

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

EFFECTO DE ESTRUCTURAS HIDROGRÁFICAS EN LA BIOMASA
ZOOPLANCTÓNICA DE LA BAHÍA DE LA PAZ, DURANTE INVIERNO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

PRESENTA:

Karina Isabel Mariano Peguero

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Elizabeth Johana Durán Campos



Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México, 2022.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

Dedicatorias.....	1
Agradecimientos.....	2
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Introducción.....	5
Marco Teórico.....	7
Zooplancton.....	7
Generalidades.....	7
Principales grupos.....	8
Factores abióticos que determinan su distribución y abundancia...10	
Métodos para estimar su biomasa.....	11
Antecedentes.....	12
Objetivos.....	13
General.....	13
Particulares.....	13
Área de estudio.....	14
Materiales y métodos.....	15
Resultados.....	16
Discusión.....	22
Conclusiones.....	27
Referencias.....	27

Dedicatoria

A mi madre: Por todo el apoyo que me has brindado en los diversos aspectos de mi vida, ese amor incondicional e impulso que me has dado desde que tengo memoria hasta la fecha.

A mi abuelita Isabel: Por tu gran cariño y por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas apoyándome cuando nadie más lo hizo.

Gracias a las dos por ayudarme a lo largo de toda mi formación académica hasta la conclusión de mi carrera, este logro también es suyo.

Al amor de mi vida: Héctor, gracias por todo el amor que me das día con día y por ser mi motivación e inspiración para dar lo mejor de mí, agradezco mucho el haberte conocido, gracias por entenderme, apoyarme en todo momento y por ayudarme a dar este gran paso en mi vida, sin ti no lo habría logrado.

A mis perritos: Bumbi, Luna, Gordo, Atenea y Benito, también les dedico este gran logro porque han estado conmigo dándome cariño en los buenos y malos momentos.

Agradecimientos

A la Dra. Elizabeth Durán Campos por ser la Directora de mi tesis y ayudarme en la realización de la misma. Gracias por esclarecer todas mis dudas y por la enorme paciencia y apoyo que me proporcionó siempre.

Al Dr. Erik Coria Monter por su ayuda para efectuar mi servicio social y mi tesis, y por ser un gran apoyo tanto en las dudas que tenía como en las revisiones de la misma.

Al Dr. Luis Alberto Oseguera Pérez por su apoyo y por estar al pendiente en cada revisión de mi tesis.

Al Dr. Omar Chaparro Herrera por sus consejos para mejorar la información plasmada en mi tesis.

A la Dra. Rocío Fernández por apoyarme en todas las revisiones de mi tesis.

Al ICMYL por ayudarme a cumplir mi sueño de realizar mi tesis enfocada en las ciencias del mar.

El muestreo y obtención de datos proviene de la campaña oceanográfica DIPAL-I realizada a bordo del B/O “El Puma” de la UNAM. El financiamiento para el tiempo de buque fue cubierto por la Coordinación de Plataformas Oceanográficas de la UNAM.

RESUMEN

El presente proyecto analiza y discute el efecto de algunas estructuras hidrodinámicas observadas durante una época de invierno en la distribución de la biomasa del zooplancton de la Bahía de La Paz, sur del Golfo de California. Se realizó un crucero de investigación oceanográfica durante el mes de febrero de 2006. La biomasa zooplanctónica se analizó de acuerdo a los métodos y protocolo descritos en Durán-Campos *et al.* (2015 y 2019b). Las estructuras hidrográficas se caracterizaron mediante datos hidrográficos obtenidos de 46 estaciones a partir de una sonda CTD. Se calcularon la temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$) y la salinidad absoluta (g/kg^1). Se realizaron perfiles y secciones verticales de las propiedades hidrográficas para identificar la profundidad de las clinas. Se elaboraron mapas de distribución horizontal de las propiedades hidrográficas. Los resultados mostraron que la temperatura fue decreciendo conforme incrementó la profundidad dado que a los 10 m se registró la mayor temperatura la cual fue de 19.7°C y a 200 m la menor con 11.95°C . La salinidad se mantuvo relativamente constante en las diferentes profundidades con un intervalo de $35.54\text{ g}/\text{kg}^1$ a $34.96\text{ g}/\text{kg}^1$. La densidad si presentó una ligera variación ya que aumentó a los 100 y 200 m de profundidad con valores de $26.26\text{ kg}/\text{m}^3$ y $26.59\text{ kg}/\text{m}^3$ respectivamente. La biomasa zooplanctónica tuvo una distribución diferente a lo largo de la bahía, se registraron valores elevados de $45\text{ g}/100\text{ m}^3$ ubicados en una latitud de 24.31°N y una longitud de 110.6°W . La comparación entre la distribución de la biomasa zooplanctónica y los parámetros hidrográficos evidenció que la biomasa zooplanctónica fue alta en Cuenca Alfonso y el umbral batimétrico en Boca Grande. Se encontró la presencia de un núcleo frío y denso en Cuenca Alfonso evidente desde los 20 m con mayor gradiente a los 100 de profundidad indicativo de la presencia de un vórtice ciclónico de mesoescala permanente al interior de la bahía. Ambas zonas con elevada biomasa zooplanctónica, una por su cercanía con la línea de costa y la otra por estar próxima al vórtice ciclónico en Cuenca Alfonso que produce la suspensión de materia orgánica debido a la poca profundidad.

Palabras clave: Estructuras hidrodinámicas, biomasa zooplanctónica, vórtice ciclónico.

ABSTRACT

This project analyzes and discusses the effect of some hydrodynamic structures observed during a winter season on the distribution of zooplankton biomass in the Bay of La Paz, southern Gulf of California. An oceanographic research cruise was carried out during the month of February 2006. Zooplankton biomass was analyzed according to the methods and protocol described in Durán-Campos et al. (2015 and 2019b). Hydrographic structures were characterized using hydrographic data obtained from 46 stations from a CTD sounder. Conservative temperature ($^{\circ}\text{C}$) and absolute salinity (g/kg) were calculated. Profiles and vertical sections of the hydrographic properties were made to identify the depth of the clines. Horizontal distribution maps of the hydrographic properties were prepared. The results showed that the temperature decreased as the depth increased, given that at 10 m the highest temperature was recorded, which was 19.7°C , and at 200 m the lowest was 11.95°C . Salinity remained relatively constant at different depths with a range from $35.54 \text{ g}/\text{kg}$ to $34.96 \text{ g}/\text{kg}$. The density did present a slight variation since it increased at 100 and 200 m depth with values of $26.26 \text{ kg}/\text{m}^3$ and $26.59 \text{ kg}/\text{m}^3$, respectively. The zooplankton biomass had a different distribution throughout the bay, with high values of $45 \text{ g } 100 \text{ m}^3$ located at a latitude of 24.31°N and a longitude of 110.6°W . The comparison between the distribution of the zooplankton biomass and the hydrographic parameters showed that the zooplankton biomass was high in the Alfonso Basin and the bathymetric threshold in Boca Grande. The presence of a cold and dense nucleus was found in the Alfonso Basin, evident from 20 m with the greatest gradient at a depth of 100, indicative of the presence of a permanent mesoscale cyclonic vortex inside the bay. Both areas have high zooplankton biomass, one due to its proximity to the coastline and the other because it is close to the cyclonic vortex in Cuenca Alfonso, which produces the suspension of organic matter due to the shallow depth.

Keywords: Hydrodynamic structures, zooplankton biomass, cyclonic vortex.

Introducción

El zooplancton está compuesto por un grupo heterogéneo de organismos que se localizan tanto en aguas epicontinentales como marinas, los cuales juegan un papel fundamental en el ecosistema marino debido a que representan un eslabón fundamental dentro de las redes tróficas, y además juegan un papel primordial en la transferencia de carbono y en su flujo vertical en la columna de agua (Brierley 2017; Durán-Campos et al. 2019; Richardson, 2008). A pesar de que estos organismos evolutivamente han desarrollado diversas estrategias que les permiten desplazarse en la columna de agua y permanecer en condiciones propicias para obtener alimento, diversos estudios señalan el hecho de que su distribución, composición y abundancia está directamente relacionada con diversas estructuras hidrodinámicas que se presentan en la columna de agua a diferentes escalas espacio-temporales; dichas estructuras han sido categorizadas de acuerdo a su influencia en la columna de agua, entre los que destacan las ondas internas, surgencias, frentes y vórtices (McGillicuddy *et al.* 2007; McGillicuddy 2016; Mahadevan 2016)

Como un indicador de la productividad de los organismos del zooplancton, la biomasa es uno de los indicadores más utilizados en cualquier ecosistema marino y su distribución puede estar regulada (además de las estructuras anteriormente descritas) por diversos factores ambientales, entre los que destacan la salinidad, la temperatura y la densidad (Mann y Lazier, 2006).

El estudio del efecto de estructuras hidrográficas en los organismos del zooplancton ha sido abordado por diferentes autores. En el sur del Golfo de California y áreas adyacentes, como la Bahía de La Paz, la presencia de vórtices de mesoescala (estructuras con un diámetro de 10-100 km) han sido relacionadas con un incremento en la biomasa del zooplancton de la región, debido a que la presencia de estas estructuras promueven la mezcla vertical y, por lo tanto, aumenta el suministro de nutrientes hacia las capas superficiales, lo que a su vez induce una alta concentración de fitoplancton y, en consecuencia, un aumento en la biomasa del zooplancton (Salas de León *et al.*, 2011). El primer reporte observacional de un vórtice ciclónico en el interior de la Bahía de La Paz fue hecho por Monreal-Gómez *et al.* (2001) quienes reportaron, con datos in situ obtenidos en la temporada de verano, un vórtice ciclónico con un impacto en los primeros 50 m de la columna de agua. Coria-Monter *et al.* (2014), documentaron una distribución diferencial entre diatomeas y dinoflagelados en un vórtice ciclónico para la temporada de verano, con un predominio de dinoflagelados en el centro del vórtice, mientras que las diatomeas predominaron en la periferia, como producto

de una serie de procesos vinculados con el bombeo de nutrimentos inducido por la estructura hidrográfica. Durán-Campos *et al.* (2015) mostraron, con datos obtenidos durante la época de verano, que el patrón de circulación provocó una agregación de los grupos funcionales de zooplancton. Coria-Monter *et al.* (2017), con datos obtenidos a finales de primavera, proporcionaron evidencia observacional que muestra que los pulsos de fertilización hacia la zona eufótica están regulados por la presencia de un vórtice ciclónico originado por un bombeo de Ekman. Con información obtenida durante la época de verano, se postuló que la presencia de un remolino ciclónico genera diferentes hábitats propicios para los organismos planctónicos, tanto el fitoplancton (Durán-Campos *et al.*, 2019a) como el zooplancton (Durán-Campos *et al.*, 2019b). Más recientemente, Rocha-Díaz *et al.* (2021) documentaron que la presencia del vórtice ciclónico de la Bahía de La Paz determina la distribución, composición y abundancia de los copépodos (calanoides, ciclopoideos y copepoditos); la mezcla turbulenta que se presenta en la periferia de dicho vórtice genera una elevada concentración de clorofila-a e induce a la formación de lo que los autores nombraron como “cinturón” de copépodos.

Justificación

El presente estudio pretende contribuir a la información que hay del zooplancton y su relación con la hidrografía en la Bahía de La Paz durante invierno, ya que hacen falta más estudios sobre dichos organismos ya que al ser consumidores primarios ocupan un papel trascendental dentro de la red trófica y a su vez, son el alimento de muchas especies de peces óseos de importancia económica. Su distribución está dada de acuerdo a las estructuras hidrodinámicas y los factores ambientales de la zona, por esta razón, el analizar el efecto de ellos en la cantidad de biomasa zooplanctónica nos brinda un indicativo de la productividad secundaria en la bahía durante esta época la cual se ve influenciada por los vientos que provienen del noroeste.

Marco Teórico

Zooplancton

El conjunto de organismos que viven suspendidos en aguas epicontinentales y marinas que son incapaces de nadar efectivamente contra las corrientes, se denominan plancton, los cuales se dividen en fitoplancton y zooplancton. En el fitoplancton están todos los protozoarios unicelulares fotosintéticos. Dentro del zooplancton se incluyen tanto protozoarios unicelulares como multicelulares heterótrofos (Johnson y Allen, 2012).

Generalidades

La mayoría de ellos mide sólo unos milímetros, no obstante, algunos son mucho más grandes. Pese a encontrarse a merced de las corrientes, son capaces de realizar maniobras evasivas y de alimentación. Cabe mencionar que en las muestras que se obtienen de zooplancton, hay una mezcla de holoplancton, organismos que pasan todo su ciclo de vida formando parte del plancton, y de meroplancton, que sólo están una parte de su vida en la columna de agua, usualmente cuando son larvas. El zooplancton demersal se encuentra la mayoría del tiempo en el fondo o cerca del mismo, sin embargo, durante la noche se desplaza hacia la superficie de la columna de agua. En lo que respecta al neuston, son organismos asociados a la capa superior de la columna de agua, ya sea que estén en ella o debajo de la superficie (Johnson y Allen, 2012).

El zooplancton puede clasificarse con base al hábitat, la profundidad en la que se distribuyen, su talla y el ciclo de vida que poseen. De acuerdo a su hábitat pueden dividirse en limnoplancton o zooplancton de agua dulce y haliplancton, es decir, zooplancton marino. Estos últimos se catalogan en zooplancton oceánico, nerítico, y de agua salobre. En lo que respecta a la profundidad de distribución, el pleuston se encuentra en la superficie del mar, el neuston se localiza en la parte superior de la columna de agua, de pocos a decenas de mm debajo de la superficie, el zooplancton epipelágico vive entre los 0 a los 300 m, el zooplancton mesopelágico abarca desde los 300 a los 1000 m, el zooplancton batipelágico habita entre los 1000 a 3000 m, el zooplancton abisopelágico de 3000 a 4000 m y el zooplancton epibentónico que se ubica en el fondo marino (Santhanam *et al.*, 2019).

Con base a la talla del zooplancton, estos pueden dividirse en microzooplancton que engloba a una variedad de organismos que van desde los 20 a los 200 μm , dentro de este grupo se incluyen protozoos ciliados, flagelados y ameboides, así como nauplios y copépodos. El mesozooplancton abarca tallas a partir de 0.2 a 20 mm y éstos se encuentran en la mayor parte de las muestras. Los copépodos están presentes entre el 50 y 90% de ellas, con densidades de 1 millón por metro cúbico (m^3). Los rotíferos, percebes en estadio larval, cangrejos y moluscos también llegan a tener grandes densidades, no obstante, es más rara su presencia. El macrozooplancton incluye organismos que miden de 2 a 20 cm de talla, y abarca desde camarones, larvas de peces y otros animales de mayor tamaño, que pese a ser más comunes, suelen ser menos abundantes y difíciles de capturar, sin embargo, medusas y ctenóforos pueden ser recolectados con una red (Santhanam *et al.*, 2019).

Principales grupos

El holoplancton incluye a los protozoos marinos, dentro de los cuales se encuentran los foraminíferos, que poseen un caparazón calcáreo ornamentado con orificios y espinas. A través de esos agujeros se desprenden unas prolongaciones desde su cuerpo que les ayudan a atrapar las partículas suspendidas para alimentarse. Los acantarios tienen un esqueleto con espículas formado de sulfato de estroncio, el cual pueden reducir y aumentar para modificar su flotabilidad. Los radiolarios cuentan con un esqueleto compuesto por una cápsula central con aberturas y una periférica, las dos formadas de espículas de silicio (Boltovskoy, 1999)

Los ciliados son uno de los grupos más importantes de los protozoos marinos debido a su abundancia y al papel que poseen dentro de las redes tróficas ya que son las presas de diversas especies de zooplancton y poseen cilios en su pared celular, tal es el caso de los tintínidos que son los únicos organismos ciliados que presentan un caparazón cartilaginoso, mismos que suelen encontrarse en muchas de las muestras fijadas (Boltovskoy, 1999).

Los cnidarios comprenden tanto a las medusas como a los sifonóforos, los cuales poseen un cuerpo gelatinoso que es transportado por las corrientes marinas, y es posible localizarlos a distintas profundidades. Son organismos carnívoros, cuentan con simetría radial, tentáculos y células urticantes denominadas cnidoblastos. Los ctenóforos también son organismos gelatinosos, transparentes y muy frágiles, de simetría bilateral, carnívoros,

con cilios que utilizan para nadar y pueden vivir solitarios o en grandes enjambres (Boltovskoy, 1999).

Los quetognatos son uno de los grupos más comunes que suelen hallarse en las muestras de zooplancton, especialmente el género *Sagitta*, poseen simetría bilateral, de cuerpo casi transparente, alargado en forma de flecha, dividido en cabeza, tronco y cola, su talla va de 1 a 2 cm, son depredadores y carnívoros. En la cabeza poseen dos ojos y alrededor de la boca cuentan con dientes y garfios a manera de mandíbulas. A los lados del tronco presentan de dos a cuatro aletas y en la cola una aleta caudal. Los poliquetos son organismos carnívoros que poseen apéndices modificados a manera de aletas para nadar, aunque usualmente viven en el fondo del mar, es posible encontrar el género *Tomopteris* en algunas muestras de zooplancton (Boltovskoy, 1999).

Otro grupo que a diferencia de los poliquetos es dominante en las muestras, son los crustáceos, entre ellos se encuentran los cladóceros, que poseen un caparazón con dos valvas, los ostrácodos también con dos valvas y una antena transformada a modo de órgano natatorio, los anfípodos, con ojos desarrollados y cabeza diferenciada que habitan desde aguas abiertas hasta mayores profundidades, los misidáceos presentan forma de gamba, ojos pedunculados y caparazón que cubre cabeza y tórax, se les localiza a grandes profundidades, así mismo, isópodos, tanaidáceos, cumáceos y eufáusidos, siendo los copépodos los más abundantes y que a su vez juegan un papel muy importante dentro de las redes tróficas ya que son consumidores principales del fitoplancton y es común que se encuentren por encima de los 100 m de profundidad; asimismo, sirven de alimento primordial para muchos otros organismos zooplanctónicos. No obstante, también hay copépodos carnívoros, los cuales tienen una talla mayor. Los copépodos son de cuerpo alargado con dos partes diferenciadas, el cefalotórax, que posee antenas para orientarse y apéndices para la alimentación, y el abdomen, que no los posee y termina en dos proyecciones llamadas furcas con prolongaciones plumosas (Boltovskoy, 1999)

Los moluscos también se encuentran formando parte del zooplancton tanto larvas como adultos, tal como lo son los heterópodos, similares a los gasterópodos, y los pterópodos, de talla pequeña y pie modificado a manera de aletas, tal es el caso de los tecosomados y gimnosomados. Por otra parte, los tunicados son procordados herbívoros que filtran fitoplancton, cuentan con una columna vertebral rudimentaria o notocorda, una branquia y un tejido gelatinoso que recubre su cuerpo llamada túnica, de ahí el nombre; los

pirosómidos, doliólidos, salpas y apendicularias son algunos ejemplos de ellos (Boltovskoy, 1999).

En lo que respecta al meroplancton, lo componen larvas de peces óseos y de organismos invertebrados, entre ellos se encuentran los nemertinos, platelmintos, sipuncúlidos, poliquetos, briozoos, crustáceos como cirrípedos, copépodos y decápodos, moluscos como gasterópodos y lamelibranquios y equinodermos (Boltovskoy, 1999).

Factores abióticos que determinan su distribución y abundancia

La distribución y abundancia del zooplancton está fuertemente influenciada por las características hidrográficas específicas de la localidad. Estudiar la composición de especies, la densidad poblacional y la diversidad es de suma importancia para analizar el potencial pesquero de los ecosistemas marinos (Santhanam *et al.*, 2019).

La temperatura del agua determina principalmente los intervalos geográficos de la distribución de los organismos, una función tanto de la latitud como de las corrientes oceánicas principales. Dentro de un intervalo de temperatura, la salinidad es quizá el factor más amplio que afecta la distribución. Los hábitats que se localizan cerca de la costa abarcan desde agua dulce, salobre, marina, e incluso áreas hipersalinas. Muchas especies poseen ciertas preferencias por cada tipo de hábitat con determinada salinidad y condiciones hidrográficas. Las variaciones en la profundidad, velocidad de corriente, energía de las olas y turbidez, influyen en la distribución local. Asimismo, la proximidad con otros hábitats como los marismas y la vegetación que se encuentra sumergida contribuyen en la distribución del plancton. Si los factores bióticos y abióticos de un lugar se modifican, la distribución de un taxa planctónico individual cambia en un tiempo récord. Tal es el caso de la disposición de la comida, la abundancia de depredadores, así como los cambios en la temperatura y la salinidad. Incluso las larvas y otros estadíos del ciclo de vida de un taxón pueden poseer distintas distribuciones en un mismo cuerpo de agua (Johnson y Allen, 2012).

Por otro lado, los giros ciclónicos también afectan la distribución y abundancia del zooplancton, debido a que producen que emerja a la superficie el agua que se encuentra a mayor profundidad, la cual es rica en nutrientes y particularmente el centro del giro posee aún más nutrientes que el agua que se encuentra alrededor (Mojica, 2008). Los giros

ciclónicos suceden en el Hemisferio Norte, cuando la circulación va en sentido opuesto a las manecillas del reloj, conocido también como giro frío ya que en el centro hay una temperatura menor que en el periferia a la misma profundidad y la superficie libre posee poca elevación en contraste con el exterior por su estructura divergente. En lo que respecta al giro anticiclónico, éste sí ocurre en dirección a las manecillas del reloj, el centro tiene una temperatura mayor y una elevación más grande que en la periferia porque es convergente (García-Mirafuentes, 2010).

Métodos para estimar la biomasa zooplanctónica

La estimación de la biomasa zooplanctónica puede realizarse mediante métodos, gravimétricos, volumétricos y colorimétricos a partir del muestreo con redes. El método gravimétrico es ampliamente utilizado para el análisis cualitativo y cuantitativo, ya que facilita la identificación de especies, ayuda a establecer el intervalo de talla de los organismos recolectados y, si se cuenta con un contador de flujo en la red, se puede conocer la densidad de los organismos. No obstante, posee algunas desventajas, entre ellas se encuentran la variación de malla, obstrucción de red y fallos en el cálculo del flujo de agua a través del arrastre, además, la información aportada por las redes es limitada espacial y temporalmente (Figuroa, 2010).

En el método gravimétrico se establece la masa del zooplancton como peso húmedo, peso seco o peso libre de cenizas. El método volumétrico define el volumen trasladado por los organismos, abarcando el agua ambiental y estructural. En lo que respecta a los métodos químicos y bioquímicos, éstos evalúan el contenido de carbono, nitrógeno y fósforo, así como de biomoléculas tales como carbohidratos, lípidos, proteínas, ARN y ATP. Cabe mencionar, que existen algunas desventajas en dichos métodos, el costo es elevado y la información obtenida es insuficiente para el estudio científico. Los métodos más recientes son los acústicos, los cuales han sido de gran ayuda ya que están basados en la percepción remota mediante el sonido lo cual facilita la obtención de la biomasa zooplanctónica de manera veloz, eficaz y a mayores profundidades (Rivera, 2013).

Antecedentes

Las condiciones hidrográficas que posee la Bahía de La Paz son altamente afectadas por la variabilidad climática del sur del Golfo de California, tanto la radiación solar como la incidencia de vientos intensos que provienen predominantemente del norte y noroeste durante la época de invierno, influyen fuertemente en la generación de estructuras hidrodinámicas del lugar como lo son vórtices ciclónicos y anticiclónicos, mismos que poseen un enorme impacto sobre la variación espacial de la biomasa zooplanctónica (López, 2017).

En invierno, los vientos más fuertes producen una capa de mezcla de alrededor de 50 m de espesor (Molina-Cruz *et al.*, 2002), profunda y visible desde que culmina el mes de agosto hasta el comienzo de la primavera (Salinas-González *et al.*, 2003), y la estratificación se reduce durante esta época con un valor promedio de 95 J/m^3 , de acuerdo a lo reportado por Obeso-Nieblas *et al.* (2007). Aunado a esto, la termoclina, haloclina y picnoclina se profundizan en otoño e invierno producto de dichos vientos del norte y noroeste (Obeso-Nieblas, 2003).

Los vórtices que se generan en la Bahía de la Paz se ven influenciados por el intercambio dinámico de agua con el Golfo de California, dado que se han registrado vórtices ciclónicos en el norte de la bahía con un diámetro de 24 km y 110 m de profundidad (García-Mirafuentes, 2010) y vórtices anticiclónicos relacionados con la topografía (Salinas-González *et al.*, 2003). En un estudio se modeló el vórtice ciclónico de la Bahía de la Paz encontrando que es de tipo baroclínico, susceptible a las condiciones de frontera y su generación proviene del flujo que atraviesa por las bocas (Martínez, 2013).

Cabe mencionar que dentro de la bahía se han identificado tres tipos de agua diferentes, una de ellas es el Agua Intermedia del Pacífico, el Agua Subtropical Superficial y el Agua del Golfo de California, con corrientes causadas por un vórtice ciclónico al norte de la bahía cerca de Boca Grande y Cuenca Alfonso que influye hasta los 100 m de profundidad, una columna de agua estratificada y la presencia de una termoclina a los 20 m de profundidad aproximadamente (Sánchez, 2019).

Se ha observado una distribución diferencial del fitoplancton desde el centro del giro ciclónico hacia la periferia con una alta abundancia de dinoflagelados y diatomeas (Coria-Monter *et al.*, 2014), y una concentración mayor de clorofila-*a* al norte de la bahía por la

incidencia del vórtice ciclónico del lugar (Sánchez, 2019). Otro estudio realizado por Mojica (2008), reveló que los nutrientes y la clorofila-a más altos se localizaron en el centro del vórtice ciclónico y que los grupos de zooplancton más abundantes fueron cladóceros, copépodos, sifonóforos, quetognatos y larvas de crustáceos.

La abundancia de copépodos registrada para la bahía ha indicado que los copepoditos son el grupo más abundante seguido por los cyclopoides y calanoides, la distribución horizontal de dichos organismos ha mostrado variación, los calanoides se han reportado con mayor abundancia cerca del centro del vórtice, los cyclopoides han sido más abundantes en la periferia, mientras que los copepoditos poseen más abundancia en la proximidad al Golfo de California (Rocha, 2018).

La biomasa zooplanctónica en la Bahía de la Paz también es más alta dentro del centro del giro ciclónico que en la periferia, con una predominancia de herbívoros en el centro, de omnívoros en la periferia y una mayor abundancia de carnívoros en las áreas adyacentes al Golfo de California (Durán-Campos *et al.*, 2015).

Objetivos

General:

1. Determinar la biomasa zooplanctónica y su relación con estructuras hidrodinámicas en la Bahía de La Paz, durante invierno.

Particulares:

1. Calcular la biomasa zooplanctónica.
2. Caracterizar estructuras hidrodinámicas mediante el análisis de parámetros hidrográficos.
3. Evaluar el efecto de las estructuras hidrodinámicas sobre la biomasa zooplanctónica.

Hipótesis

La distribución horizontal de la biomasa zooplanctónica se encuentra influenciada por la presencia de estructuras hidrográficas, tales como vórtices ciclónicos de mesoescala.

Área de estudio

La Bahía de La Paz se ubica en el margen suroriental de la península de Baja California, entre los 24.15° y los 24.97° N y los 110.30° y los 110.75° W; es la cuenca más grande dentro del Golfo de California (Figura 1).

Se comunica con el Golfo de California mediante dos bocas, una al noreste denominada Boca Grande y otra al sureste conocida como Canal de San Lorenzo. El límite sureste de Boca Grande se encuentra en la Isla Roca Partida. La batimetría muestra una región profunda con un máximo de 420 m, sobre Cuenca Alfonso.

Hacia el sur disminuye la profundidad gradualmente hasta llegar a una parte somera con pendiente suave y playas extensas. El Canal de San Lorenzo tiene una profundidad de aproximadamente 20 m. Un rasgo importante es la presencia de un umbral batimétrico de alrededor de 250 m de profundidad a lo largo de Boca Grande, lo que aísla parcialmente a la bahía del golfo.

La masa continental que la rodea presenta un clima BW (h') hw (e'), seco y árido (García, 1973). La temperatura media anual del aire es de 23.8 °C, la mínima se presenta en invierno con 8 °C y la máxima en verano con 37 °C. La cobertura de nubes es una de las más bajas de México; solo ocurre cuando se presentan tormentas tropicales, lo que a su vez puede ocasionar lluvias y causar aportes de terrígenos a la bahía. La evaporación (300 mm/año) supera a la precipitación (180 mm/año) (Monreal-Gómez *et al.*, 2001).

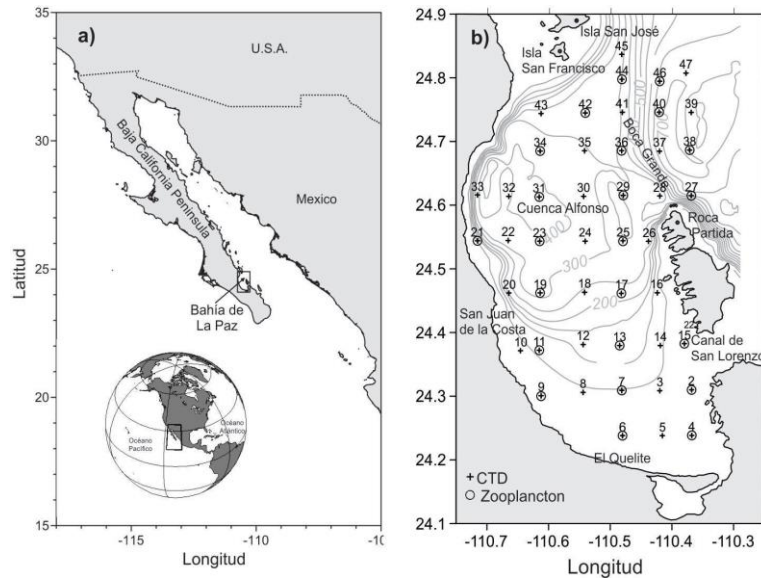


Figura 1. Área de estudio. Bahía de La Paz, batimetría en m. + Estaciones hidrográficas y O representa a las estaciones en donde se adquirieron muestras de zooplancton.

Materiales y Método

Para cubrir con el objetivo general:

Se contó con información hidrográfica de alta resolución y muestras de zooplancton con redes bongo que fueron obtenidas durante el crucero de investigación DIPAL-I a bordo del B/O El Puma de la UNAM, en la Bahía de La Paz del 22 al 26 de febrero de 2006, que corresponden a la época de invierno. El análisis de la biomasa zooplanctónica de las muestras colectadas se realizó siguiendo los métodos y protocolo descritos en Durán-Campos et al. (2015 y 2019b). La caracterización de estructuras hidrográficas se realizó a partir de los datos hidrográficos obtenidos mediante una sonda CTD.

Para cubrir con los objetivos particulares:

Se obtuvieron datos hidrográficos en un total de 46 estaciones con un CTD Seabird 19 (Figura 1b). La temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$) y salinidad absoluta (g/kg^1) se calcularon con base en la ecuación termodinámica del agua de mar (TEOS-10). Se realizaron perfiles y secciones verticales de las propiedades hidrográficas para identificar la profundidad a la que se presentan las clinas. Se realizaron mapas de distribución horizontal de las propiedades hidrográficas.

Resultados

Esta sección describe los resultados de acuerdo a los objetivos particulares, la primera sección es la hidrografía de la Bahía de La Paz y en la segunda son los datos biológicos.

Distribución horizontal de temperatura, salinidad y densidad.

Se observó que a 10 m de profundidad la temperatura se mantuvo constante en toda la bahía, con valores de 19.7 °C (Figura 2 A). La salinidad presentó valores de 35.44 g/kg¹ para la parte norte y central, mientras que en el suroeste y sureste de la bahía se presentaron valores mayores de 35.49 g/kg¹ y 35.54 g/kg¹ (Figura 2 B). Por otro lado, la densidad fue de 25.19 kg/m³ en el centro, mientras que en las periferias norte. En la parte sur se observó un núcleo de mayor densidad con valores 25.24 kg/m³ (Figura 2 C).

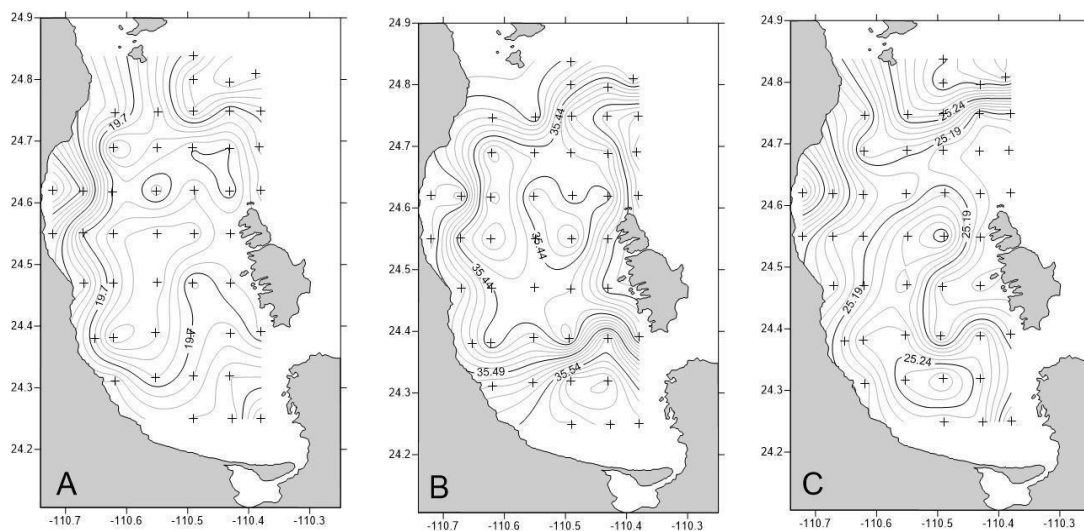


Figura 2. Distribución horizontal a 10 m de profundidad de: (A) Temperatura (°C), (B) Salinidad (g/kg¹) y (C) Densidad (kg/m³), en la Bahía de la Paz.

La temperatura a 20 m de profundidad mostró una lengüeta central de 19.35°C y en los extremos cercanos a la plataforma continental aumentó, ya que fue de 19.6°C (Figura 3 A). La salinidad arrojó dos núcleos, uno de menor salinidad ubicado en Cuenca Alfonso con valores de 35.42 g/kg¹ y en la parte sur de la bahía uno de mayor salinidad de 35.52 g/kg¹

(Figura 3 B). La densidad presentó un patrón constante para toda la bahía con un valor de 25.23 kg/m^3 (Figura 3 C).

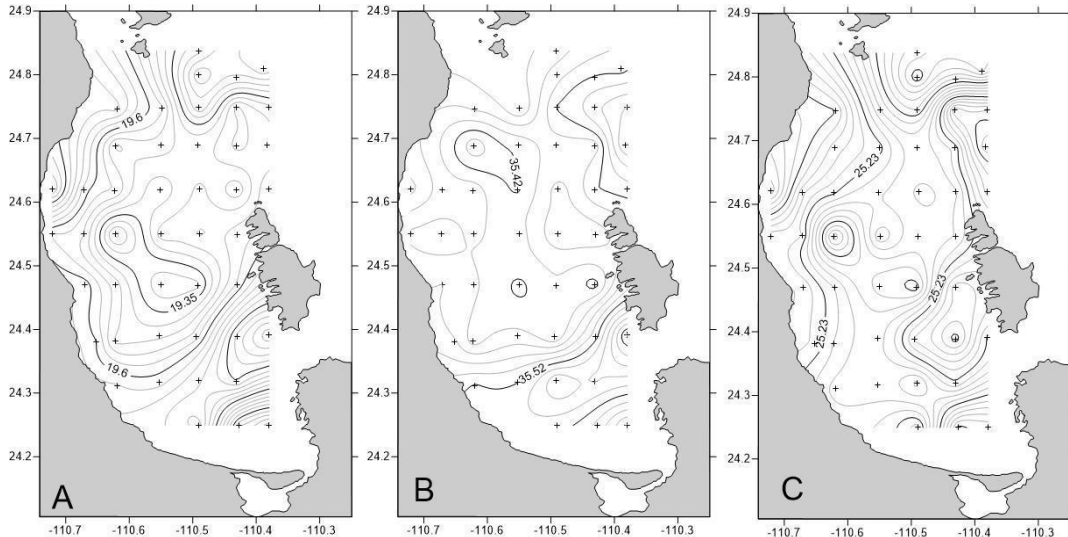


Figura 3. Distribución horizontal a 20 m de profundidad de: (A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) Salinidad (g/kg^1) y (C) Densidad (kg/m^3), en la Bahía de la Paz.

La temperatura a 30 m de profundidad se caracterizó por mantenerse constante a lo largo de la bahía con un valor de 19.3°C y presentó dos núcleos fríos, uno que abarcó la parte norte y central de la bahía a un costado de Boca Grande, y otro ubicado en la región sur cerca del canal de San Lorenzo de 18.8°C , respectivamente (Figura 4A). En cuanto a la salinidad se refiere, ésta tuvo mayor variación, dado que entre la Isla San José y el continente fue mayor, con 35.47 g/kg^1 , formándose una lengüeta, y debajo de ésta se muestran dos núcleos más que evidencian una salinidad menor, el primero observado en la porción central con 35.42 g/kg^1 , el otro siendo ligeramente menor, dado que fue de 35.37 g/kg^1 (Figura 4B). Por otro lado, la densidad presentó dos núcleos de mayor densidad, uno ubicado en la parte norte de la bahía en Cuenca Alfonso y otro ubicado en la parte sur ambos con valores de 25.42 kg/m^3 (Figura 4C). Es importante destacar que tanto la temperatura, la salinidad y la densidad presentaron núcleos en la zona de Cuenca Alfonso.

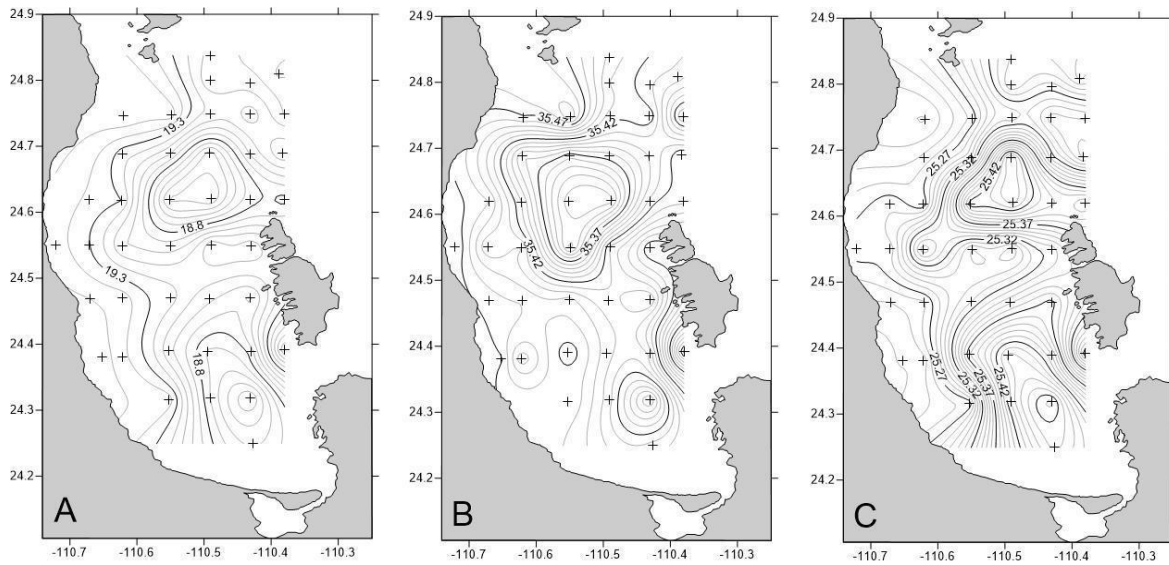


Figura 4. Distribución horizontal a 30 m de profundidad de: (A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) Salinidad (g/kg^1) y (C) Densidad (kg/m^3), en la Bahía de la Paz.

La temperatura, a los 50 m de profundidad, mostró la presencia de un núcleo frío en la zona de Cuenca Alfonso con valores de $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin embargo para esta profundidad ya no se manifiesta el otro núcleo frío en la parte sur de la bahía; mientras que el resto de la bahía presentó una distribución más estable de la temperatura con valores mayores de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 5A). La salinidad presentó un núcleo de menor salinidad en la zona de Cuenca Alfonso, de $35.24\text{ g}/\text{kg}^1$ (Figura 5B). La densidad mostró un núcleo de mayor densidad en Cuenca Alfonso que coincide con los núcleos de menor temperatura y salinidad, los valores fueron de $25.7\text{ kg}/\text{m}^3$ (Figura 5C).

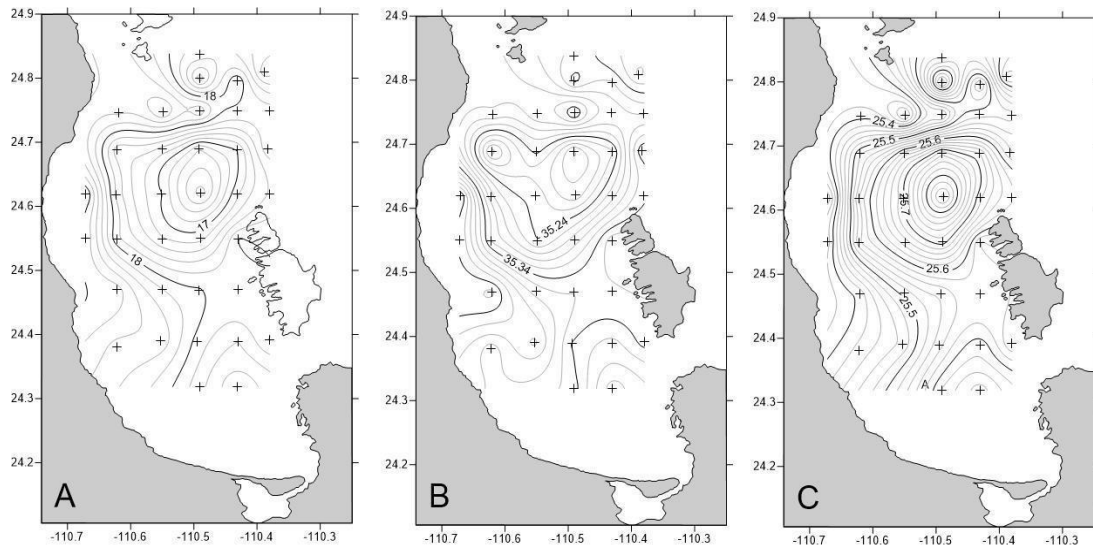


Figura 5. Distribución horizontal a 50 m de profundidad de: (A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) Salinidad (g/kg^1) y (C) Densidad (kg/m^3), en la Bahía de la Paz.

A 100 m de profundidad, en la distribución de temperatura ya no se observa el núcleo frío en Cuenca Alfonso, presentando valores de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ para toda la bahía (Figura 6A). La salinidad se mantuvo igual en el sitio, con un valor de $35.05\text{ g}/\text{kg}^1$ formándose un núcleo en el noreste de la bahía, arriba de la Isla Espíritu Santo (Figura 6 B). La densidad también se mantuvo estable dado que fue de $26.26\text{ kg}/\text{m}^3$ y no manifestó cambios dando lugar a un núcleo central al norte (Figura 6C).

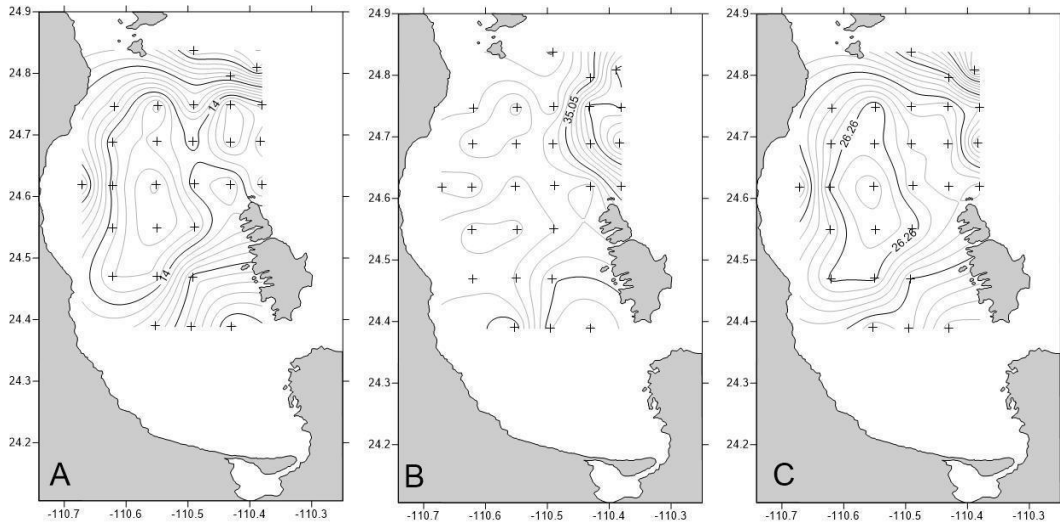


Figura 6. Distribución horizontal a 100 m de profundidad de: (A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) Salinidad (g/kg^1) y (C) Densidad (kg/m^3), en la Bahía de la Paz.

La temperatura presentó una distribución más homogénea a los 200 m de profundidad, con valores de 11.95°C (Figura 7A). En lo que respecta a la salinidad, ésta tampoco presentó variación puesto que sólo manifestó un valor de $34.964 \text{ g}/\text{kg}^1$ (Figura 7B). Por su parte, la densidad también arrojó un solo resultado, siendo éste de $26.59 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Figura 7C).

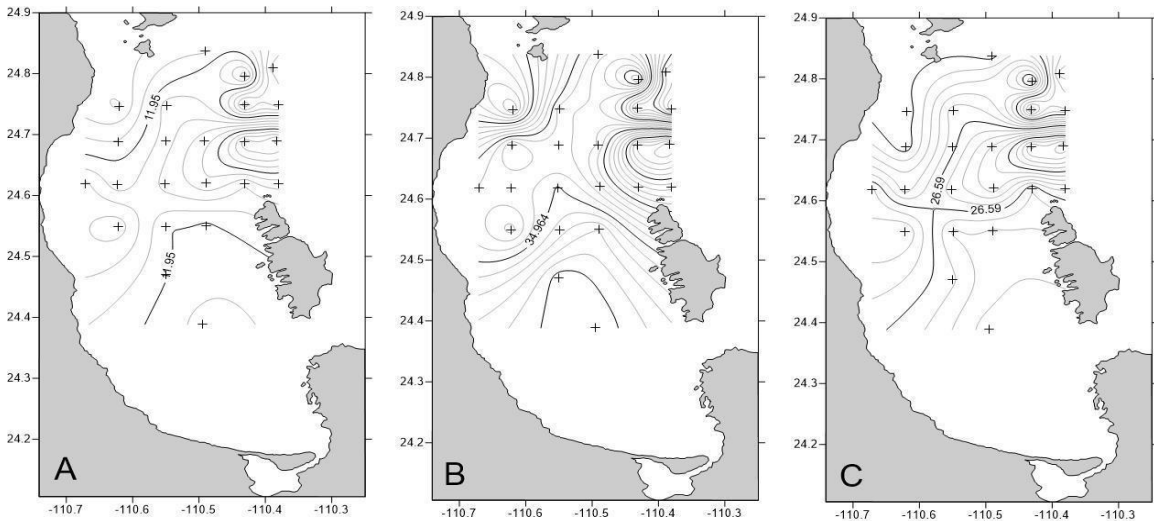


Figura 7. Distribución horizontal a 200 m de profundidad de: (A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) Salinidad (g/kg^1) y (C) Densidad (kg/m^3), en la Bahía de la Paz.

Distribución de los valores de biomasa zooplanctónica

La distribución de los valores de biomasa zooplanctónica obtenidos mostraron diferencias importantes a lo largo de la bahía. Por ejemplo, se observaron valores elevados de 45 g 100 m³ ubicados en una latitud de 24.31°N y una longitud de 110.6°W, muy próxima a la línea de costa tal como se muestra en la Figura 8. Con el objetivo de comparar la distribución de los valores de biomasa con los parámetros hidrográficos, la Figura 8 muestra la distribución sobrepuesta de la temperatura, salinidad y densidad a 20 m de profundidad. El resultado cuando se comparó la distribución de la biomasa del zooplancton con la distribución de los parámetros hidrográficos, se observaron en Cuenca Alfonso valores relativamente elevados de biomasa zooplanctónica, así como en el umbral batimétrico ubicado en Boca Grande. La comparación entre la salinidad y la biomasa zooplanctónica evidencia que en los dos núcleos que se forman en la Cuenca Alfonso la biomasa fue alta.

Por otro lado, en los núcleos de densidad que se observan al norte de la Isla Espíritu Santo de igual forma hubo mayor cantidad de biomasa. Ambas zonas en donde se presentan altas biomazas se encuentran asociadas a procesos físicos como una surgencia batimétrica que fertiliza el umbral provocando producción biológica alta. En el caso de Cuenca Alfonso, se observa la presencia de un núcleo de baja temperatura y mayor densidad, que indica la presencia de un vórtice ciclónico el cual lleva agua fría rica en nutrientes provocando la mayor densidad de fitoplancton y un ascenso de producción zooplanctónica.

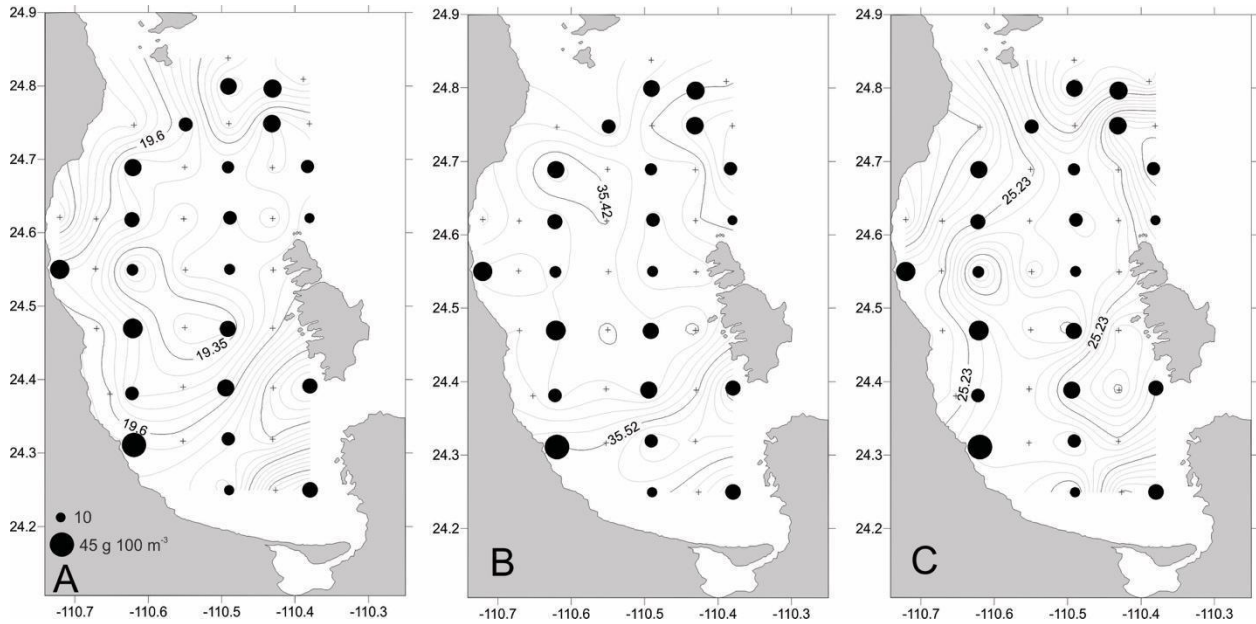


Figura 8. Distribución de la biomasa del zooplancton ($\text{g } 100\text{m}^{-3}$) en la Bahía de la Paz. La figura muestra sobrepuestas la distribución a 20 m de profundidad de: (A) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (B) Salinidad (g/kg^1) y (C) Densidad (kg/m^3), en la Bahía de la Paz.

Discusión

La Bahía de la Paz posee la entrada de diversas masas de agua debido a su ubicación geográfica, las cuales son influenciadas por los vientos que provienen del sureste durante la época de primavera a verano, y del noreste, durante otoño e invierno, situación que propicia la estratificación de la columna de agua y la formación de una termoclina, haloclina y picnoclina (Obeso-Nieblas *et al.*, 2007). En el mes de febrero de 2006, correspondiente a la época de invierno, las temperaturas mayores se registraron en las capas más superficiales, a 10, 20 y 30 m de profundidad, que fueron disminuyendo conforme aumentó la profundidad. Se observó que la temperatura menor fue a los 200 m de profundidad. La salinidad también fue disminuyendo a medida que incrementó la profundidad, sin embargo, fue muy poca dicha variación. Por otro lado, la densidad se mantuvo relativamente constante en la columna de agua. Se presentó una termoclina y picnoclina a 50 m de profundidad, y se observó que el vórtice ciclónico tuvo una influencia en los primeros 100 m de la columna de agua.

La relación que existe entre la temperatura, salinidad y densidad afecta en gran medida la distribución y abundancia del zooplancton ya que cada organismo tiene ciertas preferencias por determinados intervalos de dichos factores ambientales. La temperatura es esencial para regular procesos biológicos de vital importancia para los seres vivos ya que produce cambios en el metabolismo, la nutrición, razón de crecimiento y la forma y talla de los organismos, también se ve alterada por las propiedades físicas y químicas, entre ellas se encuentran la solubilidad de gases y nutrimentos, así como el estado físico de estos últimos y las propiedades físico-químicas del agua (Figueroa-Núñez, 2010). En el estrato que va de 0 a 30 m de profundidad se detectó una temperatura no muy alta ya que fue de 19° C tal como se muestra en las Figuras 2, 3 y 4, la cual se mantuvo constante dado que sólo varió por decimales cada 10 m. Cabe señalar que a 30 m de profundidad se formó un núcleo frío a un costado de Boca Grande, lo cual coincide con lo reportado por García-Mirafuentes (2010) en invierno de 2006.

En lo que respecta a la salinidad, es uno de los factores que más afecta la distribución del zooplancton debido a que much/as especies necesitan determinadas condiciones de salinidad para su supervivencia tal como lo mencionan Johnson y Allen (2012). Sin embargo, no se observó gran variación en los valores de salinidad en el presente estudio desde los 0 a los 200 m de profundidad manteniéndose relativamente constante en un intervalo de 35.42 a 35.54 g/kg¹. No obstante, a los 10 y 20 m de profundidad se observó que en la parte sureste y suroeste de la Bahía de La Paz la salinidad fue mayor que en la parte norte, a los 30 m fue igual en los sitios de muestreo y a partir de los 50 m la salinidad comenzó a bajar de 35.24 a 34.96 g/kg¹ hasta los 200 m de profundidad, esto coincide con lo reportado por Salamanca y Schneider (2013), quienes indican que la salinidad tiende a ser zonal ya que hay distintos factores ambientales que influyen en las variaciones que se presentan en un mismo medio acuático, entre ellos se encuentran la ubicación geográfica, las corrientes marinas, vórtices ciclónicos y anticiclónicos, evaporación, precipitación y mezcla, así como la latitud en la que se encuentre la zona de estudio. En latitudes altas, el deshielo producido por las estaciones cálidas causa una desalinización de las aguas superficiales. En las latitudes cercanas al ecuador debido a las lluvias la salinidad es baja, mientras que en las medias donde la evaporación es mayor hay salinidades altas. Cabe mencionar que cerca de las costas la salinidad también es menor por las desembocaduras de los ríos y en los polos es prácticamente nula.

La densidad fue aumentando conforme incrementó la profundidad ya que a 10 m se registró el valor más bajo de densidad que fue de 25.19 kg/m³ y a 200 m el más alto, de 26.59 kg/m³ (Figura 7C), aunado a ello, se formaron dos núcleos en la bahía a 10 m de profundidad, uno en la parte central de 25.19 kg/m³ y otro, de mayor densidad de 25.24 kg/m³ en el sur tal como se observa en la Figura 2, lo cual pudo deberse a la cercanía con la costa (Cushing, 1975). Cabe destacar que en varios estudios se han encontrado concentraciones altas de clorofila-a integrada y de productividad primaria en el Golfo de California debido a la estratificación moderada de la columna de agua (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995).

El zooplancton es susceptible también a la intensidad lumínica, la cual está dada por la profundidad en la que se encuentran, es por ello que realizan la migración vertical influenciada por la disponibilidad de alimento y para evadir la depredación (Figueroa-Núñez, 2010). En el presente estudio se encontraron en la mayoría de las muestras copépodos epipelágicos ya que se localizan de 0 a 200 m profundidad (Fernández, 2015), estos fueron calanoideos, cyclopoideos y copepoditos, lo cual coincide con un estudio realizado por Rocha (2021) en la misma campaña a la Bahía de La Paz. Es por ello que tanto el momento del día como la profundidad a la que se realice el muestreo también repercute en la presencia o ausencia de ciertos organismos. Tal es el caso del macrozooplancton, que migra a capas superficiales de la columna de agua durante el atardecer y hacia abajo al amanecer. En lo que respecta al mesozooplancton, compuesto en su mayoría por herbívoros zooplanctónicos como los copépodos, prefieren estar cerca de la superficie durante el anochecer y en zonas de mayor profundidad durante el día, razón por la cual estuvieron presentes en la mayor parte de las muestras de esta investigación ya que se obtuvieron tanto de día como de noche. Sucede lo contrario con el microzooplancton, que tiene una migración vertical mínima (Figueroa-Núñez, 2010).

La mayor producción de biomasa zooplanctónica y su relación con la distribución de los parámetros hidrográficos observados a 20 m de profundidad, fue de 45 g 100 m³, muy cercana a la línea de costa, debido posiblemente al efecto del fondo que genera una surgencia costera, las cuales por lo regular se encuentran ubicadas en un radio de 50 km, de acuerdo a lo reportado por Cushing (1975), y trasladan nutrientes, principalmente nitrato (NO₃), hacia la capa de mezcla que favorece los afloramientos y la disponibilidad de material orgánico, lo cual propicia la presencia de organismos consumidores primarios, como el zooplancton (Cervantes-Duarte *et al.*, 1993). Las surgencias en el Golfo de California elevan aguas de menor temperatura y de mayor salinidad en la superficie

(Hernández-Ayón *et al*, 2003), eso explica el por qué se registraron valores más altos de salinidad a menor profundidad que en la zona central de la bahía.

Los resultados de biomasa zooplanctónica en el presente estudio fueron altos al norte de la bahía cerca un giro ciclónico presente en la Cuenca Alfonso y Boca Grande, como se observa en la Figura 8, lo cual coincide con lo reportado por Durán-Campos, *et al.*, (2015), donde las estaciones fuera de la bahía tuvieron un promedio de biomasa de 45 g 100 m³, mientras que las localizadas cerca del núcleo frío y denso, indicativo de la presencia del vórtice ciclónico de la Cuenca Alfonso fueron de 50 g 100 m³, en promedio. Se ha reportado en un estudio que los grupos que componen en su mayoría la biomasa zooplanctónica del Golfo de California son copépodos, quetognatos y eufausiáceos (Salas de León *et al.*, 2011). En contraste con un estudio realizado por Rivera-Hernández (2013), donde la biomasa más alta obtenida fue en el estrato de 100 m con un valor de 21.39 g 100 m³, lo cual probablemente se debió a la profundidad a la que se hicieron dichas mediciones y a que debido a las surgencias, los nutrimentos se encuentran más cerca de la superficie, por lo tanto hay mayor abundancia de zooplancton que en las zonas más profundas.

Debido a que el muestreo se realizó en invierno, la temperatura del agua baja y aunado a ello, los vórtices ciclónicos también contribuyen a dicho enfriamiento dado que provocan el surgimiento de agua fría rica en nutrimentos desde capas más profundas hacia la superficie, especialmente en el centro del vórtice, lo que favorece la distribución de los organismos y genera un ambiente propicio para la abundancia del zooplancton (Mojica, 2008). Esto influye de manera trascendental en la cantidad de biomasa zooplanctónica, dado que entre menor sea la temperatura hay mayor probabilidad de afloramientos y por lo tanto, más disponibilidad de nutrimentos, así como mayor abundancia de grupos zooplanctónicos herbívoros y omnívoros, en contraste con la primavera y el verano donde la temperatura aumenta y las lluvias se ven reducidas donde el zooplancton carnívoro es más abundante. Es por ello, que la estación del año repercute en la presencia o ausencia de ciertos organismos del zooplancton. Por ejemplo, Coria-Monter, *et al.* (2020) documentaron una mayor presencia de organismos gelatinosos de alimentación carnívora como lo son los cnidarios, ctenóforos, quetognatos y apendicularios durante un periodo inusual de calentamiento en la Bahía de La Paz. Asimismo, varios autores han reportado mayor incidencia de larvas de ictioplancton durante la época de verano, donde la temperatura del agua aumenta (Figuroa-Núñez, 2010), contrario a lo que ocurre en invierno puesto que

hay menor presencia de ellas. Además, los copépodos en general presentan una mayor talla a finales del invierno y comienzos de la primavera que en el verano (Fernández, 2015)

Durante la época de invierno-primavera si el viento que proviene del noroeste se incrementa, genera un rotacional de viento positivo que produce un vórtice ciclónico en toda la Bahía de La Paz, si por el contrario los vientos que provienen del noroeste se intensifican gradualmente en dirección al este, es decir, el viento es más fuerte de lado de las islas que de la península, se origina un rotacional de viento negativo que produce un giro anticiclónico en la corriente de la bahía (Martínez-Mérida, 2013). Uno de los efectos principales que producen los vórtices anticiclónicos es la suspensión y transporte de partículas y no provocan el mismo efecto en la distribución y abundancia del zooplancton que los ciclónicos, ya que por lo general se relacionan con una baja productividad (López-Nogueira, 2017) y se ha demostrado que las larvas de peces son fácilmente advectadas y redistribuidas en un giro anticiclónico (Cruz-Gómez *et al.*, 2008).

Es importante señalar que la generación, maduración y decaimiento de un vórtice también influye en la biomasa zooplanctónica ya que López-Nogueira (2017) menciona que cuando inicia un vórtice ciclónico los nutrientes tienden a subir a la zona eufótica y la biomasa aumenta conforme madura, por lo que se infiere que el hecho de que se haya encontrado en promedio una biomasa alta en el presente estudio pudo deberse a que los vórtices presentes en ese momento en la bahía probablemente estaban en la etapa de inicio y maduración.

Por otro lado, en los meses de febrero y marzo, los vientos que provienen del noroeste se intensifican y generan una mayor mezcla de la columna de agua al interior de la bahía, y una resuspensión de materia orgánica, particularmente en las regiones someras (Reid *et al.*, 1958; LaFond y LaFond, 1971), por lo cual se infiere que el hecho de que se hayan registrado biomazas más altas próximas a la costa, tal como se muestra en la Figura 8, se debe en gran parte a que la mezcla en esta región somera induce una mayor producción.

Conclusiones

- El análisis de los datos hidrográficos y la construcción de mapas de distribución horizontal al interior de la Bahía de La Paz evidenciaron la presencia de un núcleo frío y denso en la porción central de la bahía, en Cuenca Alfonso, el cual fue evidente desde los 20 m, presentándose con mayor gradiente a los 100 m de profundidad.
- La presencia de dichos núcleos son indicativos de la presencia de un vórtice ciclónico de mesoescala el cual ha sido reportado como una estructura permanente al interior de la bahía.
- El análisis de la distribución de la biomasa zooplanctónica al interior de la Bahía de La Paz mostró que existen dos zonas con elevada biomasa, una próxima a la línea de costa, y otra en la porción central de la bahía, en Cuenca Alfonso, donde se localiza el vórtice ciclónico.
- Ambas zonas con mayor biomasa pueden ser producto de la mezcla de la columna de agua que suspende materia orgánica debido a la poca profundidad y a la presencia del vórtice ciclónico, respectivamente.

Referencias

- Boltovskoy, D. 1999. Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino. Publicación especial del INIDEP Mar del Plata, Argentina 936 pp.
- Brierley, AS. 2017. Plankton. *Current Biology* 27(11): R478-R483.
- Cervantes-Duarte, R., Aguíñiga, S. & Hernández, S. (1993). Condiciones de surgencia asociadas a la distribución de zooplancton en San Hipolito, B.C.S. [versión electrónica]. *Ciencias Marinas*, 19(1), 117-135.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M., Salas de León, D. & Durán-Campos, E. (2020). Zooplankton abundance during summer in the Bay of La Paz (southwestern Gulf of California, Mexico). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48(5): 794-805.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Aldeco-Ramírez, J., & Merino-Ibarra, M. (2014). Differential distribution of diatoms and dinoflagellates in a

- cyclonic eddy confined in the Bay of La Paz, Gulf of California. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 119, 6258-6268.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Merino-Ibarra, M., & Durán-Campos, E. (2017). Wind driven nutrient and subsurface chlorophyll-a enhancement in the Bay of La Paz, Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 196, 290-300.
- Cruz-Gómez, R., Monreal-Gómez, M. & Bulgakov, S. (2008). Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*, 33(10): 741-746.
- Cushing, D.H. (1975). Ciclos de producción en áreas de afloramiento. *Ecología marina y pesquerías*. Acribia, pp. 23-39.
- Durán-Campos, E., Salas-de-León, D., Monreal-Gómez, M., Adelco-Ramírez, J. & Coria-Monter, E. (2015). Differential zooplankton aggregation due to relative vorticity in a semi-enclosed bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 164: 10-18.
- Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A. & Coria-Monter, E. (2019a). Impact of a dipole on the phytoplankton community in a semi-enclosed basin of the southern Gulf of California, Mexico. *Oceanologia* 61(3): 331-340.
- Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Coria-Monter, E. (2019b). Zooplankton functional groups in a dipole eddy in a coastal region of the southern Gulf of California. *Regional Studies in Marine Science* 28: 100588.
- El plancton marino: breve descripción y clasificación. (2018). Guía del plancton marino costero. Recuperado el 18 de febrero de 2021 del sitio web Csic.es: <https://elmarafons.icm.csic.es/wp-content/uploads/2018/04/gu%C3%ADa-identificaci%C3%B3n-plancton.pdf>
- Fernández, M. (2015). Clase: Maxillipoda: Copepoda: Orden CALANOIDA Manual. *Revista IDE@-SEA*, 89(30-06-2015): 1-27.
- Figueroa-Núñez, M. (2010). *Aplicación de un Modelo Inverso para estimar la Biomasa Zooplanctónica en la Bahía de Campeche* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio educativo digital TESIUNAM.

- García-Mirafuentes, S. (2010). *Análisis de las características del giro ciclónico de la Bahía de La Paz* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio educativo digital TESIUNAM. 86 pp.
- Gaxiola-Castro, G., García-Córdova, J., Valdez-Holguín, J.E. & Botello-Ruvalcaba, M. (1995). Spatial distribution of chlorophyll a and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research* 15: 1043-1059.
- Hernández-Ayón, J., Zirino, A., Marinone, S.G., Canino-Herrera, R. & Galindo-Bect, M. (2003). Relación pH-densidad en el agua de mar. *Ciencias Marinas*, 29(4): 497–508.
- Johnson, W. & Allen, D. (2012). *Zooplankton of the Atlantic and Gulf coasts: a guide to their identification and ecology*. Baltimore, Maryland. The Johns Hopkins University Press.
- LaFond, E.C. & LaFond, K.G. (1971). Oceanography and its relation to marine organic production. In: J.D. Costlow (ed.), *Fertility of the Sea*, v. 1. Gordon and Breach, pp. 241-266.
- López-Nogueira, I. (2017). *Estructuras hidrodinámicas y biomasa zooplanctónica en la Bahía de la Paz* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Mahadevan, A. (2016). The impacts of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annual Review of Marine Sciences* 8, 161-184.
- Mann, K., & J. Lazier. 2006. *Dynamics of marine ecosystems, biological-physical interactions in the oceans*. Blackwell Scientific Publications. 466 p.
- Martínez-Mérida, J. (2013). *Modelación de la circulación en la Bahía de La Paz*, B.C.S. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio educativo digital TESIUNAM.
- McGillicuddy, D. J., Jr., et al. (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.

- Mojica, E. (2008). *Estructura del Zooplancton de la Bahía de La Paz, B.C.S. y su relación con la hidrografía durante el verano del 2004* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio educativo digital TESIUNAM.
- Molina-Cruz, A., Pérez-Cruz, L. & Monreal-Gómez, M. A. (2002). Laminated sediments in the Bay of La Paz, Gulf of California: a depositional cycle regulated by pluvial flux, *Sedimentology* 49: 1401-1410.
- Monreal-Gómez, M.A., Molina-Cruz, A., & Salas de León, D.A. (2001). Water masses and cyclonic circulation in Bay of La Paz, Gulf of California, during June 1998. *Journal of Marine Systems* 30: 305-315.
- Obeso-Nieblas, M. (2003). *Variabilidad espaciotemporal de las condiciones oceanográficas de la Bahía de La Paz, BCS, México* [Tesis de posgrado]. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas IPN, La Paz, México. 337 p.
- Obeso-Nieblas, M., Shirasago-Germán, B., Gaviño-Rodríguez, J., Obeso-Huerta, H., Pérez-Lezama, E. & Jiménez-Illescas, A. (2007). Hidrografía en la Boca Norte de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas* 33(3): 281–291.
- Obeso-Nieblas, M., Shirasago-Germán, B., Gaviño-Rodríguez, J., Pérez-Lezama, E. & Jiménez-Illescas, A. (2008). Variabilidad hidrográfica en la Bahía de La Paz, Golfo de California, México (1995-2005). *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 43(3): 555-567.
- Reid, J.L., Roden, G.I. & Willie, J.G. (1958). Studies of the California Current system. CALCOFI Rep., VI: 27-56.
- 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/icesjms/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]. Repositorio educativo digital TESIUNAM.
- Rocha, F. (2018). Abundancia de Copépodos (Crustacea: Calanoida, Cyclopoida) y su relación con la dinámica oceanográfica en la Bahía de La Paz, Golfo de California

[Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio educativo digital TESIUNAM, p. 31.

Rocha-Díaz, F., Monreal-Gómez, M., Coria-Monter, E., Salas de Leon, D., Durán-Campos, E. & Merino-Ibarra, M. (2021). Copepod abundance distribution in relation to a cyclonic eddy in a coastal environment in the southern Gulf of California. *Continental Shelf Research* 222: 104436. 10.1016/j.csr.2021.104436.

Salamanca, M. & Schneider, W. (2013). Perspectiva física del océano. C. Werlinger (Ed.), *Biología Marina y Oceanografía: Conceptos y Procesos Tomo I* (149-160).

Salas de León, D.A., Carbajal, N., Monreal-Gómez, M.A. & Gil-Zurita, A. (2011) Vorticity and mixing induced by the barotropic M2 tidal current and zooplankton biomass distribution in the Gulf of California. *Journal of Sea Research* 66, 143-153. doi: 10.1016/j.seares.2011.05.011

Salinas-González, F., Zaytsev, O. & Makarov, V. (2003). Formación de la estructura termohalina del agua en la Bahía de La Paz de verano a otoño. *Ciencias Marinas* 29(1): 51-65.

Sánchez, J. (2019). *Distribución de la Biomasa Fitoplanctónica y su relación con la hidrografía en la Bahía de La Paz, Golfo de California* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio educativo digital TESIUNAM.

Santhanam, P., Begum, A. & Pachiappan, P. (2019). *Basic and Applied Zooplankton Biology*. Singapore. Springer.