longitudes corporales por segundo cuando están en modo de escape (Johnson y Allen, 2012).

Principales grupos

Según el ciclo de vida, el zooplancton se puede dividir en dos tipos, meroplancton y holoplancton. El meroplancton se refiere a los organismos que sólo durante una parte de su ciclo de vida son planctónicos. Dentro de esta categoría se encuentran algunos crustáceos y, principalmente los peces en sus estadios larvales.

El holoplancton hace referencia a los organismos que son planctónicos a lo largo de su ciclo de vida, se divide en protozooplancton y metazooplancton. Dentro del protozooplancton destacan los Foraminíferos, Radiolarios y Tintínidos. Asimismo, dentro del metazooplancton se pueden encontrar algunos Crustáceos como los Copépodos, Ostrácodos, Cladóceros, Isópodos, Misidáceos, Anfípodos y Eufáusidos. Asimismo, también dentro del metazooplancton se encuentran Sinóforos, Ctenóforos, Poliquetos, Moluscos y Quetognatos (Boltovsky, 1999).

Factores abióticos que determinan su distribución y abundancia

Existen diversos factores que pueden afectar a la distribución, así como a la abundancia del zooplancton. La temperatura del agua, por ejemplo, es la que determina los intervalos de distribución geográfica principalmente, una función tanto de la latitud como de las principales corrientes oceánicas. También, dentro de un

intervalo de temperatura dado, la salinidad es probablemente el factor más importante que afecta la distribución. Dentro de cada una de las divisiones de salinidad, muchas especies muestran preferencias por hábitats específicos o condiciones hidrográficas. Las diferencias de profundidad, velocidad de la corriente, energía de las olas y turbidez de la columna de agua afectan las distribuciones locales (Johnson y Allen, 2012).

La proximidad de ciertos hábitats como marismas, criaderos de ostras y vegetación sumergida también afecta la distribución del plancton (Johnson y Allen, 2012).

La distribución de los taxones planctónicos individuales cambia con el tiempo a medida que cambian los factores abióticos y bióticos. Estos factores incluyen la distribución de alimentos, la abundancia de depredadores y los cambios de temperatura o salinidad. Las diferentes larvas u otras etapas de la vida de un taxón pueden tener diferentes distribuciones dentro de la misma masa de agua (Johnson y Allen, 2012).

Otro de los factores que pueden afectar la distribución de la biomasa zooplanctónica son los vórtices, los cuales se definen como un flujo turbulento en rotación cuya circulación varía de acuerdo con el hemisferio donde se presenten, éstos generalmente se dividen en: ciclónicos, anticiclónicos y mode-water (media-agua) (McGillicuddy *et al.*, 2007).

Los vórtices en el océano pueden ser de diferentes escalas; algunos son muy pequeños que pueden ser dominados por la viscosidad, mientras que otros son tan grandes que la curvatura y la rotación de la Tierra ejercen efecto sobre ellos (Olson, 1991).

Los vórtices ciclónicos elevan la picnoclina estacional y permanente, mientras que los vórtices anticiclónicos hunden ambas picnoclinas. Los vórtices mode-water hunden la picnoclina principal, mientras que la estacional se eleva. Asimismo, se ha reportado que la dirección de rotación de los vórtices mode-water, es la misma que los vórtices anticiclónicos (McGillicuddy *et al.*, 2007).

En los vórtices ciclónicos, la circulación es contraria al sentido de las manecillas del reloj, en cambio, en los anticiclónicos, la circulación es a favor de las manecillas del reloj. Estos sentidos sólo son tomados en cuenta si se considera que el vórtice se encuentra en el hemisferio norte (De la Lanza, 2001). Sin embargo, el tamaño de los vórtices depende de diversos factores, como la latitud a la que se genera, la estratificación de la columna de agua, así como la topografía del fondo (Cruz-Gómez *et al.*, 2008).

En el hemisferio norte, los vórtices anticiclónicos tienen la característica de atrapar partículas en el centro y hundirlas a zonas profundas o subsuperficiales, esto genera una baja productividad en la zona de influencia del giro. En cambio, un giro ciclónico captura partículas, sedimentos y nutrimentos de aguas subsuperficiales y las eleva a la superficie, esto genera una fertilización del agua superficial, provocando una alta productividad en la zona (Salas de León y Monreal-Gómez, 2005).

El esfuerzo rotacional del viento, la geometría del golfo y la corriente de Lazo, provocan que en el Golfo de México existan zonas de giros ciclónicos (que inducen el ascenso de agua) y giros anticiclónicos (que inducen el descenso de agua). En áreas de divergencia oceánica (giros ciclónicos), la temperatura disminuye y el contenido de nutrimentos es mayor, estas zonas son las consideradas más productivas de la plataforma continental (Gordon, 1967; Bessonov *et al.*, 1971).

La circulación en el Golfo de México es dominada por dos características semipermanentes: la Corriente de Lazo y un gran giro anticiclónico, estos se sitúan en la parte oriental y occidental del Golfo, respectivamente (Behringer *et al.*, 1977). Los giros anticiclónicos que se desprenden de la Corriente de Lazo juegan un papel muy importante en el balance de sal y calor en el interior del golfo, debido a esto representan el mecanismo fundamental de transporte de energía de la región oriental hacia la occidental (Monreal Gómez y Salas de León, 1997).

Métodos para coleccionar y estimar la biomasa zooplanctónica

Una de las primeras técnicas que se han utilizado en el muestreo del zooplancton y que aún se han seguido empleando con eficiencia, se encuentra el uso de redes de malla fina (Fraser, 1968). Sin embargo, la información que proporcionan es muy limitada, debido a que realizan muestreos específicos con el fin de abarcar áreas extensas (Ashjian *et al.* 1994). Este sigue siendo el método más comúnmente utilizado para estudiar la distribución y composición del zooplancton tanto cualitativa como cuantitativamente. Este método permite discriminar a los organismos recolectados con base en su tamaño y de acuerdo al tamaño de la malla de la red, asimismo, se puede contar con flujómetros calibrados que, adicionados a las redes, pueden determinar la densidad de los organismos (Omori e Ikeda, 1984).

En la actualidad el uso de redes y flujómetros es rutinario en el muestreo de zooplancton, en general. A partir de las muestras obtenidas con las redes, se puede realizar la estimación de la biomasa zooplanctónica por los siguientes métodos: a) Método gravimétrico, en el cual se determina el peso o masa de los organismos, como peso húmedo, peso seco o peso seco libre de cenizas; b) Método volumétrico, el cual determina el volumen desplazado por el plancton, incluyendo el agua ambiental y estructural; c) Métodos químicos y bioquímicos, en los cuales se determina el contenido de Carbono, Nitrógeno, Fósforo y la cantidad de componentes bioquímicos como proteínas, lípidos, carbohidratos, ARN y ATP (Gasca, 1996). Sin embargo, una de las desventajas de estos métodos de muestreo puede ser que sean costosos o no brinden la información necesaria para los fines de investigación.

En los últimos 20 años, con los nuevos métodos acústicos se ha logrado un gran avance en el campo de la hidroacústica, el cual se basa en el principio de la percepción remota mediante el sonido (Galarza-Macias, 1998; Gómez-Gutiérrez *et al.*, 1998) que permite obtener la biomasa del zooplancton de una manera rápida.

ANTECEDENTES

El sur de la Bahía de Campeche, Golfo de México, constituye una región pesquera de gran importancia para México. Debido a esto, se han realizado varios estudios en lo que a plancton respecta. Sin embargo, con relación a los estudios detallados de las comunidades zooplanctónicas dominantes, dentro del par ciclón-anticiclón que domina en la bahía, estos aún son escasos (Castellanos y Gasca, 1999).

Se han realizado estudios en el Golfo de México respecto a la estimación de la biomasa zooplanctónica, de los cuales se ha mencionado que ésta se puede ver afectada por la presencia de diversos factores como son la presencia de giros ciclónicos y anticiclónicos. En particular, se tiene un registro de valores elevados debido a diversos factores como la presencia de giros ciclónicos. Al norte del Golfo de México, se ha observado mayor biomasa en los giros ciclónicos que en los anticiclónicos (Wormuth *et al.* 2000).

El incremento en la biomasa sucede cuando disminuye la intensidad del giro ciclónico, las poblaciones de necton y plancton pueden mantenerse por la mezcla de agua como agregaciones locales (Biggs *et al.* 1997).

Se han registrado concentraciones de nutrimentos relativamente altas en los centros fríos de los giros ciclónicos, mientras que en los centros cálidos de los giros anticiclónicos se han encontrado concentraciones bajas (Biggs, 1992).

Ramírez Cruz (2005) realizó un estudio con datos colectados a finales de las temporadas de nortes (Abril de 2000), donde registró altas concentraciones de biomasa en la frontera de los giros anticiclónicos-ciclónicos, esto como indicativo de que la circulación en la región tiene una influencia directa en la distribución de la biomasa. Asimismo, menciona que la concentración de la biomasa se vió afectada durante el paso de los nortes, mostrando así un descenso en la concentración de la misma. Sin embargo, al final de la temporada de nortes, observó un restablecimiento del espesor de la columna de agua, con un ascenso de la termoclina, haloclina y pincoclina, así como una mayor concentración de zooplancton por arriba de la

termoclina. Además, registró un gran número de grupos, esto debido a que la diversidad de grupos del zooplancton en el Cañón de Campeche es considerable.

Cabe mencionar que los estudios relacionados a las comunidades zooplanctónicas en el Cañón de Campeche, son aún escasos, y menor aún los que hacen referencia al efecto de los vórtices producidos en el Cañón (Rivera-Hernández, 2013).

Mojica (2003) realizó un estudio en el Cañón de Campeche y encontró que la distribución de la biomasa zooplanctónica en la zona está influenciada principalmente por la profundidad, temperatura, salinidad y las migraciones nocturnas. Asimismo, registró las mayores concentraciones de biomasa por debajo de la termoclina, y en la frontera del giro ciclónico y anticiclónico.

Rivera-Hernández (2013) realizó un estudio en el cual se determinó la biomasa zooplanctónica en la región del Cañón de Campeche, en cuatro estratos de muestreo; a 4 m, 50m, 100m y 200m. El cálculo de las biomásas se efectuó mediante el método de peso húmedo, donde se menciona que los valores más altos se obtuvieron en los bordes de los giros ciclónicos y en la frontera de los giros. Asimismo, los valores de biomasa más altos registrados se obtuvieron en el estrato de 4m. Además, la distribución de la biomasa fue comparada con las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad registradas en la zona.

Se ha observado que la época climática y las condiciones hidrodinámicas juegan un papel muy importante en la distribución de la biomasa, composición y abundancia del zooplancton del Cañón de Campeche (Arriola-Pizano, 2012).

Arriola-Pizano (2012) realizó un estudio para evaluar las variaciones espaciales y temporales de la biomasa, además de la composición del zooplancton en la región de Campeche, en la época de nortes y no nortes. Como resultado, se obtuvo que las estaciones muestreadas en épocas de no nortes presentaron las mayores biomásas y mayores abundancias de zooplancton. Además, el análisis estadístico mostró que en la época de no nortes la mezcla de columna de agua es relacionada con la hidrodinámica (giros ciclónicos y anticiclónicos), promoviendo así el desarrollo del zooplancton debido a que ésta favorece las características adecuadas

necesarias (temperatura, salinidad y nutrimentos). Por consiguiente, los grupos que presentaron abundancias altas fueron los que se favorecen con los sitios de frontera (sitios donde se juntan los giros ciclónicos y anticiclónicos).

Por otra parte, se ha registrado que el zooplancton es también un indicador de la presencia de frentes. Las zonas en la que ocurren los frentes son turbulentas, poseen gradientes de temperatura y representan una fuente alimenticia, por lo tanto, estos factores son de gran importancia para producir concentraciones (parches) de zooplancton (Foerster, 1996).

En un trabajo realizado en la región del Cañón de Campeche, Mojica-Ramírez (2003) determinó la variación espacial del zooplancton, donde se encontró que la mayor cantidad de biomasa zooplanctónica fue de $10.42 \text{ g } 100\text{m}^{-3}$, a profundidades entre 60 y 80 m, mientras que la menor concentración fue de $0.19 \text{ g } 100\text{m}^{-3}$, entre 80 y 100m de profundidad. La distribución vertical de la biomasa está determinada por la circulación mayormente ciclónica del Cañón de Campeche y por la estructura hidrográfica de la columna de agua (termoclina y picnoclina), además de las migraciones verticales que los organismos realizan.

JUSTIFICACIÓN

El conocimiento de las características oceanográficas desde el punto de vista fisicoquímico es fundamental para entender los procesos biológicos que se llevan a cabo. Dentro de las variables que influyen se encuentran la temperatura, densidad y salinidad. Algunos autores como Mojica (2003) han reportado que la distribución de la biomasa zooplanctónica, en específico del Cañón de Campeche, se ve influenciada principalmente por la profundidad, la temperatura y la salinidad, determinando que dichos parámetros influyen para que exista una mayor biomasa. Aunque hay estudios que se enfocan en la relación de tales variables con el zooplancton, aún falta que se realicen más estudios en la zona; asimismo, estudios que describan el efecto de procesos hidrodinámicos como vorticidades, corrientes marinas y mareas sobre la distribución de la biomasa zooplanctónica.

El Cañón de Campeche es de suma importancia debido a que en él suceden múltiples procesos hidrodinámicos. Sin embargo, a pesar de la gran importancia científica, aún hay pocos estudios sobre la distribución de organismos como el zooplancton y la relación o efectos que tienen dichos procesos o estructuras hidrodinámicas. Algunas de ellas son los giros ciclónicos y anticiclónicos, los cuales son de gran importancia, ya que algunos autores han reportado que los giros ciclónicos que se desarrollan en el Golfo de México promueven localmente una mayor productividad del plancton (Wormuth *et al.*, 2000; Biggs.1992)

Debido a lo anteriormente mencionado, el presente estudio analizará la variabilidad de ciertas características fisicoquímicas tales como la temperatura, salinidad y densidad y su influencia en la distribución de la biomasa zooplanctónica, así como los efectos de las estructuras hidrodinámicas como vórtices ciclónicos y anticiclónicos, además de la influencia de nortes, con el fin de determinar la relación que presentan y si se ve favorecida la productividad.

OBJETIVO GENERAL

1. Determinar la biomasa zooplanctónica y su relación con los procesos hidrodinámicos presentes en el Cañón de Campeche, durante la época de nortes.

PARTICULARES

1. Determinar la estructura hidrográfica de la columna de agua
2. Caracterizar la presencia de procesos hidrodinámicos
3. Determinar la relación entre la distribución de la biomasa zooplanctónica y la presencia de procesos hidrodinámicos

HIPÓTESIS

La distribución de la biomasa zooplanctónica estará impactada positivamente debido a la presencia de estructuras hidrodinámicas durante la época de muestreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este proyecto se utilizó información hidrográfica de alta resolución y muestras de zooplancton con redes Bongo que fueron obtenidas durante el crucero de investigación Cañón-IV a bordo del B/O Justo Sierra de la UNAM, en la región del Cañón de Campeche del 22 al 27 de febrero de 2011.

Se obtuvieron datos hidrográficos en un total de 48 estaciones hidrográficas con un CTD Seabird 19 (Figura 1B). La salinidad y densidad se calcularon a partir de la conductividad, temperatura y presión siguiendo las rutinas y protocolos de la ecuación termodinámica para agua de mar (TEOS-10), filtrando los datos para evitar ruidos y brincos. Los datos limpios fueron promediados a cada 1 decibar. Con el objetivo de analizar la distribución horizontal de los parámetros hidrográficos, se realizaron mapas horizontales a diferentes profundidades con ayuda del software Surfer v13.

Se colectaron muestras de zooplancton en todas las estaciones hidrográficas (Figura 1B) mediante arrastres oblicuos de redes Bongo de 303 μm . El volumen de agua filtrado durante los arrastres fue calculado con ayuda de flujómetros General Oceanics, previamente calibrados. La profundidad de arrastre fue de 200 m hacia la superficie y en las estaciones más someras que 200 m, el muestreo se realizó desde lo más cercano al fondo (5 m encima del fondo) hasta la superficie. Las muestras colectadas se fijaron a bordo con una solución de formaldehído al 4% en agua de mar, neutralizado con borato de sodio durante 24 horas; posteriormente se trasvasaron a alcohol etílico al 70% para su preservación final.

En el laboratorio, la cuantificación de la biomasa zooplanctónica se realizó siguiendo los protocolos, métodos y recomendaciones descritas en Durán-Campos *et al.* (2015 y 2019), y finalmente estandarizada a $\text{g } 100 \text{ m}^{-3}$. Con la información obtenida, se realizaron mapas de distribución horizontal con ayuda del software Surfer v13, con el objetivo de identificar patrones en su distribución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se describirán los resultados siguiendo los objetivos de esta investigación; primero se describirá la parte física de la columna de agua y la segunda describirá la biomasa del zooplancton.

Distribución horizontal de temperatura, densidad y salinidad

La distribución horizontal de las variables hidrográficas a las diferentes profundidades analizadas, mostró una serie de núcleos cálidos y fríos, así como diversos núcleos de diferente densidad. Dichas estructuras son indicativas de la presencia de vórtices, ya sea ciclónicos (fríos y densos) y anticiclónicos (cálidos y poco densos). Además, la distribución horizontal de los parámetros hidrográficos es utilizada para identificar a una cierta profundidad núcleos fríos de alta densidad, o núcleos cálidos de baja densidad. Generalmente, los núcleos fríos y los núcleos cálidos están asociados a vórtices ciclónicos y anticiclónicos, respectivamente como menciona López Nogueira (2017).

Los núcleos de concentración de biomasa zooplanctónica se pueden deber a la transferencia de organismos planctónicos originada por la circulación en la Bahía de Campeche (Salas de León *et al.*, 1998).

En la Figura 2 se muestra la distribución de la temperatura a 10 m de profundidad (A); en áreas sombreadas con colores rojizos indican que hay un incremento en la temperatura, mientras que las áreas sombreadas con colores oscuros indican una menor temperatura, por lo tanto, corresponde al mapa de densidad (B), debido a que a mayor temperatura la densidad se ve disminuida y viceversa. Asimismo, la salinidad (C) se ve directamente relacionada con las anteriores, ya que

cuando la densidad sea mayor, de igual forma la salinidad lo será, esto presente en temperaturas bajas. Esto coincide con lo reportado por Rosales (2003), ya que menciona que en estratos superiores a 20 m la densidad mostró una distribución similar a la de la salinidad, mientras que en los estratos inferiores a 20m, la distribución de la densidad estuvo dominada por la distribución de la temperatura.

En el mapa de la temperatura (A) se puede observar que en la región norte del área de estudio se localizan temperaturas de 23.6 °C, mientras que, en la porción sur, se observa una lengua de agua cálida con una temperatura de alrededor de 24.9 °C.

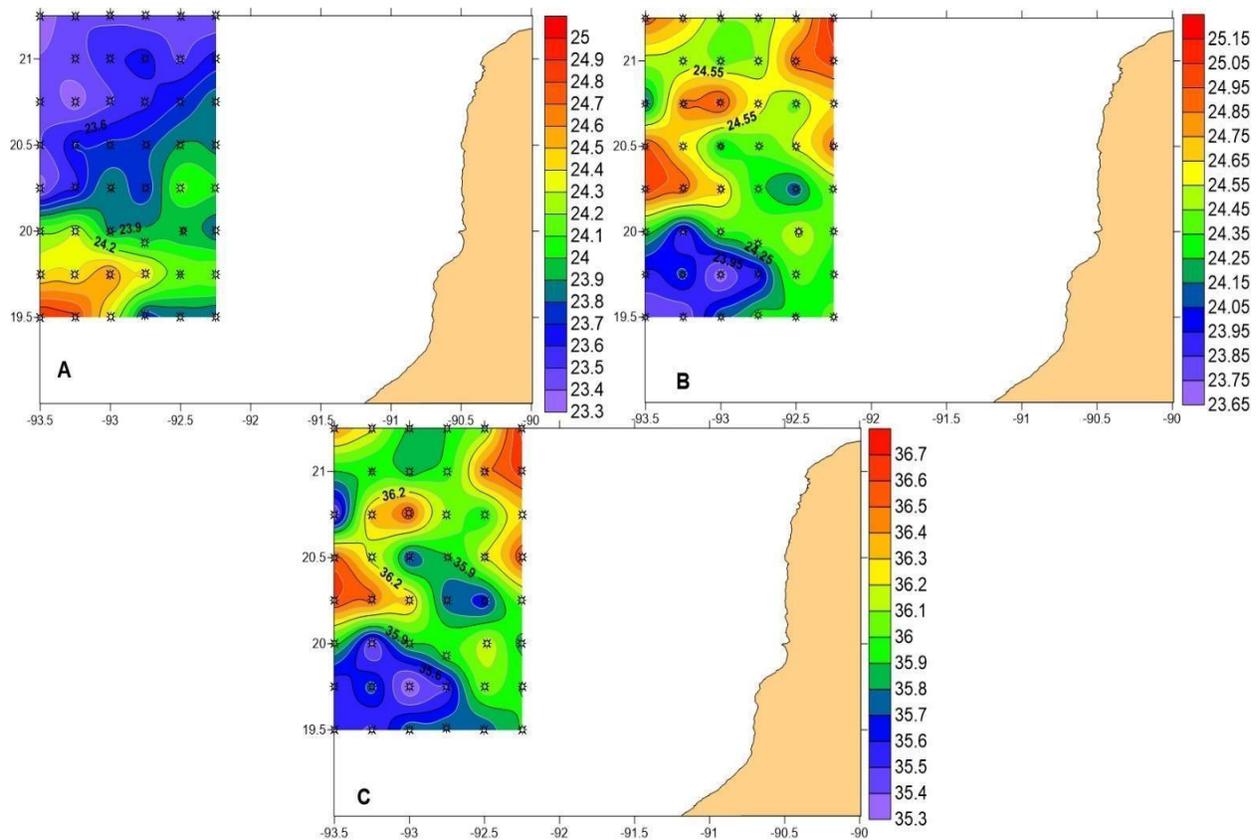


Figura 2. Distribución horizontal de: A) temperatura (°C), B) densidad (kg m^{-3}) y C) salinidad a 10 m de profundidad.

A 20 m de profundidad (Figura 3), el mapa de la temperatura (A) muestra que en la porción sur del área de estudio se observa un núcleo cálido con temperaturas que alcanzan los 24 °C. La distribución de la densidad (B) mostró la presencia de núcleos con diferentes valores entre 24.5 y 24.8 kg m^{-3} , mientras que en la distribución de la salinidad (C) se observaron núcleos similares con valores de 36.05.

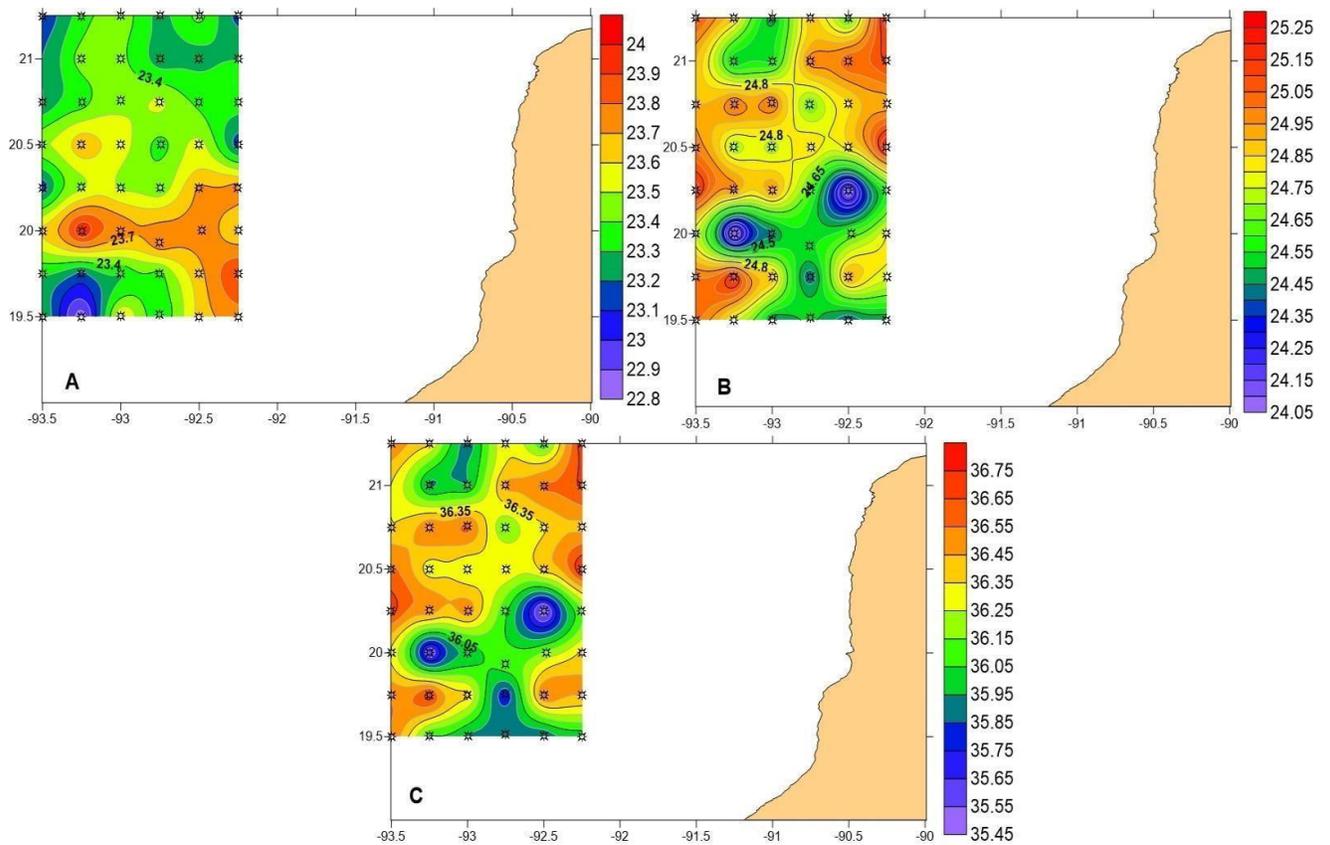


Figura 3. Distribución horizontal de: A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), B) densidad (kg m^{-3}), y C) salinidad a 20 m de profundidad.

A 30 m de profundidad (Figura 4), se observa una menor temperatura, y destaca la presencia de un núcleo cálido en la porción sur-centro del área de estudio con valores de $\sim 24^{\circ}\text{C}$. De la misma manera, la distribución de la densidad (B) y la salinidad (C) mostró la presencia de un núcleo que coincide con el observado para la temperatura, que alcanza valores en su centro de 24.2 kg m^{-3} y 36.5 , en densidad y salinidad, respectivamente.

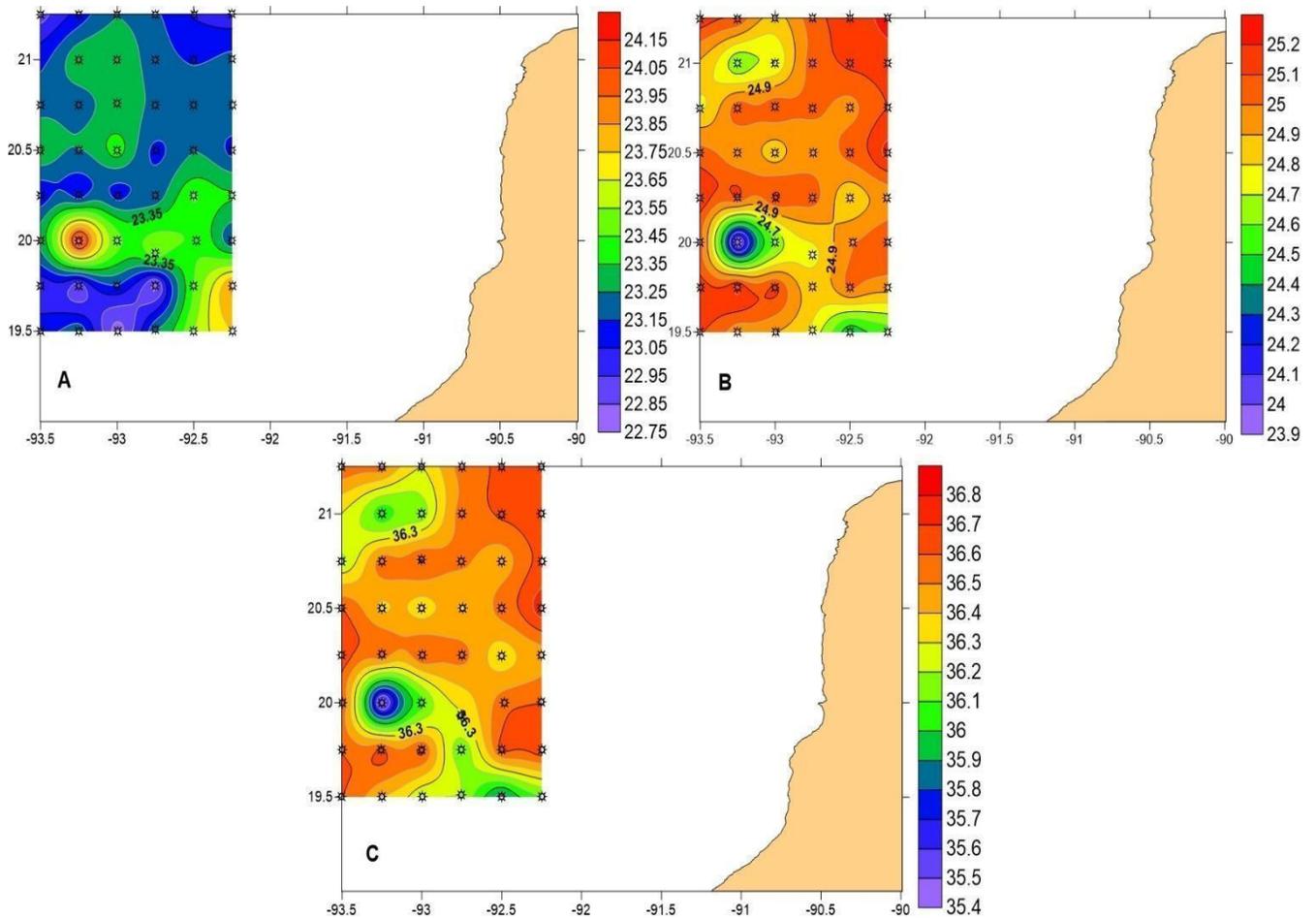


Figura 4. Distribución horizontal de: A) temperatura (°C), B) densidad (kg m^{-3}) y C) salinidad a 30 m

A 50 m de profundidad (Figura 5), la temperatura (A) se encuentra, en general, distribuida uniformemente con valores de 23°C , excepto por la presencia de un pequeño núcleo cálido en la porción sur del área de estudio; los valores de densidad (B) muestran la presencia de diferentes núcleos localizados tanto en la porción norte como sur del área de estudio, con valores de 25.1 y 25.3 kg m^{-3} , respectivamente, mientras que la salinidad presentó valores de 36.

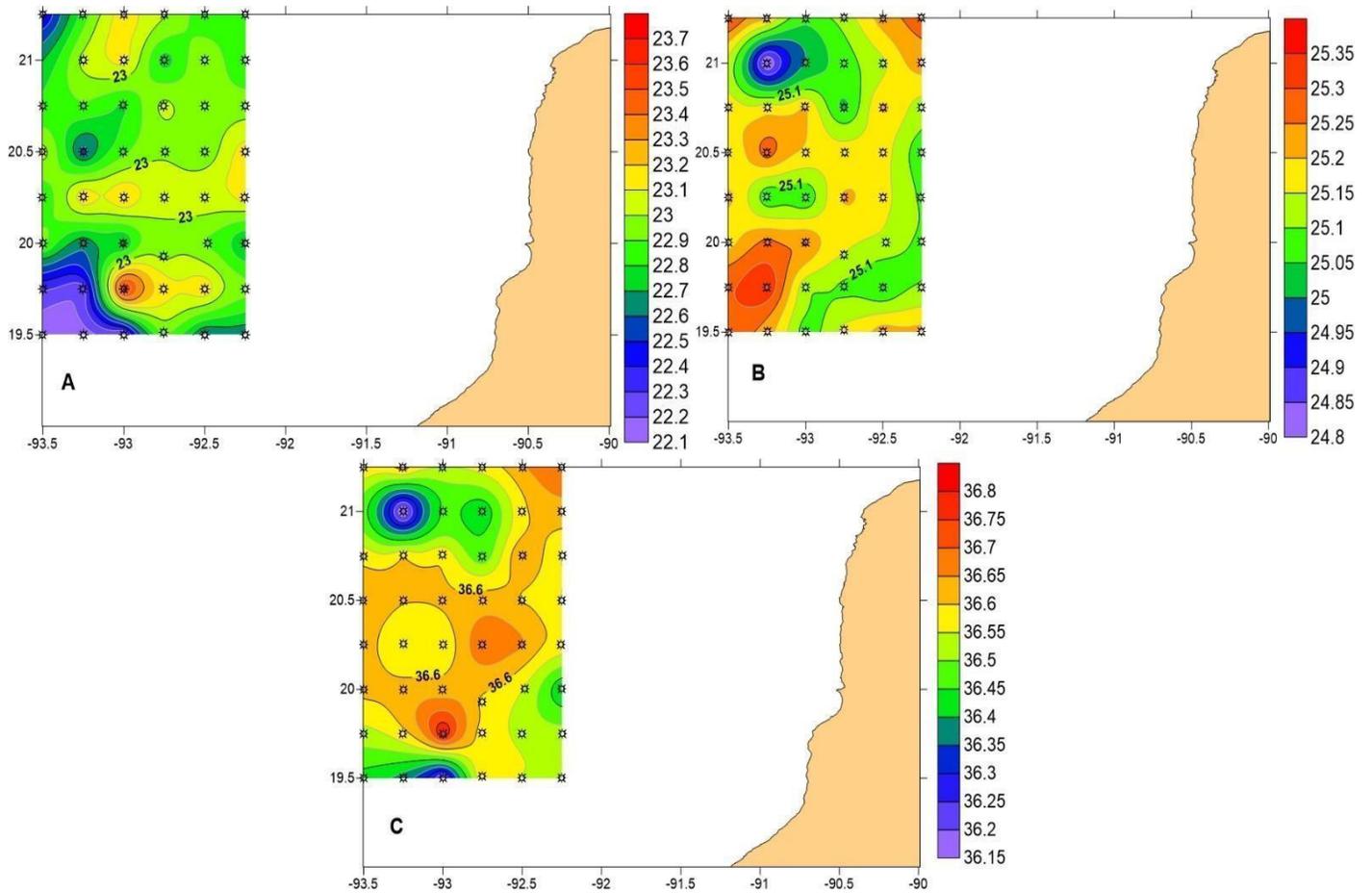


Figura 5. Distribución horizontal de: A) temperatura (°C), B) densidad (kg m^{-3}) y C) salinidad a 50 m de profundidad.

La Figura 6 describe la distribución de la temperatura (A) a una profundidad de 100 m, con temperaturas que oscilan entre los 18 y 22°C, además de que conforme la profundidad va aumentando la temperatura va disminuyendo respectivamente, con respecto a los mapas anteriores, se muestran diferentes áreas en forma de núcleos, con aguas frías, de igual forma la densidad (B) y la salinidad (C).

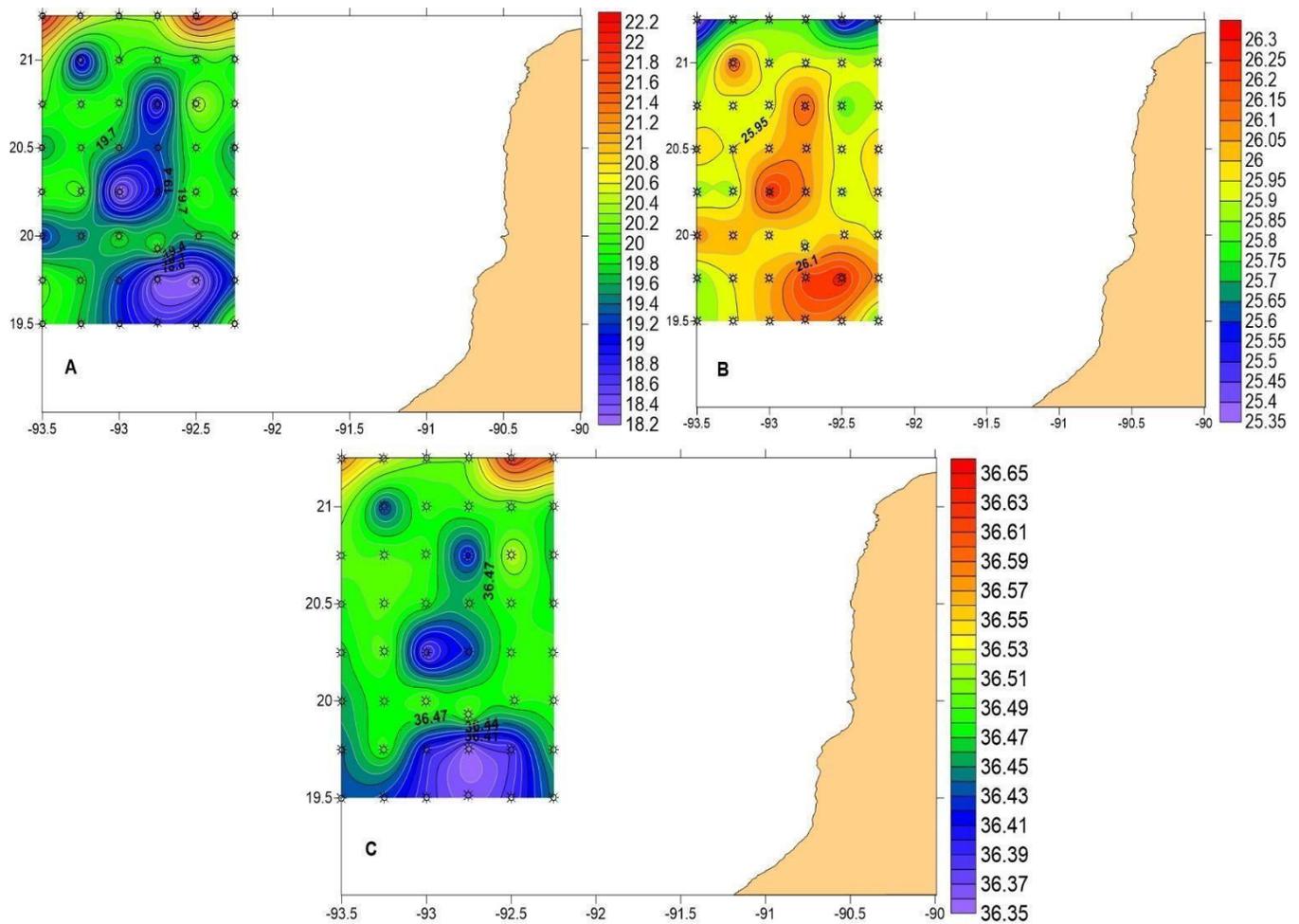


Figura 6. Distribución horizontal de: A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), B) densidad (kg m^{-3}) y C) salinidad a 100 m de profundidad.

Con respecto a la distribución de la temperatura (A), densidad (B) y salinidad (C) a 200 m de profundidad, la Figura 7 muestra que se tienen temperaturas más bajas, que oscilan entre los 13 y 15 $^{\circ}\text{C}$, la densidad se mantiene alrededor de los 26 kg m^{-3} , mientras que la salinidad entre el 35 y 36. De la misma manera que en todas las profundidades anteriores, destaca la presencia de diferentes núcleos con diferentes valores, que se vinculan directamente con la presencia de vórtices, ya sea ciclónicos o anticiclónicos.

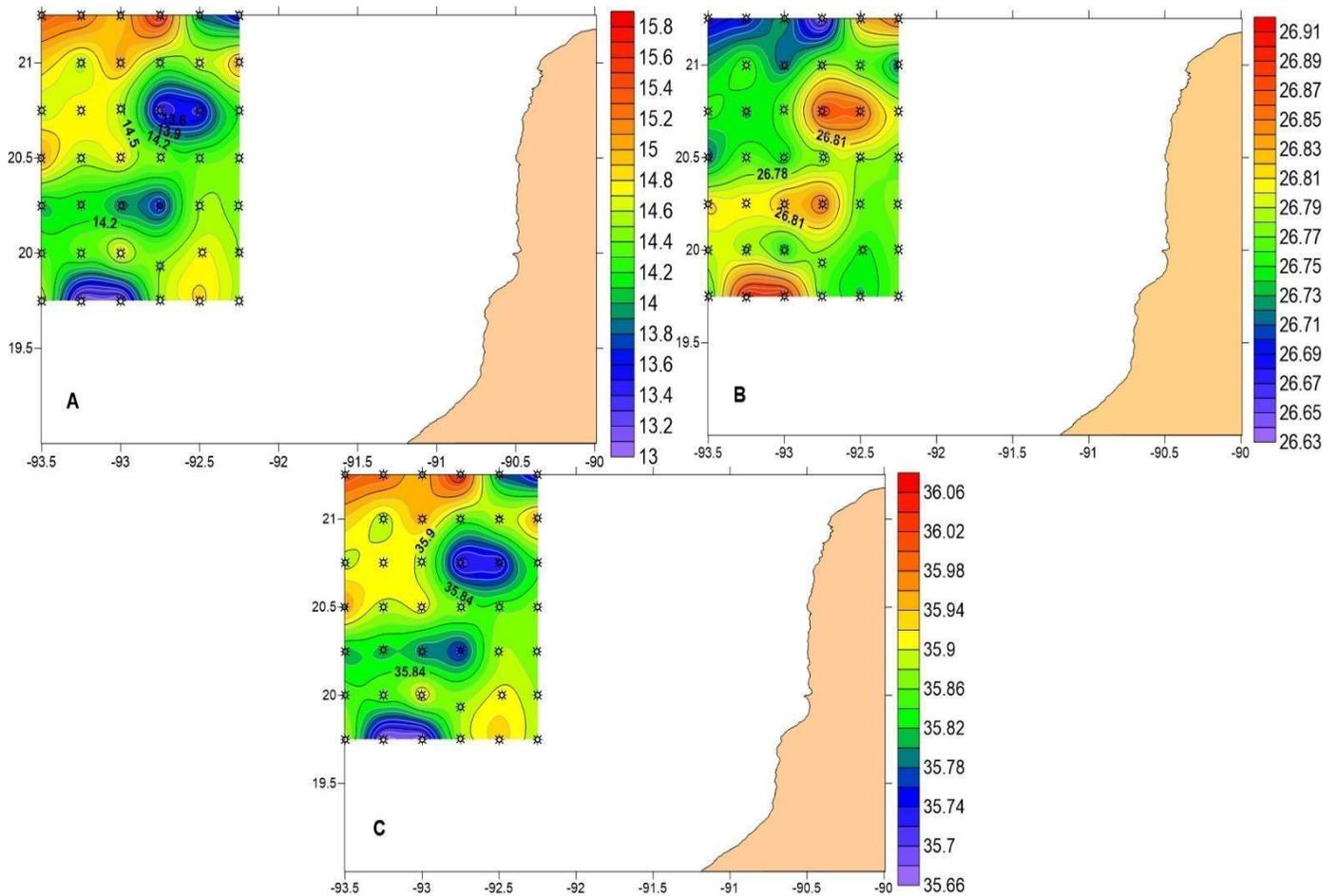


Figura 7. Distribución horizontal de: A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), B) densidad (kg m^{-3}) y C) salinidad a 200 m de profundidad.

La Figura 8, muestra la distribución de las variables hidrográficas a 500 m de profundidad. Se observan temperaturas aún más bajas con respecto a las profundidades anteriores, de entre 7 y 8 $^{\circ}\text{C}$, la densidad aumentó y la salinidad disminuyó un poco, ya que en las áreas donde se registran mayores temperaturas ésta también se nota ligeramente aumentada, mientras que la salinidad es menor.

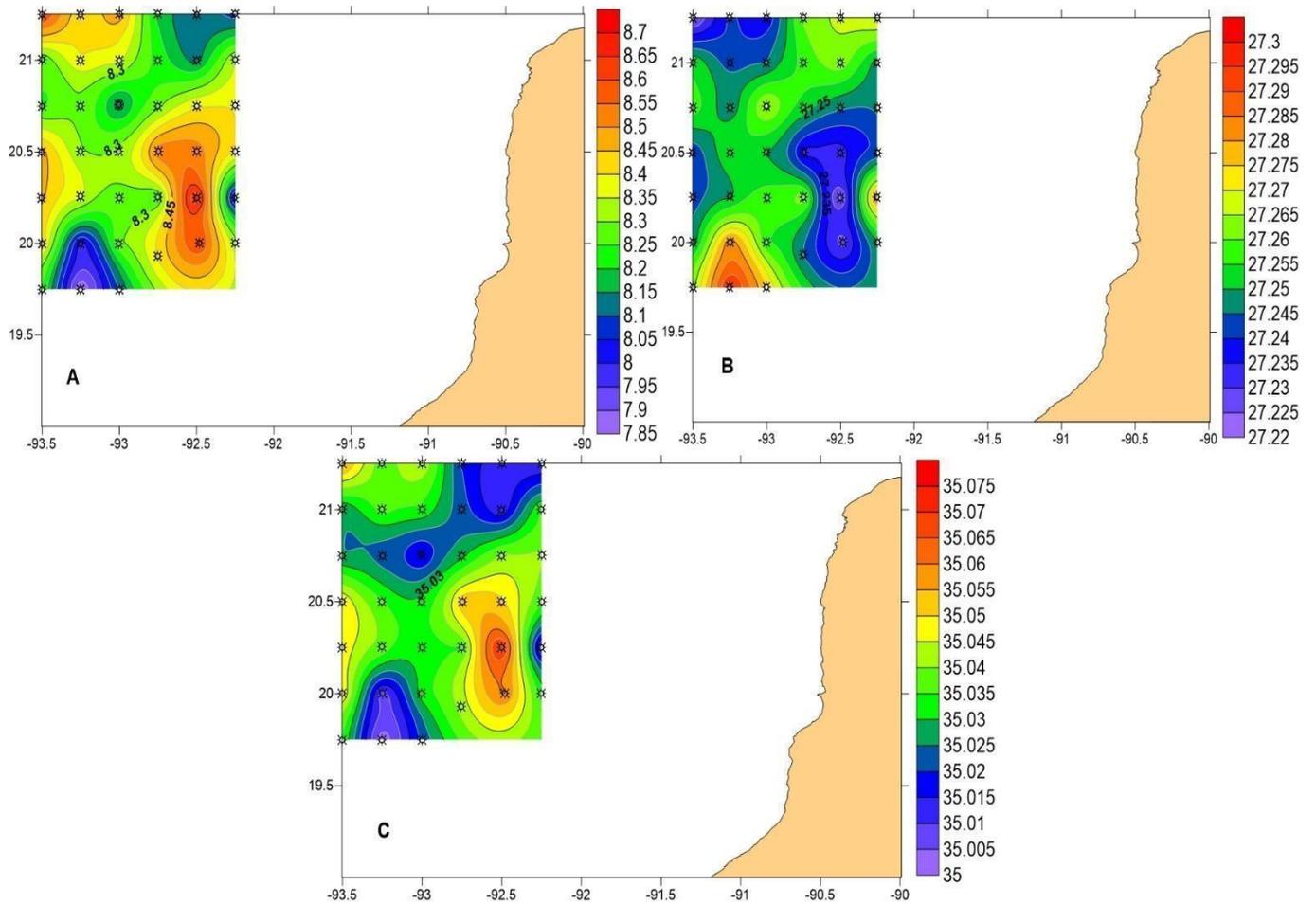


Figura 8. Distribución horizontal de: A) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), B) densidad (kg m^{-3}) y C) salinidad a 500 m de profundidad.

Finalmente, la Figura 9 muestra los mapas de la distribución de la temperatura (A), densidad (B) y salinidad (C) a una profundidad de 1000 m. Se observan temperaturas muy bajas, de entre 4 y 5 $^{\circ}\text{C}$. Con respecto a la densidad, se observó un aumento considerable en relación con el descenso de la temperatura, con valores de densidad de alrededor de 27 kg m^{-3} . Por otro lado, la salinidad, se ve ligeramente disminuida, sin embargo, en las áreas donde hay mayor registro de aguas con bajas temperaturas, la densidad y salinidad se registran mayores en conjunto.

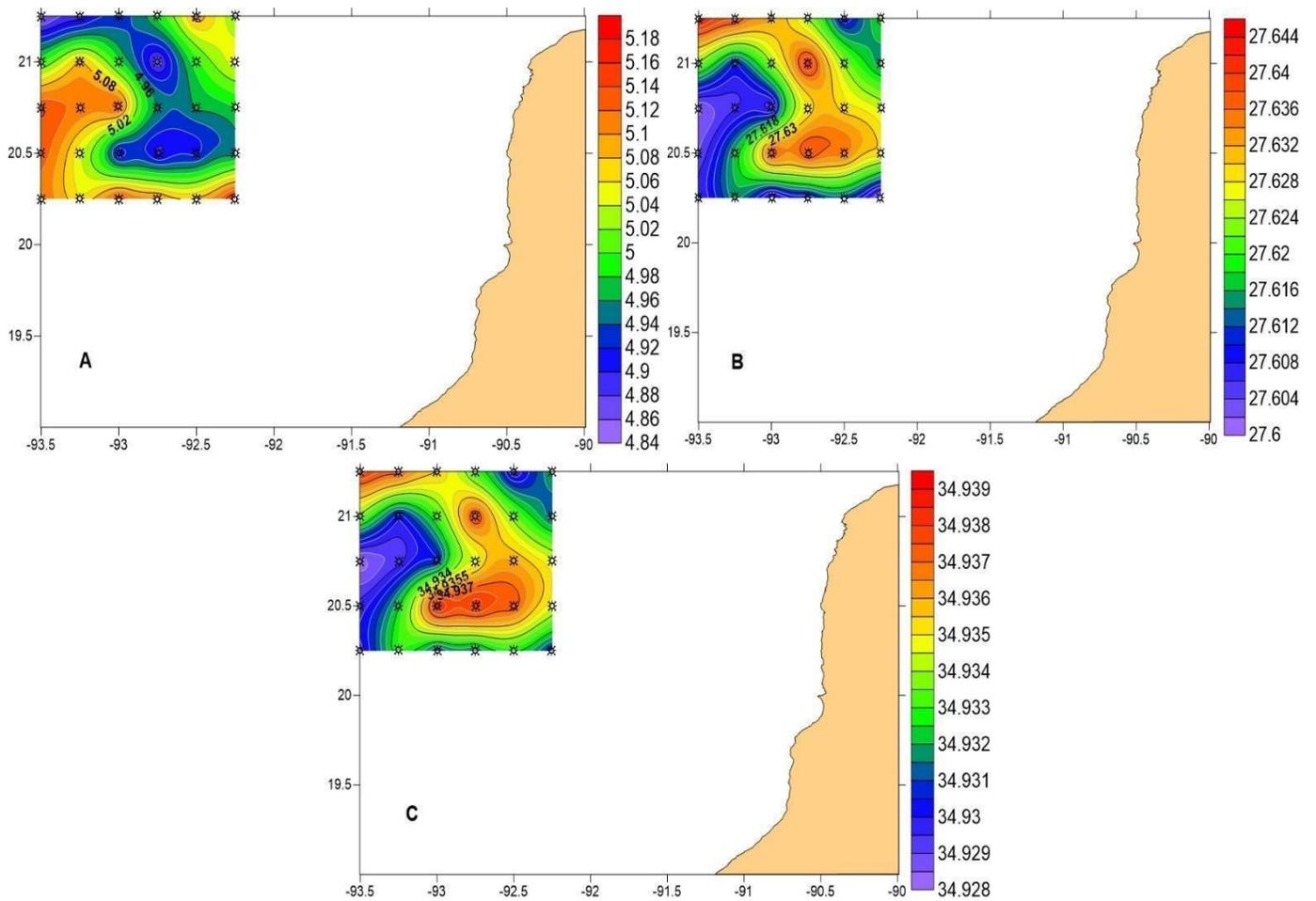


Figura 9. Distribución horizontal de: A) temperatura (°C), B) densidad (kg m⁻³) y C) salinidad a 1000 m de profundidad.

Distribución de la biomasa zooplanctónica

Los resultados del cálculo de la biomasa (g 100 m⁻³) en todas las estaciones muestreadas y su distribución horizontal se presentan en la Figura 10. La figura se presenta con la distribución de las variables hidrográficas a 30 m de profundidad sobrepuesta, debido a que en esta profundidad se observaron los gradientes más intensos, así como la presencia de diferentes núcleos indicativos de la presencia de vórtices. Los resultados de la biomasa mostraron valores máximos de 40 g 100 m⁻³

³, con un interesante patrón de distribución a lo largo del área de estudio. Por ejemplo, se observa que la mayor biomasa coincide con las zonas que presentaron menor temperatura, mayor densidad y menor salinidad. En este núcleo se puede inferir la presencia de vórtice ciclónico el cual favorece la producción biológica, debido a que esta estructura inyecta una gran cantidad de nutrimentos hacia la zona eufótica, provocando una elevada biomasa fitoplanctónica y, por lo tanto, un aumento en la biomasa zooplanctónica (Coria-Monter *et al.*, 2014; Eden *et al.*, 2009; Sweeny *et al.*, 2003).

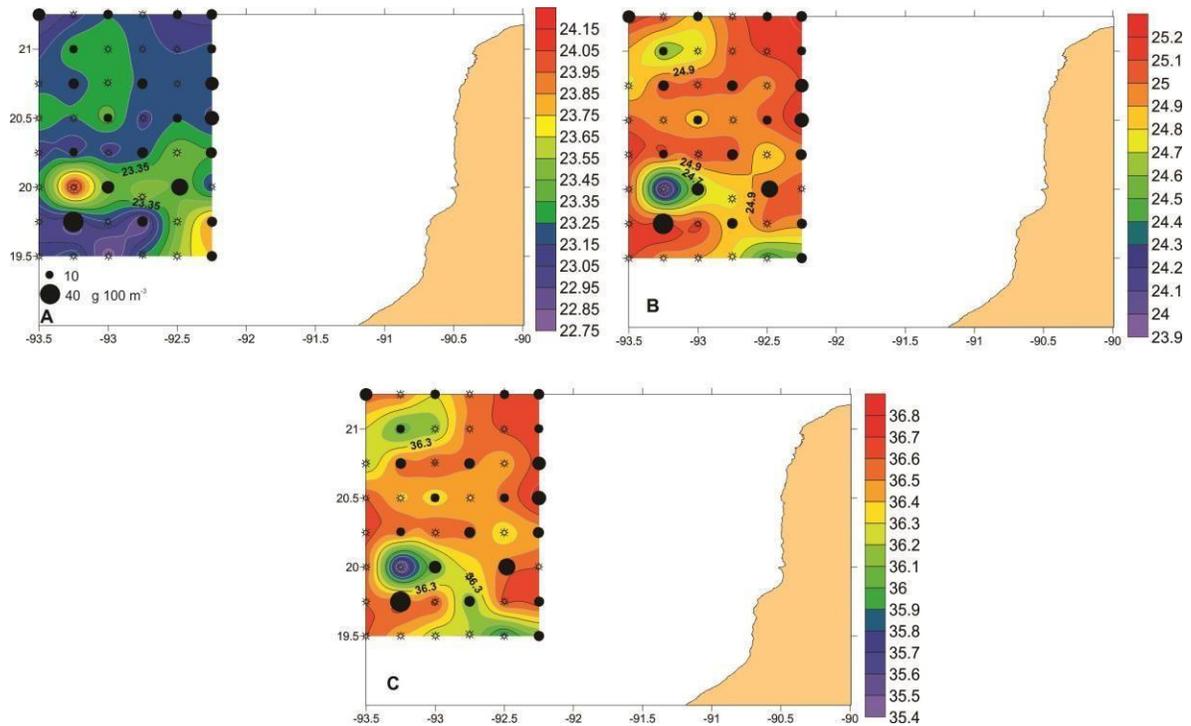


Figura 10. Distribución de la biomasa zooplanctónica ($\text{g } 100 \text{ m}^{-3}$) y su relación con las variables hidrográficas a 30 m de profundidad.

La composición del zooplancton marino y su biomasa se ven influenciados generalmente por la hidrodinámica de los océanos. Los procesos hidrodinámicos que usualmente se presentan son los vórtices ciclónicos y anticiclónicos, frentes y surgencias. De igual forma, se encuentran fenómenos atmosféricos que determinan su distribución, como son los “Nortes”.

En el presente estudio, se identificó que la distribución horizontal de temperatura, salinidad y densidad estuvo condicionada por la presencia de un vórtice ciclónico el cual favoreció la producción biológica, llevando una gran cantidad de nutrientes hacia la zona eufótica, lo cual concuerda con lo reportado por Lévy *et al.* (2001), quienes mencionan que la presencia de vórtices puede enriquecer la producción biológica, mediante la inyección de nutrientes hacia la zona eufótica. Algunos estudios han demostrado que en zonas en las que estos vórtices anticiclónicos-ciclónicos interactúan, se pueden formar frentes con elevada concentración de biomasa fitoplanctónica y zooplanctónica, derivado del aporte de nutrientes (Torner *et al.*, 2003).

Se pueden identificar diferentes etapas a lo largo del ciclo de vida de un vórtice. Durante la generación, maduración y decaimiento existen cambios en la biomasa del fitoplancton y este modelo propone que al inicio en un vórtice ciclónico una cantidad significativa de nutrientes emergen a la zona eufótica y la cantidad de clorofila es pequeña. Los estados de madurez del vórtice se caracterizan por un incremento en la producción primaria, en la concentración de pigmentos, algunas respuestas biológicas y en la exportación de partículas. Cuando el vórtice comienza a decaer, la productividad y las concentraciones de pigmentos decrecen.

Morales *et al.* (2012) mencionan que los vórtices pueden estar involucrados en la exportación horizontal de aguas costeras que contienen altas concentraciones de nutrientes, materia orgánica y/o biomasa zooplanctónica. Por su parte, Strzelecki *et al.* (2007), mencionan que los vórtices pueden afectar la distribución de zooplancton mediante diferentes mecanismos, y que en particular un vórtice ciclónico puede elevar la nutriclina y fertilizar la capa eufótica, que puede incrementar la biomasa del fitoplancton, incrementando a su vez la biomasa zooplanctónica, ya que el zooplancton puede aproximarse debido a la alta concentración de alimento. Asimismo, Goldthwait y Steinberg (2008) mencionaron que los giros pueden influir en la distribución del zooplancton a través del tiempo, lo cual va a depender del tipo de vórtice y/o de las condiciones presentes durante su formación, determinando así la secuencia de eventos biológicos.

Por otra parte, el viento juega un papel importante en la distribución de la biomasa zooplanctónica, debido a que puede producir mezcla en la columna de agua. Además, puede ser el mecanismo generador del vórtice, pues el campo de vientos puede dar origen a uno ciclónico o anticiclónico, y puede elevar o hundir la pycnoclina y la nutriclina, favoreciendo o inhibiendo la productividad primaria. La materia orgánica puede ser transportada por ciclones y huracanes aportando material terrígeno, afectando la producción primaria, abundancia y distribución del zooplancton (Silverberg *et al.*, 2007).

Nowlin (1972) reportó que los huracanes y los “Nortes” tienen influencia en la dinámica del Golfo de México causando un incremento en la capa superficial, a lo que Ramírez (2005) añade que el paso de Nortes modifica la concentración y distribución de la biomasa del zooplancton. Por su parte Wickstead (1979) afirma que los cambios en la columna de agua provocados por el paso de un norte permanecen, modificando la distribución de los organismos, lo cual coincide con lo reportado por Ramírez (2005), quien en un estudio realizado al final de la temporada de nortes registró mayores concentraciones de zooplancton por arriba de la termoclina; asimismo, registró mayores biomásas que las registradas durante la presencia de un norte.

Respecto a la distribución horizontal reportada en este trabajo, la biomasa fue mayor en las zonas que presentaron menor temperatura, mayor densidad y menor salinidad, con un valor de $40 \text{ g } 100 \text{ m}^{-3}$. Mojica (2003) en un estudio realizado en el Cañón de Campeche, encontró que la distribución de la biomasa zooplanctónica en la zona está influenciada principalmente por la profundidad, temperatura, salinidad y las migraciones nocturnas, obteniendo así que dichos parámetros influyen para que se presente una mayor biomasa. Asimismo, registró en el Cañón de Campeche las mayores concentraciones de biomasa por debajo de la termoclina, y en la frontera del giro ciclónico y anticiclónico. También, en áreas de divergencia oceánica (giros ciclónicos), la temperatura disminuye y el contenido de nutrientes es mayor, estas zonas son las consideradas más productivas de la plataforma continental (Gordon, 1967; Bessonov *et al.*, 1971).

La mayor biomasa zooplanctónica se registró en la estación 37, localizada en la parte suroeste del Cañón de Campeche, en la cual se encuentra la frontera del vórtice ciclónico. Este proceso de frontera tiene características turbulentas con un gradiente de temperatura y acumulación de material biológico lo cual promueve un incremento de la biomasa zooplanctónica (Foerster 1996; Mojica, 2003; Ramírez-Cruz, 2005). El menor valor de biomasa se registró en la estación 11, presente en la región noroeste, en la cual se observó una circulación anticiclónica en la columna de agua. Este proceso hidrodinámico implica concentraciones bajas de nutrimentos (Biggs, 1992), lo que a su vez provoca baja cantidad de clorofila-a (un indicador de biomasa fitoplanctónica) y poca disponibilidad de alimento para el zooplancton.

Algunos autores reportan que los giros ciclónicos que se desarrollan en el Golfo de México promueven localmente una mayor productividad del plancton (Wormuth *et al.*, 2000; Biggs, 1992).

La Bahía de Campeche presenta una circulación predominantemente ciclónica (Nowlin, 1972; Molinari *et al.*, 1978; Merrell y Morrison, 1981). Aunado a esto, Monreal-Gómez y Salas de León (1990), efectuaron la simulación de la Bahía de Campeche mediante un modelo numérico hidrodinámico y concluyeron que esta región presenta características ciclónicas con centros fríos en su circulación de febrero a abril y de julio a diciembre; en el periodo de mayo a julio el giro desaparece y la circulación es en sentido este-oeste. Asimismo, reportan que los giros actúan como una frontera natural para el crecimiento y dispersión de los organismos planctónicos.

Los resultados que se obtuvieron en el presente estudio concuerdan con lo que diversos autores han reportado a lo largo de diversas investigaciones, los cuales argumentan que la Bahía de Campeche es una zona de alta concentración de biomasa zooplanctónica (Bessonov *et al.*, 1971; De la Cruz, 1971; Gómez Aguirre, 1987; Flores Coto *et al.*, 1988; Sanvicente, 1990; Gasca *et al.*, 1995; Alba, 2001; Okolodkov, 2003). Asimismo, Flores *et al.* (1988) y Okolodkov (2003), mencionan que se debe a dos factores: el primero, se trata de la anchura de la plataforma continental, que permite que el sur del Golfo de México sea un área de alta productividad primaria y secundaria; el segundo, es el aporte sobre la zona

nerítica de aguas continentales, las cuales transportan grandes cantidades de nutrimentos.

CONCLUSIÓN

- La hidrodinámica en la región de Campeche (circulación ciclónica y anticiclónica), además de la presencia de Nortes, influyen en la distribución y las concentraciones de biomasa zooplanctónica.
- La biomasa fue mayor en las zonas que presentaron menor temperatura, mayor densidad y menor salinidad.
- Los vórtices ciclónicos que se desarrollan en el Golfo de México promueven una mayor productividad del plancton.
- Las bajas concentraciones de nutrimentos provocan una baja en la cantidad de clorofila-a, lo que, a su vez, produce poca disponibilidad de alimento para el zooplancton.

REFERENCIAS

- Alba Hurtado, C.A. (2001) Composición, Abundancia y Distribución de Sifonóforos (Cnidaria, Hydrozoa), en la Bahía de Campeche, México. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, 51 p, México D.F.
- Arriola-Pizano, G. (2012). Estimación de la Biomasa y Composición del Zooplancton en la Región del Cañón de Campeche. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Ashjian, C.J., Smith S.L., Flagg C.N., Mariano A.J., Behrens W.J., Lane P.V.Z. (1994). The influence of a Gulf Stream meander on the distribution of zooplankton biomass in the Slope Water, the Gulf Stream, and the Sargasso Sea, described using a shipboard acoustic Doppler current profiler. *Deep Sea Research* 41(1):23-50.
- Behringer, D. W., Molinari, R. L., Festa, J. F. (1977). The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 82(34): 5469-5476.
- Bessonov, N., González, O., Elizarov, A. (1971). Resultados de las investigaciones Cubano-soviéticas en el Banco de Campeche. Pp 317- 323. *In: UNESCO (Ed.), Coloquio sobre investigaciones y recursos del Mar Caribe y regiones adyacentes, París, 545 p.*
- Biggs, D.C. (1992). Nutrients, plankton, and productivity in a warm-core ring in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 97: 2143-2154.
- Biggs, D.C., Zimmerman R.A., Gasca, R., Suárez-Morales, E., Castellanos, I., Leben R. R. (1997). Note on plankton and cold-core rings in the Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin*. 95(2): 369-375.
- Brierley, A.S. (2017). Plankton. *Current Biology* 27: R431-R510.
- Boltovskoy, D. (1999). South Atlantic zooplankton. *Publicaciones especiales del INIDEP, Mar del Plata*, p. 1076.
- Castellanos, I., Gasca A. R. (1999). Epipleagic Euphasids (Euphausiacea) and spring mesoscale features in the Gulf of Mexico. *Crustaceana*. 72(4):391-404.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M. A., Salas-de-León, D. A., Aldeco-Ramírez J., Merino-Ibarra, M. (2014). Differential distribution of diatoms and dinoflagellates in a cyclonic eddy confined in the Bay of La Paz, Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 119 (9): 6258-6268.

- Cruz-Gómez, R. C., Monreal-Gómez, M.A., Bulgakov, S.N. (2008). Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia* 33 (10): 741-746.
- De la Cruz, A. (1971). Estudios de plancton en el Banco de Campeche. Pp 375-383. In: UNESCO (Ed.), *Coloquio sobre investigaciones y recursos del Mar caribe y regiones adyacentes*, París, 545 p.
- De la Lanza, G. (2001). *Características físico-químicas de los mares de México*. 6ª ed. Plaza y Valdés. CDMX. 149 p.
- Durán-Campos, E., Salas de León, D.A., Monreal-Gómez, M.A., Aldeco-Ramírez, J., Coria-Monter, E. (2015). Differential zooplankton aggregation due to relative vorticity in a semi-enclosed bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 164: 10-18.
- Durán-Campos, E., Salas de León, D.A., Monreal-Gómez, M.A., Coria-Monter, E. (2017). Patterns of chlorophyll-a distribution linked to mesoscale structures in two contrasting areas Campeche Canyon and Bank, southern Gulf of Mexico. *Journal of Sea Research* 123: 30-38.
- Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Coria-Monter, E. (2019). Zooplankton functional groups in a dipole eddy in a coastal region of the southern Gulf of California. *Regional Studies in Marine Science* 28: 100588.
- Flores Coto, C. (1988) Composición, distribución y abundancia ictioplanctónica del Sur del Golfo de México. *Universidad y Ciencia*. 5(9):65-84.
- Foerster, W.J. (1996). El efecto de la frontera en el noreste del Océano Pacífico Norte. *Ciencias Marinas* 22: 175-190.
- Fraser, J.H. (1968). The history of plankton sampling. In: D. J. Tranter (ed.). *Zooplankton Sampling*. UNESCO. Paris. 57-76.
- Galarza-Macías, J. (1998). Estimación de la biomasa zooplanctónica en zonas costeras con ayuda de un Perfilador Acústico Doppler. Tesis de Licenciatura. Universidad Iberoamericana, 70 pp.
- Gasca, R. (1996). *El zooplancton marino*. In: Gasca, R. y Suárez E. (1996). Introducción al estudio del zooplancton marino. El Colegio de la Frontera del Sur.
- Gasca, R., Suárez, E., Castellanos, I. (1995). Biomazas zooplanctónicas en aguas superficiales del Golfo de México durante verano e invierno de 1991. *Caribbean Journal of Science* 31 (1-2): 128-140.

- Goldthwait, S., Steinberg, D. (2008). Elevated biomass of mesozooplankton and enhanced fecal pellets flux and cyclonic and mode-water eddies in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Research II* 55: 1360-1377.
- Gómez-Aguirre, S. (1987). Biomasa de plancton de la zona económica exclusiva del sureste del Golfo de México y Caribe Mexicano (may-jul), 1982). *Universidad y Ciencia* 4 (8): 47-54.
- Gómez-Gutiérrez, J., Robinson-Mendoza, C., Arenas-Fuentes, V. (1998). La hidroacústica, una moderna herramienta para el estudio de la biología y la ecología del sistema pelágico marino. *Ciencia*. 49(2):11-22.
- Gordon, A. L. (1966). Caribbean Sea-Oceanography, *In: The Encyclopedia of Oceanography*, R.W., Fairbridge (Ed.), 175-181 pp.
- Hensen, V., (1987). *Über die Bestimmung des Planktons oder dies im Meere treibenden Materials an Pflazen und Tieren. V. Bericht der Commision zur wissenschaftlichen Untersuchung der deutschen Meere un Kiel*. Paul Perey, Berlin, 108 pp.
- Johnson, W., Allen, D. (2012). Zooplankton of the Atlantic and Gulf coasts: a guide to their identification and ecology. The Johns Hopkins University. 470 p.
- Lévy, M., Klein, P., Treguier, M. (2001). Impact sub-mesoscale physic on productions and subductions of phytoplankton in an oligotrophic regimen. *Journal of Marine Research* 59: 535–566.
- López Nogueira I.L. (2017). Estructuras Hidrodinámicas y Biomasa Zooplanctónica en la Bahía de la Paz. Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 53 p. México D.F.
- McGillicuddy Jr., D.J., Anderson, L.A., Bates, N. R., Bibby, T., Buesseler, K.O., Carlson, C., Davis, C.S., Ewart, C., Falkowski, P., Goldthwait, S.A., Hansell, D.A., Jenkins, W.J., Johnson, R., Kosnyrev, V., Ledwell, J. R., Li, Q.P., Siegel, D.A., Steinberg, D.K. (2007). Eddy/Wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms. *Science* 316: 1021-1026.
- McGillicuddy, Jr., D.J. (2016). Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale. *Annual Review of Marine Sciences* 8: 125-159.
- Merrel, W.J. Jr., Morrison, J.M. (1981). On the circulation of the Gulf of Mexico with observations from April 1978. *Journal of Geophysical Research*, 86(C5), 4181-4185.

- Mojica, E. (2003). Variabilidad de la biomasa zooplanctónica en la región del Cañón de Campeche durante la campaña PROMEBIO-I (del 5 al 21 de agosto, 1999). Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México Distrito Federal.
- Molinari, R.L, Festa, J.F., Behringer D.W. (1978). The circulation of the Gulf of Mexico derived from estimated Dynamic High Fields. *Journal of Physical Oceanography* 8: 987-996.
- Monreal-Gómez, M. A., Salas de León, D.A. (1990). Simulación de la Circulación de la Bahía de Campeche. *Geofísica Internacional* 29(2): 101-111.
- Monreal-Gómez, M. A., Salas de León, D.A. (1997). Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. *Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Unión Geofísica Mexicana* 3: 183-199.
- Morales, C., Hormazabal, S., Correa-Ramírez, M., Pizarro, O., Silva, N., Fernández, C., Anabalón, V., Torreblanca, L. (2012). Mesoscale variability and nutrient-phytoplankton distributions off central -southern Chile during the upwelling season: The influence of mesoscale eddies. *Progress in Oceanography* 104: 17-29.
- Nowlin, W.D. Jr. (1972). Winter circulation patters and property distributions. In: *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. L. R. A. Capurro y J.L. Reid, Eds. Gulf Pub. Co., Houston 3-15 pp.
- Okolodkov, Y.B. (2003). A review of Russian research in the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea in the 1960 – 1980s. *Hidrobiológica* 13 (3): 207-221.
- Omori, M., Ikeda. (1984). *Methods in Marine Zooplankton Ecology*. John Wiley y Sons. Ed. USA. 332 pp.
- Olson, D. B. (1991). Rings in the Ocean. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 19(1), 283-311, doi:10.1146/annurev.ea.19.050191.001435.
- Ramírez Cruz, V. (2005). Distribución de la biomasa zooplanctónica en la región del Cañón de Campeche en fin de temporada de nortes. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México Distrito Federal.
- Richardson, A.J. (2008). In hot water: zooplankton and climate change. *ICES Journal of Marine Science* 65(3): 279-295, doi: <https://doi.org/10.1093/icesims/fsn028>
- Rivera-Hernández, F. (2013). Efecto de la Vorticidad en la Distribución de la Biomasa de Zooplancton en el Cañón de Campeche. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Rosales Navarro, I.S. (2003). Circulación Geostrófica en el sur del Golfo de México. Tesis

- de Licenciatura en Ing. Geofísico, Fac. Ingeniería, UNAM, 87 p, México D.F., junio de 2003.
- Salas de León, D.A. (1998). Influence de la circulation à long terme sur la répartition des organismes zooplanctoniques dans la Baie de Campeche, Mexique. *Oceanologica Acta* 21(1):87-93.
- Salas de León, D.A., Monreal-Gómez M.A., Signoret, M., Aldeco, J. (2004). Subsurface anticyclonic-cyclonic structure and some biological characteristics over the Campeche Canyon, Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 109, doi: 10.1029/2002JC001614.
- Salas de León, D.A., Monreal-Gómez M.A. (2005). Procesos físicos que influyen en la productividad biológica de los mares mexicanos. *Ciencia* 56(4): 49-59.
- Sanvicente-Añorve, L.E. (1990). Comunidades ictioplanctónicas en el sureste del Golfo de México. Tesis de Maestría. ICMYL, UNAM, 58 p.
- Silverberg, N., Shumilin, E., Aguirre-Bahena, F., Rodríguez-Castañeda, A., Sapozhnikov, D. (2007). The impact of hurricanes on sedimenting particulate matter in the semiarid Bahía de La Paz, Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 27: 2513-2522.
- Strzelecki, J., Koslowa, J., Waiteb, A. (2007). Comparison of mesozooplankton communities from a pair of warm-and cold-core eddies off the coast of Western Australia. *Deep-Sea Research II* 54: 1103-1112.
- Sweeney, E., N., McGillicuddy Jr, D., J., Buesseler, K.O. (2003). Biogeochemical impacts due to mesoscale eddy activity in the Sargasso Sea as measured at the Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS). *Deep Sea Research II* 50: 3017-3039.
- Torner, M., Kirwan, A.D., Poje, A.C. (2003). Chlorophyll dispersal by eddy-eddy interaction in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 108: 2033. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JC001499>.
- Vera-Mendoza, R., Salas de León, D.A. (2014). Effect of environmental factor son zooplankton abundance and distribution in river discharge influence areas in the southern Gulf of Mexico. In: Amezcua, F., Bellgraph, B. (eds.), *Fisheries management of Mexican and Central American Estuaries, Estuaries of the world*. Springer, pp 93-112.
- Wickstead, J.H. (1979). *Zooplankton marino*. Omega. Madrid, España. 70 pp.
- Wormuth, J.H., Ressler, P.B., Candy, R.B., Harris, E.J. (2000). Zooplankton and micronekton in cyclones and anticyclones in the Northeast Gulf of Mexico. *Gulf of*

Mexico Science 18(1): 23-34.

Yáñez-Arancibia, A., Day, J.W. (2004). The Gulf of Mexico: towards an integration of coastal management with large marine ecosystem management. *Ocean & Coastal Management* 47 (11-12): 537-563.

Zavala-García, F., Flores-Coto, C., Espinoza-Fuentes M.L. (2016). Relationship between zooplankton biomass and continental water discharges in the southern Gulf of Mexico (1984-2001). *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 51(1): 21-30

