



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

ESTRUCTURAS HIDRODINÁMICAS Y BIOMASA ZOOPLANCTÓNICA EN LA BAHÍA DE LA PAZ

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
Maestro en Ciencias

PRESENTA:

Biól. Iván Longinos López Nogueira

Directora de tesis: Dra. María Adela Monreal Gómez
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

Comité Tutorial: Dr. César Flores Coto
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara
Unidad Académica Sisal
Dr. Samuel Enrique Gómez Noguera
Unidad Académica Mazatlán
Dr. Javier Aldeco Ramírez
UAM-Xochimilco

Ciudad Universitaria, CD. MX.

agosto 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A la doctora Adela Monreal por todo su apoyo desde un principio hasta la correcta finalización de este trabajo, además de brindarme su amistad y atención como pocos profesores lo han hecho.

Al doctor César Flores por sus indicaciones y apoyo, también por facilitarme un espacio en el laboratorio de zooplancton.

A los doctores Xavier Chiappa, Samuel Gómez y Javier Aldeco por sus indicaciones y apoyo en mi trabajo además del tiempo que invirtieron para ayudarme.

A la doctora María Ana Fernández Álamo por guiarme hasta el final de mi tesis.

A los doctores Erik Coria Monter y Elizabeth Duran Campos por toda su ayuda y amistad.

A todos mis compañeros de los laboratorios de Zooplancton y Oceanografía Física.

Al Servicio Meteorológico Nacional por proporcionarme los datos de vientos de la Bahía de La Paz.

A mis padres por estar siempre pendiente a pesar de todo.

A mis suegros por ayudarme en varios aspectos.

DEDICATORIA

A mis padres José y Adaia, sin ustedes nunca hubiera estado aquí. Siempre los voy a amar.

A mi hermano Joaquín, a pesar de que ya no vivimos juntos.

Al amor de mi vida, Angélica, por quien comenzó todo esto. Sin ella ni siquiera hubiera pensado en hacer un posgrado. Cuando todo comenzó eras mi novia, después te convertiste en mi esposa y ahora eres la madre de nuestra hermosa hija.

A ti, Fátima, si algún día lees esto quiero que sepas que eres la persona más importante de nuestras vidas. Te amamos.

Índice

RESUMEN	1
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	2
1.1 JUSTIFICACIÓN	4
1.2 OBJETIVO	5
1.3 HIPÓTESIS	5
1.4 ÁREA DE ESTUDIO	5
1.5 ANTECEDENTES	7
CAPÍTULO II MATERIAL Y MÉTODOS	13
2.1 DATOS HIDROGRÁFICOS Y MUESTRAS DE ZOOPLANCTON	13
2.2 PROCESAMIENTO DE DATOS HIDROGRAFICOS	15
2.3 VIENTOS	15
2.4 VELOCIDAD GEOSTRÓFICA.....	16
2.5 ESTIMACIÓN DE BIOMASA ZOOPLANCTONICA.....	17
CAPÍTULO III RESULTADOS	19
3.1 ESTRUCTURAS HIDROGRAFICAS	19
3.1.1 SECCIONES VERTICALES.....	19
3.1.2 DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y SIGMA-T	21
3.2 VELOCIDADES GEOSTRÓFICAS	24
3.3 VELOCIDAD DEL VIENTO.....	26
3.4 MASAS DE AGUA.....	26
3.5 BIOMASA ZOOPLANCTONICA.....	27
CAPÍTULO IV DISCUSIÓN	34
CONCLUSIONES	44
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	45

RESUMEN

En la Bahía de La Paz se analizaron datos hidrográficos obtenidos mediante un CTD, a bordo del B/O *El Puma*, durante dos Campañas Oceanográficas DIPAL-V y PALEOMAR-I en diciembre de 2012 y en noviembre de 2014, respectivamente. Con estos datos se determinaron las masas de agua presentes en la cuenca, y se calcularon las corrientes geostroficas con el fin de determinar las estructuras hidrodinámicas. Así mismo, se realizaron arrastres con una red Bongo (333 μm), con el fin de obtener muestras de zooplancton en la capa superficial de los 200 m, o a lo largo de la columna de agua en regiones con profundidad menor. Los resultados muestran que los vientos dominantes del norte y noreste con intensidad aproximada de 8 m/s provocaron una capa de mezcla de ~ 50 m de espesor a fin de otoño 2012 y en otoño de 2014, en la zona sur de la bahía no se presentó termoclina. Dentro de la Bahía de la Paz se observaron tres masas de agua: Agua Tropical Superficial (ATS), Agua del Golfo de California (AGC) y Agua Subtropical Subsuperficial (AStSs). Las estructuras hidrodinámicas presentes en diciembre de 2012 fueron un giro ciclónico al norte de la bahía cerca de Boca Grande, mientras que en noviembre de 2014 se presentó un giro anticiclónico en el centro de la bahía. Los valores de la biomasa de zooplancton en diciembre de 2012 variaron entre 11 y 54 g/100 m³, mientras que en noviembre de 2014 los valores de biomasa presentaron un rango entre 21 y 107 g/100 m³. Se encontró que las estructuras hidrodinámicas tienen influencia sobre la variación espacial de la biomasa de zooplancton. En la región sur de la Bahía de la Paz la biomasa de zooplancton fue de ~ 100 g/100 m³ en noviembre de 2014, con valores asociados a intensas velocidades de la corriente, a la presencia de altas concentraciones de fosfatos y a la mezcla vertical por viento. Los valores de la biomasa fueron mayores a finales de otoño de 2012 y otoño de 2014, en comparación a la biomasa reportada en la literatura en verano 2009. Las estructuras hidrodinámicas tienen influencia sobre la distribución de la biomasa de zooplancton en la Bahía de La Paz, y ésta fue mayor en las zonas con una alta velocidad geostrofica relacionada a giros ciclónicos, así como bajos valores de biomasa asociada a giros anticiclónicos.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas marinos generalmente son difíciles de describir, ya sea por la gran cantidad de interacciones entre sus diferentes comunidades, debido a los ciclos biogeoquímicos o a la competencia por los nutrientes; por su gran cantidad de poblaciones y organismos que a menudo ocupan un mismo nicho; o por la poca información existente o disponible debido a las dimensiones de los diferentes cuerpos de agua.

Uno de los principales componentes de los ecosistemas oceánicos y de agua dulce es el zooplancton, el cual está formado por organismos microscópicos (desde unos cuantos μm) y macroscópicos (algunos cm de longitud); entre los cuales se encuentran cnidarios, radiolarios, foraminíferos, rotíferos, crustáceos y larvas de peces. Su vasto número de individuos crea una comunidad en sí misma y dentro de los grupos que lo conforman, de acuerdo a sus hábitos alimenticios se pueden encontrar carnívoros, herbívoros y omnívoros (Wickstead, 1976). La biomasa de zooplancton representada en $\text{g}/100 \text{ m}^3$, frecuentemente se utiliza como un indicador de la productividad secundaria, su distribución puede estar regulada por diversos factores ambientales como la salinidad, temperatura y densidad del agua, así como por variables fisicoquímicas, como nutrientes y oxígeno disuelto, la biomasa de zooplancton también depende de la disponibilidad de alimento. Por otro lado, las condiciones hidrográficas y diversos procesos físicos o estructuras hidrodinámicas (e.g. mezcla-estratificación, advección, difusión, frentes, vórtices de mesoescala, etc.) influyen tanto en la distribución como en la abundancia y densidad de organismos (Omori e Ikeda, 1984; Mann y Lazier, 1991).

Los principales rasgos de la circulación oceánica están enmarcados en frentes, vórtices, surgencias, ondas superficiales e internas. En el estudio de la dinámica oceánica es muy común utilizar la vorticidad relativa, la cual es una propiedad física ampliamente usada en la caracterización de la rotación de los fluidos y es una medida de la intensidad de los vórtices. Evaluar la vorticidad en el medio marino es de gran importancia debido a que

está asociada al bombeo o succión de nutrientes (Cruz-Gómez *et al.*, 2008) los cuales regulan la variación de la biomasa del plancton.

Los procesos físicos en el océano se presentan a diferentes escalas espacio-temporales, desde la circulación en cuencas oceánicas hasta micro turbulencia, los vórtices de mesoescala se presentan en el océano con diámetro entre 10 y 100 km. Estos vórtices juegan un papel muy importante no solamente en el transporte de calor y masa, sino también en el transporte de material suspendido y de nutrientes, tanto en la horizontal, como entre las diferentes capas en el océano. Generalmente las capas de mayor interés en cuanto al plancton son la superficial y la subsuperficial ya que al transportar nutrientes hacia la capa eufótica éstos influyen en la cantidad de biomasa y distribución del fitoplancton (McGillicuddy *et al.*, 1998; Hernández-León *et al.*, 2001), que a su vez afecta a la biomasa de zooplancton, a la productividad biológica y por lo tanto a la producción pesquera (Dickey *et al.*, 2008).

En el océano abierto se han identificado tres tipos de vórtices, los cuales pueden ser generados por viento, inestabilidades barotrópicas y/o baroclínicas o por la presencia de islas. Estos tipos de vórtices pueden ser anticiclónicos, ciclónicos y los llamados de media agua “mode-water”. Los vórtices anticiclónicos (con circulación en sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte) causan el hundimiento de la nutriclina y originan una disminución de la producción primaria local. Por el contrario, los giros ciclónicos (con circulación en sentido contrario a las manecillas del reloj, en el hemisferio norte) desplazan la nutriclina hacia arriba, y generan un aumento de la producción primaria de la capa superficial al inyectar nutrientes a la capa eufótica; mientras que los llamados vórtices de media-agua, aunque tienen circulación anticiclónica, presentan un comportamiento similar a los giros ciclónicos (McGillicuddy *et al.*, 2007). En general los vórtices de núcleo frío (ciclónicos) son más productivos y presentan una mayor abundancia de plancton en relación a los vórtices de núcleo cálido (anticiclónicos) (Biggs *et al.*, 1997).

Existen numerosos mecanismos por los cuales los giros pueden afectar la distribución de zooplancton. Éste al encontrar zonas con alta concentración de nutrientes y

fitoplancton, puede ser arrastrado dentro del vórtice por la interacción con el campo de flujo. La influencia de los vórtices sobre la variación de la biomasa del zooplancton también puede depender del tiempo, de las condiciones en las que se encuentra éste, de los mecanismos de formación y del tipo de vórtice (Hernández-León *et al.*, 2001). Los procesos hidrodinámicos, como vórtices y frentes formados por balances geostróficos, influyen en la distribución de la biomasa de zooplancton (i.e., variación espacial de la biomasa de zooplancton) y abundancia del plancton y material en suspensión mediante acumulación, retención o dispersión (Aldeco *et al.*, 2009).

Por la relevancia que tiene la biomasa zooplanctónica en la pesca local, esta investigación se enfoca en el estudio de la variación espacial de la biomasa zooplanctónica y su relación con las estructuras hidrodinámicas en la Bahía de la Paz.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Es primordial tomar en cuenta las acciones concernientes al buen manejo de los recursos naturales, tanto en los trabajos de investigación como en el sector pesquero o industrial. El plancton, al ser parte fundamental en la cadena trófica en los océanos, tiene gran importancia ecológica y económica, y participa activamente en los ciclos biogeoquímicos del planeta mediante el secuestro y resuspensión de nutrientes. En esta investigación se identificaron las estructuras físicas a las cuales se asoció la alta concentración de biomasa zooplanctónica. La importancia de conocer la relación entre determinadas estructuras hidrodinámicas y la distribución de la biomasa de zooplancton radica en la información que ofrece en cuanto a la abundancia de los organismos en los niveles tróficos superiores.

1.2 OBJETIVO

Determinar posibles influencias de las estructuras hidrodinámicas sobre la distribución espacial de la biomasa zooplanctónica en La Bahía de La Paz, en diciembre 2012 y noviembre 2014.

1.3 HIPÓTESIS

Los estudios físico-biológicos en la bahía de la Paz han sido generalmente realizados durante verano (Coria-Monter *et al.*, 2014; Duran-Campos *et al.*, 2015), por lo que se espera poder comparar esos resultados con los obtenidos en esta tesis para diciembre 2012 y noviembre 2014, tanto en lo que respecta a la estructura de la circulación como a la cantidad de biomasa zooplanctónica. Los vientos son más intensos durante otoño por lo que se espera que la capa de mezcla sea más profunda. Debido a un mayor espesor de la capa de mezcla, la productividad biológica y por lo tanto la cantidad de biomasa de zooplancton será mayor en otoño que en verano.

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de La Paz es la cuenca más grande del Golfo de California y se localiza entre las latitudes 24.15 y 24.97 °N y las longitudes 110.30 y 110.75 °W, aproximadamente a 180 km de la boca del golfo de California (Fig. 1.1). El golfo cubre un área aproximada de 2635 km², tiene una longitud de 1100 km y un ancho variable de 180 km en el área noroeste y 200 km en el sureste. La Bahía de la Paz tiene su origen en las depresiones inundadas en los márgenes internos del borde continental rodeados por superficies terrígenas y protegidas del mar por barreras arenosas producidas por corrientes y oleaje (Hausback, 1984).

La línea de costa de la península de Baja California se caracteriza por una morfología irregular distintiva, una serie de islas separadas por estrechos con un gran rango de profundidades y con un patrón sedimentológico particular. A través del eje del golfo una serie de bahías escalonadas y fallas son las principales estructuras responsables del movimiento de toda la península hacia el noroeste (Hausback, 1984).

La Bahía de la Paz se caracteriza por presentar en el sur una amplia plataforma, somera y cubierta de arena, la cual se vuelve estrecha a lo largo de la costa noroeste. Al este de la bahía se localizan las islas Roca Partida y Espíritu Santo. Los sedimentos de la plataforma cambian su consistencia con la profundidad. Éstos se vuelven lodosos conforme aumenta la profundidad, hasta formar la Cuenca Alfonso que ocupa la mayor parte del norte de la bahía. Se ha observado que la materia particulada sedimentada es predominantemente litogénica, con una contribución significativa de componentes biogénicos marinos, por ejemplo carbonato de calcio, ópalo y materia orgánica (Silverberg *et al.*, 2007). Las islas San José y San Francisco delimitan a la Bahía hacia el norte, mientras que las islas Roca Partida y Espíritu Santo lo hacen en el este. La Cuenca Alfonso se encuentra aislada del Golfo de California por un umbral batimétrico a lo largo de Boca Grande con una profundidad máxima de 250 m. La Bahía de la Paz tiene una profundidad máxima de 420 m en Cuenca Alfonso y decrece gradualmente hacia el sur. La evaporación (300 mm/año) excede a la precipitación (180 mm/año) y la descarga de ríos es casi inexistente, por lo que la salinidad superficial se incrementa marcadamente (Nava-Sánchez, 1997).

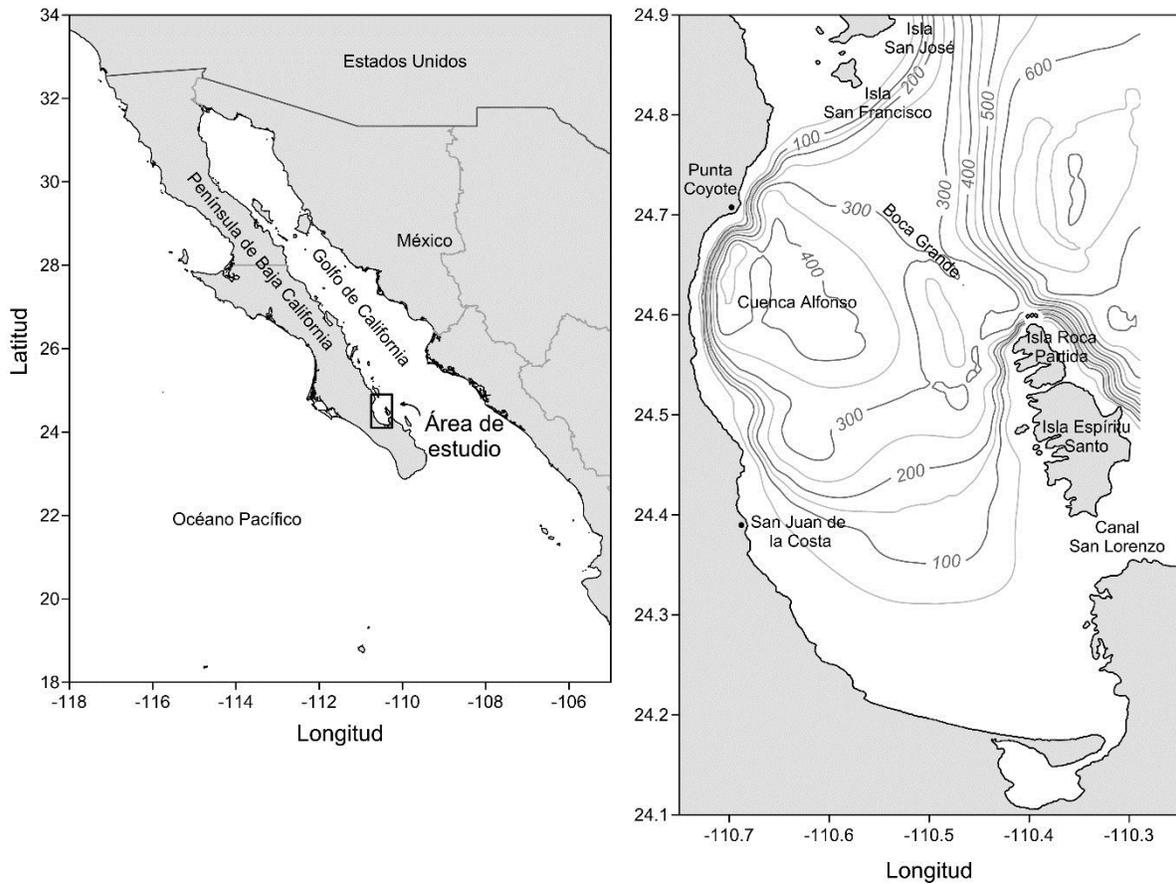


Figura 1.1. Localización y batimetría (m) de Bahía de la Paz, B.C.S.

1.5 ANTECEDENTES

La circulación de la bahía de La Paz está gobernada por un vórtice ciclónico sobre la Cuenca Alfonso, el cual ha sido considerado como semi-permanente (Coria-Monter *et al.*, 2014) debido a que se ha observado en diferentes épocas del año. Se ha argumentado que la productividad biológica en la Cuenca Alfonso se incrementa debido a la fertilización producida por dicho vórtice ciclónico, el cual genera un ascenso de la picnoclina y de la nutriclina hacia la capa eufótica.

Las condiciones hidrográficas de la Bahía de La Paz se encuentran muy influenciadas por la variabilidad climática del sur del Golfo de California. En la bahía se

distinguen características tales como la ausencia de la capa de mezcla durante el verano, cuando se presenta estratificación particularmente en la Cuenca Alfonso que es la región más profunda en la bahía (Obeso-Nieblas, 2003).

Los ciclones tropicales tienen un gran efecto en las lluvias del noroeste de México incluyendo ésta área (Court, 1980), con característica de clima semiárido. Existen dos temporadas de lluvia en la región del Golfo de California; por un lado, las lluvias de invierno que ocurren de noviembre a febrero cuando se presenta la mayor cantidad de precipitación anual en la zona noroeste de la Península de Baja California, por otro lado, la presencia de los monzones de verano y tormentas tropicales, desde junio hasta octubre dominan en la parte sureste de la región (Douglas y Englehart, 1995). La Bahía de La Paz se encuentra sujeta principalmente a dos patrones de vientos, los vientos del sur y sureste, llamados localmente Coromuel que ocurren desde finales de la primavera, persisten en verano y terminan a inicio del otoño con velocidades de aproximadamente 4 ms^{-1} , mientras que los vientos del norte y noroeste son dominantes desde finales de otoño hasta principios de primavera, son persistentes con intensidades que alcanzan magnitudes de 12 ms^{-1} (Obeso-Nieblas, 2003).

Durante primavera y verano, como resultado de los vientos relativamente débiles del sureste y sur-sureste la bahía se caracteriza por tener una marcada estratificación desde la superficie y con la presencia de la termoclina, haloclina y picnoclina muy superficial, (Salinas-González *et al.*, 2003). La generación de una capa de mezcla y el hundimiento de la termoclina, haloclina y picnoclina durante otoño e invierno son resultados de los fuertes vientos del norte y noroeste (Obeso-Nieblas, 2003). Los vientos de otoño e invierno generan una capa de mezcla de aproximadamente 50 m de espesor (Molina-Cruz *et al.*, 2002).

En la bahía de la Paz existe una marcada variabilidad espacial y estacional de las condiciones oceanográficas, ocasionadas por una parte por las variaciones locales de los vientos y la radiación solar características de una región semiárida, con altas tasas de evaporación, por otra parte, debido a la influencia del Golfo de California que tiene su

propia dinámica, como lo indican las condiciones oceanográficas prevalecientes en la parte profunda de la bahía (anoxia, temperatura poco variable, alta densidad), en Boca Grande y en la región adyacente del golfo de California (Obeso-Nieblas *et al.*, 2004).

La importancia ecológica y económica de la Bahía de la Paz ha motivado a los investigadores a realizar diversos estudios. Jiménez-Illescas (1996) reportó una capa de mezcla de 40 m de profundidad causada por el efecto de los vientos del noroeste. La circulación barotrópica generada por el viento del norte en la bahía de la Paz, simulada mediante un modelo numérico muestra la presencia de un giro ciclónico en el sur, mientras que el viento del sur teóricamente induce un giro anticiclónico (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997).

En cuanto a la determinación de las masas de agua se ha reportado la presencia del Agua del Golfo de California (AGC), el Agua Tropical Superficial (ATS) y el Agua Subtropical Subsuperficial (AStSs) a finales de primavera. Además se ha observado que una de las características de la Cuenca Alfonso es la baja cantidad de oxígeno disuelto en el agua, debido a la poca circulación de la capa del fondo a causa de la presencia del umbral, el cual no permite el intercambio de agua a profundidades mayores de 300 m, entre el golfo y la bahía (Monreal-Gómez *et al.*, 2001).

Estudios de la concentración de clorofila-*a* y fitoplancton durante el verano de 2009 mostraron que valores altos de clorofila-*a* se observaron en la periferia de un vórtice ciclónico presente en Cuenca Alfonso, mientras que un bajo contenido de clorofila-*a* en el centro del giro se ha asociado a la dominancia de dinoflagelados en dicha región, así como a la edad del giro el cual se encuentra en decadencia. Además se observó una distribución diferencial de fitoplancton; con dominancia de dinoflagelados en el centro del giro y diatomeas en la periferia de éste (Coria-Monter *et al.*, 2014).

En cuanto a los estudios de zooplancton se ha reportado que en verano la mayor cantidad de biomasa zooplanctónica se encuentra asociada al vórtice ciclónico. Por otro lado, el grupo de los copépodos es el más abundante en el zooplancton (Mojica-Ramírez,

2008). Durante el verano de 2009 la cantidad de la biomasa zooplanctónica presentó sus mayores valores en Cuenca Alfonso y en la entrada a la Bahía de la Paz en la proximidad de Boca Grande (Fig. 1.2) (Durán-Campos *et al.*, 2015).

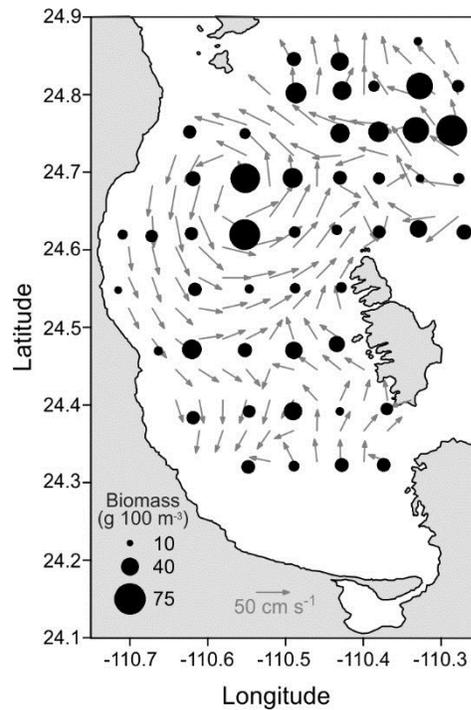


Figura 1.2. Distribución de la biomasa zooplanctónica en peso húmedo ($\text{g}/100 \text{ m}^3$) de las muestras obtenidas con red bongo de $333 \mu\text{m}$, en verano de 2009 (según Durán-Campos *et al.*, 2015).

Las características físicas o estructuras hidrodinámicas presentes en la bahía durante verano de 2009 se manifestaron con un núcleo de alta densidad en un mapa de distribución horizontal de la densidad a 25 m de profundidad (Fig. 1.3a) en Cuenca Alfonso, donde se presentó un vórtice ciclónico con diámetro de 30 km, con velocidades que alcanzan los 60 cm/s (Fig. 1.3b), en esa región se muestra una vorticidad positiva (Fig.1.3c), mientras que en la zona cercana a Boca Grande y en las afueras de la Bahía se observan menores densidades y vorticidades negativas. La distribución de los diferentes grupos tróficos del zooplancton en esa época estuvo asociada a la clorofila-a y a la distribución diferencial del

fitoplancton; se encontró en el centro del vórtice ciclónico una dominancia de zooplancton herbívoro, donde dominaron los dinoflagelados y se encontró bajo contenido de clorofila-*a* (Duran-Campos *et al.*, 2015).

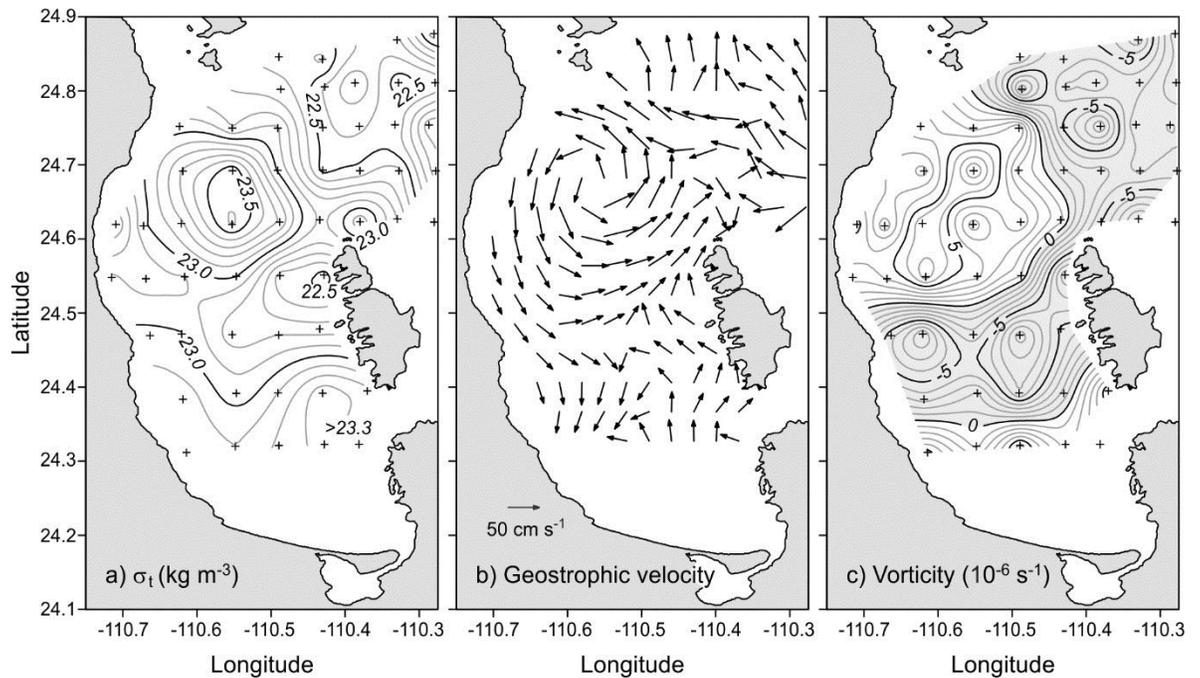


Figura 1.3. Distribución horizontal a 25 m de profundidad de a) sigma-t (kg/m^3), b) velocidad geostrófica relativa al fondo (cm/s) y c) componente vertical de la vorticidad relativa (10^{-6} s^{-1}) en el verano de 2009, en la bahía de la Paz (según, Durán-Campos *et al.*, 2015).

El efecto de los vórtices de mesoescala sobre la distribución del plancton se ha estudiado y determinado en otras partes del mundo; en el Mar Árabe y en el Mar Negro el efecto de los vórtices sobre la distribución de la biomasa zooplanctónica produjo la mayor heterogeneidad en regiones donde los vórtices tienen la mayor energía potencial. Por otro lado, la mayor biomasa zooplanctónica en el Mar de los Sargazos fue observada después de un florecimiento de fitoplancton en la zona entre dos vórtices; uno ciclónico y el otro de media agua (Goldthwait y Steinberg, 2008), se observaron elevados valores de biomasa de mesozooplancton y un incremento en la exportación de carbono en ambos vórtices debido a

las migraciones verticales. Cuando se presenta un dipolo, entre ambos vórtices se puede presentar un frente oceánico el cual es generalmente un frente térmico. Por ejemplo la mayor biomasa zooplanctónica en las Islas Canarias está asociada a un dipolo ciclón-anticiclón se encontró en el frente oceánico, con la menor biomasa zooplanctónica en el centro del giro ciclónico (Hernández-León *et al.*, 2001).

CAPÍTULO II MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 DATOS HIDROGRÁFICOS Y MUESTRAS DE ZOOPLANCTON

Se analizaron datos hidrográficos obtenidos a bordo del B/O *El Puma* en dos campañas oceanográficas realizadas en diciembre de 2012 y noviembre de 2014. Durante la campaña DIPAL-V en diciembre de 2012, se registró la conductividad, temperatura y profundidad de la columna de agua en 42 estaciones hidrográficas (Fig. 2.1a) con un CTD SBE-19. En 24 de estas estaciones se tomaron muestras de zooplancton mediante una red bongo de 333 μm y 505 μm de luz de malla y con bocas de 0.60 m de diámetro, adaptadas con un flujómetro cada una de ellas. Se realizaron los arrastres con red bongo en la capa superficial de los 200 m, o en la capa superficial de menor espesor para regiones más someras. Las muestras de zooplancton colectadas se fijaron durante 24 h con una solución de formaldehído al 4% en agua de mar neutralizada con borato de sodio, y después se trasvasaron a alcohol etílico al 70%.

Durante la campaña PALEOMAR-I en noviembre de 2014, se midió la temperatura, conductividad y profundidad en 34 estaciones hidrográficas (Fig. 2.1b). En 17 de ellas, localizadas en la región sur de la bahía se tomaron muestras de zooplancton con la misma técnica que en la campaña DIPAL-V. En el presente trabajo se analizaron algunas secciones verticales de los datos de sigma-t, desde la superficie hasta 70 m de profundidad. Los transectos se seleccionaron con el fin de analizar la distribución vertical de la densidad en las zonas donde se contó con muestras biológicas, con el objetivo de analizar la distribución de la biomasa de zooplancton respecto a las isopícnas. En la campaña DIPAL-V se utilizaron dos transectos A-A' y B-B' (Fig. 2.1a) los cuales cruzan longitudinalmente la bahía y en la campaña PALEOMAR-I se trazaron dos transectos C-C', D-D', los cuales cruzan la zona sur de la bahía, donde se obtuvieron las muestras de zooplancton (Fig. 2.1b); se analizó el transecto de la estación 9 a la 13, que se localizó frente a la costa en la parte sur de la bahía, con el fin de obtener la profundidad de la capa de mezcla. Mediante las secciones verticales se ubicó la profundidad de la pinoquina.

Mediante el uso de los datos de CTD se construyeron los diagramas T-S con el fin de identificar las masas de agua presentes en la bahía. Además se calculó la velocidad geostrofica relativa al fondo, posteriormente se analizó la distribución horizontal de la

temperatura, salinidad, densidad y corrientes geostróficas. Se consideró que la zona por debajo de la piconclina tiene importancia biológica al comportarse como una barrera física para los nutrientes. Es importante mencionar que el transecto de las estaciones 9- 13 de la campaña PALEOMAR-I es bastante somero, con una profundidad máxima de 40 m, y el muestreo de zooplancton mediante redes bongo abarcó toda la columna de agua.

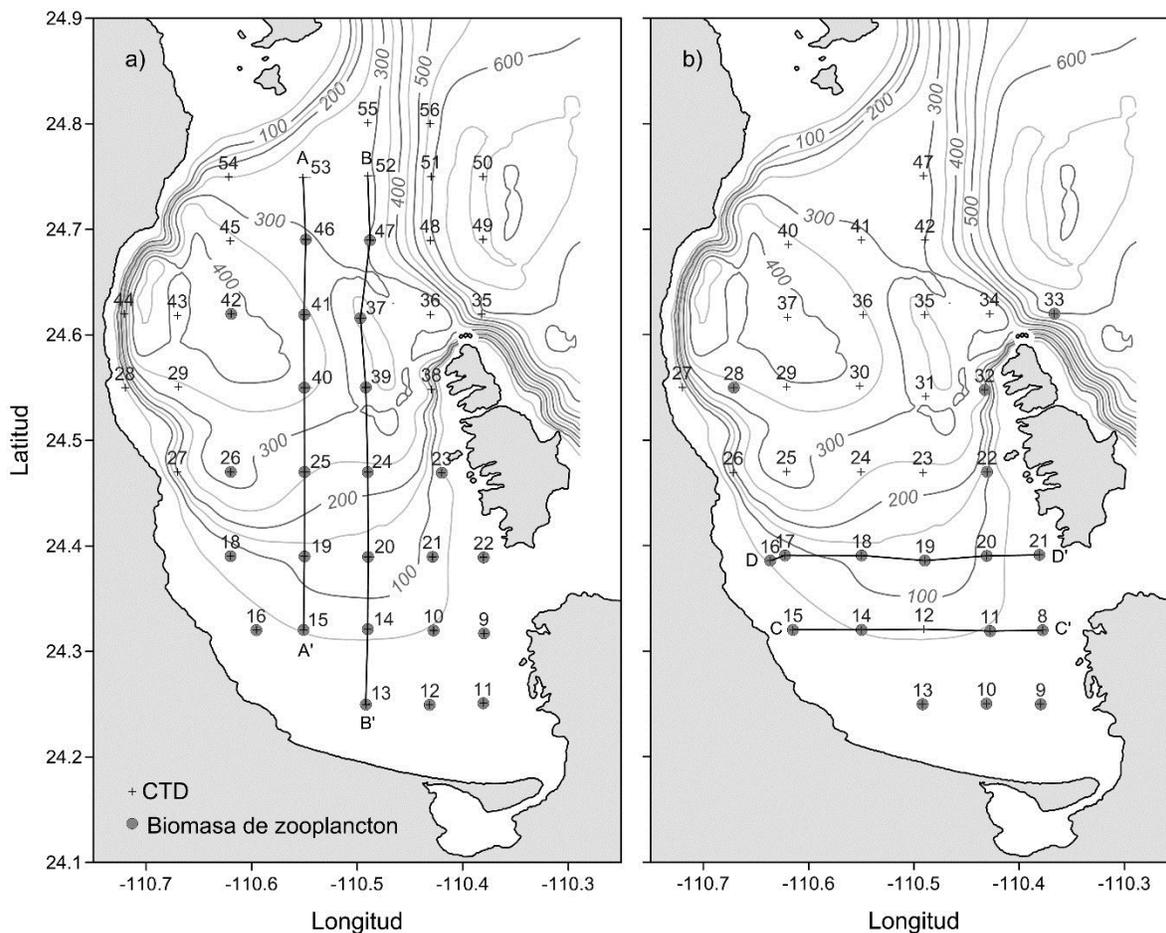


Figura 2.1. Estaciones hidrográficas, con registros de CTD (+) y muestreo de zooplancton (o): a) Campaña DIPAL-V en diciembre de 2012, transectos A-A' y B-B', b) Campaña PALEOMAR-I en noviembre de 2014, transectos C-C', D-D'.

2.2 PROCESAMIENTO DE DATOS HIDROGRAFICOS

Se analizaron los datos hidrográficos de conductividad, temperatura y profundidad obtenidos con el CTD. La salinidad, densidad ($\sigma-t$) y presión se calcularon con los algoritmos de la UNESCO, en primer lugar con el fin de poder construir los diagramas TS e identificar las masas de agua presentes en la bahía durante diciembre de 2012 y noviembre de 2014, en segundo lugar para calcular las corrientes geostróficas las cuales resultan de la distribución de la densidad.

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. Su representación mediante planos horizontales permitió identificar las principales estructuras hidrodinámicas presentes en las épocas de estudio. Generalmente, los núcleos fríos y los núcleos cálidos están asociados a vórtices ciclónicos y anticiclónicos, respectivamente. Además se presenta la distribución de densidad en secciones verticales a lo largo de los diferentes transectos, los cuales también proporcionan información sobre la presencia de vórtices ya que en un núcleo frío las isotermas manifiestan una elevación mientras que en un núcleo cálido éstas se hunden.

2.3 VIENTOS

Los datos de vientos analizados de la Bahía de la Paz de noviembre de 2014, fueron registrados por la Estación Meteorológica Automática (EMA's) en La Paz B.C.S y proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Los vientos de noviembre 2014 durante la campaña PALEOMAR-I se considerarán como los representativos de otoño y fin de otoño, ya que no se contó con datos de vientos de diciembre de 2012 debido a que no existían las EMA's. La serie de tiempo de la velocidad del viento se representó mediante un diagrama de estacas, el cual facilita el análisis de la intensidad y dirección del viento. En este caso, en el diagrama de estacas la dirección de los vientos se representa desde la dirección de origen de la línea de estaca hasta la línea horizontal central, la magnitud de los vientos se representa por el tamaño de la línea de estaca, de acuerdo a la escala elegida.

2.4 VELOCIDAD GEOSTRÓFICA

Existen diferentes métodos para obtener las corrientes oceánicas, éstos pueden ser métodos directos e indirectos. En el primer caso se trata de la medición directa de las corrientes, utilizando diferentes tipos de correntómetros, en el segundo caso; con el método indirecto es muy común que se utilicen datos de conductividad, temperatura y presión obtenidos con el CTD, para obtener la salinidad y la densidad (σ_t), y a través de aproximaciones teóricas se pueda calcular la velocidad de la corriente. Dentro de los métodos indirectos de obtención de corrientes se encuentra, un método que consiste en hacer una simplificación de las ecuaciones de movimiento, bajo la aproximación geostrófica que considera en la horizontal un equilibrio entre las fuerzas de gradiente de presión y las fuerzas de Coriolis, mientras que en la vertical se equilibran las fuerzas de gradiente de presión con la fuerza debida a la gravedad. Las corrientes geostróficas se calculan a partir de datos observados a lo largo de la columna de agua entre pares de estaciones hidrográficas para lo que se requiere conocer la distribución de la densidad del agua de mar. En el océano la densidad del agua depende de la temperatura (T), la salinidad (S) y de la presión (P); por lo que las corrientes geostróficas se calculan a partir de la distribución de estos parámetros, en la columna de agua en diferentes latitudes y longitudes. Las velocidades geostróficas relativas al fondo fueron calculadas a diferentes niveles, considerando las anomalías del volumen específico (Pond y Pickard, 1983):

$$(v_1 - v_2) = \frac{1}{L2\Omega \sin \phi} \left[\int_{P_1}^{P_2} \delta_B dP - \int_{P_1}^{P_2} \delta_A dP \right] \quad (2.1)$$

$$(v_1 - v_2) = \frac{1}{L2\Omega \sin \phi} [\Delta\Phi_B - \Delta\Phi_A] \quad (2.2)$$

donde, L es la distancia entre las dos estaciones hidrográficas (A y B), expresada en metros, δ es la anomalía de volumen específico en $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, P es la presión en Pascales (ó N m^{-2}), ϕ

es la latitud y $\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ es la velocidad angular de la tierra, entonces ($v_1 - v_2$) estará en m/s y que en este estudio se transformó a cm/s.

En este caso las velocidades geostróficas relativas al fondo se calcularon mediante los datos de CTD y los parámetros calculados con los algoritmos de la UNESCO. El campo de corrientes geostróficas se mostró sobre un plano horizontal, con el fin de analizar el patrón de corrientes para constatar la presencia de las estructuras hidrográficas, como pueden ser los vórtices ciclónicos y anticiclónicos o frentes oceánicos, etc. y así analizar su efecto sobre la distribución de la biomasa zooplanctónica y por lo tanto sobre la productividad biológica.

El patrón de corrientes geostróficas en el océano puede mostrar vórtices o giros que pueden ser generados por variaciones de la velocidad en la horizontal y/o en la vertical, respectivamente (Shore *et al.*, 2007). El nombre utilizado para los giros presentes en el océano depende del sentido de rotación del giro. En el hemisferio norte, si éste se mueve en sentido de las manecillas del reloj se le conoce como giro anticiclónico, mientras que si el giro se mueve en sentido contrario a las manecillas del reloj se le conoce como giro ciclónico.

2.5 ESTIMACIÓN DE BIOMASA ZOOPLANCTONICA

La biomasa de zooplancton en peso húmedo se obtuvo de las muestras de redes bongo, con luz de malla de 333 μm en las campañas DIPAL-V y PALEOMAR-I. En el laboratorio cada muestra se procesó en un sistema de filtrado por succión a fin de extraer el líquido intersticial. El procedimiento para obtener la biomasa de zooplancton en peso húmedo fue el siguiente. Se retiró de la muestra el material extraño y los organismos gelatinosos de gran tamaño. Posteriormente la muestra fue vaciada al sistema de filtrado sobre un cernidor de tela de nylon, de luz de malla de 200 μm , el cual fue previamente pesado, y se colocó dentro de un embudo Büchner. Se utilizó una bomba de 1/4 HP para ejercer un vacío de 25 ± 3 cm Hg para retirar así el agua intersticial de la muestra. El proceso de filtrado se dio por terminado cuando el lapso entre gota y gota fue igual o superior a 15 segundos, al terminar el proceso de filtración se pesó la muestra junto con el

cernidor. A este valor se le restó el peso inicial del cernidor para obtener el peso húmedo de la muestra de zooplancton (Flores-Coto y Zavala-García, 1989). Se colocaron flujómetros en las bocas de las redes Bongo para expresar la cantidad de biomasa de zooplancton en el océano por cada m³ de agua filtrada. En el presente trabajo se utilizó un contador modelo 2030 de General Oceanic. La fórmula para obtener el volumen de agua filtrada fue la siguiente:

$$V_f = (3.14 * D_r^2 / 4) (N_r * C_r / 999999)$$

Dónde:

V_f= Volumen de agua filtrado por la red en m³

D_r= Diámetro de la boca de la red en m (0.60)

N_r= Número de revoluciones en el flujómetro

C_r= Constante del rotor (26873 para el flujómetro modelo 2030 de General Oceanic)

Una vez obtenido el peso húmedo y el volumen filtrado, la biomasa de zooplancton se normalizó en g en 100 m³ (g/100 m³) mediante la relación reportada por Zavala-García y Flores-Coto, (1989):

$$\text{Biomasa Zooplanctónica (g/100 m}^3\text{)} = \frac{\text{Peso Neto (g)}}{\text{Volumen filtrado (m}^3\text{)}} \times 100$$

CAPÍTULO III RESULTADOS

3.1 ESTRUCTURAS HIDROGRAFICAS

Mediante las secciones verticales realizadas durante ambas campañas se detectó la profundidad de la pycnoclina entre los 50 y 60 m. La pycnoclina actúa como una barrera física, por lo que se eligió la profundidad de la pycnoclina y por debajo de ésta para analizar las estructuras hidrográficas existentes en la Bahía de la Paz mediante la distribución horizontal de sigma-t y de las corrientes geostroficadas.

3.1.1 SECCIONES VERTICALES

En diciembre de 2012 la capa de mezcla tuvo un espesor aproximado de 40 m en los transectos A-A' y B-B', con un hundimiento en el norte (Fig. 3.1) En la capa superficial de los 200 m la densidad varió de 23.50 a 26.25 kg/m³, con su máximo gradiente vertical cercano a 50 m. (Figs. 3.1 a y b).

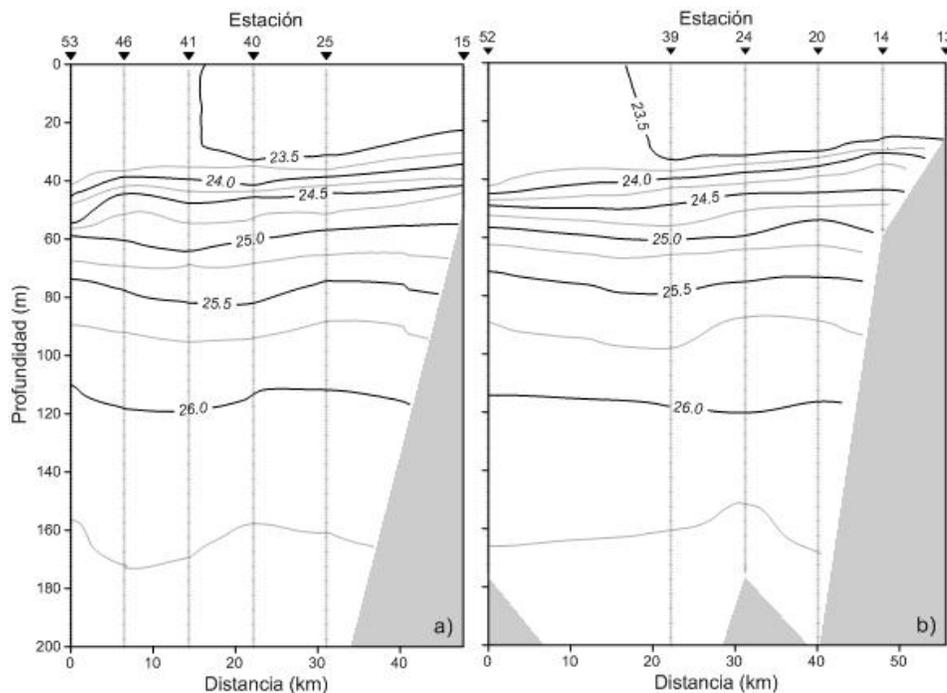


Figura 3.1. Sección vertical de sigma-t (kg/m³), en diciembre de 2012 durante la campaña DIPAL-V: **a)** a lo largo del transecto A-A' y **b)** a lo largo del transecto B-B'.

En noviembre de 2014, a largo de los transectos C-C' (Fig. 3.2) y D-D' (Fig. 3.3) se observó una capa de mezcla con espesor aproximado de 50 m. En el transecto C-C' la pycnoclina se encontró a mayor profundidad que en el transecto D-D', debido a que es un transecto muy somero, en él la densidad varió de 22.75 a 24.75 kg/m³. En el transecto D-D' se observa un hundimiento de las isopícnas en las estaciones 18 y 19, en la capa de los 45 a los 90 m (Fig. 3.3). En el transecto que une las estaciones 9, 10 y 13 se analizó la distribución vertical de la densidad, éste parámetro se mostró muy uniforme con un valor cercano a 22.75 (no se muestra) a lo largo del transecto y en toda la columna de agua.

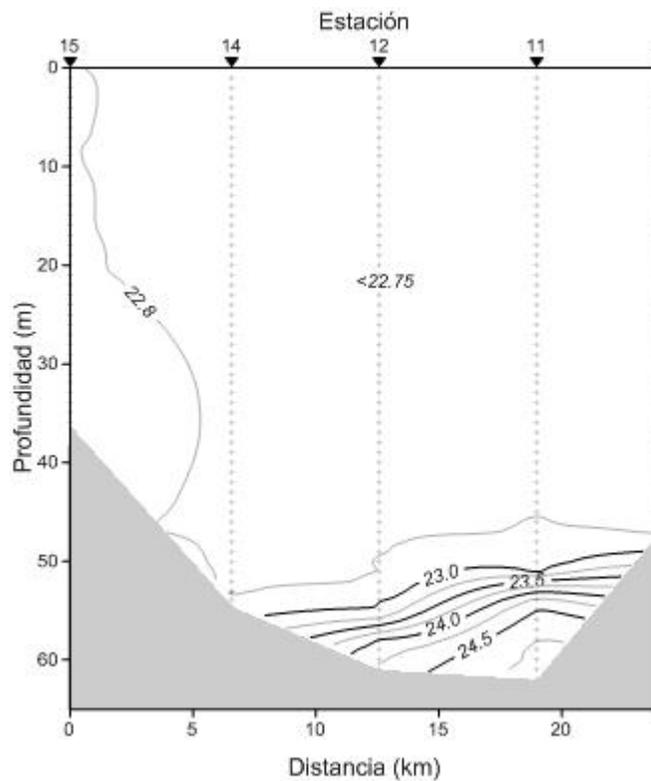


Figura 3.2. Sección vertical de sigma-t (kg/m³) en noviembre de 2014 durante la campaña PALEOMAR-I: a lo largo del transecto C-C',

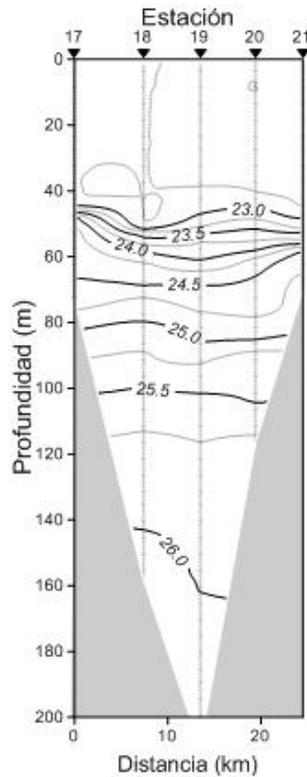


Figura 3.3. Sección vertical de sigma-t (kg/m^3) en noviembre de 2014 durante la campaña PALEOMAR-I: a lo largo del transecto D-D´.

3.1.2 DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y SIGMA-T

La temperatura varió entre $19.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $20.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 50 m de profundidad en diciembre de 2012. Esta aumentó hacia el noroeste donde presentó un valor de $22.75\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura máxima fue de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Boca Grande, en donde además se observó una lengüeta de agua fría de $19.25\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la región próxima a los $24.55\text{ }^{\circ}\text{N}$ y $110.5\text{ }^{\circ}\text{W}$ se presentó un núcleo de aproximadamente $20.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ al sur de Cuenca Alfonso (Fig. 3.4a). Las isohalinas formaron un núcleo de baja salinidad en Boca Grande, en el centro de dicho núcleo se presentó un salinidad de 34.94 g/kg , la salinidad en el sur de la bahía se mostró muy uniforme, varió entre 35.05 y 35.08 g/kg . Presentó los valores más altos de salinidad

en esta zona, en Boca Grande y frente a Punta Coyote (Fig. 3.4 b). La densidad (σ_t) varió de 24.1 a 25.0 kg/m^3 , en este caso la densidad está gobernada por la temperatura, con patrones muy similares, con los valores más altos de densidad en la lengüeta de agua fría, próxima a Boca Grande (Fig. 3.4.c), la región sur muestra una densidad uniforme alrededor de 24.8 kg/m^3 .

En noviembre de 2014, durante la campaña PALEOMAR-I, la temperatura varió de 22.50 a 26.50 °C a 50 m de profundidad. Mostró un núcleo cálido posicionado cerca de la latitud 24.5 °N (Fig. 3.5a), el cual coincide con un núcleo de baja densidad (22.8 kg/m^3). En la periferia de este núcleo cálido la densidad va aumentando (Fig. 3.5c), la cual está asociada a menores temperaturas. En cuanto a la distribución de salinidad en la figura (3.5b) se aprecia un núcleo con valores bajos cercanos a 34.80 g/kg en Cuenca Alfonso, así como una lengüeta de agua cuya salinidad va decreciendo de la costa hacia el interior de la bahía con un rango de 34.94 a 34.90 g/kg.

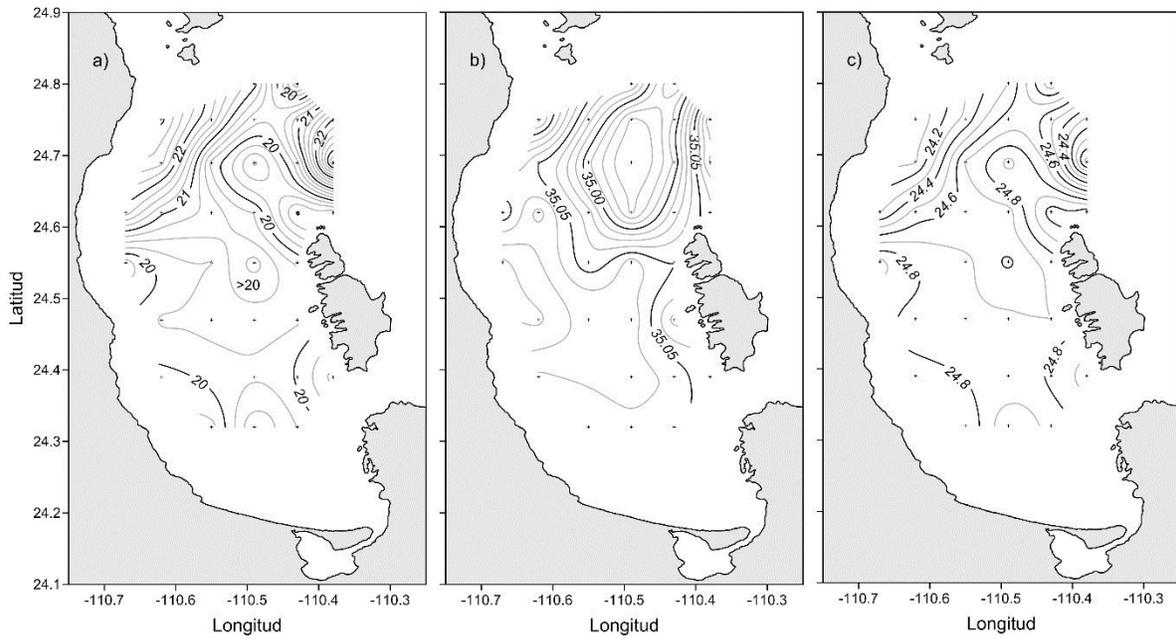


Figura 3.4. Distribución de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) con IC (intervalo de contorno) de 0.25, b) salinidad (g/kg) con intrvalo de contorno de 0.0125 y c) sigma-t (kg/m^3) con IC de 0.1, a 50 m de profundidad durante DIPAL-V en diciembre de 2012.

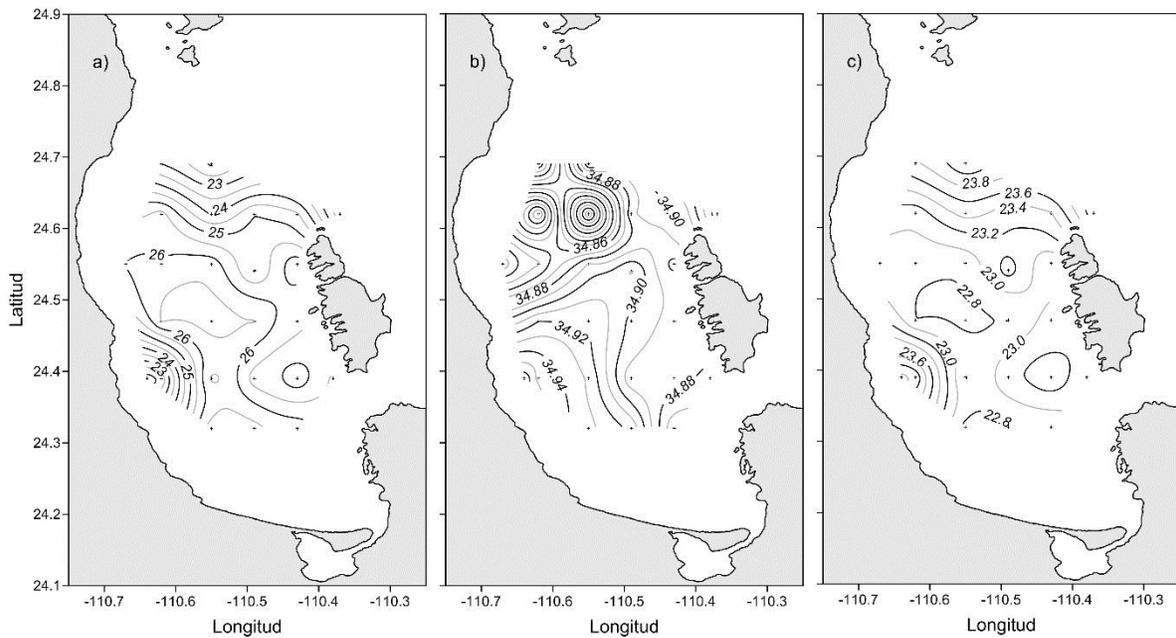


Figura 3.5. Distribución de a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) con IC de 0.5, b) salinidad (g/kg) con IC de 0.01 y c) sigma-t (kg/m^3) con IC de 0.20, a 50 m de profundidad durante PALEOMAR-I en noviembre de 2014.

3.2 VELOCIDADES GEOSTRÓFICAS

Los patrones de corrientes geostróficas relativas al fondo durante diciembre de 2012, a 50 m de profundidad muestra un vórtice ciclónico próximo a la Isla Roca Partida y una corriente anticiclónica muy bien definida en Boca Grande, donde se presentan las velocidades de mayor intensidad con magnitudes cercanas a 30 cm/s (Fig. 3.6a). En el sur de la bahía las velocidades son pequeñas comparadas con las anteriormente descritas: El patrón de corrientes a 70 m de profundidad muestra el vórtice ciclónico y en general un patrón similar al de 50 m de profundidad solo que con velocidades menores (Fig. 3.6b). Las estructuras ciclónicas y anticiclónicas son muy notorias en esta época.

Durante la campaña PALEOMAR-I en noviembre de 2014, se obtuvieron velocidades con mayor intensidad que durante la campaña de diciembre 2012. Se puede observar una circulación anticiclónica en la región próxima a la Cuenca Alfonso y una pequeña zona con circulación ciclónica frente a la Isla Espíritu Santo (Fig. 3.6c). A 70 m de profundidad la circulación ciclónica próxima a la Isla Espíritu Santo ya no se observa (Fig. 3.6d). En esta época la presencia del vórtice anticiclónico definido por la distribución horizontal de temperatura y densidad a 50 m se confirma con el patrón de corrientes geostróficas.

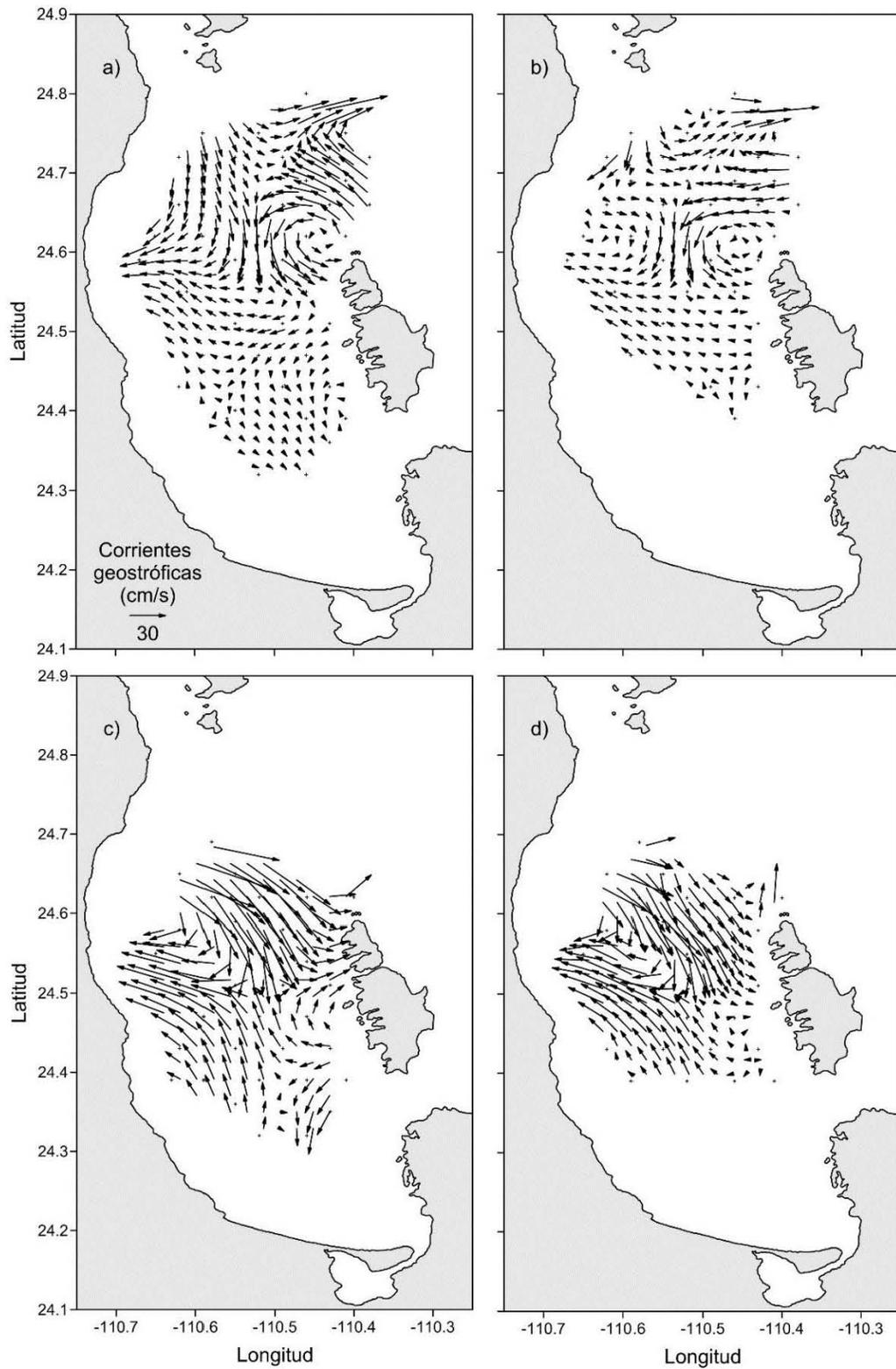


Figura 3.6. Patrón de corrientes geostróficas relativas al fondo, durante la campaña DIPAL-V en diciembre 2012, a) a 50 m de profundidad, b) a 70 m de profundidad. Durante la campaña PALEOMAR-I, en noviembre de 2014; c) a 50 m de profundidad y d) a 70 m de profundidad.

3.3 VELOCIDAD DEL VIENTO

Los vientos del 21 al 28 de noviembre de 2014 en la EMA La Paz B.C.S. inicialmente soplaron del noreste. Después fueron cambiando de dirección, observando vientos del sureste, los cuales predominaron el día 22. Al final de ese día y a principios del 23 los vientos soplaron del noroeste y del noreste. Los vientos disminuyeron su intensidad el día 23. A partir del día 24 y hasta la mitad del día 28 los vientos fueron del sector norte. Las mayores magnitudes alcanzaron valores de 8.0 m/s.

En general en el lapso de tiempo de la campaña oceanográfica PALEOMAR-I, los vientos dominantes fueron del noreste además de rachas de viento del sureste con pequeña magnitud (Fig. 3.7).

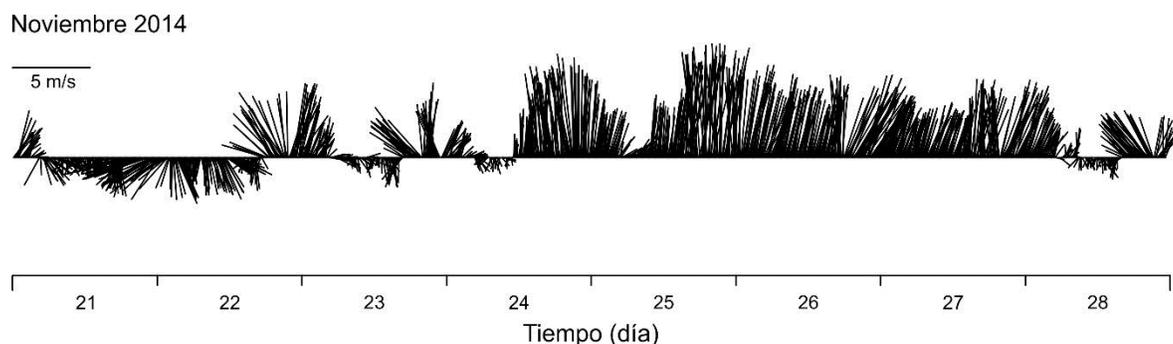


Figura 3.7. Serie de tiempo de vientos en noviembre del 2014, en la EMA La Paz, B.C.S.

3.4 MASAS DE AGUA

Dentro de la Bahía de la Paz se observaron tres masas de agua: Agua Tropical Superficial (ATS) con salinidad entre 34.2 y 34.9 g/kg, y temperatura entre 18 y 26°C, Agua del Golfo de California (AGC; $34.9 < S < 35.2$, $12 < T < 26$) y Agua Subtropical Subs superficial (AStSs; $34.5 < S < 34.9$, $9 < T < 18$), en las estaciones por fuera de Boca Grande se encontró además el Agua Intermedia del Pacífico (AIP; $34.5 < S < 34.8$, $4 < T < 9$). Al comparar ambas campañas se observó que el ATS presentó valores menores de salinidad y el AGC presentó mayor salinidad en diciembre de 2012 (Fig. 3.8a), que en noviembre de

2014 (Fig. 3.8b). La capa superficial de los 50 m estuvo ocupada con AST y AGC, mientras que el AStSs se situó en la capa de mayor profundidad.

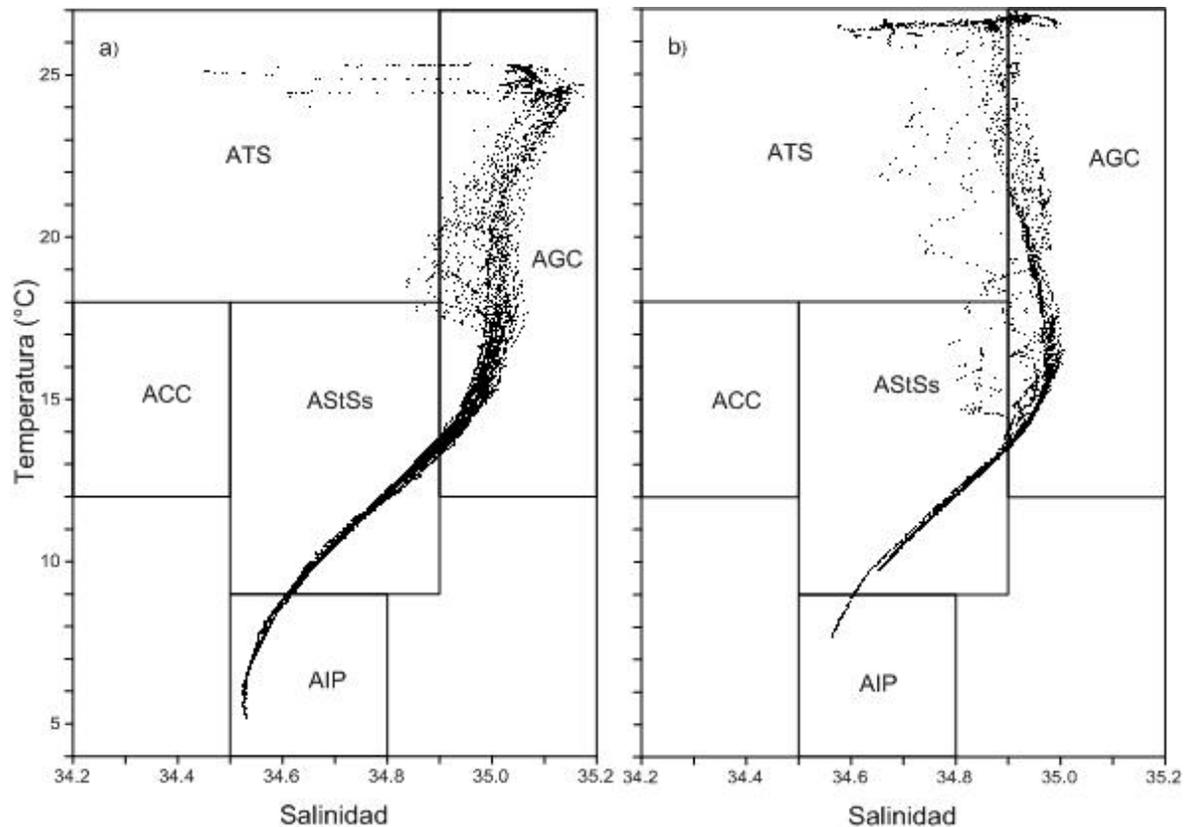


Figura 3.8. Diagramas T-S y masas de agua en la Bahía de la Paz: a) en diciembre de 2012 y b) en noviembre de 2014.

3.5 BIOMASA ZOOPLANCTONICA

Durante la Campaña DIPAL-V en diciembre de 2012, los valores de la biomasa de zooplancton variaron entre 11 y 54 g/100 m³. Estos valores extremos se presentaron en las estaciones 25 y 16 respectivamente.

Mientras que durante la Campaña PALEOMAR-I en noviembre de 2014, los valores de biomasa presentaron un mayor rango el cual se encontró entre 21 y 106 g/100 m³ en la estación 8 y 13 respectivamente (Tabla 3.1).

La biomasa del zooplancton obtenida en la capa superior de 200 m (o a lo largo de la columna de agua en el caso de zonas más someras) se muestra en las figuras 3.9 y 3.10.

Durante la campaña DIPAL-V en diciembre de 2012 (donde se obtuvieron muestras de zooplancton en la mayor parte de la bahía), los valores de biomasa variaron entre 11 y 54 g/100 m³. En esta época los valores más altos se presentaron en la zona sur de la bahía y frente a Punta Coyote (Fig. 3.9a). Los valores más altos de biomasa se observaron en las estaciones 13 y 16 (48 y 54 g/100 m³, respectivamente), las cuales se localizan en el sur de la bahía próximas a la costa; seguidas por las estaciones de la 9 a la 12 que como ya se mencionó es una zona somera y mezclada. Por otro lado en Cuenca Alfonso, en donde se presentan las mayores profundidades, en las estaciones 41, 42 y 46 se observaron valores relativamente altos de biomasa. Los valores mínimos de biomasa se observaron en las estaciones 20, 25, y 39 situadas a lo largo del transecto BB' (con valores entre 13 g/100 m³ y 15 g/100 m³, respectivamente) (Fig. 3.9a y Fig. 2.1a).

Tabla 3.1. Biomasa zooplanctónica (g/100 m³) en la campañas DIPAL-V en diciembre de 2012 y PALEOMAR-I, en noviembre de 2014.

Campaña DIPAL V (diciembre 2012)		Campaña PALEOMAR I (noviembre 2014)	
No. de Estación	Biomasa (g /100 m ³)	No. de Estación	Biomasa (g /100 m ³)
9	39	8	21
10	36	9	76
11	34	10	75
12	35	11	62
13	48	13	106
14	21	14	101
15	38	15	85
16	54	16	83
18	28	17	71
19	21	18	35
20	13	19	31
21	24	20	22
22	24	21	99
23	23	22	101
24	15	28	32
25	11	32	47
26	18	33	28
37	21		
39	13		
40	14		
41	31		
42	32		
46	31		
47	21		

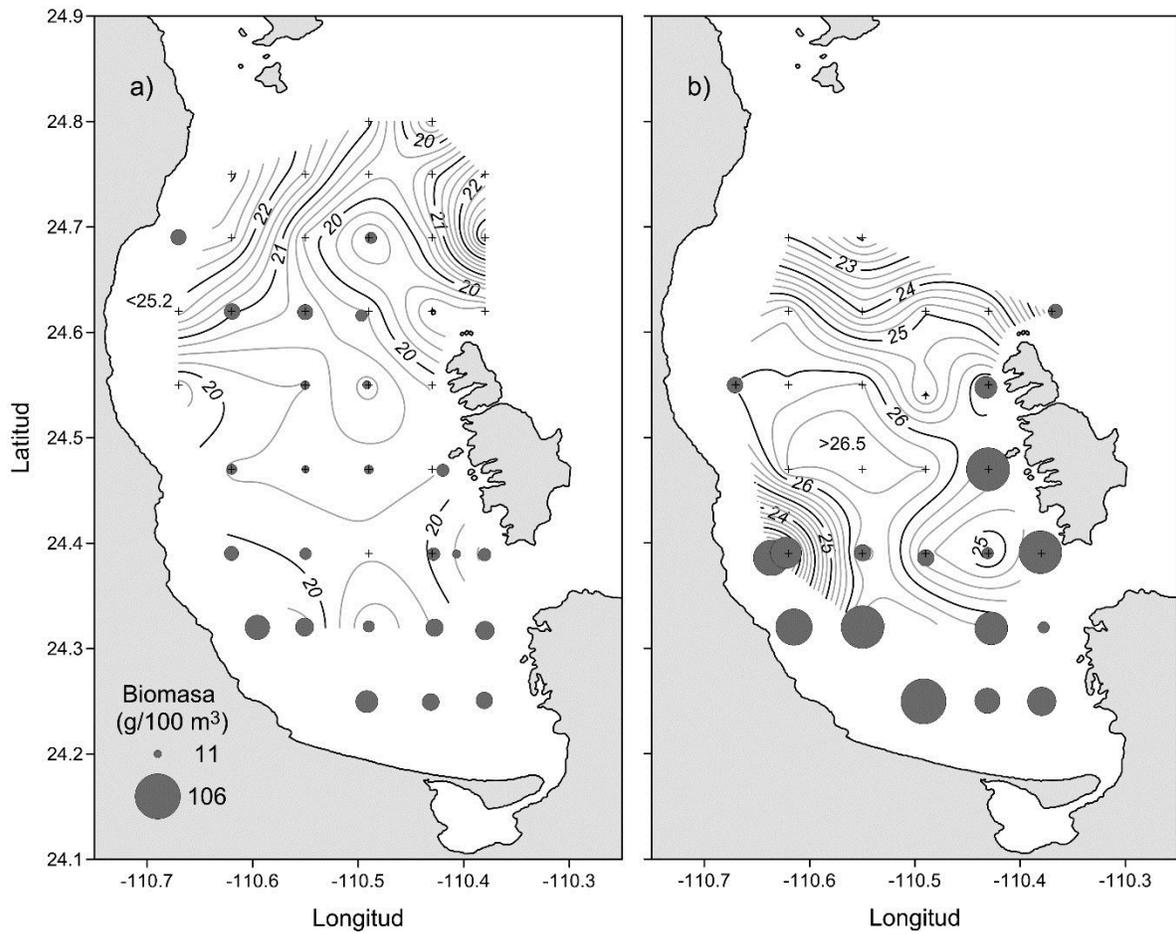


Figura 3.9. Biomasa de zooplancton ($\text{g}/100 \text{ m}^3$) y distribución de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) a 70 m de profundidad, en la campaña oceanográfica a) DIPAL-V en diciembre de 2012 y b) PALEOMAR-I en noviembre de 2014.

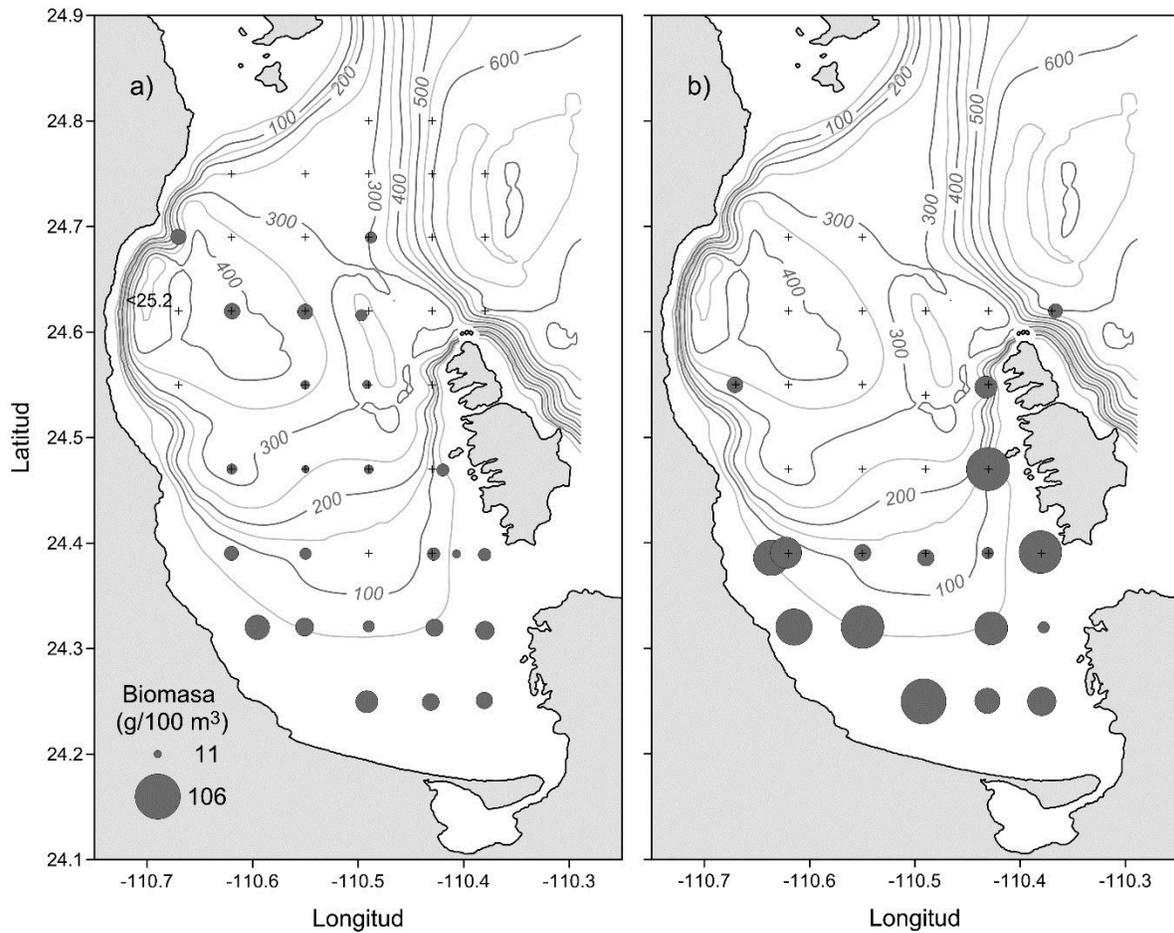


Figura 3.10. Biomasa de zooplancton ($\text{g}/100 \text{ m}^3$) y batimetría, en la campaña oceanográfica a) DIPAL-V en diciembre de 2012 y b) PALEOMAR I en noviembre de 2014.

Los valores fueron mayores durante noviembre de 2014, con máximos en la región sur de la bahía, principalmente en la región próxima a la costa y a la Isla Espíritu Santo (Fig. 3.9 b). No obstante que durante la campaña PALEOMAR-I no se obtuvieron muestras de zooplancton en la región de Cuenca Alfonso, se observa que la tendencia es a obtener biomasa alta en la periferia del vórtice cálido.

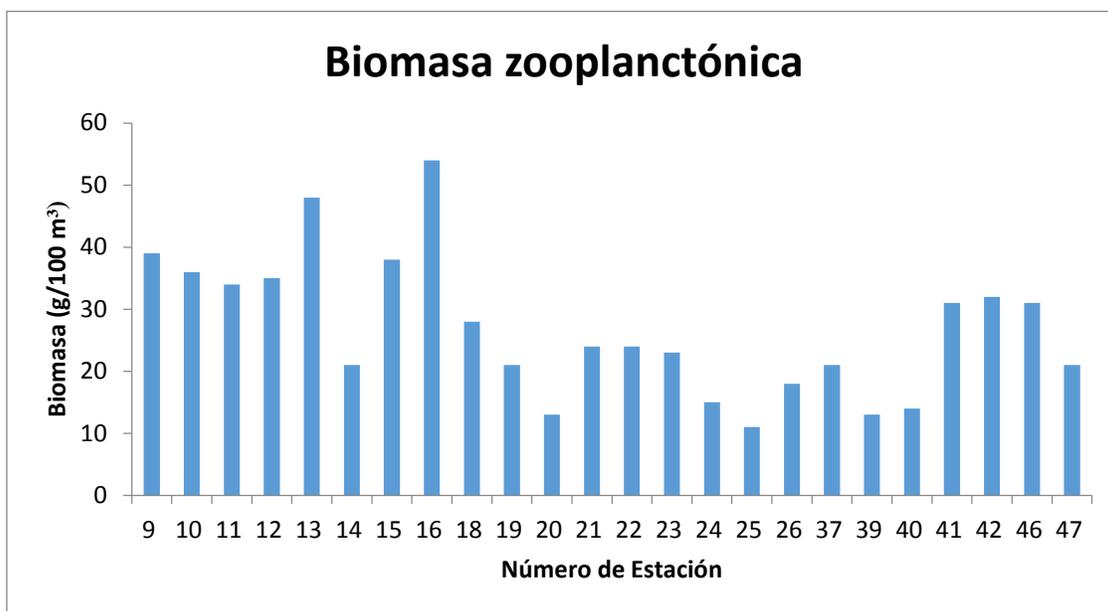


Figura 3.11. Cantidad de biomasa de zooplancton (g/100 m³) por estación durante la campaña oceanográfica DIPAL-V en diciembre de 2012.

Durante la campaña PALEOMAR-I en noviembre de 2014 la biomasa del zooplancton fue mayor que durante diciembre de 2012. Los valores más altos de biomasa se encontraron en las estaciones 13, 14, 21 y 22, de las cuales las primeras dos se localizan en la región costera al suroeste, y las otras dos frente a Isla Espíritu Santo. Los valores mínimos de biomasa se encontraron en las estaciones 8 y 20 situadas en el canal de San Lorenzo (Fig. 3.10 b).

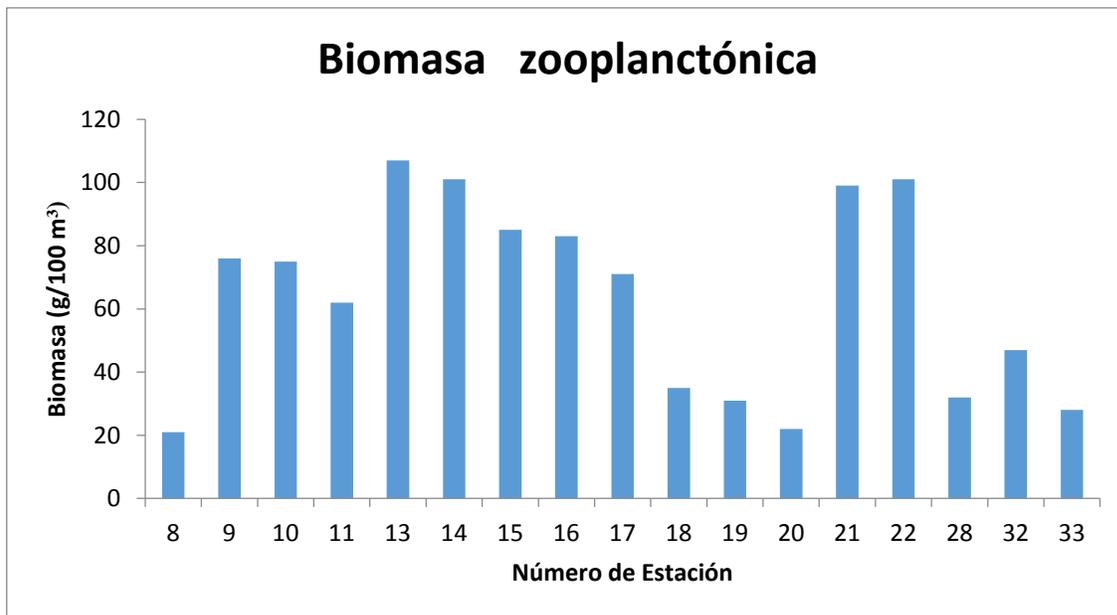


Figura 3.12. Cantidad de biomasa de zooplancton (g/100 m³) por estación durante la campaña oceanográfica PALEOMAR-I en noviembre de 2014.

CAPÍTULO IV DISCUSIÓN

El objetivo general de este estudio es encontrar la relación entre la biomasa de zooplancton y las estructuras hidrodinámicas; como vórtices, frentes, entre otros. La posición vertical del máximo de clorofila puede ser afectada por los cambios en el transporte vertical de nutrientes y las oscilaciones asociados a las estructuras de mesoescala, ya que el ciclo de vida de un vórtice puede influenciar la disponibilidad de nutrientes permitiendo cambios en la composición de la biomasa de fitoplancton y consecuentemente, en la composición de especies en general (Sweeney *et al.*, 2003). En la Bahía de La Paz se ha reportado un giro ciclónico en Cuenca Alfonso, en diferentes estaciones del año a finales de primavera (Monreal-Gómez *et al.*, 2001), durante verano (Sánchez-Velasco *et al.*, 2004, 2006), y a finales de verano (Coria-Monter *et al.*, 2014 y Duran-Campos *et al.*, 2015). Se pueden identificar diferentes etapas a lo largo del ciclo de vida de un giro. Durante la generación, maduración y decaimiento existen cambios en la biomasa de fitoplancton y este modelo propone que al inicio en un giro ciclónico una cantidad significativa de nutrientes emergen a la zona eufótica y la cantidad de clorofila es pequeña. La clorofila se incrementa conforme el giro va llegando a la madurez donde se obtiene un máximo de clorofila, posteriormente la concentración de clorofila disminuye cuando el giro tiende a decaer. Los estados de madurez del giro 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 giro comienza a decaer, la productividad y las concentraciones de pigmentos decrecen. De acuerdo a dicho modelo se ha argumentado que la evolución del giro ciclónico en Cuenca Alfonso puede alcanzar un máximo durante la etapa de madurez del giro durante mayo. Las concentraciones mínimas de clorofila en el decaimiento del giro ciclónico se presentaron de agosto a octubre (Coria *et al.*, 2014). Los muestreos durante las campañas DIPAL-V en diciembre de 2012 y PALEOMAR-I en noviembre de 2014 corresponderían a la etapa de decaimiento.

Los giros ciclónicos como el que se ubica en Cuenca Alfonso son más productivos y presentan una mayor abundancia de plancton que los giros anticiclónicos. Sin embargo, según McGillicuddy *et al.* (2007), la respuesta biológica depende de la edad y tamaño del giro. En la campaña DIPAL-V (2012) se observó un giro ciclónico al norte de la Bahía,

cerca de Boca Grande, el cual se detectó mediante las corrientes geostróficas a 50 m de profundidad y coinciden con la distribución de densidad.

Además del giro ciclónico, se ha reportado un giro anticiclónico en la bahía (Salinas González, 2003). Dichas estructuras anticiclónicas suelen asociarse con baja productividad. En las campañas oceanográficas se observó una estructura anticiclónica. Durante DIPAL-V ésta se observó en Boca Grande, mientras que en la campaña PALEOMAR-I el vórtice anticiclónico se presentó en el centro de la bahía y fue posible detectarlos mediante la distribución de temperatura y densidad, así como mediante las corrientes geostróficas a 50 m. En DIPAL-V el vórtice anticiclónico se caracterizó por presentar baja biomasa de zooplancton. Por otro lado, los vórtices pueden estar involucrados en la exportación horizontal de aguas costeras que contienen altas concentraciones de nutrientes, materia orgánica y/o biomasa de zooplancton (Morales *et al.*, 2012). Huntley *et al.* (2000) señalaron que algunos parámetros físicos y biológicos pueden influir en la distribución del zooplancton incluyendo la dinámica poblacional, advección y ecología de los organismos los cuales pueden ser alterados por la presencia de vórtices de mesoescala. Strzelecki *et al.* (2007) mencionan que los giros pueden afectar la distribución de zooplancton mediante diferentes mecanismos, y que un giro ciclónico puede elevar la nutriclina y fertilizar la capa eufótica, que puede incrementar la biomasa del fitoplancton y de esta manera el zooplancton puede aproximarse debido a la alta concentración del alimento. Goldthwait y Steinberg (2008) mencionaron que los giros pueden influir en la distribución del zooplancton a través del tiempo, lo cual depende del tipo de giro y/o de las condiciones presentes durante la formación del giro, determinando la secuencia de eventos biológicos. Se ha planteado que en general, los efectos de los giros sobre el zooplancton dependen del fitoplancton y de la actividad primaria del agua que originó dicho giro, además del tamaño, la edad y la dinámica asociada al giro junto con las interacciones con el agua aledaña (Strzelecki *et al.*, 2007).

Se ha discutido la influencia del giro frío observado en el noreste y centro de la Bahía de la Paz a 50 m en julio de 1997 (Sánchez-Velasco *et al.*, 2004). Los giros de este tipo están asociados a la fertilización con nutrientes en la columna de agua. Los mayores

valores de la biomasa zooplanctónica se registraron en la parte somera próxima al área de la Ensenada de la Paz mientras que los valores más bajos se registraron en el centro y noreste de la Bahía en los veranos de 1997 y 1998. La gran abundancia de zooplancton en la parte somera fue asociada a las condiciones de mezcla generadas por los vientos del sur que prevalecen hasta verano. En el presente estudio los muestreos en las campañas DIPAL-V y PALEOMAR-I se realizaron en la época del año con vientos intensos del norte, noreste y noroeste, los cuales alcanzaron velocidades de 8 m/s, y generaron una capa de mezcla con espesor entre 50 y 60 m de profundidad, y en la zona sur de la bahía la columna se encontró completamente mezclada, por lo que en la parte sur de la bahía los altos valores de biomasa de zooplancton se deben, por un lado, a la cantidad de materia orgánica que llega a través de la Ensenada de La Paz y por otro lado a la mezcla debida al viento.

Además de los vórtices, las barreras físicas que se presentan en la columna de agua debido al gradiente de densidad son esenciales para comprender la distribución de los organismos del zooplancton. Se registraron tres masas de agua al interior de la bahía en ambas campañas oceanográficas: Agua Tropical Superficial (ATS), Agua del Golfo de California (AGC) y el Agua Subtropical Subsuperficial (AStSs). Aunque el AGC está presente en la bahía casi todo el año en la capa superior, el índice de estratificación y la producción primaria mantienen una relación inversa entre primavera y el periodo de verano-otoño, lo que ayuda o inhibe el proceso de fertilización. Los flujos verticales de partículas de carbono orgánico y nitrógeno en la bahía varían estacionalmente con los flujos máximos al final del verano mientras que los flujos mínimos se producen en invierno-primavera junto a valores altos de $\delta^{15}\text{N}$ (utilizado como firma isotópica). Los altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ observados periódicamente en la materia particulada de sedimentación pueden estar asociados con la introducción del Agua Tropical Superficial rica en $\delta^{15}\text{N}$ traída cerca de la superficie por vórtices ciclónicos que se forman en las aperturas al sur del Golfo de California o dentro de la Bahía de la Paz (Aguñiga *et al.*, 2010).

La composición biológica de los giros está establecida por la masa de agua que lo origina, pero está sujeta a la influencia de las comunidades aledañas dentro del giro y a la tendencia gradual a equilibrarse (Olson, 1991).

El viento juega un papel importante en la distribución de la abundancia de biomasa de zooplancton, como ya se mencionó puede producir la mezcla en la columna de agua, como es el caso de la zona sur de la Bahía de La Paz. Además puede ser el mecanismo generador del giro, pues el campo de vientos puede dar origen a un giro ciclónico o anticiclónico, y puede elevar o hundir la picnoclina y la nutriclina, favoreciendo o inhibiendo la productividad primaria. El viento también influye mediante el transporte eólico, pues aunque existe evidencia de un origen fluvial para los sedimentos del Holoceno en la bahía, se plantea la hipótesis de que durante periodos normales, el transporte eólico controla la entrada de material particulado a la bahía (Silverberg *et al.*, 2007). La materia orgánica puede ser transportada por huracanes y ciclones, lo que provoca el aporte de material terrígeno, y afecta de este modo la producción primaria y a su vez la abundancia y distribución de zooplancton. El impacto más evidente de los huracanes en Cuenca Alfonso es el incremento en el flujo de partículas al fondo marino. Las tasas de sedimentación en masa, medidas en muestras a través de las semanas antes, durante e inmediatamente después de cada huracán, son tres veces mayores de lo normal. Los flujos más altos se aplican a prácticamente todos los elementos examinados así como al sílice biogénico, CaCO_3 y a la materia orgánica (Silverberg *et al.*, 2007).

Durante la campaña DIPAL-V en diciembre de 2012 se obtuvieron muestras de zooplancton en la mayor parte de la bahía para obtener la biomasa, mientras que en la campaña PALEOMAR-I realizada en noviembre del 2014, sólo se cubrieron las estaciones oceanográficas en el sur de la Bahía de la Paz y en la zona frente a la Isla Espíritu Santo. Como se mencionó en secciones anteriores la mayoría de los estudios realizados en la bahía referente a la obtención de la biomasa de zooplancton se han realizado a finales de primavera y principio de verano. En la figura 3.11 se puede apreciar que la biomasa de zooplancton en las estaciones 41, 42 y 46 fueron las que presentaron un mayor valor, sin tener influencia de la costa y corresponden a las estaciones que rodean al giro ciclónico

presente cerca de las islas. La alta biomasa presente en las estaciones localizadas en el sur de la bahía puede deberse a la proximidad de la costa y a la vecindad de la Ensenada de la Paz, así como a la mezcla que se observó en dicha zona. En la figura 3.12 se puede observar que la biomasa de la campaña de 2014 fue mayor que en la campaña de 2012. De nueva cuenta los valores de biomasa zooplanctónica más altos se encontraron en las estaciones próximas a la costa; mientras que los valores menores fueron los registrados en las estaciones 8 y 20 cerca del canal de San Lorenzo, posiblemente debido a la corriente dentro del canal.

En este estudio se analizó la distribución de biomasa en medio y finales de otoño, por lo que se podrán comparar las dos épocas contrastantes. En verano la gran incidencia de radiación genera una estratificación continua (Monreal-Gómez *et al.*, 2001), mientras que durante otoño los intensos vientos del noreste provocan un espesor de la capa de mezcla de aproximadamente 50 m. La termoclina y picnoclina se encuentran a mayor profundidad y están muy bien marcadas coincidiendo con lo reportado por Molina-Cruz *et al.* (2002). La diferencia estacional provoca que las clinas se localicen a diferentes profundidades en las dos épocas contrastantes verano y otoño, como se ha mencionado en otras secciones las clinas son barreras físicas que pueden influir en la distribución de los nutrientes y por lo tanto de organismos del plancton.

En noviembre de 2014 las mayores biomásas de zooplancton se obtuvieron en la zona costera al sur de la bahía. En muestreos realizados durante el verano 2009, cuando ocurre una estratificación continua o una capa de mezcla muy superficial, se encontró la mayor biomasa en Cuenca Alfonso. En dicha zona se reportó la presencia de un vórtice ciclónico bien definido, así como en Boca Grande donde el efecto del umbral produce un frente térmico (Durán-Campos *et al.*, 2015). La metodología utilizada por Durán Campos *et al.* (2015) para la obtención de la biomasa de zooplancton no fue la misma que la utilizada en el presente estudio debido a que dichos autores no utilizaron la bomba de vacío para extraer completamente el agua intersticial, pues solo se dejó decantar el agua mediante un papel filtro con el fin de no maltratar a los organismos. Por lo que se podría decir que al comparar la biomasa obtenida por ambos métodos ésta debería ser mayor con el método del

papel filtro. Sin embargo al comparar los valores en el sur de la bahía en verano esos resultaron más bajos que los obtenidos en este estudio para otoño, lo cual indica que en otoño la biomasa de zooplancton es mayor que en verano. Al comparar con el valor de las biomásas de verano 2009 de acuerdo a Durán-Campos *et al.* (2015), se encontró que el valor de éstas en Cuenca Alfonso son muy similares, mientras que en la zona costera en otoño fueron mayores, lo anterior debido a la mezcla que se encontró en parte somera del sur de la bahía y a la presencia del vórtice anticiclónico en el centro de la bahía.

Además de la diferencia estacional debida al viento, existen otros factores que provocan la disminución o aumento de nutrientes y grupos de fitoplancton que pueden regular la presencia de grupos zooplanctónicos. Por ejemplo, el suministro de material terrígeno procedente de terremotos en áreas que son tectónicamente activas, como consecuencia de los campos de viento se pueden generar eventos de surgencias locales, las cuales también pueden influir sobre los flujos de materia particulada terrígena y biogénica (Silverberg *et al.*, 2007). El aporte de sedimentos terrígenos es considerablemente mayor que el aporte de material biogénico (Molina-Cruz *et al.*, 2002).

En la región suroeste donde se encontraron altos valores de biomasa de zooplancton, se ha detectado una alta concentración de nutrientes (Coria-Monter *et al.*, 2014), sobre todo núcleos de alta concentración de fosfato que podrían estar relacionados con el alto contenido de fosforita en la región de San Juan de la Costa, donde se encuentra la empresa minera Roca Fosfórica Mexicana (Rofomex) que se especializa en la extracción de fosforita (Hausback, 1984).

Por otro lado, en la bahía se ha reportado materia orgánica en sedimentos entre 1 y 5% (Fig. 4.1). Los valores más bajos de materia orgánica (<1.0%) se localizan en casi toda la porción sur de la bahía y en un área pequeña en la parte noroeste. Valores entre 1 y 3% se distribuyen en una franja curva desde el canal de San Lorenzo hasta la parte central-oeste de la bahía, siguiendo en dirección norte hasta la altura de Isla Roca Partida, asociada a la trayectoria de las corrientes a 100 m de profundidad. Los valores altos (3 a 5%) se

encuentran frente a la Isla Espíritu Santo, que es la porción con corrientes de baja intensidad por lo que no existe remoción de material de fondo (Cruz-Orozco *et al.*, 1996).

La alta concentración de materia orgánica (entre 3 a 5%) se encuentra cerca de las islas de Espíritu Santo y Roca Partida en donde se obtuvieron biomásas de 101 g/100 m³ (estación 22) y 99 g/100 m³ (estación 21) en la campaña PALEOMAR I en noviembre de 2014.

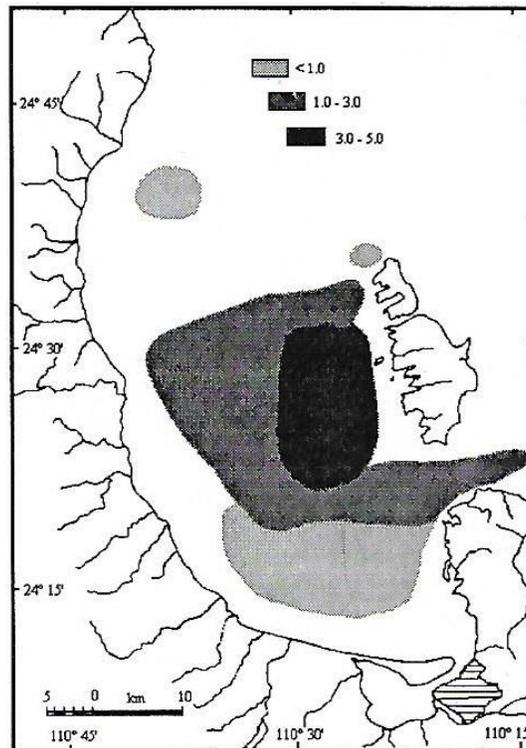


Figura 4.1. Distribución de materia orgánica en la Bahía de la Paz (según Cruz-Orozco *et al.*, 1996).

La resuspensión de sedimentos preexistentes debido a las olas causadas por huracanes puede representar otra fuente de partículas terrígenas. La plataforma que rodea Cuenca Alfonso está dominada por areniscas. Los sedimentos fangosos que podrían suministrar material resuspendido se limita a la pendiente sur de la cuenca. Incluso sin huracanes, las tasas de sedimentación en Cuenca Alfonso son considerables. Los huracanes afectan la región de La Paz aproximadamente cada dos años (Silverberg *et al.*, 2007).

Obeso-Niebla (2003) mencionó que la presencia de una capa de mezcla en otoño (2001) y de manera más relevante en invierno (2001), así como el hundimiento de la termoclina, la haloclina y picnoclina de esta zona, fueron originados por los fuertes vientos del noroeste y norte que prevalecen en estas épocas. También describió que en Boca Grande se inicia el proceso de mezcla de la capa superficial en octubre, el cual culmina durante febrero con una capa máxima de 100 m. De esta manera la distribución vertical de las masas de agua varían según la época del año, como se observa en la figura (3.8).

Además de los giros, el zooplancton está relacionado con la densidad de las masas de agua existentes en la Bahía de la Paz ya que son importantes barreras físicas y mecanismos de dispersión que varían de extensión a través del año. Se tienen que tener en cuenta otros factores que son intrínsecos a la formación de las estructuras hidrodinámicas como son el viento, que también varía con el tiempo y los fenómenos ambientales tales como huracanes o El Niño. En cuanto a factores biológicos, los nutrientes o productores primarios están de igual manera ligados a las masas de agua que los originan y a la entrada de nutrientes debido a fenómenos meteorológicos o actividad biológica de organismos de niveles tróficos superiores.

El Niño y La Niña son fenómenos que repercuten de manera directa a la capa de mezcla y el transporte de materia orgánica. Aunque existen registros de un fenómeno La Niña débil entre los años 2011 y 2012 (la campaña DIPAL-V se realizó en diciembre de 2012), no hay datos del fenómeno de El Niño registrados en la NOAA durante el periodo de estudio tanto de DIPAL-V como de PALEOMAR-I (tabla 4.1). Sin embargo durante el estudio de verano de 2009 por Duran-Campos (2015) se presentó un Niño moderado, lo cual pudo haber afectado la distribución y abundancia de zooplancton y de esta manera diferir de los resultados que se presentan en este trabajo.

Además, con el fin de descartar posibles influencias de los fenómenos El Niño y La Niña en los muestreos del presente trabajo, se revisaron registros de la NOAA de dichos fenómenos. Según los registros el fenómeno El Niño no estuvo presente durante los

muestreos y por lo tanto no afectó la distribución del zooplancton. Mientras tanto se presentó un fenómeno La Niña débil en el muestreo de 2012 pudiendo afectar los valores obtenidos de biomasa. En la figura 4.2 se puede apreciar de manera gráfica la presencia e intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña.

Tabla 4.1. Intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña de 1951-2016 (según, Jan Null, 2017).

El Niño				La Niña		
Débil	Moderado	Fuerte	Muy Fuerte	Débil	Moderado	Fuerte
1951-52	1963-64	1957-58	1982-83	1950-51	1955-56	1973-74
1952-53	1986-87	1965-66	1997-98	1954-55	1970-71	1975-76
1953-54	1987-88	1972-73	2015-16	1964-65	1998-99	1988-89
1958-59	1991-92			1967-68	1999-00	
1968-69	2002-03			1971-72	2007-08	
1969-70	2009-10			1974-75	2010-11	
1976-77				1983-84		
1977-78				1984-85		
1979-80				1995-96		
1994-95				2000-01		
2004-05				2011-12		
2006-07						

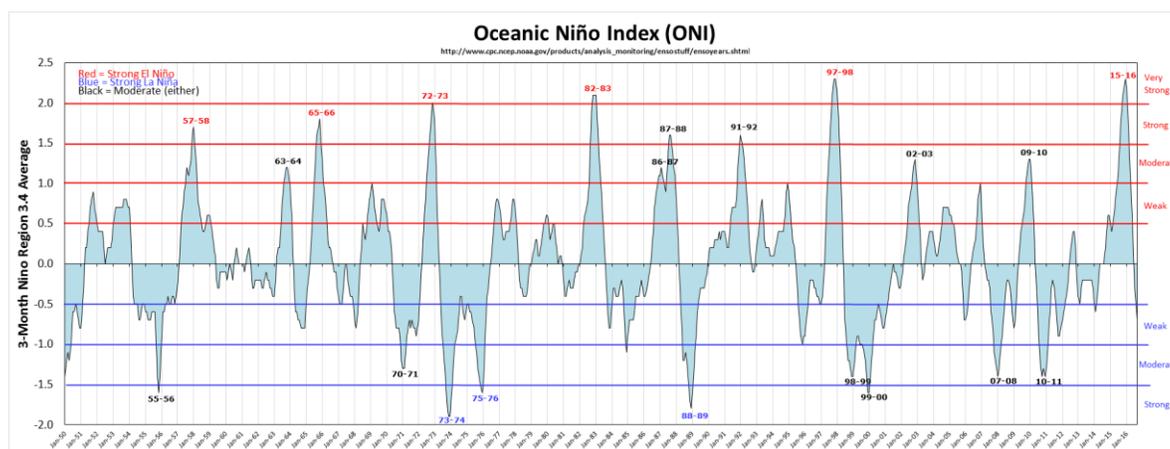


Figura 4.2. Intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña de 1951-2016 (según, Jan Null, 2017).

Tomando en cuenta los resultados obtenidos durante la elaboración de este trabajo y los antecedentes se puede afirmar que la biomasa de zooplancton fue mayor en las zonas con una alta velocidad geostrófica relacionada a giros ciclónicos, y que los valores bajos de biomasa están asociados con giros anticiclónicos, por lo que se puede afirmar una influencia de las estructuras hidrodinámicas con la biomasa zooplanctónica.

CONCLUSIONES

Los vientos predominantes del norte y noreste con intensidad de ~8 m/s, presentes en diciembre de 2012 y noviembre de 2014, generaron en la bahía de La Paz una capa de mezcla de ~50 m de espesor.

En la región sur de la Bahía de la Paz la biomasa de zooplancton fue de ~100 g/100m³, con valores más altos en 2014, respecto a 2012 asociadas a intensas velocidades, a la presencia de altas concentraciones de fosfatos y a la mezcla vertical por viento.

La biomasa de zooplancton en el sur de la bahía de La Paz fue mayor en diciembre de 2012 y noviembre de 2014, respecto a la biomasa reportada en la literatura en verano 2009. La estratificación inhibe el ascenso de nutrientes hacia la capa eufótica.

Al ser importantes barreras físicas y mecanismos de dispersión, las estructuras hidrodinámicas tienen influencia sobre la distribución de la biomasa de zooplancton en la Bahía de La Paz. Esta fue mayor en las zonas con una alta velocidad geostrofica relacionada a giros ciclónicos, así como bajos valores de biomasa asociada a giros anticiclónicos, por lo que se puede afirmar una influencia de las estructuras hidrodinámicas con la biomasa zooplanctónica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguiñiga, S., Sánchez, A., Silverberg, N. 2010. Temporal variations of C, N, $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ in organic matter collected by a sediment trap at Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, SW Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 30: 1692-1700.
- Aldeco-Ramírez, J., Hernández-Becerril, D., Monreal-Gómez, M.A., Salas-de-León, D.A., Signoret, M. 2009. Ocurrencia de un giro anticiclónico, frentes y *Trichodesmium* spp. sobre la región del Cañón de Campeche, Golfo de México. *Ciencias Marinas*, 35 (4): 333-344.
- Biggs, D., Zimmerman, R., Gasca, R., Suarez-Morales, E., Castellanos, I., Leben, R. 1997. Note on plankton and cold-core rings in the Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin*, 95 (2): 369–375.
- 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 (9): 6258- 6268.
- Court, A. 1980. Tropical cyclone effects on California. NOAA *Technical Memorandum* NWS WR 159: 38 p.
- Cruz-Gómez, R., Monreal-Gómez, M.A., Bulgakov, N. 2008. Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*, 33 (10): 741- 746.
- Cruz-Orozco, R., Martínez, N., Mendoza, M. 1996. Batimetría y sedimentos de la Bahía de La Paz, B.C.S. México. *Oceánides*, 11 (1): 21- 27.
- Dickey, T., Nencioli, F., Kuwahara, V., Leonard, C., Black, W., Rii, Y., Bidigare, R., Zhang, Q. 2008. Physical and bio-optical observations of oceanic cyclones west of the island of Hawaii. *Deep Sea Research II*, 55: 1195–1217.
- Douglas, A. y Englehart, P. 1995. An analysis of the starting date for the summer monsoon in western México and southern Arizona. Proceedings of the 20th annual climate diagnostics and prediction workshop. US Department of Commerce, NOAA, Seattle, Washington. 207- 208.

- Durán-Campos, E., Salas-de-León, D.A., Monreal-Gómez, M.A., Aldeco-Ramirez, 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
- Flores-Coto, C. y Zavala-García, F. 1989. Medición de biomasa zooplanctónica. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
- Goldthwait, S. y 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.
- Hausback, B. 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico. *Geology of the Baja California Peninsula*, 39: 219–236.
- Hernández-León, S., Almeida, C., Gómez, M., Torres, S., Montero I., Portillo-Hahnefeld, A. 2001. Zooplankton biomass and indices of feeding and metabolism in island-generated eddies around Gran Canarias. *Journal of Marine Systems*, 30 (2): 51-66.
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le Cossec, A., Monroy, E. 2011. Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan) baseline, nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water Air Soil Pollut*, 218: 517–528.
- Huntley, M., Gonzalez, A., Zhu, Y., Zhou, M., Irigoyen, X. 2000. Zooplankton dynamics in a mesoscale eddy-jet system off California. *Marine Ecology Progress Series*, 201: 165–178.
- Jan Null. 2017. El Niño and La Niña Years and Intensities Based on Oceanic Niño Index (ONI). Golden Gate Weather Services. Recuperado de <http://ggweather.com/enso/oni.htm> el 09/06/2017.
- Jiménez-Illescas A. 1983. Aplicación de un modelo hidrodinámico numérico a la Ensenada de La Paz, B.C.S. *Tesis de Maestría*, CICESE. Ensenada, B.C., México. 109 p.
- Jiménez-Illescas, A. 1996. Análisis de procesos barotrópicos y baroclínicos en la Bahía de La Paz, BCS. *Tesis doctoral*. Universidad Nacional Autónoma de México, DF. 212 p.
- Jiménez-Illescas, A., Obeso-Nieblas, M., Salas-de-León, D.A. 1997. Oceanografía física de la Bahía de la Paz, B.C.S. En: Urban, R.J., Ramírez, M. Eds. *La Bahía de la Paz*,

- investigación y conservación*. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS, La Paz, B.C.S., México. 31–41.
- Jiménez-Illescas, A., Marinone, S., Parés-Sierra, A. 2005. Efectos de la variabilidad espacial y temporal del viento sobre la circulación en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 31: 357–368.
- Mann, K. y Lazier, J. 1991. Dynamics of Marine Ecosystems. *Blackwell Scientific Publications*, Oxford. 512 p.
- McGillicuddy, Jr. D.J., Robinson, A., Siegel, D., Jannasch, H., Johnsonk, R., Dickey, T., McNeil, J., Michaels, A., Knapp, A. 1998. Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Nature*, 394: 263–265.
- McGillicuddy, Jr. D.J., Anderson, L., Bates, N., Bibby, T., Buesseler, K., Carlson, C., Davis, C., Ewart, C., Falkowski, P., Goldtwaith, S., Hansell, D., Jenkins, W., Johnson, R., Kosnyrev, V., Ledwell, J., Li, Q., Siegel, D., Steinberg, D. 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 Science*, 8: 125–159.
- Mojica-Ramírez, 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*. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. 79 p.
- 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.
- Morales, C., Hormazabal, S., Correa-Ramirez, 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.
- Nava-Sánchez, E. 1997. Modern fan delta of the west coast of the Gulf of California, México. PhD, University Southern California, 229 p.
- Obeso-Nieblas, M. 2003. Variabilidad espaciotemporal de las condiciones oceanográficas de la Bahía de La Paz, BCS, México. *Tesis doctoral*. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas IPN, La Paz, México. 337 p.
- Obeso-Nieblas, M., Shirasago, B., Sánchez-Velasco, L., Gaviño-Rodríguez, J. 2004. Hydrographic variability in Bahía de La Paz, BCS, México, during the 1997-1998 El Niño. *Deep Sea Research II*, 51: 689–710.
- Olson, D. 1991. Rings in the ocean. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 19: 283–311.
- Omori, M., Ikeda, T. 1984. *Methods in marine zooplankton ecology*. John Wiley and Sons, Inc. New York. 332 p.
- Pond, S. y Pickard, G.L. 1983. *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press, Oxford. 329 p.
- 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-Velasco, L., Jiménez-Rosenberg, S., Shirasago, B., Obeso-Nieblas, M. 2004. Distribution and abundance of fish larvae in Bahía de la Paz (Gulf of California) and their relation to hydrographic variability during summer (1997- 1998). *Deep-Sea Research II*, 51: 723–737.
- Shore, J., Stacey, M. W., Wright, D. G. 2008. Sources of eddy energy simulated by a model of the northeast Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 38: 2283–2293.
- Silverberg, N., Shumilin, E., Aguirre-Bahena, F., Rodríguez-Castañeda, A., Sapozhnikov, D. 2007. The impact of hurricanes on sedimenting particulate matter in the semi-arid 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., McGillicuddy, Jr., D.J. Buesseler, K. 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.
- Wickstead, J. 1976. Marine Zooplankton. *The Institute of Biology's Studies in Biology* London, England, 62: 59 p.