

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**PROCESOS DE INTERCAMBIO ENTRE LA BAHÍA TODOS
SANTOS Y EL OCÉANO ADYACENTE**

TESIS

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS
NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA
COSTERA**

PRESENTA:

STEPHANIE ANDREA GONZALEZ MONTES

ENSENADA, B.C., MÉXICO

2017

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

**PROCESOS DE INTERCAMBIO ENTRE LA BAHÍA TODOS SANTOS Y EL
OCÉANO ADYACENTE**

TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

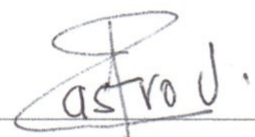
PRESENTA:

STEPHANIE ANDREA GONZALEZ MONTES

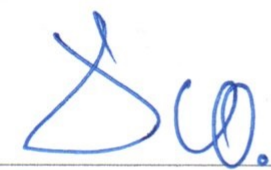
APROBADA POR:



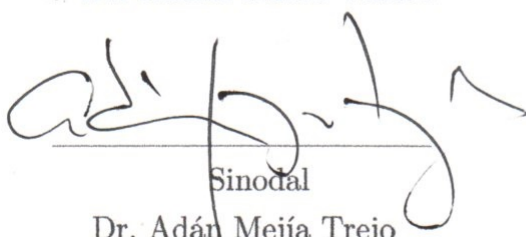
Director de Tesis
Dr. Xavier Flores Vidal



Sinodal
Dr. Rubén Castro Valdez



Sinodal
Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa



Sinodal
Dr. Adán Mejía Trejo



Sinodal
Dr. John Largier

Resumen

La Bahía Todos Santos se localiza en la costa occidental de la península de Baja California, se encuentra limitada al noroeste por San Miguel, al suroeste por Punta Banda y al Oeste por las Islas Todos Santos, las cuales dividen la conexión de la bahía en dos bocas denominadas boca norte con un ancho de 11 *km* y profundidades menores de ≈ 50 *m* y boca sur con un ancho de 5 *km* y profundidad máxima de ≈ 450 *m*. Con el objetivo de caracterizar los flujos de entrada y salida de agua en la bahía, se realizaron cuatro campañas de medición, dos en 2016 y dos en 2017, de estas se obtuvieron perfiles verticales de temperatura, salinidad y densidad, además de perfiles de velocidad de la corriente obtenidos mediante arrastres de ADCP. Adicionalmente, se analizaron datos de radio escaterómetros (HFR) que permitieron complementar el esquema de circulación. Los resultados permiten proponer un esquema de circulación para cada boca: la boca norte presentó una circulación en dos capas, la primera (capa superficial) hasta ≈ 10 *m* de profundidad, con un flujo hacia el interior de la bahía por encima de la termoclina que pareció estar forzado por el viento, el cual aparentemente “apila” agua hacia el límite este de la bahía, lo que podría generar una inclinación del nivel de mar que fuerza la segunda capa (por el fondo) compuesta de una contra corriente hacia el exterior de la bahía. En la boca sur, el esquema de intercambio fue más complejo, regido por tres capas; una muy superficial (≈ 1 *m*) aparentemente forzada por el viento, otra sub-superficial (centrada en ≈ 10 *m*) asociada a un flujo de entrada y una tercera capa por debajo de los 15 *m* asociada a un flujo de salida. La diferencia del patrón de intercambio en las dos bocas de la bahía pudiera ser explicado si se toma en cuenta que en la boca norte la dirección predominante del viento (viento del noroeste), se encuentra alineado con el gradiente de presión impuesto por el mismo viento (apilamiento de agua). Mientras que en la boca sur, el esfuerzo del viento no se alinea con el gradiente de presión, esto podría explicar la presencia de una tercera capa muy superficial únicamente detectada por los radio escaterómetros (HFR).

Palabras clave: Bahía Todos Santos, circulación baroclínica, flujos de intercambio.

Abstract

Todos Santos Bay is located on the western coast of the Baja California Peninsula, is bordered to the northwest by Punta San Miguel, to the southwest by Punta Banda, and to the west by the Todos Santos Islands, which divide the entrance of the bay in: north entrance with a width of 11 *km* and average depth of ≈ 50 *m* and south entrance with a width of 5 *km* and maximum depth of ≈ 450 *m*. In order to characterize the inflows and outflows of the bay, four field campaigns were carried out, two in 2016 and two in 2017. Temperature, salinity and density profiles were obtained, along with current velocity profiles obtained with a towed ADCP. Additionally, radio scatterometer data (HFR) were analyzed to complement the circulation scheme. The results allow us to propose different schemes for each entrance: the north entrance has a circulation in two layers, the first layer up to ≈ 10 *m* depth, with a inflow into the bay, apparently forced by the wind, which could modify sea level within the bay, piling up water on the east limit, which could generate a sea level tilt that would force a countercurrent layer through the bottom. In the south entrance the exchange scheme was more complex, composed of three layers; a very superficial layer (≈ 1 *m*) apparently forced by the wind, another sub-surface (centering at ≈ 10 *m*) associated to an inflow and a third layer below 15 *m* associated to an outflow. The difference of the exchange pattern in the two entrances of the bay could be explained because of in the north entrance the predominant direction of the wind (northwest) is aligned with the pressure gradient imposed by the wind (sea level upset). While in the south entrance, the wind stress does not align with the pressure gradient, this could explain the presence of a very superficial third layer only detected by the radio scatterometer (HFR).

Keywords: Bahía Todos Santos, baroclinic circulation, exchange flows.

Agradecimientos

A Dios quien ha forjado mi camino y me permitió cumplir con éxito otro logro académico, por darme la fortaleza que se requiere para estar lejos de las personas amadas y poner en mi camino a personas valiosas que me enseñaron y acompañaron durante este proceso.

A mi director de tesis Dr. Xavier Flores Vidal por su confianza, asesoría, apoyo y dirección a largo de estos años.

A los miembros del comité Dr. Rubén Castro, Dr. Francisco Delgadillo por sus comentarios y sugerencias, al Dr. John Largier (UC-Davis) por sus asesorías y aceptarme durante mi estancia en *Bodega Marine Laboratory* y al Dr. Adán Mejía por sus enseñanzas e incondicional apoyo.

A todo el equipo de Radlab por su apoyo durante las campañas de medición y su amistad durante mi estancia en México.

A mis padres y hermana que a pesar de la distancia siempre me han brindado su apoyo incondicional, por su amor y motivación para hacer de esto realidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo económico recibido bajo la modalidad de beca de estudios de posgrado y una beca de apoyo mixto para la realización de una estancia en el extranjero.

El financiamiento parcial para la realización de este trabajo se obtuvo mediante: El Observatorio Oceanográfico Regional Costero [OORCO] del IIO-UABC. Proyecto SEP “Procesos de intercambio de propiedades en dos sistemas lagunares de Baja California, ref:11157”. El cuerpo académico de “Oceanografía operacional” ref: UABC-CA-249. Programa “Mediciones oceanográficas en tiempo real ref: 11307”.

Contenido

Resumen	V
Abstract	VI
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	XVI
1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	5
1.1.1. Objetivos específicos	6
1.2. Área de estudio	6
Introducción	1
2. Metodología	9
2.1. Perfiles verticales de CTD (Conductivity, Temperature, Depth)	11
2.2. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)	13
2.3. Radio escaterómetros	19
2.4. Datos meteorológicos	21
3. Resultados	23
3.1. Meteorología	23
3.2. Dinámica de intercambio de la bahía con el océano adyacente	29
3.2.1. Intercambio de agua entre la boca norte y el océano adyacente	29
3.2.2. Intercambio de agua entre la boca sur y el océano adyacente .	53
4. Discusiones	74
5. Conclusiones	78
Referencias	79

Lista de figuras

1. Área de estudio en la Bahía Todos Santos, los contornos de color representan las isóbatas expresada en metros. 7
2. Bahía Todos Santos, los contornos de color representan las isóbatas expresada en metros. Los puntos azules corresponden a la posición de las estaciones donde se realizaron mediciones de perfiles verticales de temperatura, salinidad y densidad. 10
3. Parámetros de medición del ADCP, en la vertical se muestra las celdas, NC corresponde al número de celdas, CS indica el tamaño de la celda y BD establece la celda de blanqueo en la cual no se obtienen datos de las corrientes. 14
4. ADCP remolcado por la embarcación. En el panel a) (izquierdo) se observa el ADCP con su base instalado en el estribor de la embarcación. En el panel b) (derecho) se observa el ADCP sumergido en el agua realizando mediciones en la columna de agua 15
5. Ejemplo de la malla de medición del ADCP. Las dimensiones verticales (z) corresponden a la profundidad, las dimensiones horizontales (y) al ancho del transecto (bocas de la bahía), mientras que la dimensión “x” corresponde al tiempo (repeticiones del transecto). Se requirió de un ciclo completo de marea (24 horas) para poder estimar la variabilidad producida por la marea. 17
6. Ejes de coordenadas de las mediciones con el ADCP, los ejes de color negro indican la orientación de las mediciones realizadas a lo largo del transecto marcado por los puntos azules, los ejes de color rojo indican los ejes rotados que permitieron obtener las corrientes a lo largo y a través del transecto. 18
7. Ubicación de las estaciones de radar usadas para obtener las corrientes totales en la Bahía Todos Santos. 20
8. Antenas de recepción instaladas en unos de los sitios de radar usado para obtener las corrientes totales en la Bahía Todos Santos. 21

9.	<i>Ubicación de la estación meteorológicas instalada en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la UABC (IIO).</i>	22
10.	<i>Velocidad del viento (m/s) para los cuatro periodos de muestreo cada uno de ellos de tres días de duración. El eje horizontal corresponde al tiempo en horas (referenciado en UTC), abarcando 72 horas de datos.</i>	25
11.	<i>Dirección de donde proviene el viento (grados norte) para los cuatro periodos de muestreo cada uno de ellos de tres días de duración. El eje horizontal corresponde al tiempo en horas (referenciado en UTC), abarcando 72 horas de datos.</i>	26
12.	<i>Diagrama de astillas del viento para los cuatro periodos de muestreo cada uno de ellos de tres días de duración. Las flechas representan la dirección a donde va el viento. El eje horizontal corresponde al tiempo en horas (referenciado en UTC), abarcando 72 horas de datos.</i>	27
13.	<i>Temperatura (°C) para los cuatro periodos de muestreo cada uno de ellos de tres días de duración. El eje horizontal corresponde al tiempo en horas, abarcando 72 horas de datos.</i>	28
14.	<i>Contornos para la boca norte de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de bajamar en marea muerta febrero de 2016 y 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el muestreo. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.</i>	31
15.	<i>Contornos para la boca norte de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de pleamar en marea muerta febrero de 2016 y 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el muestreo. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.</i>	32

16. *Contornos para la boca norte de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de pleamar en marea viva septiembre de 2016 y marzo de 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.* 35
17. *Contornos para la boca norte de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de bajamar en marea viva septiembre de 2016 y marzo de 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.* 36
18. *Temperatura promedio para cada periodo muestreado de la boca norte, el cual abarcó 24 horas de muestreo. Los paneles superiores corresponden a muestreos en mareas muertas (febrero de 2016 y febrero de 2017) y los paneles inferiores a mareas vivas (septiembre de 2016 y marzo de 2017). El lado izquierdo en el eje horizontal (eje de distancia de las figuras), corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.* 39
19. *Salinidad promedio para cada periodo muestreado de la boca norte, el cual abarcó 24 horas de muestreo. Los paneles superiores corresponden a muestreos en mareas muertas (febrero de 2016 y febrero de 2017) y los paneles inferiores a mareas vivas (septiembre de 2016 y marzo de 2017). El lado izquierdo en el eje horizontal (eje de distancia de las figuras), corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.* 40

20. *Corrientes residuales (de las 24 horas de muestreo) a través del transecto, medidas con el ADCP en la boca norte de la bahía. El panel superior y el panel inferior corresponden a periodos de mareas vivas, el panel del medio a mareas muertas. El lado izquierdo en el eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos. Los valores negativos (contornos azules) corresponden a agua saliendo de la bahía y valores positivos (contornos rojos) corresponde a flujos entrando. 43*
21. *Perfiles verticales de temperatura correspondientes al muestreo en mareas vivas de septiembre de 2016 para la boca norte, el panel **a**) corresponde al periodo de marea, con color azul bajamar y con color rojo pleamar. El panel **b**) representa la magnitud y dirección viento, la flecha de color verde es la escala de magnitud. Los tres paneles siguientes corresponden a la temperatura para tres profundidades diferentes (2, 9 y 22 metros, paneles **c**, **d** y **e** respectivamente) con sus vectores de dirección de las corrientes (flechas azules), los puntos de color azul indican la posición espacial y temporal de los transectos medidos con el ADCP (origen de las flechas). En el eje de distancia el cero corresponde a San Miguel y el máximo valor a las Islas Todos Santos. 46*

22. *Perfiles verticales de temperatura correspondientes al muestreo en mareas vivas de marzo de 2017 para la boca norte, el panel **a)** corresponde al periodo de marea, con color azul bajamar y con color rojo pleamar. El panel **b)** representa la magnitud y dirección viento, la flecha de color verde es la escala de magnitud. Los tres paneles siguientes corresponden a la temperatura para tres profundidades diferentes (2, 9 y 22 metros, paneles **c**, **d** y **e** respectivamente) con sus vectores de dirección de las corrientes (flechas azules), los puntos de color azul indican la posición espacial y temporal de los transectos medidos con el ADCP (origen de las flechas). En el eje de distancia el cero corresponde a San Miguel y el máximo valor a las Islas Todos Santos. 47*
23. *Diagrama representativo de la magnitud y dirección del viento, medidos a bordo de la embarcación a lo largo del transecto de la boca norte. En color rojo, se observa la escala de magnitud del viento. . . . 49*
24. *Diagramas de Hovmöller correspondientes a la boca norte. El panel a) indica las condiciones de la marea a línea de color rojo corresponde a periodos de pleamar y el color azul a bajamar y el panel b) corresponde al viento para el periodo de tiempo presentado. El panel c) corresponde a los datos obtenidos con los radio escaterómetros y el panel d) a los datos del ADCP. Las líneas blancas horizontales en el panel d) (ADCP) indican la posición espacio-temporal de los transectos realizados. La mínima distancia corresponde a San Miguel y el valor máximo a las Islas Todos Santos. Los valores negativos (contornos azules) corresponden a agua saliendo de la bahía y valores positivos (contornos rojos) corresponde a flujos entrando. 51*
25. *Promedio de corrientes en (m/s), con color rojo el promedio correspondiente al ADCP y de color azul a los radio escaterómetros. En el eje horizontal la mínima distancia corresponde a San Miguel y el valor máximo a las Islas Todos Santos. 52*

26.	<i>Contornos para la boca sur de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de pleamar en marea muerta febrero de 2016 y 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.</i>	55
27.	<i>Contornos para la boca sur de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de bajamar en marea muerta febrero de 2016 y 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.</i>	56
28.	<i>Contornos para la boca sur de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de pleamar en marea viva septiembre de 2016 y marzo de 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.</i>	58
29.	<i>Contornos para la boca sur de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de bajamar en marea viva septiembre de 2016 y marzo de 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.</i>	59
30.	<i>Temperatura promedio para cada periodo muestreado de la boca sur. El lado izquierdo en el eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.</i>	62

31. *Salinidad promedio para cada periodo muestreado de la boca norte. El lado izquierdo en el eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.* 63
32. *Corrientes residuales (de las 24 horas de muestreo) a través del transecto, medidas con el ADCP en la boca sur de la bahía. El panel superior y el panel inferior corresponden a periodos de mareas vivas, el panel del medio a mareas muertas. El lado izquierdo en el eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda. Los valores negativos (contornos azules) corresponden a agua saliendo de la bahía y valores positivos (contornos rojos) corresponde a flujos entrando.* 65
33. *Perfiles verticales de temperatura correspondientes al muestreo en mareas vivas de septiembre de 2016 para la boca sur, el panel **a**) corresponde al periodo de marea, el panel **b**) representa la magnitud y dirección viento, los paneles **c**, **d** y **e** presentan los valores de temperatura para tres profundidades (2, 9 y 22 m respectivamente) con sus vectores de dirección de las corrientes (flechas azules), los puntos de color azul indican la posición espacial y temporal de los transectos medidos con el ADCP (origen de las flechas). En el eje de distancia el cero corresponde a las Islas Todos Santos y el máximo valor a Punta Banda.* 67
34. *Perfiles verticales de temperatura correspondientes al muestreo en mareas vivas de marzo de 2017 para la boca norte, el panel **a**) corresponde al periodo de marea, el panel **b**) representa la magnitud y dirección viento, los paneles **c**, **d** y **e** presentan los valores de temperatura para tres profundidades (2, 9 y 22 m respectivamente) con sus vectores de dirección de las corrientes (flechas rojas), los puntos de color rojo indican la posición espacial y temporal de los transectos medidos con el ADCP (origen de las flechas). En el eje de distancia el cero corresponde a las Islas Todos Santos y el máximo valor a Punta Banda.* 68

35. *Diagrama representativo de la magnitud y dirección del viento, medidos a bordo de la embarcación a lo largo del transecto de la boca sur. En color rojo, se observa la escala de magnitud del viento.* 70
36. *Diagramas de Hovmöller correspondientes a la boca sur. El panel a) indica las condiciones de la marea a línea de color rojo corresponde a periodos de pleamar y el color azul a bajamar y el panel b) corresponde al viento para el periodo de tiempo presentado. El panel c) corresponde a los datos obtenidos con los radio escaterómetros y el panel d) a los datos del ADCP. Las líneas blancas horizontales en el panel d) (ADCP) indican la posición espacio-temporal de los transectos realizados. La mínima distancia corresponde a San Miguel y el valor máximo a las Islas Todos Santos. Los valores negativos (contornos azules) corresponden a agua saliendo de la bahía y valores positivos (contornos rojos) corresponde a flujos entrando.* 72
37. *Promedio de corrientes en (m/s), con color rojo el promedio correspondiente al ADCP y de color azul a los radio escaterómetros. En el eje horizontal la mínima distancia corresponde a a las Islas Todos Santos y el valor máximo a Punta Banda.* 73

Lista de tablas

1.	<i>Periodos muestreados durante las campañas de medición.</i>	9
2.	<i>Parámetros de perfilación del CTD usado en las campañas de medición.</i>	11
3.	<i>Parámetros de perfilación de los ADCP usados en las campañas de medición.</i>	16
4.	<i>Análisis de las variables meteorológicas medidas.</i>	24

1 Introducción

La Bahía de Todos Santos (BTS), se encuentra dentro del Sistema de la Corriente de Baja California (SCC), el cual lo conforman la Corriente de California (CC) que es un flujo ancho ($\approx 300 \text{ km}$) y superficial ($0 - 300 \text{ m}$) que viaja hacia el ecuador y transporta principalmente agua fría, de baja salinidad y con alto contenido de oxígeno disuelto. Frente a Baja California la CC se extiende hasta 200 km fuera de la costa. Con dirección hacia el polo se encuentran la Sub-Corriente de California (CU) que tiene un flujo sub-superficial ($150 - 350 \text{ m}$) a lo largo del talud continental y la Contra Corriente de California (CCC) que es costera, y con una estacionalidad intermitente, (Lynn y Simpson, 1987; Garfield et al., 1999).

A partir de análisis del comportamiento en el ciclo de nutrientes, se encontró que los campos espacial y temporal de los nutrientes inorgánicos disueltos (PO_4 y NO_3) frente a Baja California se vieron fuertemente influenciados por la variabilidad en el flujo de la Corriente de California, por eventos de gran escala temporal y espacial (ciclos El Niño-La Niña) y por procesos de mesoescala, principalmente surgencias costeras, remolinos ciclónicos y anticiclónicos que afectaron la región durante 1997–2005, (Gaxiola-Castro et al., 2010).

Cerca de la costa de la península de Baja California se presentan dos mecanismos en que el viento puede fomentar la alta productividad en el océano. El primero, son las surgencias costeras ocasionadas por el transporte de Ekman debido a la componente del viento paralelo a la costa y el segundo es el efecto del rotacional del esfuerzo del viento, el cual si es positivo ocasionará bombeo de Ekman (transporte de aguas subsuperficiales a la superficie), contribuyendo a la intensidad de las surgencias (Castro y Martínez, 2010).

La variabilidad y distribución de los vientos en la región frente a Baja California, dependen de la posición del Centro de Alta Presión del Pacífico Norte, el cual tiene variaciones estacionales (Castro y Martínez, 2010). Los vientos en el norte de Baja

California son paralelos a la costa debido a la presencia de cadena de montañas. Por tal razón, la dirección predominante del viento durante el año en la bahía es la del noroeste (49%), en especial en los meses cálidos, con velocidades típicas de 2.5 a 5 m/s , (Alvarez Sánchez, 1977). Por otra parte, los máximos valores de esfuerzo del viento favorables a las surgencias en el norte de la península y el sur ocurren en primavera y verano, siendo más persistentes en magnitud durante la primavera, (Pérez Bruniús et al., 2007).

Las características del agua dentro de la BTS se encuentran influenciadas por la CC, lo que contribuye en gran medida a la variabilidad oceanográfica de la zona (Argote Espinoza et al., 1991). Las propiedades físicas del agua en la BTS presentan cambios estacionales, ? encontró que dichos cambios se derivan de procesos que ocurren en el océano abierto, por lo que el agua presente en la zona está relacionada con la dinámica del sistema de la Corriente de California.

En la zona costera de la Bahía Todos Santos existe evidencia de fenómenos de surgencia en las épocas de primavera y verano al norte de la bahía. Adicionalmente, aguas cálidas pueden ser encontradas dentro de la bahía, lo cual sugiere que la bahía pudiera comportarse como una trampa de surgencias (Calva Chávez, 2014). Otros autores como Delgadillo-Hinojosa et al. (2015) también han encontrado aguas dentro de la bahía con temperaturas de $(17.74 \pm 0.42 \text{ }^{\circ}\text{C})$, estas fueron en promedio más calientes que las aguas del Pacífico adyacentes $(14.67 \pm 0.52 \text{ }^{\circ}\text{C})$ lo que indica nuevamente la naturaleza de retención de la circulación en la BTS, también encontraron, que existe un desacoplamiento de los ciclos de Cd y PO_4 dentro de la BTS durante la temporada de afloramiento, que es causada por una intensificación de la actividad biológica asociada con la retención de agua en el interior de la bahía. Las concentraciones de Cd y PO_4 en la bahía fueron aproximadamente 50 % menores a los de la zona oceánica adyacente.

En el ámbito biológico, Vivas Téllez (2015) usó un modelo lagrangiano tridimensional para calcular las trayectorias de partículas, es decir, calculó la posición de

cada partícula a partir del campo Euleriano de velocidad tridimensional. A partir de esto, identificó 2 patrones de dispersión de partículas en la BTS, en el primero, detectó partículas que provienen de regiones al norte de la BTS y en el segundo de regiones al oeste de la plataforma continental.

Algunos de los estudios realizados en la bahía, han usado datos de temperatura, salinidad y densidad para analizar las principales variaciones hidrográficas en la BTS. Mancilla Peraza y Martínez García (1991) a través de mediciones de 5 estaciones de las variables mencionadas, determinaron en sus análisis que los procesos que más afectan la variabilidad de las características del agua de mar en la BTS fueron los eventos anuales de surgencia, el calentamiento y enfriamiento estacional, y la advección de las aguas del exterior.

En cuanto a la circulación interna de la bahía se ha establecido la existencia de una circulación superficial anticiclónica en la parte norte y ciclónica en la parte sur. En el estudio realizado por Argote Espinoza et al. (1991), se sugiere la posibilidad de una entrada de agua por la parte sur, siguiendo un flujo paralelo a la costa de Punta Banda hasta salir hacia el Oeste por la parte media de la bahía.

Adicionalmente, Mateos et al. (2009) utilizó un modelo tridimensional y baroclínico que le permitió observar que las variaciones de la circulación exterior de la BTS modifican la circulación interna de esta. Reportó que los remolinos encontrados en la BTS se encuentran modulados por el transporte en la boca norte de la bahía, así cuando este es débil el remolino anticiclónico generado cubre parte de la región interna. Cuando el transporte aumenta el remolino se divide en dos uno anticiclónico al norte de la bahía y otro ciclónico al sur, esto ocasionado por la geometría de la BTS.

En la aplicación de un modelo forzado con viento, flujo de calor y condiciones de frontera abierta, Mateos Farfán (2010), determinó que la mayor parte del flujo que entra a la BTS por la boca norte sale por la boca sur, para las capas superficiales no

se aprecia que la corriente externa tenga influencia en la región interna de la BTS. Por otra parte, la estacionalidad del esfuerzo del viento y del flujo de calor influye en la circulación dentro de la BTS modificando la circulación en las bocas de la bahía.

Zertuche Chanes (2013) usó un modelo numérico para simular de manera tridimensional la circulación de la BTS, y encontró un flujo de agua que sale por la boca norte durante bajamar cercano a las costas de San Miguel. Para la boca sur predominó una salida de agua por Punta Banda. De manera general, los flujos de la boca sur fueron tenues en marea muerta, mientras que en periodos de marea viva el flujo de salida se inclinó hacia la parte este del cañón permitiendo así un flujo de salida en la parte oeste de la boca.

El modelo numérico oceánico conocido como ROMS fue implementado por Rivas et al. (2007), con experimentos numéricos durante primavera de 2007, con lo que establecieron que la mayoría de aguas que provienen de mar abierto son introducidas dentro de la BTS. Pocos estudios han tratado de determinar las corrientes de entrada y salida para la Bahía de Todos Santos. Miranda-Bojórquez (2012) encontró una relación débil entre las corrientes internas y externas a la bahía con el esfuerzo del viento local, lo que sugiere que los patrones en la Bahía de Todos Santos se encuentran dominados por otros efectos ajenos al viento. Adicionalmente, se reportó un patrón de corrientes medias para las dos entradas de la bahía donde se evidencia que el agua ingresa por la entrada norte y sale por la sección del cañón (boca sur).

Reyes y Pares (1983) utilizaron un arreglo de cuatro estaciones meteorológicas en la BTS y aplicaron métodos de componentes principales para estudiar la circulación del viento superficial a una escala local dentro de la Bahía de Todos Santos, encontraron vientos más intensos y variables en la Isla de Todos Santos, además de una dependencia de la dirección del viento con la orientación de la línea de costa.

Partiendo de la existencia de dicha relación entre la velocidad del viento y la

velocidad de las corrientes Argote Espinoza et al. (1991) usó un modelo numérico barotrópico bidimensional, a partir del cual estableció que las corrientes dentro de la BTS son inducidas principalmente por el viento, mientras que las corrientes generadas por la marea tienen poca influencia en la circulación dentro de la bahía.

Con datos de cuatro estaciones meteorológicas instaladas dentro de la bahía Flores Vidal et al. (2015) estudiaron la influencia del campo de viento sinóptico sobre las corrientes superficiales de la BTS, mediante esto establecieron la importancia de la variabilidad de escala fina del campo de viento dentro de la BTS, dado que la variabilidad diurna incrementaba en la medida que la estación se encontraba al interior de la bahía. Además, en el mismo trabajo se muestran resultados importantes donde la circulación superficial presenta una varianza explicada por la marea, lo cual pudiera jugar un papel importante dentro de la bahía y no ser despreciada como se ha abordado por otros autores.

Cabe destacar que la mayoría de estudios han usado como herramienta principal aplicación de modelos numéricos para explicar las corrientes superficiales y la circulación en la BTS. Los estudios observacionales son poco comunes y precisamente debido a la falta de mediciones los mismos estudios numéricos carecen de condiciones de frontera y condiciones iniciales realistas. Adicionalmente, la variabilidad diurna y semidiurna ha sido poco abordada, por lo tanto, estudiar las escalas espaciales y temporales (de decenas de metros y horas) que pudieran generar las interacciones entre la Contra Corriente de California y la BTS, requiere atención.

1.1 Objetivo General

Estudiar los flujos de intercambio entre la Bahía Todos Santos y el océano adyacente.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analizar la variación espacial y estacional de los campos de temperatura, salinidad, densidad y velocidad de las corrientes en las bocas de la bahía.
- Identificar los posibles forzamientos que modulan el intercambio de agua entre la Bahía de Todos Santos y el Océano Pacífico.

Conocer la dinámica de los flujos de intercambio entre un cuerpo de agua y el mar abierto permite interpretar diversos fenómenos, como la permanencia temporal de giros residuales en la circulación interior, patrones de dispersión y tiempo de residencia de contaminantes, además de comprender la concentración de nutrientes dentro del cuerpo de agua. Lo anterior permite generar información que pudiera ser relevante para las áreas de pesca, acuicultura y navegación.

El presente trabajo analiza datos de cuatro campañas de medición (cada una de 24 horas para cada boca de la bahía), donde se obtuvieron perfiles de temperatura, salinidad, densidad y corrientes, con alta resolución espacial, que abarcaron distintos estados de marea. Además, de una base de datos obtenidos con Radio Escaterómetros Doppler de Alta Frecuencia.

En la siguientes secciones se presenta una descripción breve del área de estudio, la metodología utilizada para el análisis de la información, los resultados más relevantes y una discusión que pretende proponer un esquema general de intercambio de agua entre la BTS y el océano adyacente.

1.2 Área de estudio

La Bahía Todos Santos (BTS), se encuentra localizada en la costa occidental de la península de Baja California, entre los $31^{\circ}41'$ y $31^{\circ}56'$ de Latitud Norte y los $116^{\circ}34'$ y $116^{\circ}51'$ de Longitud Oeste, (figura 1). Tiene una superficie aproximada de 230 km^2 y se encuentra limitada al noroeste (NO) por Punta San Miguel, al

suroeste (SO) por Punta Banda y al Oeste (O) por las Islas Todos Santos. Las islas originan que la comunicación con el océano se divida en dos bocas denominadas boca norte con un ancho de 11 km y profundidades menores a 50 m y la boca sur con un ancho de 5 km y profundidad máxima de 450 m (Alvarez Sánchez et al., 1988).

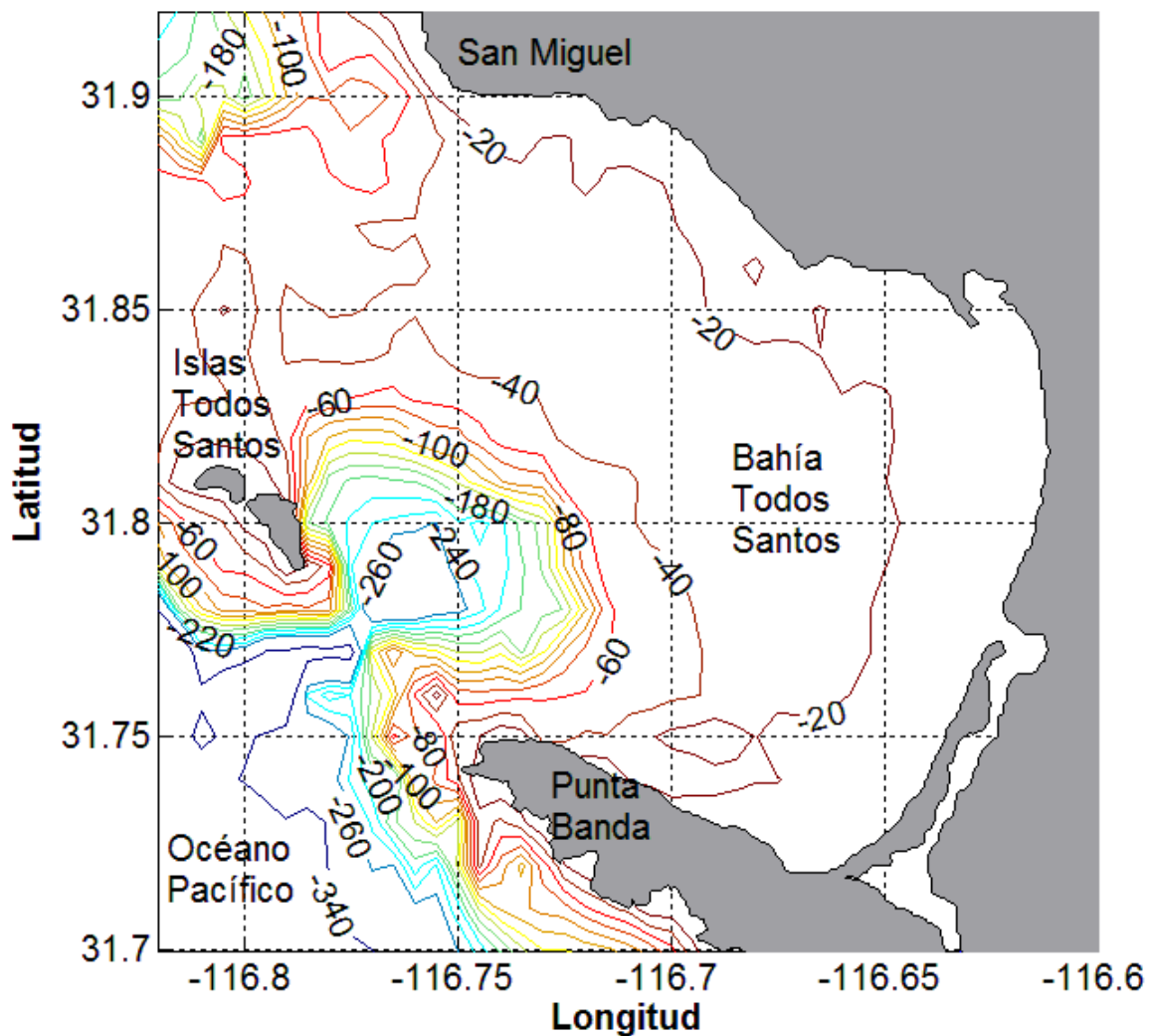


Figura 1: Área de estudio en la Bahía Todos Santos, los contornos de color representan las isóbatas expresada en metros.

La variación estacional de las aguas en la BTS se encuentra influenciada por las surgencias, la variabilidad de vientos del noroeste, el calentamiento y enfriamiento del ciclo estacional y las irregularidades batimétricas y de la línea de costa,

(Mancilla Peraza y Martínez García, 1991). Cabe mencionar que, la morfología de la bahía juega un papel importante en cuanto a modificaciones de la dirección y la magnitud de las corrientes superficiales (Larrañaga, 2013).

La bahía presenta un sistema de brisas bien marcado, con vientos de mar a tierra durante el día, y vientos de menor intensidad de tierra a mar durante la noche (Alvarez Sánchez, 1977; Reyes y Pares, 1983). Entre los meses de octubre y marzo se presentan eventos esporádicos de vientos de tierra hacia el mar de corta duración (2 - 3 días) con baja humedad y alta temperatura denominados vientos Santa Ana, estos vientos suelen modificar el patrón de vientos que típicamente se dirige hacia el sureste, (Castro et al., 2003).

Existe una predominancia de los vientos del noroeste al interior de la bahía, con intensidad de 4 m/s durante los meses cálidos, mientras que en los meses fríos se presentan principalmente días de calma; la BTS se encuentra en una región caracterizada por vientos favorables a surgencias durante todo el año (Calva Chávez, 2014).

Los vientos locales en la bahía son generados principalmente por las características físicas de la región. Sin embargo, los mecanismos generadores del viento local y de alta frecuencia, no actúan de forma homogénea en toda la bahía, (Pavía y Reyes, 1983). Esto se encuentra relacionado con los resultados encontrados por Flores Vidal et al. (2015), quienes sugieren la existencia de un área que no se encuentra influenciada por el viento (área de sombra de viento), la cual se asocia a la cadena de montañas alrededor de la costa norte de la bahía, en esta zona la circulación está dominada por la marea y puede presentar un ligero aumento del nivel del mar local. Por otra parte, el área donde los vientos locales diurnos inciden en las aguas superficiales puede presentar un ligero descenso en el nivel del mar local, lo que origina consecuencias en la circulación tridimensional de la bahía, lo que puede generar remolinos de corta duración (horas) y zonas de flujo y reflujo en escalas espaciales del orden de decenas de metros.

2 Metodología

Para caracterizar los flujos de entrada y salida de la Bahía Todos Santos, es necesario estudiar los mecanismos físicos que intervienen en el patrón de intercambio de agua con la zona oceánica adyacente, para ello, se requiere conocer la estructura transversal de los flujos. Con este objetivo, se realizaron cuatro campañas de medición en periodos de condición de mareas vivas y muertas, dos durante el 2016 y dos en 2017. Los periodos muestreados se muestran en la tabla 1, en las cuatro campañas de medición se realizaron transectos de arrastre ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler por sus siglas en inglés) equipado con sensor de presión, temperatura y bottom track (detecta el fondo) y perfiles verticales de temperatura, salinidad y densidad (CTD, Conductivity, Temperature, Depth por sus siglas en inglés).

Tabla 1: Periodos muestreados durante las campañas de medición.

Mes	Días	Periodo de marea
Febrero 2016	25-27	Marea muerta
Septiembre 2016	13-15	Marea viva
Febrero 2017	1-3	Marea muerta
Marzo 2017	9-12	Marea viva

En cada campaña, se definieron dos etapas de medición correspondientes a la boca norte y la boca sur, para cada boca se establecieron estaciones (figura 2) que definieron las posiciones de las mediciones con el CTD y el recorrido a seguir para el transecto de arrastre con el ADCP. Para cada boca se realizó un recorrido midiendo con el ADCP de manera continua a lo largo del transecto y otro recorrido de regreso únicamente realizando los lances de CTD, esto se repitió las veces necesarias hasta completar 24 horas de muestreo, es decir, durante un ciclo de marea completo.

Con los lances de CTD se obtuvieron perfiles verticales de mediciones de

conductividad, temperatura, densidad y presión, adicionalmente se contó con los perfiles de corriente medidos por el ADCP, que permitieron obtener la velocidad de las corrientes medidas en los transectos realizados para cada boca de la bahía.

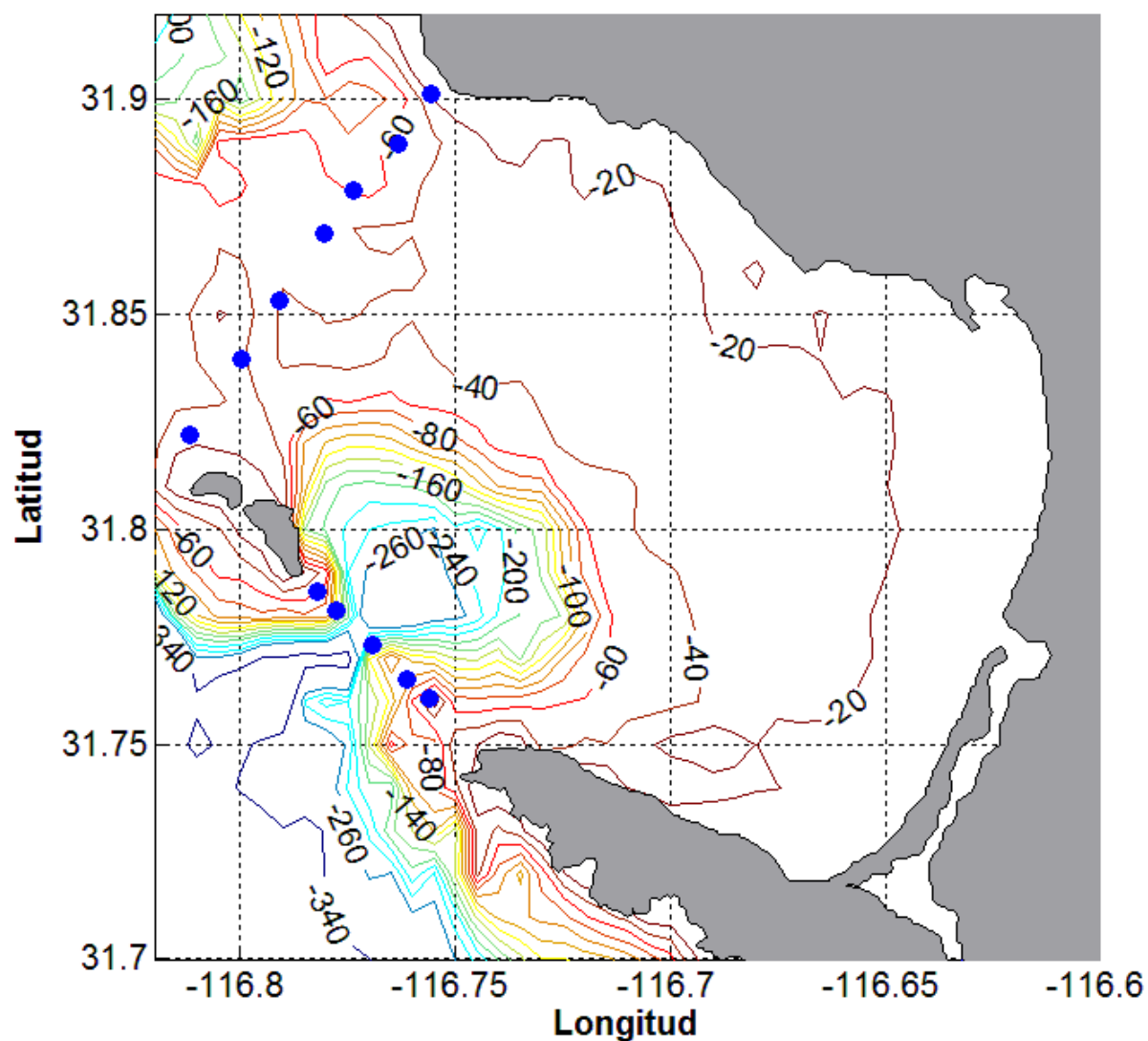


Figura 2: Bahía Todos Santos, los contornos de color representan las isóbatas expresada en metros. Los puntos azules corresponden a la posición de las estaciones donde se realizaron mediciones de perfiles verticales de temperatura, salinidad y densidad.

2.1 Perfiles verticales de CTD (Conductivity, Temperature, Depth)

Los perfiladores conocidos como CTD, son herramientas útiles para conocer las propiedades físicas del agua tales como conductividad, temperatura, densidad y presión. El instrumento realiza un perfil en la vertical del agua, a partir del cual obtiene mediciones continuas en la medida que desciende, esto se conoce como perfiles de CTD.

El CTD usado en las campañas de medición fue un *CastAway-CTD*, el cual tiene un tiempo de respuesta de 5 Hz (5 datos por segundo), resolución espacial fina y alta precisión. Además de estar equipado con un sensor de GPS interno. Las especificaciones de los sensores se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de perfilación del CTD usado en las campañas de medición.

Especificación	Temperatura	Salinidad	Presión	Densidad
Rango	-5 - 45 °C	Hasta 42	0 - 100 dBar	990 - 1035 kg/m ³
Resolución	0.01 °C	0.01	0.01 dBar	0.04 kg * m ³
Precisión	± 0.05 °C	± 0.1	± 0.25 %FS	± 0.02 kg/m ³
Método	Mediciones	PSS-78	Mediciones	EOS80

Los datos obtenidos con el CTD, se procesaron con el objetivo de detectar y eliminar datos atípicos. Para esto se aplicó un filtro de promedios corridos que permitió suavizar los datos, en *MATLAB* se aplicó la función *filtfilt* (ecuación 1), la cual calcula un promedio corrido de “ida y vuelta” que no distorsiona la fase y la magnitud, además de mantener la cantidad de datos originales.

$$\begin{aligned}
 Y(n) = & b(1) * x(n) + b(2) * x(n - 1) + \dots + b(nb + 1) * x(n - nb) \\
 & - a(2) * y(n - 1) - \dots - a(na + 1) * y(n - na).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Los datos correspondientes a la variable de densidad, se reportan, usando la anomalía de densidad, referida como:

$$\sigma(S, T, P) = \rho(S, T, P) - 1000 \text{ kg/m}^3. \quad (2)$$

Los datos de salinidad fueron calibrados, utilizando la ecuación 3, obtenida a partir de mediciones directas de salinidad en muestras de agua recolectadas. Con un total de 127 determinaciones de salinidad, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.79.

$$Y = (0.6352 * X) + 12.348. \quad (3)$$

Donde:

Y=Salinidad medida

X=Salinidad del CTD

Para analizar la variabilidad espacial y temporal de las variables de temperatura, salinidad y densidad, se crearon matrices en tres dimensiones, con información asociada de la ubicación horizontal y vertical de cada muestra en función del tiempo. A partir de la matriz generada, se evaluó el comportamiento espacial y temporal de la circulación termohalina.

Para determinar la profundidad de la termoclina se calculó la mayor variación en el gradiente de temperatura (derivada de la temperatura en función de la profundidad), usando como criterio:

$$\frac{dT}{dz} > 0.17 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}. \quad (4)$$

Considerando los flujos que entraron y salieron del sistema, se calculó el residual, el cual se obtuvo a partir del promedio temporal de las variables observadas en un ciclo de marea, es decir, que el residual no tiene las oscilaciones armónicas de la marea. Sobre la matriz que contiene todos los transectos realizados se calculó el

promedio sobre el tiempo, determinando la distribución promedio para cada una de las variables analizadas. A pesar de que el residual se obtuvo mediante un promedio temporal, arroja los mismos resultados que un análisis armónico donde se ajusta una curva de marea por mínimos cuadrados y se extrae la señal de marea de los datos. De esta forma el residual que aquí se presenta se puede considerar un flujo residual.

2.2 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Los perfiladores de funcionamiento acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés), miden la magnitud y dirección de la corriente a diferentes profundidades. Este perfilador utiliza el efecto Doppler, que es el cambio en la frecuencia del pulso cuando hay un movimiento relativo entre la fuente emisora y el objetivo. Es decir, el perfilador transmite una señal de ondas de sonido (en tres direcciones diferentes) con características conocidas que es dispersada por las partículas en suspensión, y parte de esta señal regresa y es capturada de nuevo por el dispositivo, pero ahora con una frecuencia diferente, causada por el movimiento de las partículas en relación con el instrumento, lo que permite estimar el movimiento real del agua, en función de la distancia a la que se encuentra del instrumento, obteniendo así los perfiles de corriente.

Los parámetros de muestreo son programables e incluyen: tamaño de la celda, número de celdas y ciclos de muestreo. La figura 3 muestra de carácter ilustrativo únicamente el esquema del tamaño y número de celdas del ADCP, durante los muestreos realizados el instrumento estaba volteado hacia abajo y remolcado por la embarcación.

La estrategia utilizada para estas mediciones fue fijar el ADCP en el barco, la figura 4 muestra como fue ensamblado el ADCP en la embarcación, el cual estuvo midiendo de forma continua mientras que el barco iba recorriendo el transecto correspondiente para cada una de las bocas. Durante las campañas de medición se

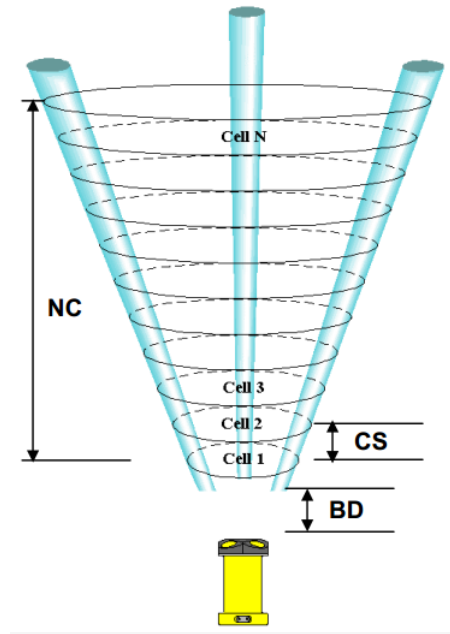
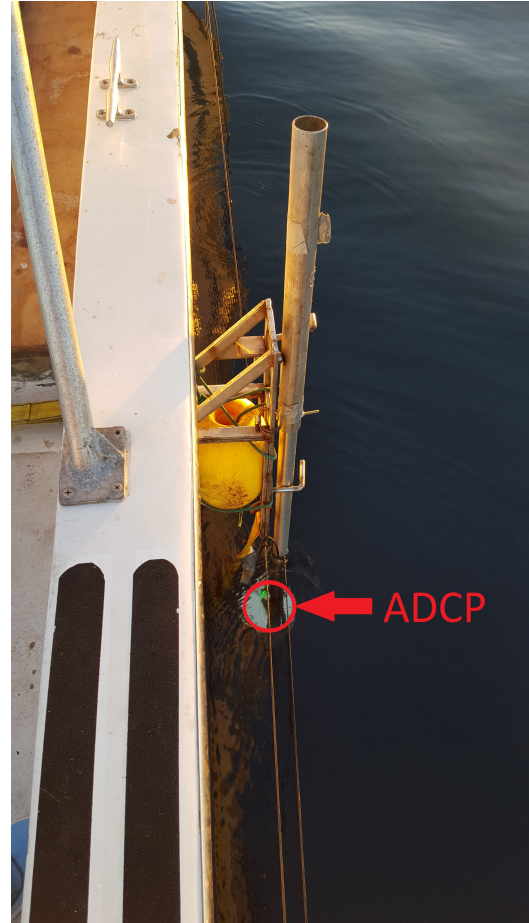


Figura 3: Parámetros de medición del ADCP, en la vertical se muestra las celdas, NC corresponde al número de celdas, CS indica el tamaño de la celda y BD establece la celda de blanqueo en la cual no se obtienen datos de las corrientes.

usaron tres instrumentos (ADCP's) diferentes, las especificaciones de cada uno de los ADCP's se muestra en la tabla 3.



(a)



(b)

Figura 4: ADCP remolcado por la embarcación. En el panel a) (izquierdo) se observa el ADCP con su base instalado en el estribor de la embarcación. En el panel b) (derecho) se observa el ADCP sumergido en el agua realizando mediciones en la columna de agua

Tabla 3: Parámetros de perfilación de los ADCP usados en las campañas de medición.

Parámetros de perfilación	Sontek RiverSurveyor	Sontek Hydro-Surveyor M-9	RiverRay
Frecuencia	1MHz	1MHz ó 3MHz	600kHz
Distancia de blanqueo	0.7m	0.2m	0.2m
Resolución	1mm/s	1mm/s	1mm/s
Tamaño de celda	0.7-4 m	0.02-4 m	0.1m mínimo
Profundidad máxima del Bottom Track	40m	80m	100m

De cada instrumento se obtuvo los datos de la configuración, errores estándar, y velocidades de cada una de las componentes, dichas variables pueden ser leídas en *MATLAB*. Para el análisis de datos se requiere de una matriz tridimensional de la variación temporal y espacial de las corrientes. Así la matriz generada tiene en cada una de sus dimensiones, información asociada a la corriente en toda la extensión (y), profundidad (z) para cada una de las bocas, y la variación temporal (x) (que fue de al menos 24 horas para obtener el ciclo completo de marea). La figura 5 muestra un ejemplo gráfico de las mediciones realizadas con el ADCP a lo largo del transecto.

Una vez extraídos los datos de velocidad (u, v) , se eliminaron los datos marcados como erróneos durante el momento de la medición (banderas de dato dudoso). Las diferencias de resolución espacial obtenidas con cada uno de los instrumentos, fueron homogeneizadas durante el postprocesamiento, generando una malla sintética a la cual se interpolaron todos los datos de las mediciones, a partir de esto se obtuvo los transectos homogeneizados espacialmente. El tamaño de la cada celda de medición (dimensiones verticales) fue de 1 m.

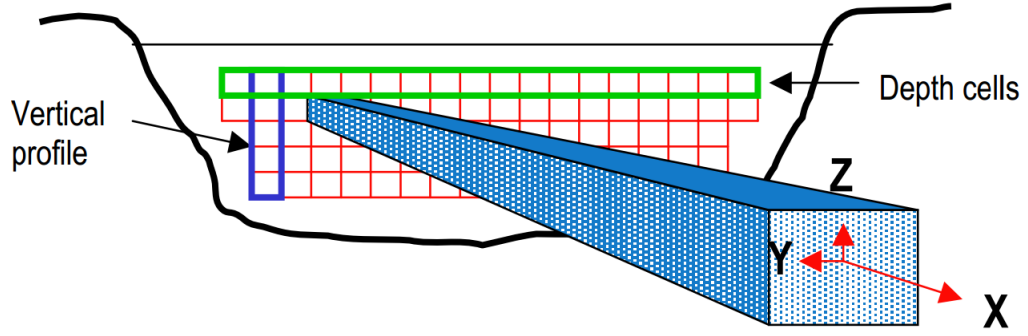


Figura 5: Ejemplo de la malla de medición del ADCP. Las dimensiones verticales (z) corresponden a la profundidad, las dimensiones horizontales (y) al ancho del transecto (bocas de la bahía), mientras que la dimensión “ x ” corresponde al tiempo (repeticiones del transecto). Se requirió de un ciclo completo de marea (24 horas) para poder estimar la variabilidad producida por la marea.

La dirección de las componentes u y v , registradas por el ADCP se encuentran orientadas hacia el norte, dado que la intención del trabajo es analizar las corrientes en las bocas de la bahía, los datos fueron rotados para así generar un sistema de referencia propio y obtener la dirección perpendicular y paralela al transecto medido. La figura 6, muestra la orientación de los ejes originales U y V y cómo estos son rotados U_r y V_r , de tal manera que las corrientes medidas son a lo largo del transecto y a través del transecto.

Se crearon matrices tridimensionales asociadas a las velocidades de las corrientes medidas en el transecto, en función del tiempo. Para obtener el residual, se calculó el promedio temporal de las corrientes observadas en un ciclo de marea, es decir, aquella parte de la corriente que no tiene las oscilaciones armónicas de la marea, (Marinone y Lavín, 1997).

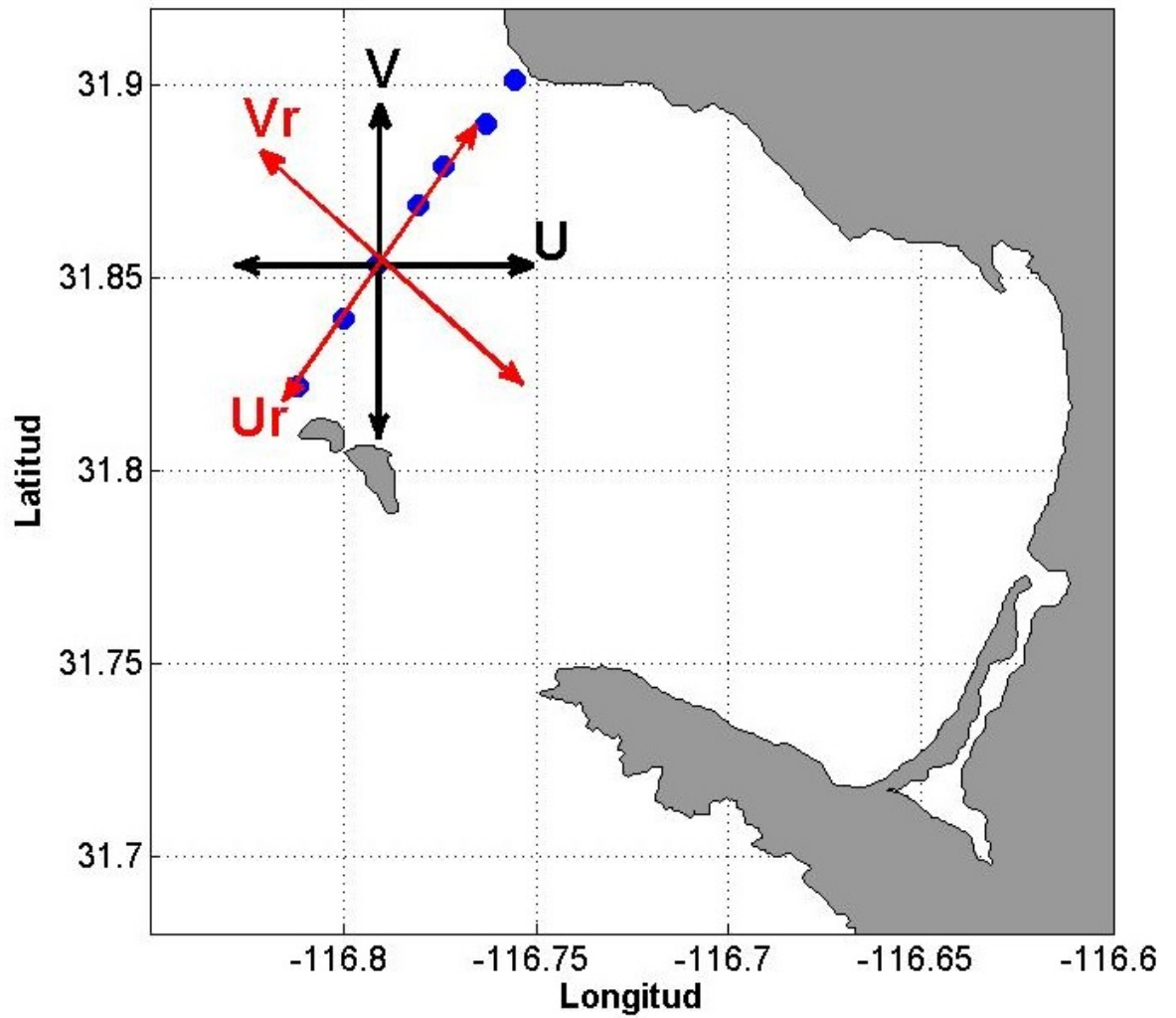


Figura 6: Ejes de coordenadas de las mediciones con el ADCP, los ejes de color negro indican la orientación de las mediciones realizadas a lo largo del transecto marcado por los puntos azules, los ejes de color rojo indican los ejes rotados que permitieron obtener las corrientes a lo largo y a través del transecto.

2.3 Radio escaterómetros

El Observatorio Oceanográfico Regional Costero (OORCo), mantiene en operación una red de radio escaterómetros alrededor de la BTS, que poseen una base de datos de más de 3 años de registros de corrientes superficiales en la bahía. De la base de datos se utilizaron las estaciones de *Conalep*, *UABC (La Quinta)* y *Villarino* (ver figura 7), de la cual se extrajeron las series de tiempo correspondientes a los días de los muestreos, a partir de esto, se obtuvo los datos de corrientes totales.

Los radio escaterómetros Doppler de alta frecuencia (o HFDRS, por sus siglas en inglés) transmiten una señal electromagnética continua hacia el océano con una frecuencia y longitud de onda conocida, (Flores Vidal et al., 2015). Esto permite monitorear las corrientes superficiales con una alta resolución espacio-temporal, para el caso de la bahía la resolución espacio-temporal es de 250 *m* y 30 minutos, respectivamente.

La profundidad efectiva de la medición de los radio escaterómetros, depende de la frecuencia del radar (Flores Vidal, 2015). Si el perfil de corriente es lineal, esto para regiones altamente influenciadas por el viento, (Fernandez, 1993) entre otros autores, han definido la profundidad efectiva de la medición como:

$$Profundidad_{efectiva} = \lambda_{Oceanica} * 0.08. \quad (5)$$

Donde:

$$\lambda_{Oceanica} = \frac{1}{2} * \lambda_{radar}. \quad (6)$$

Los radio escaterómetros usados en la estimación de corrientes superficiales tienen $\lambda_{radar} = 12.5$, a partir de las ecuaciones 5 y 6 se estima que la profundidad efectiva de la medición fue de ≈ 0.5 *m*.

La figura 7 muestra la ubicación de los radio escaterómetros usados para el cálculo de corrientes totales en la BTS (la figura 8 muestra las antenas instaladas de uno de los sitios de radio escaterómetros), con ayuda de estos datos, se realizaron las comparaciones pertinentes con los datos obtenidos con el ADCP, teniendo en cuenta que los radio escaterómetros miden únicamente la capa superficial las comparaciones se hicieron con las celdas superficiales medidas con el ADCP, es decir, con la celda correspondiente a los $\approx 2.5\text{ m}$ de profundidad.

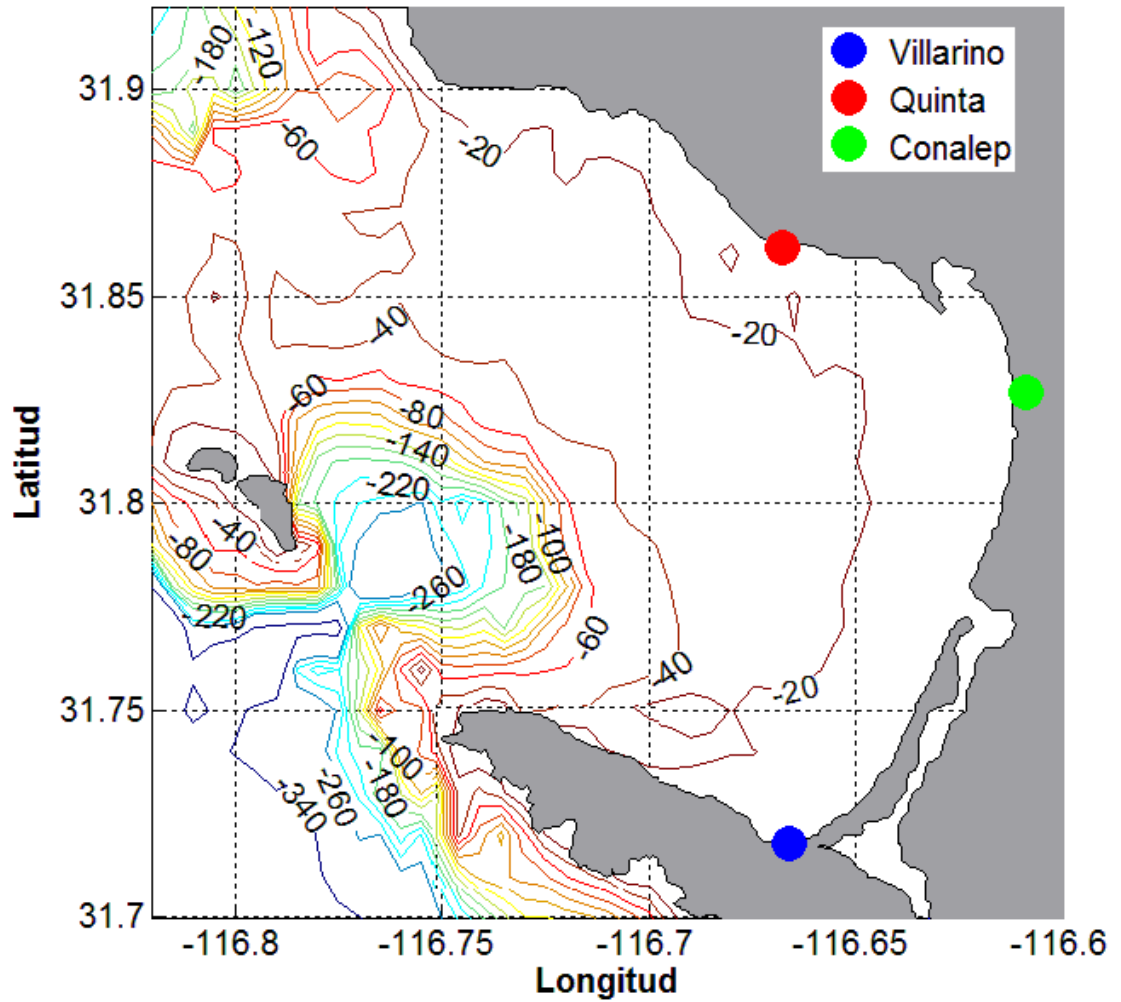


Figura 7: Ubicación de las estaciones de radar usadas para obtener las corrientes totales en la Bahía Todos Santos.



Figura 8: Antenas de recepción instaladas en unos de los sitios de radar usado para obtener las corrientes totales en la Bahía Todos Santos.

Para el mes de septiembre de 2016, se extrajeron los datos correspondientes a los radio escaterómetros que cubrieran la sección del transecto recorrido durante las mediciones en campo de los días 13, 14 y 15 de septiembre, esto permitió realizar comparaciones entre los datos medidos con el ADCP y los datos de radar.

2.4 Datos meteorológicos

Se utilizó la estación meteorológica (que forma parte del Observatorio Oceanográfico Regional Costero (OORCo)) que mide variables de temperatura del aire, presión atmosférica, magnitud y dirección del viento, instalada en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) (la ubicación de la estación se observa en la figura 9), de la cual se extrajeron las series de tiempo correspondientes a los días de los muestreos, con los cuales se calcularon promedios horarios para el análisis de la variabilidad temporal.

Adicionalmente, para las dos campañas de medición del 2017 se instaló una

estación meteorológica a bordo de la embarcación que permitió medir la dirección y magnitud del viento a lo largo del transecto. Con estos datos fue posible establecer la influencia del viento en los patrones de intercambio de la bahía.

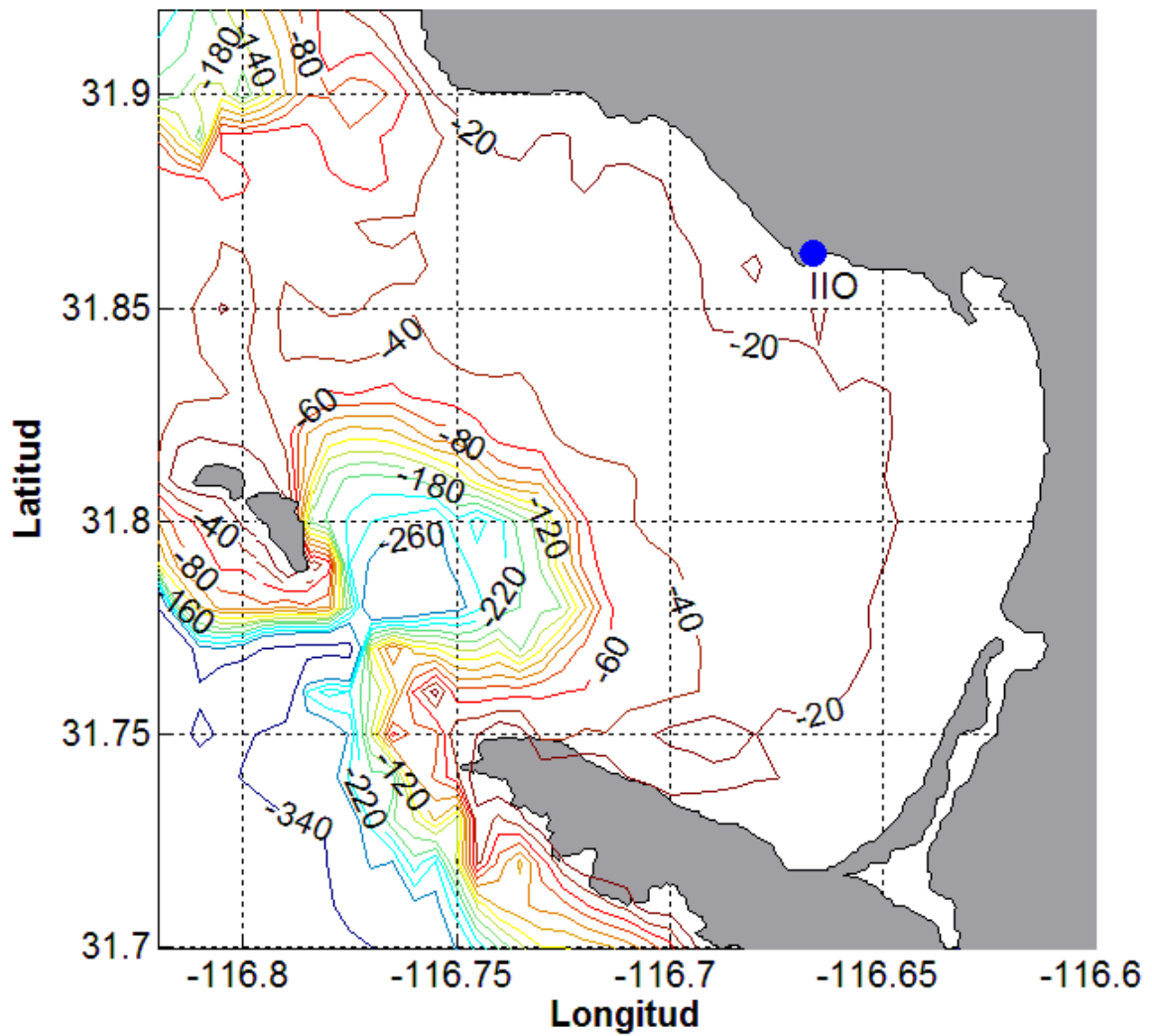


Figura 9: Ubicación de la estación meteorológicas instalada en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la UABC (IIO).

3 Resultados

3.1 Meteorología

Las figuras 10, 11, 12 y 13 muestran la variación temporal de la magnitud y dirección del viento, así como la temperatura ambiente, para los tres días de muestreo durante las campañas de medición. Cada figura se compone de cuatro paneles que corresponden a cada campaña: a) Febrero de 2016, b) Septiembre de 2016, c) Febrero de 2017 y d) Marzo de 2017.

Durante los cuatro muestreos, en todas las variables, fue evidente la variación diurna, con máximos y mínimos asociados al medio día y media noche (hora local). Durante el medio día (hora local), la dirección del viento (figura 11) fue del noroeste ($\approx 280 - 300^\circ$), y se asocia a las velocidades máximas registradas > 6 m/s para febrero y septiembre de 2016 (figura 10, paneles **a** y **b**) y > 4 m/s para febrero y marzo de 2017 (figura 10, paneles **c** y **d**), mientras que durante el resto del día los vientos fueron débiles (< 2 m/s) sin presentar una dirección predominante (esto durante los cuatro muestreos).

En cuanto a la variabilidad entre los experimentos, durante los muestreos de 2017 (figuras 10 y 11, paneles **c** y **d**) los vientos del noroeste fueron menos intensos (≈ 4 m/s) y de menor duración, mientras que en los días muestreados de septiembre de 2016 (figura 10 y 11 panel **b**), la dirección del viento fue menos variable y con magnitudes > 4 m/s, esto puede estar relacionado a que el viento de gran escala generó modificaciones sobre el viento local. Adicionalmente, el periodo de septiembre presentó las temperaturas más altas y relativamente constantes a lo largo del día (esto característico de periodos de verano).

Los vientos más cálidos ($\approx 18 - 20^\circ\text{C}$) se asociaron a vientos provenientes del noroeste (aparentemente brisas marinas, las cuales ocurren en zonas costeras y son vientos típicos diurnos de mar a tierra), este esquema de vientos es uno de los procesos dinámicos más relevantes de pequeña escala los cuales establecen una

circulación local, estos pueden influenciar en las corrientes de las bocas de la bahía y en el intercambio con el océano adyacente.

La tabla 4, presenta el análisis de las variables medidas para los cuatro muestreos realizados. En septiembre, se presentaron las temperaturas más altas y vientos más intensos. En febrero de 2016 (figura 12 panel **a**), la dirección del viento fue del suroeste, mientras que en las otras épocas de medición, los vientos predominantes fueron del noroeste.

Tabla 4: Análisis de las variables meteorológicas medidas.

Variable	Min	Max	Dirección predominante
Febrero de 2016			
Dirección del viento	N/A	N/A	180
Magnitud del viento	0.3	6.4	2.7
Temperatura	6.8	21.7	13.4
Septiembre de 2016			
Dirección del viento	N/A	N/A	300
Magnitud del viento	0.4	6.6	2.9
Temperatura	10.5	20.8	16.1
Febrero de 2017			
Dirección del viento	N/A	N/A	270
Magnitud del viento	0.3	5.1	1.8
Temperatura	8.9	20	12.8
Marzo de 2017			
Dirección del viento	N/A	N/A	280
Magnitud del viento	0.4	5.1	1.8
Temperatura	12.16	21.4	15.8

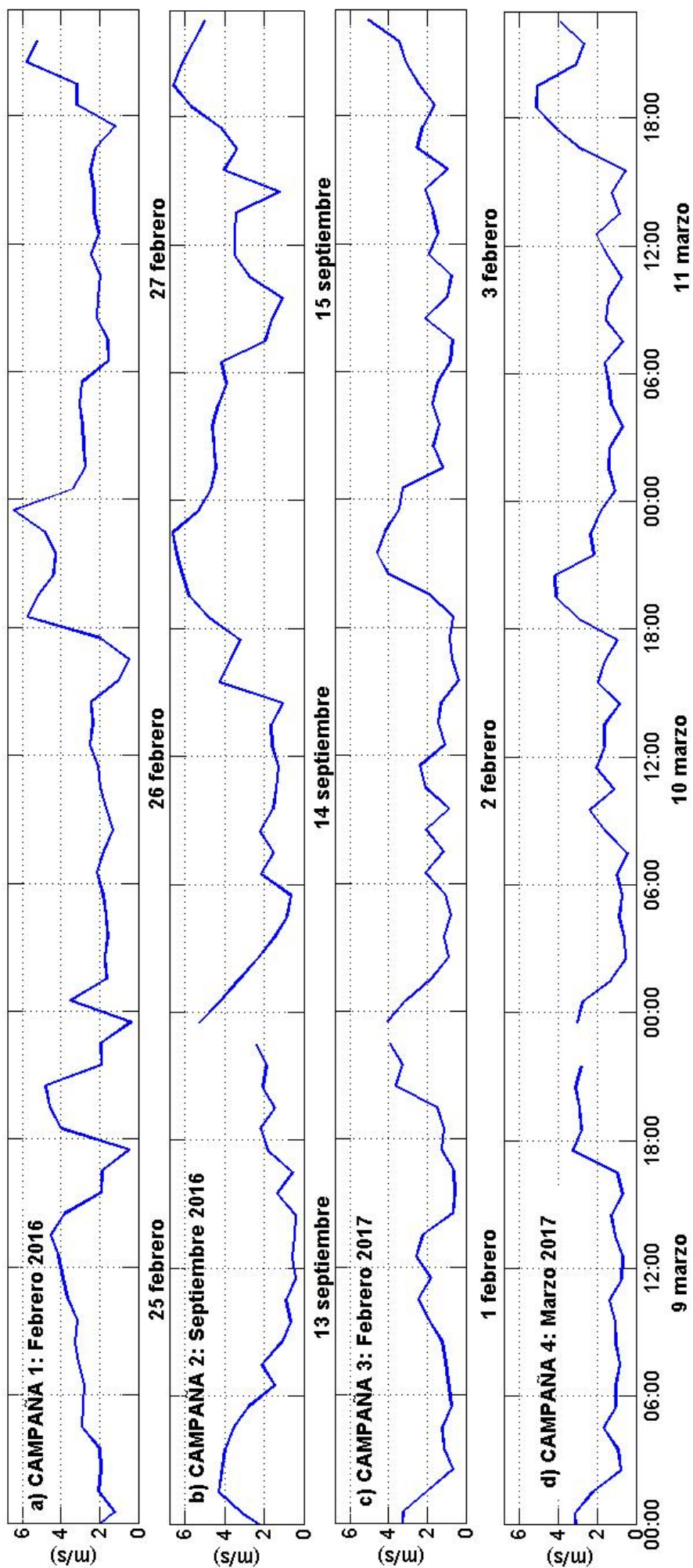


Figura 10: Velocidad del viento (m/s) para los cuatro periodos de muestreo cada uno de ellos de tres días de duración. El eje horizontal corresponde al tiempo en horas (referenciado en UTC), abarcando 72 horas de datos.

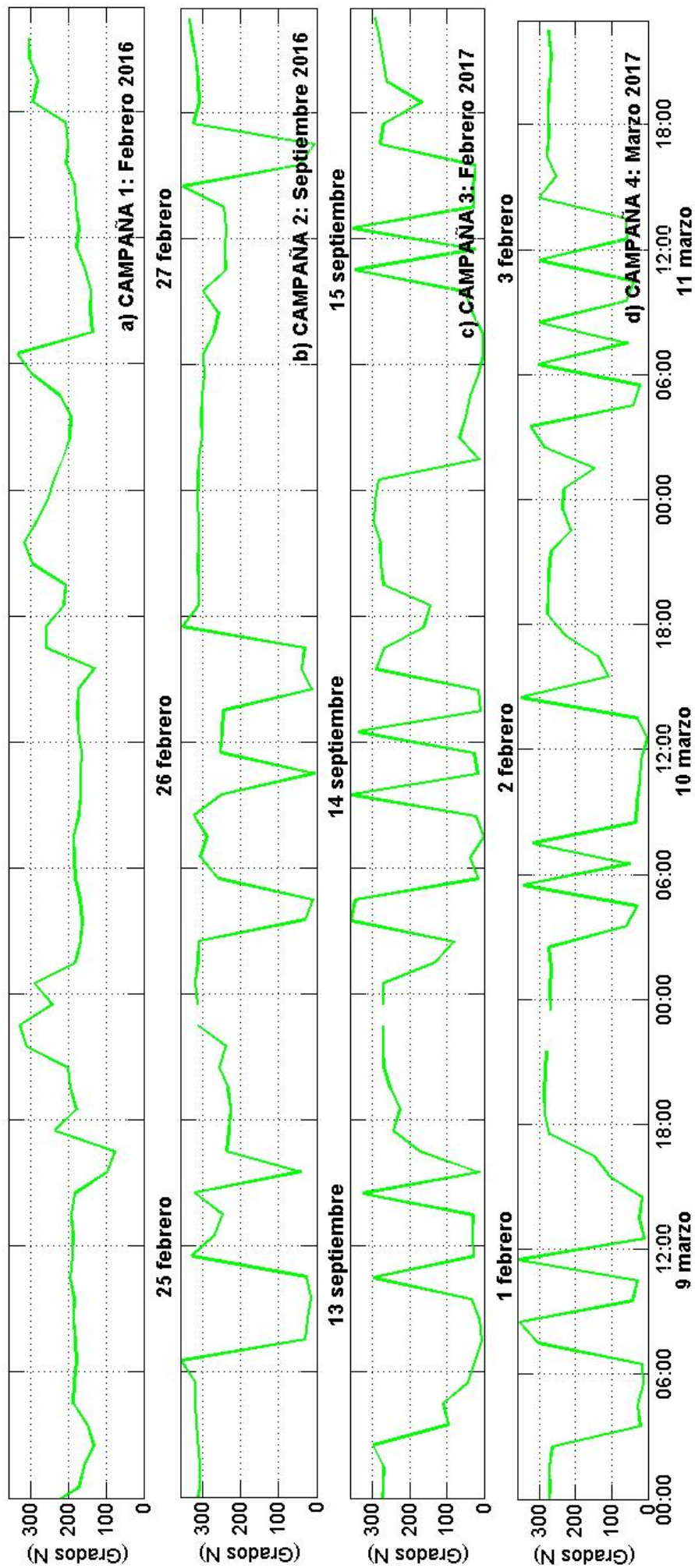


Figura 11: Dirección de donde proviene el viento (grados norte) para los cuatro periodos de muestreo cada uno de ellos de tres días de duración. El eje horizontal corresponde al tiempo en horas (referenciado en UTC), abarcando 72 horas de datos.

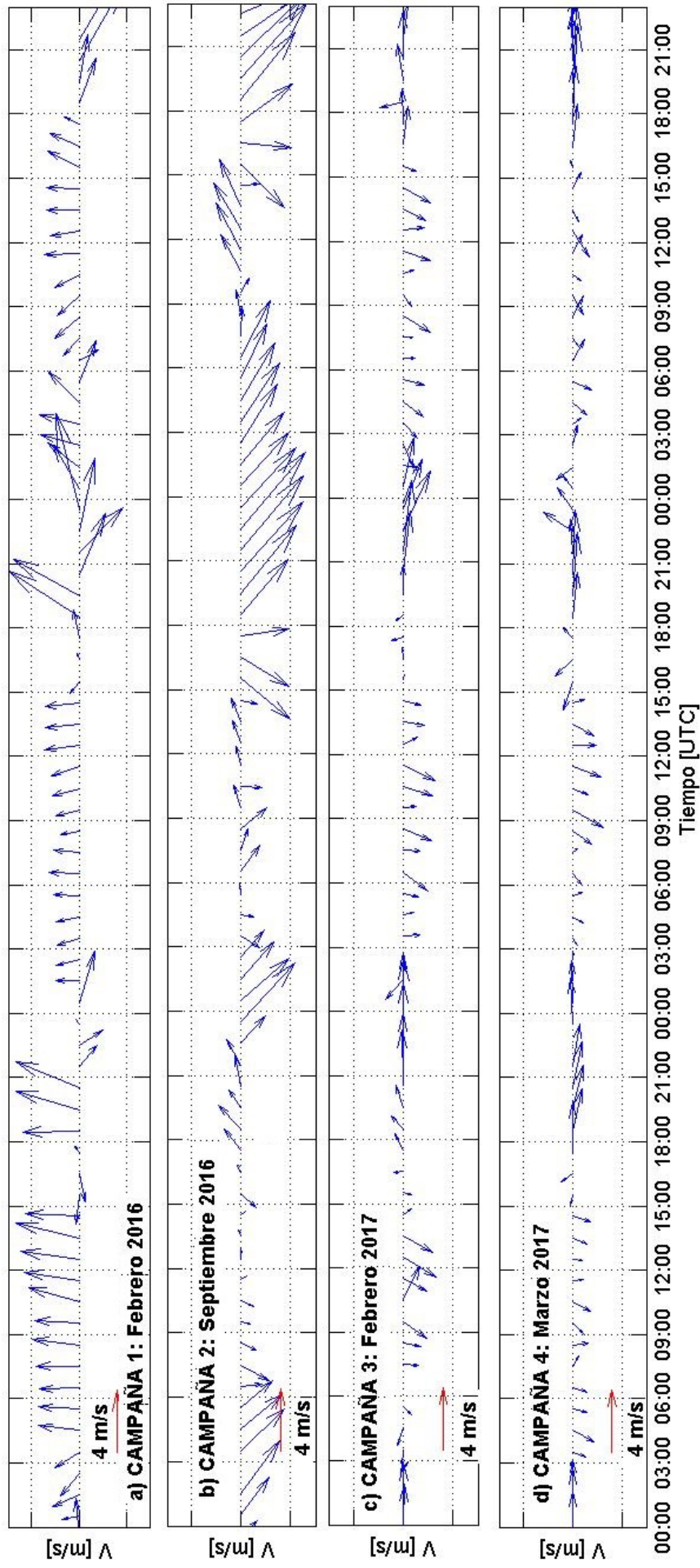


Figura 12: Diagrama de astillas del viento para los cuatro periodos de muestreo cada uno de ellos de tres días de duración. Las flechas representan la dirección a donde va el viento. El eje horizontal corresponde al tiempo en horas (referenciado en UTC), abarcando 72 horas de datos.

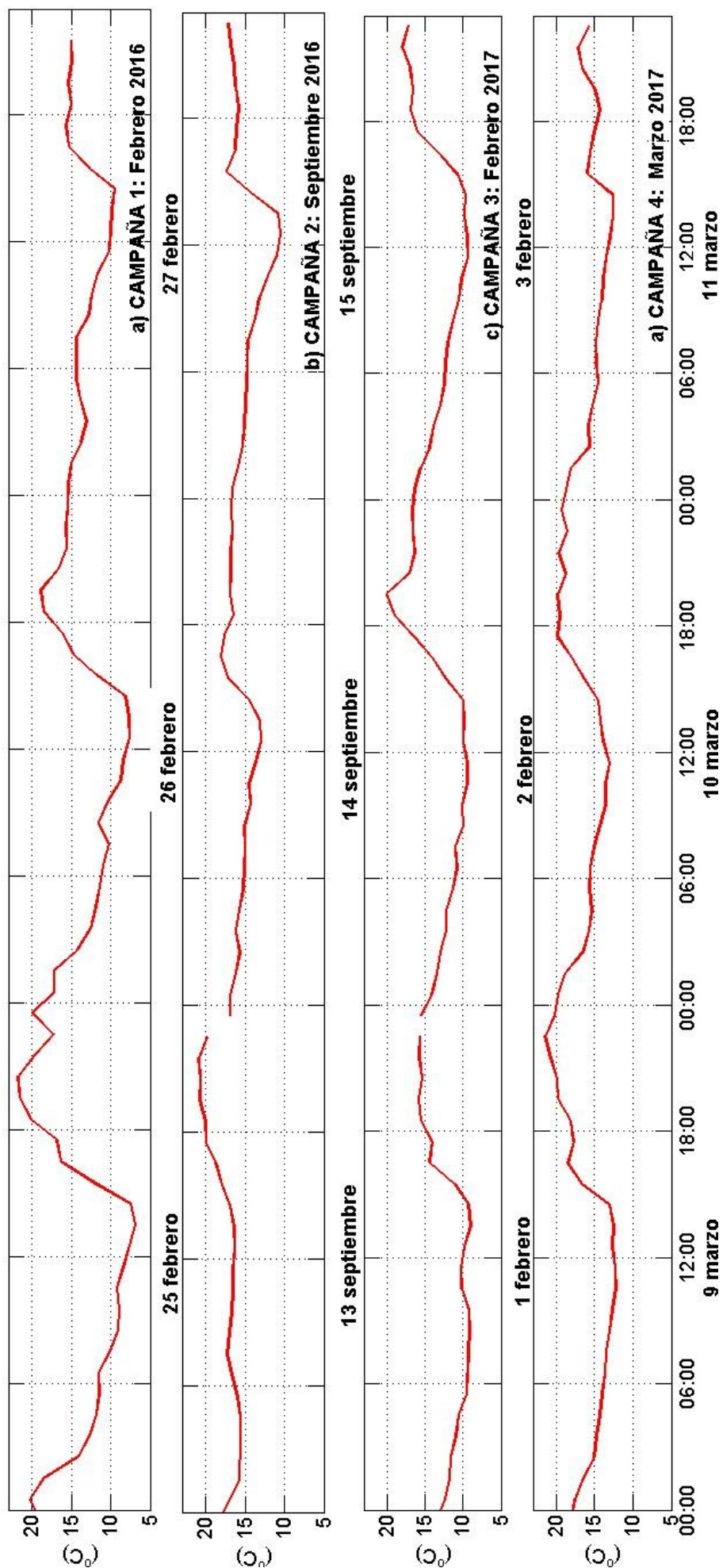


Figura 13: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para los cuatro periodos de muestreo cada uno de ellos de tres días de duración. El eje horizontal corresponde al tiempo en horas, abarcando 72 horas de datos.

3.2 Dinámica de intercambio de la bahía con el océano adyacente

A continuación, se presentan los resultados referentes a cada una de las bocas de conexión, para cada una se muestran los datos de temperatura, salinidad, densidad, además de datos de velocidad de las corrientes y de viento, que permiten proponer un esquema de intercambio entre la BTS y el océano adyacente.

3.2.1 Intercambio de agua entre la boca norte y el océano adyacente

Perfiles verticales de temperatura, salinidad y densidad fueron medidos durante un ciclo diurno completo, pero a continuación se presentan los resultados agrupados durante bajamar y pleamar. Los resultados de las mediciones realizadas en bajamar se presentan en la figura 14, y los obtenidos en pleamar se presentan en la figura 15. Ambas figuras se componen de manera similar, del lado izquierdo se presenta el muestreo de febrero 2016 y del lado derecho el muestreo de febrero de 2017, ambos muestreos realizados durante mareas muertas. El panel **a)** indica las condiciones de marea durante el periodo muestreado, las barras de color rojo indican el instante exacto de las mediciones a lo largo del transecto para un solo recorrido (aproximadamente 2 horas de mediciones). Para cada periodo de muestreo, se presenta por paneles la variabilidad vertical de los campos de temperatura (figura 14 **b)**), salinidad (figura 14 **c)**) y densidad (figura 14 **d)**) hasta los 40 m de profundidad. En la figura 14 **b)**, se muestra con una línea roja punteada la profundidad de la termoclina, la cual se calculó con base en la ecuación 4 mostrada en la sección de metodología. En las figuras 14 **b)**, **c)** y **d)**, las líneas blancas verticales indican la posición de los lances realizados a lo largo del transecto. La línea de color negro corresponde a la batimetría de la boca norte.

Durante el muestreo de febrero de 2016 figura 14 (paneles izquierdos), la termoclina se ubicó aproximadamente a 28 m de profundidad, mientras que durante febrero de 2017 (paneles derechos) la termoclina fue más somera, aproximadamente

a 5 *m* de profundidad. Durante los dos muestreos presentados en la figura (ambos durante bajamar), se observó agua de mayor salinidad cerca de la costa de San Miguel (limite norte de la bahía), mientras que en la región de las islas la salinidad fue ligeramente menor (≈ 0.1 *ups*).

La figura 15 muestra las mismas variables de la figura 14, pero durante pleamar. Bajo estas condiciones (entrada de agua al sistema por diferencia de volumen de agua), el muestreo de febrero de 2017 (paneles derechos) presentó la termoclina a aproximadamente 20 *m* de profundidad. Adicionalmente, se observó que el agua de salinidad relativamente alta (cerca de la costa de San Miguel) disminuyó, esto ocasionado por la marea entrante y los procesos de mezcla que esto conlleva.

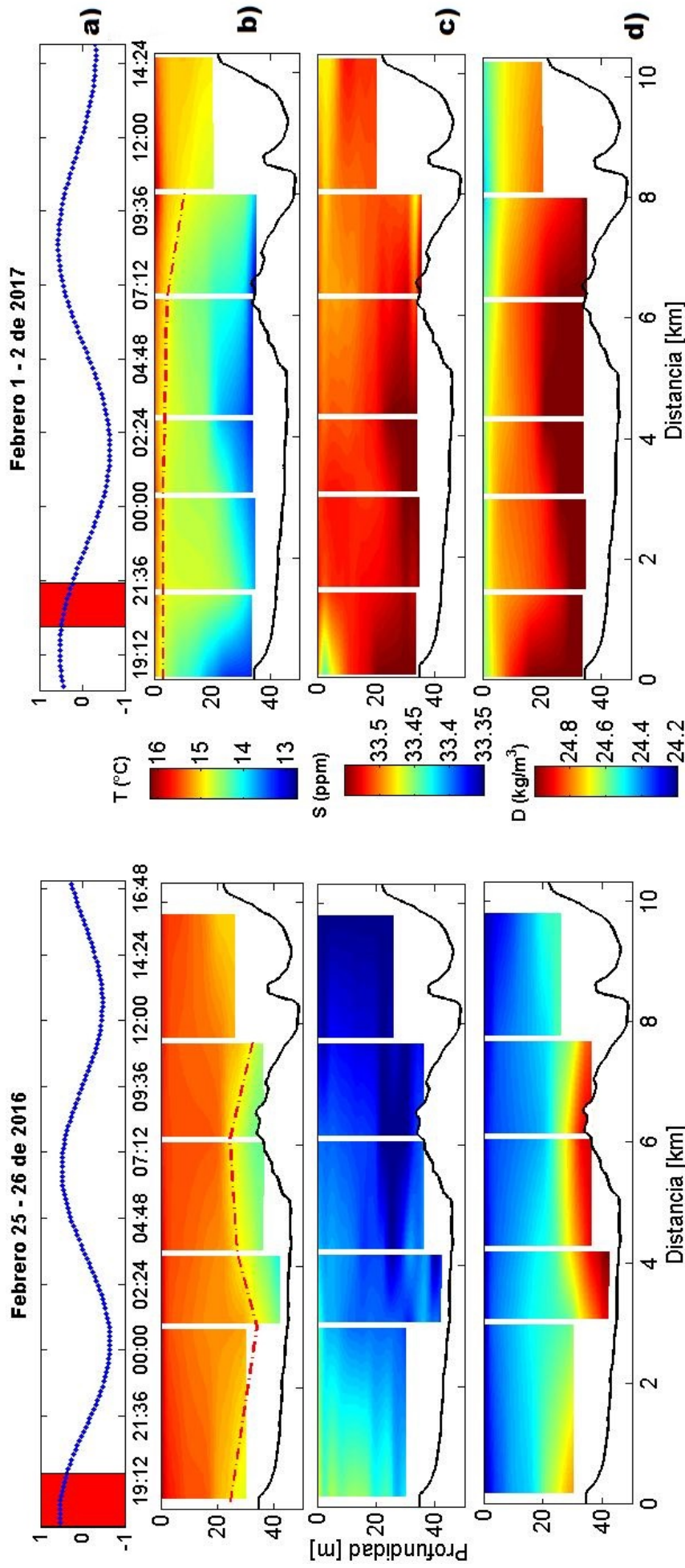


Figura 14: Contornos para la boca norte de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de bajamar en marea muerta febrero de 2016 y 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el muestreo. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.

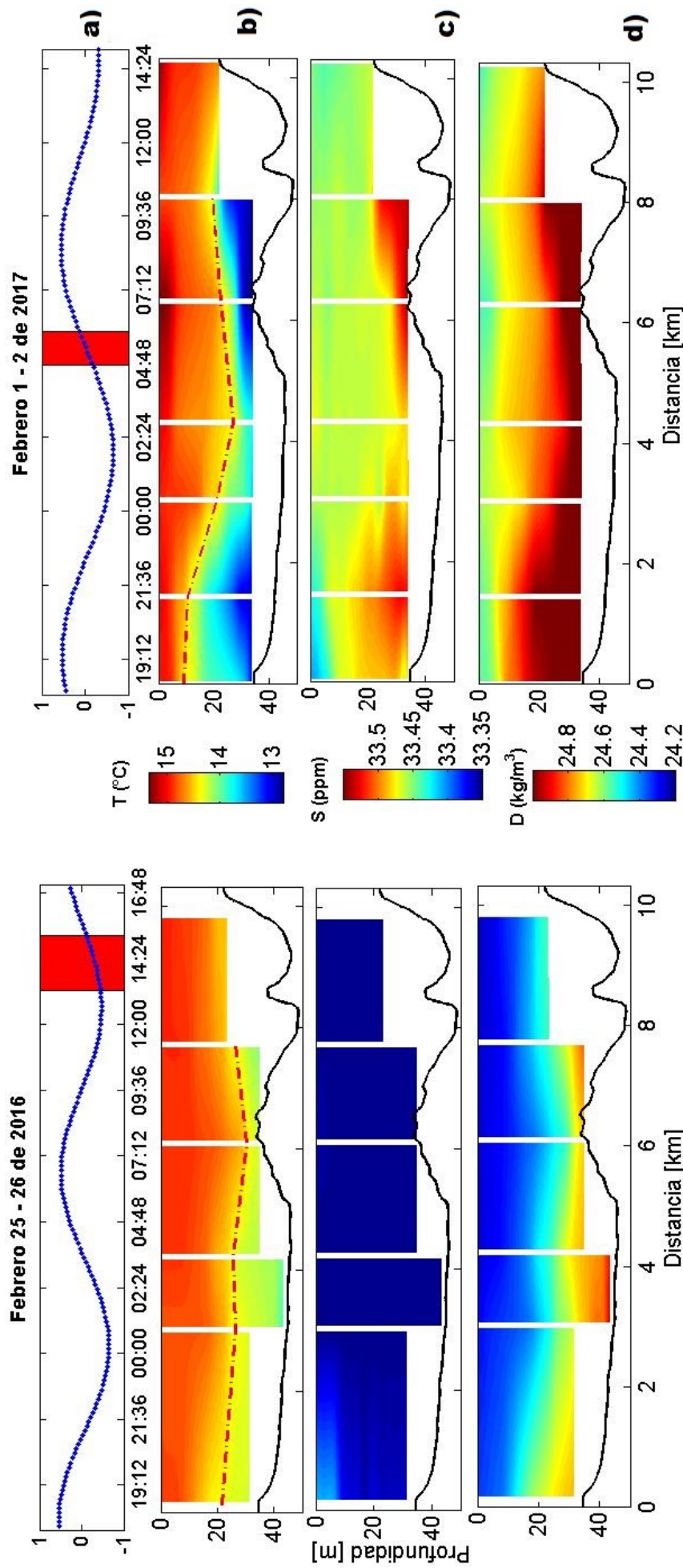


Figura 15: Contornos para la boca norte de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de pleamar en marea muerta febrero de 2016 y 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el muestreo. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.

Las figuras 16 y 17 corresponden a las mediciones realizadas durante mareas vivas. Los muestreos se realizaron en septiembre de 2016 (lado izquierdo de las figuras) y marzo de 2017 (lado derecho de las figuras). Las figuras se componen de paneles de la misma forma que la figura 14 y presentan las mismas variables.

En la figura 16 tanto para el panel de la izquierda como el de la derecha, se encontró una distribución de salinidad 0.1 *ups* más alta cerca de la costa de San Miguel (de manera similar a los resultados de mareas muertas). El mes de septiembre (paneles izquierdos), presentó las temperaturas más altas, mayor estratificación y termoclina somera ($\approx 10\text{ m}$). En este periodo, las condiciones de la columna de agua estuvieron más estratificadas en comparación con los resultados presentados en la figura 14, esto puede ser explicado por una exposición mayor de radiación solar debido a la época del año que ocasionó gradientes de temperatura considerables a lo largo de la columna de agua. Para el muestreo de marzo de 2017 (figura 16 paneles derechos, durante pleamar), se encontró que la termoclina se ubicó a profundidades menores a los 10 *m*, con salinidad 0.2 *ups* menor que en el resto del transecto (primeros $\approx 2\text{ km}$ del transecto), lo que pudiera estar asociado a agua entrando a la bahía en capas superficiales alineada al costado de San Miguel.

En la figura 17 (bajamar), en los paneles derechos (muestreo de marzo de 2017), se observó nuevamente agua superficial ligeramente menos salada en capas superficiales (menores a los 10 *m* de profundidad), lo que sugiere que para capas superficiales, cerca de la costa de San Miguel, el agua estaría entrando a la bahía (asumiendo que el agua de menor salinidad proviene del exterior, ya que en el interior los procesos de evaporación deberían generar agua de mayor salinidad). Para los paneles izquierdos (muestreo de septiembre de 2016), se mantuvo la termoclina somera $\approx 10\text{ m}$. Los máximos valores de salinidad estuvieron asociados a condiciones de bajamar (figura 17), lo que sugiere que es agua saliendo de la bahía.

De los resultados mostrados en las figuras anteriores, podemos destacar que a pesar de ser mediciones en diferentes periodos y estados de marea, se observó

recurrentemente agua relativamente más cálida, en zonas cercanas a la costa de San Miguel, lo que sugiere que existe una corriente costera, pegada a la costa de San Miguel que parece estar desacoplada del resto de la circulación en la boca norte.

Las diferencias entre los experimentos estuvieron relacionadas con las variaciones de la temperatura ambiente, que ocasionaron un calentamiento del agua mayor en las épocas de verano (muestreo de septiembre de 2016), caso contrario a los muestreos de febrero y marzo, donde la temperatura del agua fue menor (aproximadamente $2^{\circ}C$). Lo anterior ocasionó diferencias a lo largo de la columna de agua, dando lugar a una circulación en dos capas, con una capa más cálida por encima de la termoclina y una capa fría por debajo.

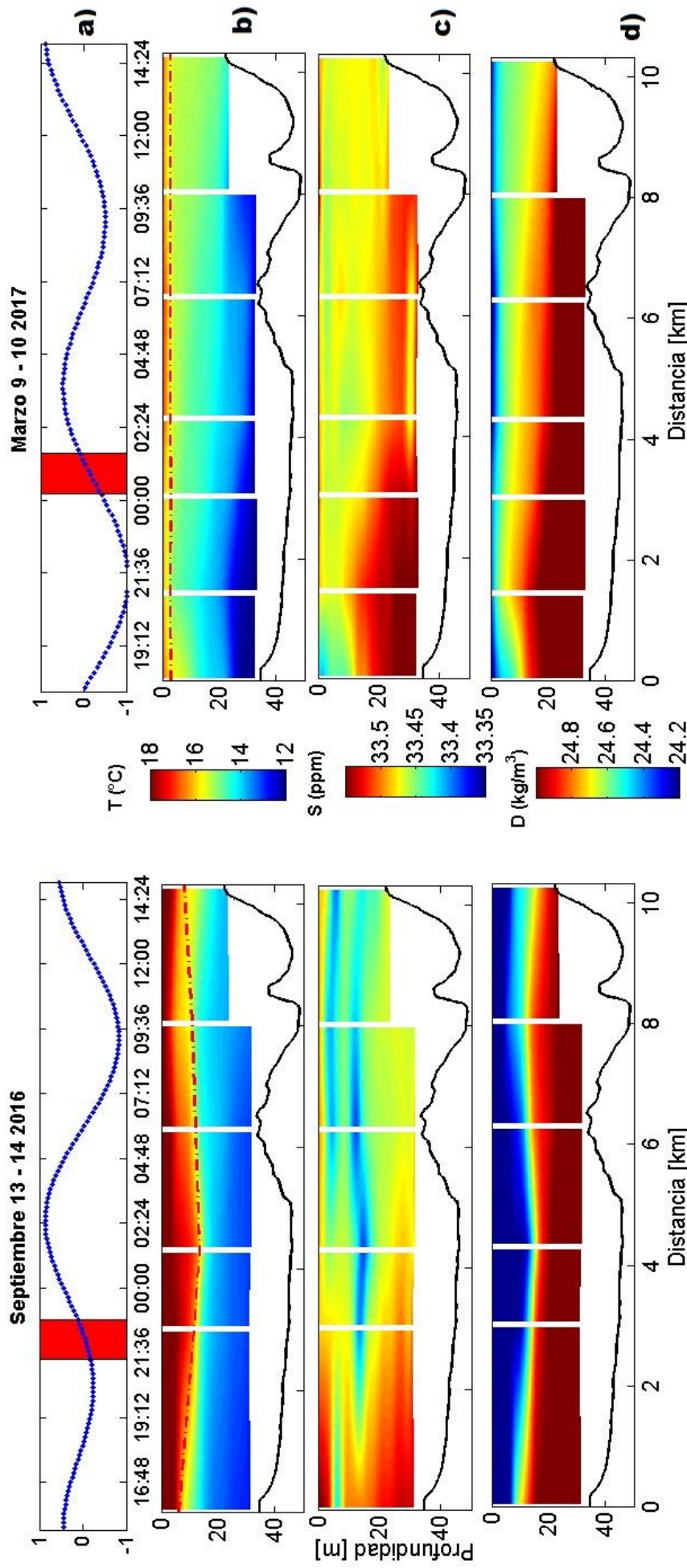


Figura 16: Contornos para la boca norte de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de pleamar en marea viva septiembre de 2016 y marzo de 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.

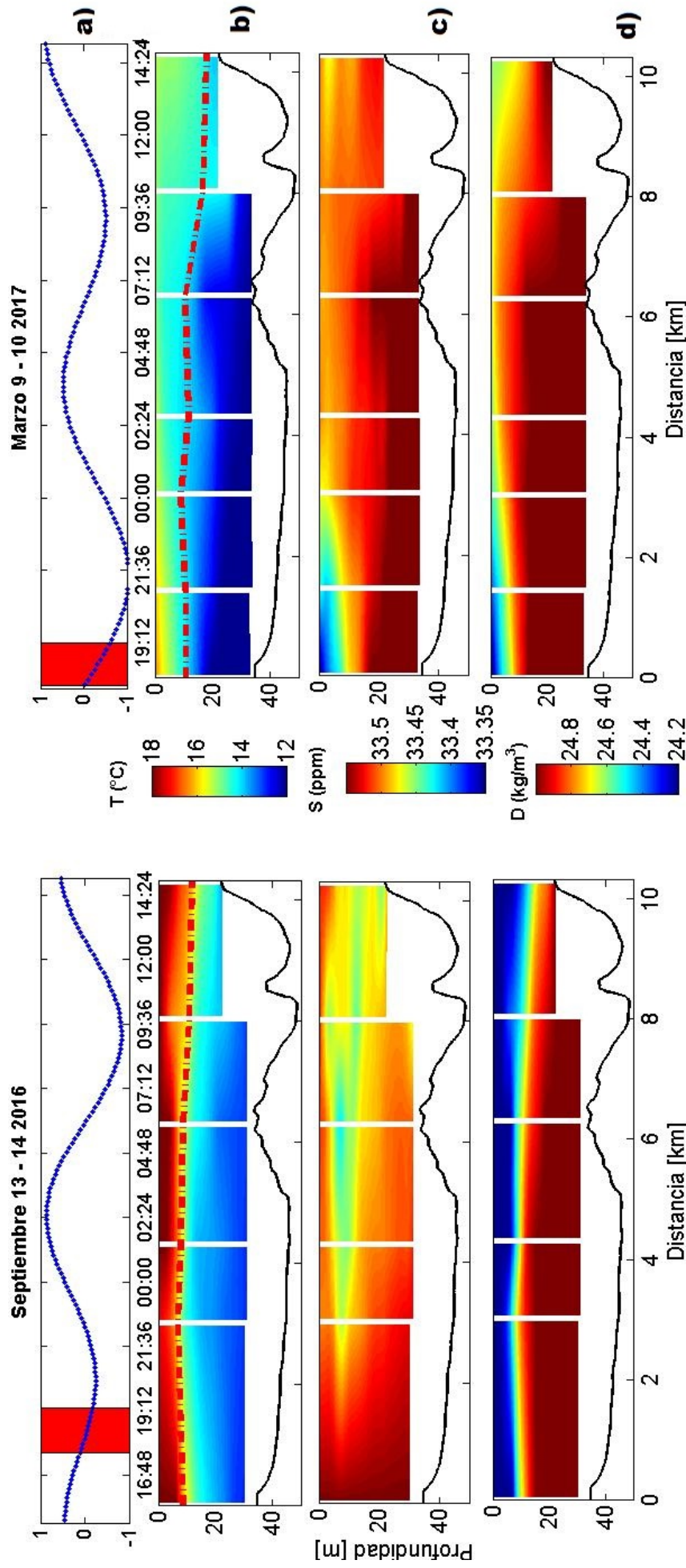


Figura 17: Contornos para la boca norte de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de bajamar en marea viva septiembre de 2016 y marzo de 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.

Las figuras 18 y 19 muestran el residual (el cual se obtuvo de acuerdo a lo mencionado en la sección de metodología) de temperatura y salinidad para los primeros 50 *m* de la columna de agua, obtenidos con los datos de las 24 horas de muestreo.

Se presentan los resultados para los cuatro periodos muestreados, los paneles superiores de las figuras 18 y 19 corresponden a los periodos de marea muerta (izquierdo corresponde a febrero de 2016 y derecho a febrero de 2017). Los paneles inferiores corresponden a marea viva (izquierdo a septiembre de 2016 y derecho a marzo de 2017). Las líneas blancas verticales indican la posición de los lances realizados a lo largo del transecto. La línea roja punteada indica la profundidad de la termoclina.

Se observa en la figura 18 que las campañas realizadas en el 2016 (campaña 1 y 2) presentaron los valores de temperatura más altos que los de 2017. Para los periodos de marea muerta (paneles superiores), la termoclina se encontró aproximadamente a los 20 *m* de profundidad, mientras que en marea viva (paneles inferiores) la profundidad de la termoclina fue menor (≈ 10 *m*), que por lo general se encontró arriba de los 10 *m* de profundidad. Adicionalmente, se observó nuevamente agua superficial (≈ 10 *m* de profundidad) más cálida cerca de la costa de San Miguel.

Durante febrero y marzo de 2017 (paneles derechos de la figura 18), se observaron temperaturas más bajas, esto debido a la época del año en la cual se realizaron las mediciones (finales de invierno). Sin embargo, la campaña de febrero de 2016 (panel superior izquierdo), a pesar de que se realizó en época de invierno, presentó valores de temperatura del agua relativamente altos, esto dado que el 2016 fue un año en condiciones de El Niño.

Para el residual de salinidad (figura 19), se observó que las regiones donde las salinidades fueron altas se asociaron con regiones de temperaturas relativamente altas, por ejemplo en la zona cercana a San Miguel. En el residual de

salinidad para las campañas 2, 3 y 4 (paneles derechos e inferior izquierdo), se observó que en capas superficiales ($< 15\text{ m}$) la distribución de salinidad tiende a presentar valores relativamente bajos comparados con el resto de la columna de agua, estas diferencias se encontraron asociadas con la profundidad de la termoclina.

Para todos los muestreos, se observó que la termoclina presentó una inclinación negativa desde San Miguel hacia las Islas, es decir, que es relativamente somera del lado de San Miguel y más profunda del lado de las Islas Todos Santos. Por lo tanto, el gradiente de presión seguramente es mayor en la región de las Islas y menor en San Miguel, lo cual pudiera inducir un movimiento de agua hacia San Miguel por la superficie y hacia las islas por el fondo, como una respuesta dinámica inducida por el gradiente de presión.

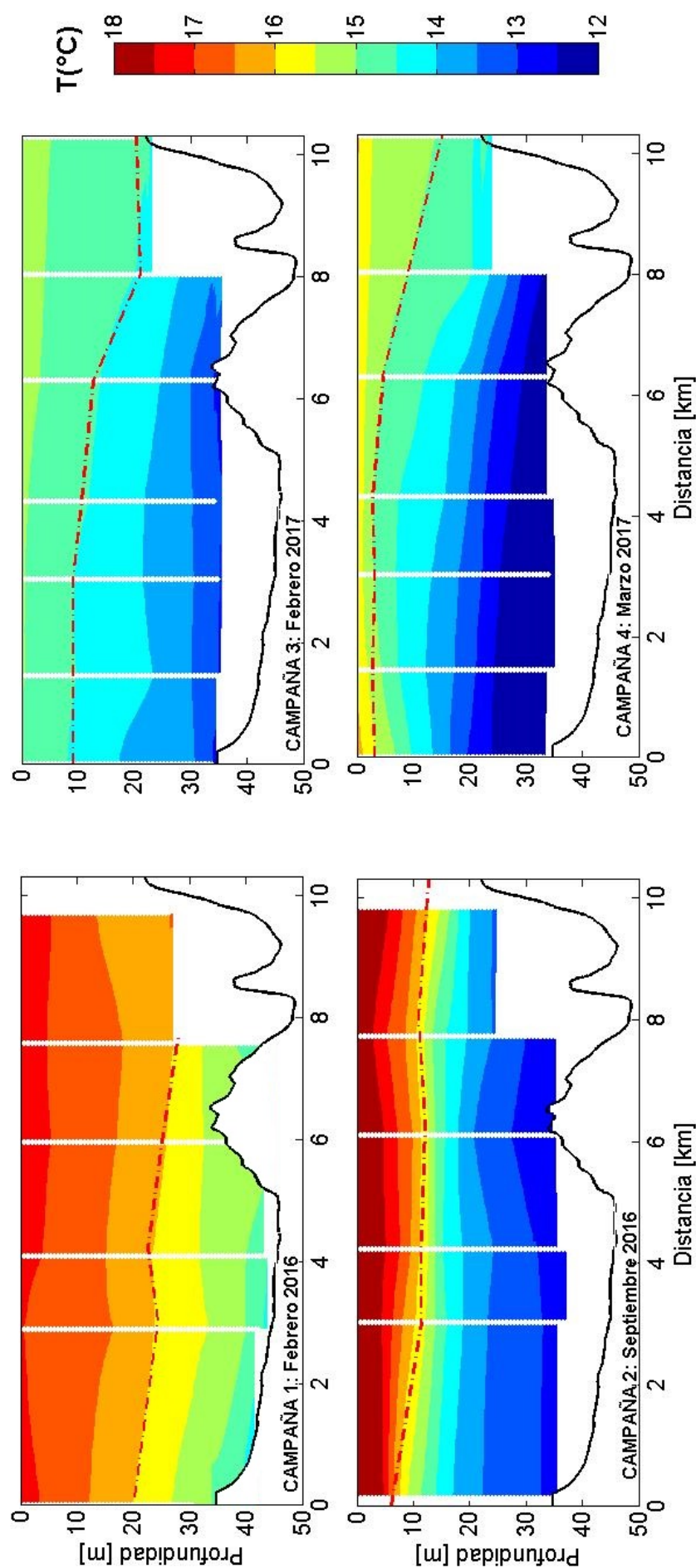


Figura 18: Temperatura promedio para cada periodo muestreado de la boca norte, el cual abarcó 24 horas de muestreo. Los paneles superiores corresponden a muestreos en mareas muertas (febrero de 2016 y febrero de 2017) y los paneles inferiores a mareas vivas (septiembre de 2016 y marzo de 2017). El lado izquierdo en el eje horizontal (eje de distancia de las figuras), corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.

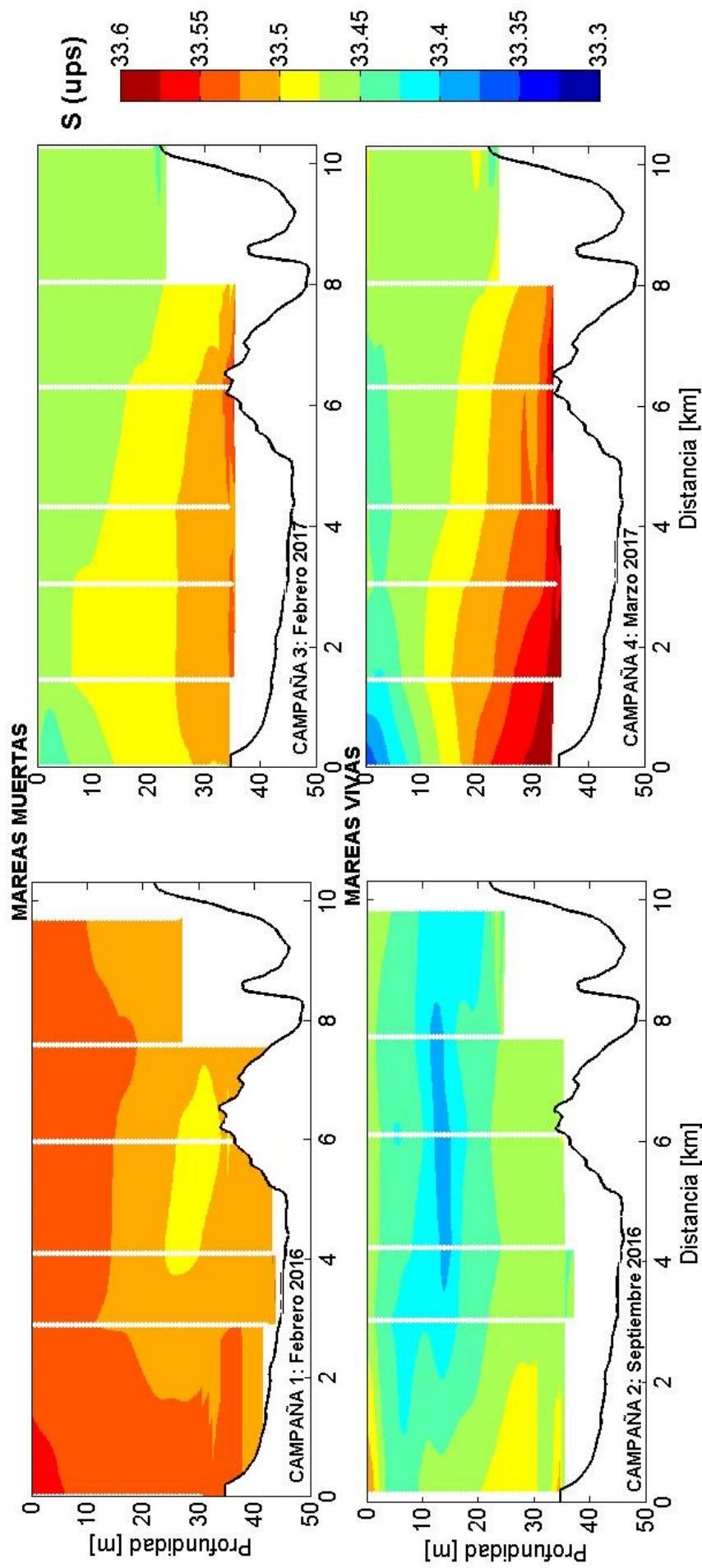


Figura 19: Salinidad promedio para cada periodo muestreado de la boca norte, el cual abarcó 24 horas de muestreo. Los paneles superiores corresponden a muestreos en mareas muertas (febrero de 2016 y febrero de 2017) y los paneles inferiores a mareas vivas (septiembre de 2016 y marzo de 2017). El lado izquierdo en el eje horizontal (eje de distancia de las figuras), corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos.

Con el objetivo de corroborar el esquema de circulación (intercambio en la boca) basado hasta el momento en perfiles de temperatura, salinidad y densidad, a continuación se presenta la componente de la velocidad perpendicular al transecto obtenida con el ADCP remolcado por la embarcación (figura 20). Los paneles **a**, **b** y **c** de la figura 20 corresponden a las campañas de septiembre de 2016, febrero y marzo de 2017 respectivamente, y representan el flujo residual calculado a partir de un promedio vectorial de todos los transectos medidos durante un ciclo de marea completo. La línea de color negro corresponde a la batimetría de la boca norte.

Durante los tres periodos muestreados se observó un flujo de agua saliendo por la costa de San Miguel con velocidades de $\approx 10 \text{ cm/s}$. Durante el muestro de septiembre (figura 20 panel **a**), se observó una circulación en dos capas, con velocidades de $\approx 15 \text{ cm/s}$ entrando a la bahía por la superficie ($< 10 \text{ m}$ de profundidad), acompañado de un contra flujo con dirección hacia fuera de la bahía por la capa del fondo (profundidades $> 10 \text{ m}$) con velocidades ligeramente menores a los 15 cm/s . En los periodos de febrero y marzo, la circulación en dos capas no fue perceptible, en su lugar fue recurrente observar un flujo de entrada, homogéneo en la vertical y que abarcó todo el ancho del transecto con velocidades de $\approx 20 \text{ cm/s}$. Sin embargo, para zonas cercanas a San Miguel, se observó de manera recurrente un flujo saliendo de la bahía con intensidades entre 10 y 25 cm/s (periodos de febrero y marzo de 2017 respectivamente).

Los resultados sugieren que para la boca norte de la BTS, los flujos de entrada fueron predominantes a lo largo del transecto, exceptuando la zona cercana a la costa de San Miguel, donde se observó un flujo persistente de salida, aparentemente desconectado dinámicamente del resto del transecto. Para condiciones de verano y marea viva, el muestreo de septiembre de 2016 muestra una circulación en dos capas, donde los flujos de salida se encuentran debajo de los 10 m de profundidad, esto se encuentra asociado a la profundidad de la termoclina observada en la figura 18, que a su vez parece ser ocasionada por las condiciones cálidas de la época del año. La intensidad de las velocidades de entrada aumentó hacia la derecha (corres-

pondiente a las Islas Todos Santos) en todos los muestreos y alcanzó velocidades de 25 cm/s , lo cual es consistente con el gradiente de presión inferido de la figura 18.

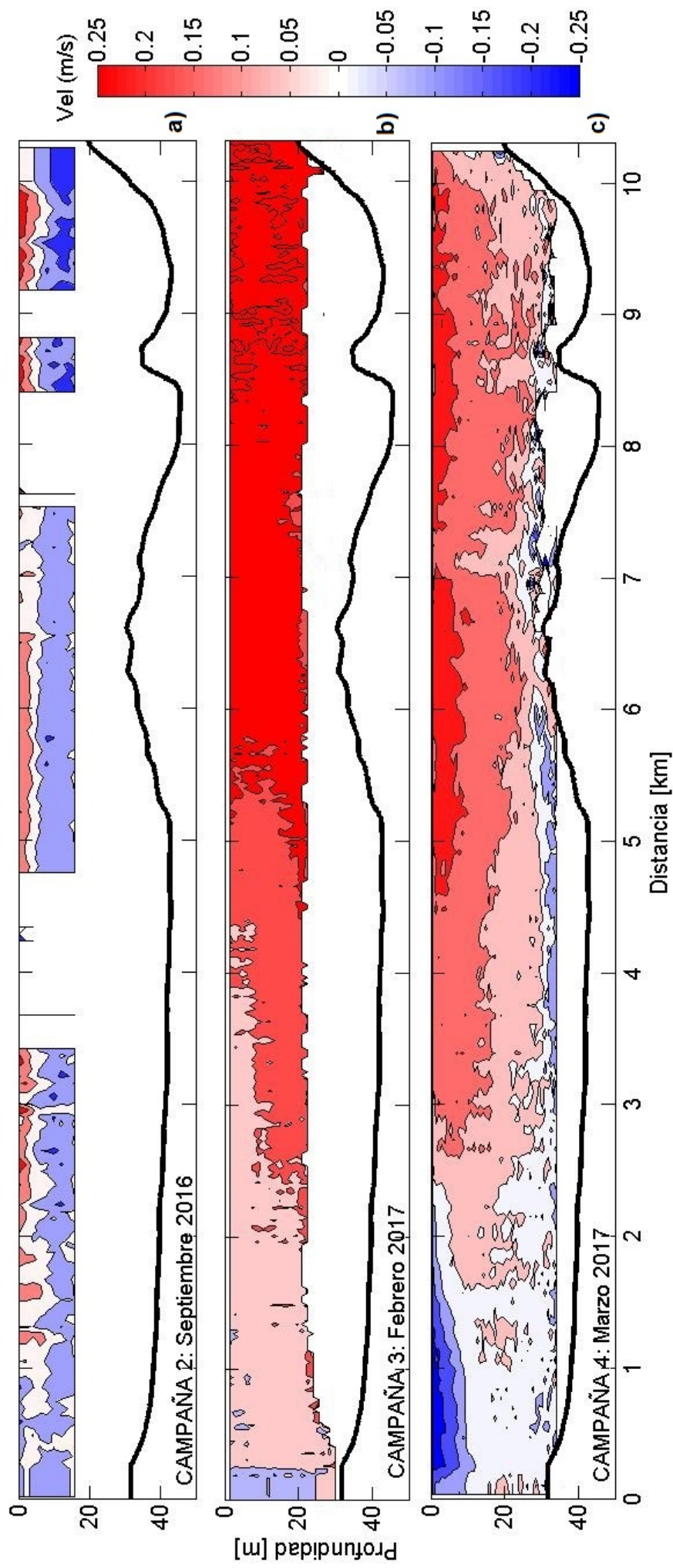


Figura 20: Corrientes residuales (de las 24 horas de muestreo) a través del transecto, medidas con el ADCP en la boca norte de la bahía. El panel superior y el panel inferior corresponden a periodos de mareas vivas, el panel del medio a mareas muertas. El lado izquierdo en el eje horizontal corresponde a San Miguel y el lado derecho a las Islas Todos Santos. Los valores negativos (contornos azules) corresponden a agua saliendo de la bahía y valores positivos (contornos rojos) corresponde a flujos entrando.

De los resultados presentados hasta el momento se puede considerar que la circulación en dos capas presentada en la figura 20 (campana de septiembre de 2016) pudiera estar ocasionada por una mayor estratificación y una termoclina somera $\approx 10\text{ m}$, mientras que en los muestreos de febrero y marzo (invierno y primavera) no se logró percibir de forma clara una circulación de dos capas. Por el contrario, se encontró un flujo de entrada a la BTS en toda la columna de agua por el lado de las Islas Todos Santos con velocidades promedio de $\approx 20\text{ cm/s}$ y un flujo de salida por la costa de San Miguel.

Con la finalidad de corroborar la circulación en dos capas y su posible forzamiento, así como el flujo recurrente de salida por la costa de San Miguel, se presentan a continuación dos figuras compuestas con datos de los campos de temperatura y corrientes, para tres profundidades 2, 9 y 22 m (figuras 21 y 22).

Como se mencionó anteriormente, la circulación en dos capas se encuentra asociada con la profundidad de la termoclina. En la figura 21, se observan cambios en la temperatura del agua, donde la capa superficial de 2 m es la más cálida ($> 18^\circ\text{C}$). A los 22 m de profundidad, la temperatura disminuyó aproximadamente a 13°C . Adicionalmente, se observó un cambio en la dirección de las corrientes, de la capa superior (2 m) con respecto a capas más profundas 9 y 22 m (por debajo de la termoclina), lo cual sugiere que el efecto del viento domina en la capa superficial, mientras que para aguas debajo de la termoclina, las direcciones fueron contrarias, y de mayor intensidad para la capa de 22 m. Se observó que las corrientes aparentemente responden al comportamiento de flujo y reflujo de la marea diurna, con entradas de agua a la bahía durante pleamar y salidas de agua durante bajamar.

La figura 22, correspondiente al muestreo de marzo de 2017, se compone de manera similar a la figura 21, para las mismas profundidades de (2, 9 y 22 m). Los cambios en la dirección de las corrientes se presentaron para zonas cercanas a San Miguel. Se observó cerca de la costa de San Miguel, corrientes saliendo de la bahía, esto para la capa superficial de 2 m, para las capas más profundas

(9 y 22 m) las magnitudes de la corriente fueron menores. Para este muestreo, se encontró que las entradas de agua a la bahía fueron persistentes durante todo el ciclo de marea y sin cambios importantes en su dirección respecto a la profundidad. Esto podría explicarse si se considera que la intensidad del viento fue menor (ver tabla 4), lo que pudiera explicar la ausencia de una segunda capa por el fondo al disminuir el efecto de “apilamiento” de agua impuesto por el viento, lo que podría explicar la entrada homogénea de agua durante todo el ciclo de marea, sin presentar inversiones asociadas a la termoclina o al flujo y reflujo de la marea.

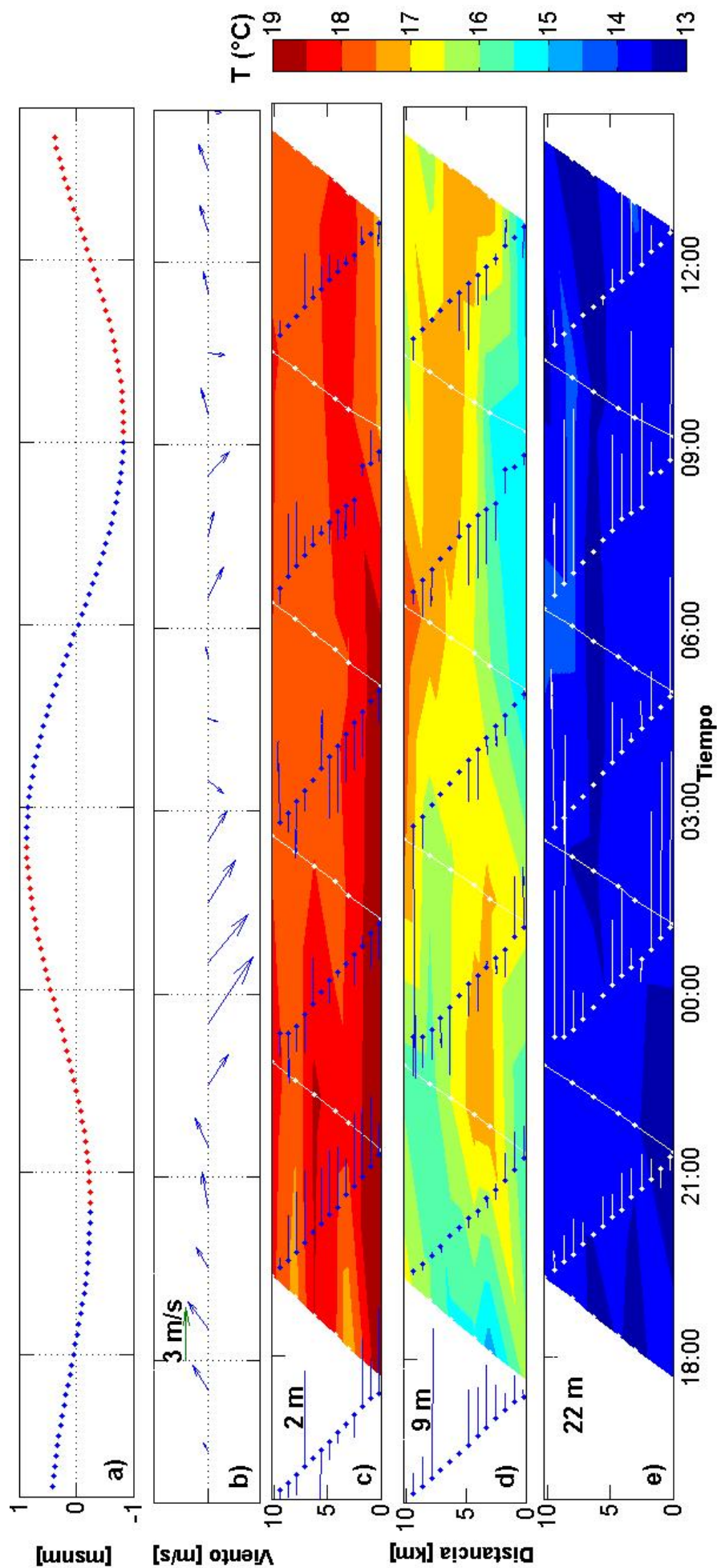


Figura 21: Perfiles verticales de temperatura correspondientes al muestreo en mareas vivas de septiembre de 2016 para la boca norte, el panel **a**) corresponde al periodo de marea, con color azul bajamar y con color rojo pleamar. El panel **b**) representa la magnitud y dirección viento, la flecha de color verde es la escala de magnitud. Los tres paneles siguientes corresponden a la temperatura para tres profundidades diferentes (2, 9 y 22 metros, paneles **c**, **d** y **e** respectivamente) con sus vectores de dirección de las corrientes (flechas azules), los puntos de color azul indican la posición espacial y temporal de los transectos medidos con el ADCP (origen de distancia el cero corresponde a San Miguel y el máximo valor a las Islas Todos Santos).

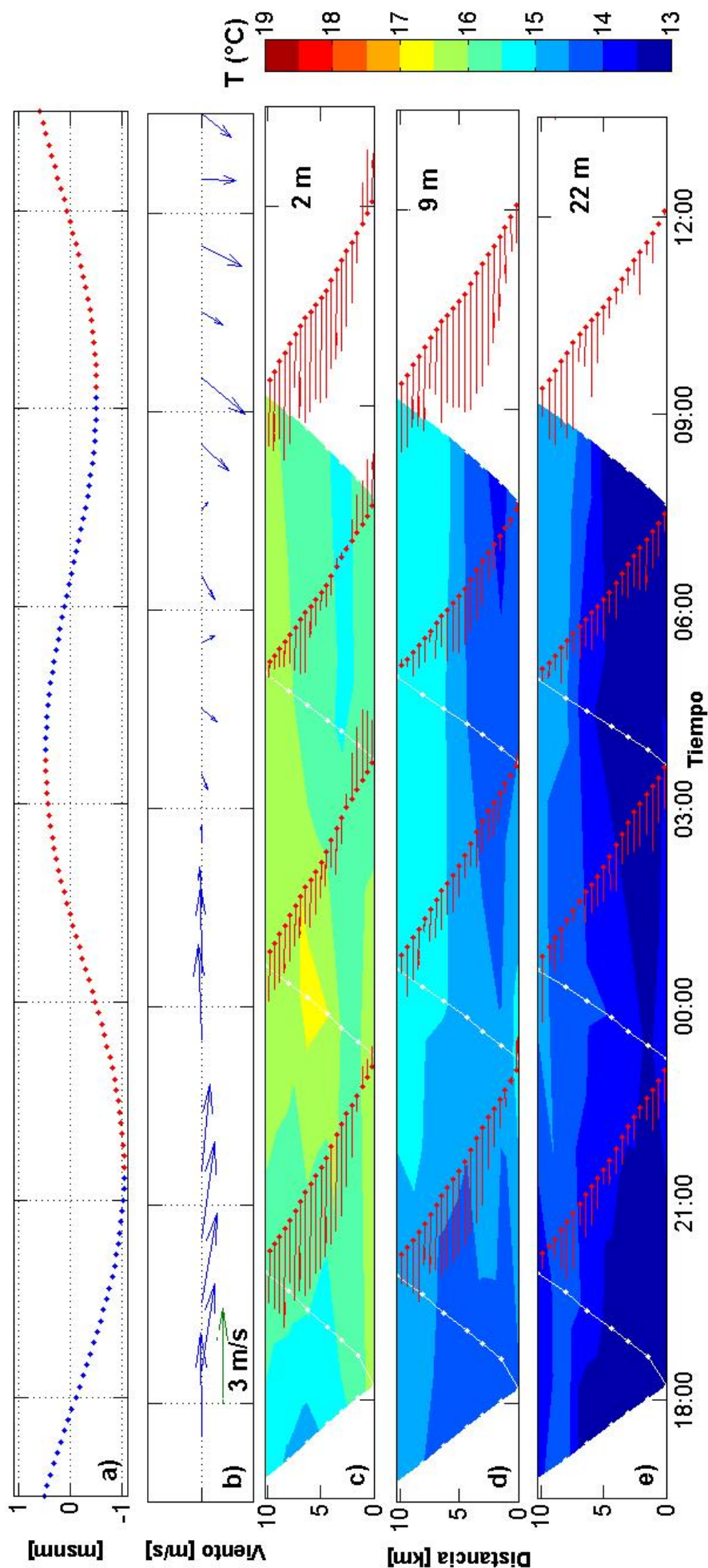


Figura 22: Perfiles verticales de temperatura correspondientes al muestreo en mareas vivas de marzo de 2017 para la boca norte, el panel **a**) corresponde al periodo de marea, con color azul bajamar y con color rojo pleamar. El panel **b**) representa la magnitud y dirección viento, la flecha de color verde es la escala de magnitud. Los tres paneles siguientes corresponden a la temperatura para tres profundidades diferentes (2, 9 y 22 metros, paneles **c**, **d** y **e** respectivamente) con sus vectores de dirección de las corrientes (flechas azules), los puntos de color azul indican la posición espacial y temporal de los transectos medidos con el ADCP (origen de las flechas). En el eje de distancia el cero corresponde a San Miguel y el máximo valor a las Islas Todos Santos.

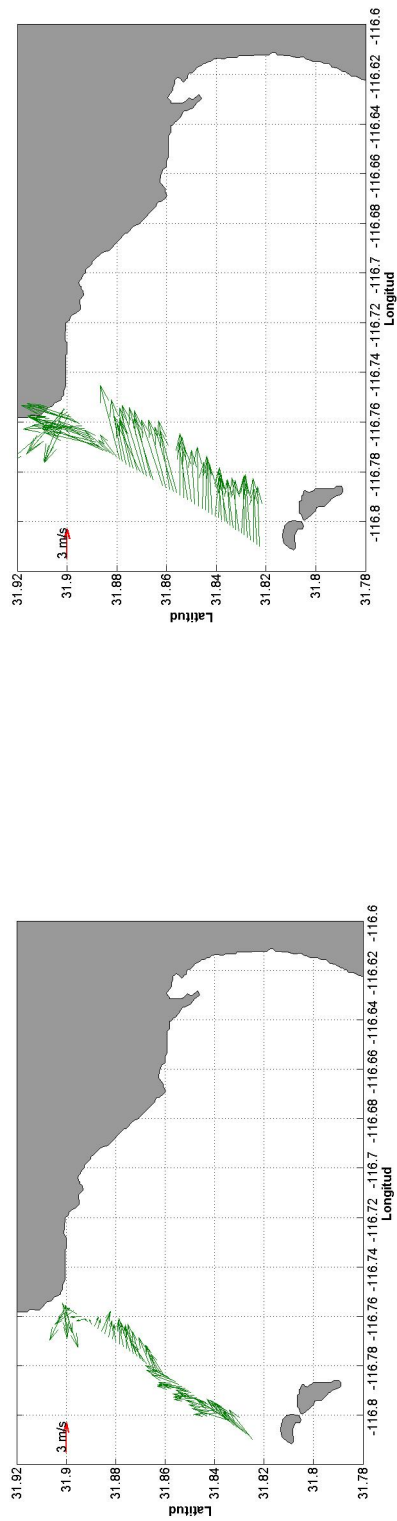
Hasta el momento, se ha demostrado la existencia de una circulación de dos capas en la boca norte, se considera que el viento y los gradientes de presión impuestos por el mismo, pudieran ser los responsables de esta circulación. Sin embargo, aún no se ha brindado explicación acerca de la existencia de una corriente costera pegada a San Miguel.

Como se mencionó en la sección de metodología, se midieron datos meteorológicos a bordo de la embarcación, lo que permitió obtener una variación espacial y temporal del viento en las bocas de la bahía, los resultados para la boca norte se muestran a continuación.

La figura 23, muestra la dirección y magnitud del viento (flechas verdes) a lo largo del transecto recorrido, en color rojo se observa la escala de referencia. La figura se compone de paneles que corresponden a diferentes periodos de tiempo, indicados en cada panel y referenciados en UTC.

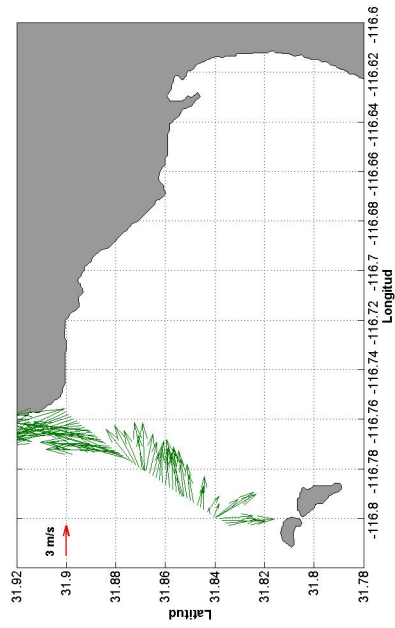
El rasgo más sobresaliente de la figura 23, es que cerca a San Miguel la dirección de la cual proviene el viento es diferente al resto del transecto. Mientras que en zonas cercanas a San Miguel ($\approx 2 \text{ km}$ de la costa) la dirección del viento fue del sureste, en el resto del transecto fue del oeste, esto es de suma relevancia ya que puede influenciar en la dirección y magnitud de las corrientes en esta sección del transecto. Lo anterior, pudiera estar ocasionado por la cadena de montañas que rodean la sección norte de la bahía, que ocasionan que los vientos del noroeste no tengan influencia en las zonas cercanas a San Miguel.

A partir de los resultados presentados en la figura anterior, es posible sugerir que el esquema de vientos general mostrado en las figuras 10 y 11, pudiera no ser aplicable para toda la bahía, lo cual parece tener implicaciones importantes en la circulación de menor escala dentro de la bahía.



(a) Experimento 1: 1 de febrero 2017 17:55-20:10

(b) Experimento 2: 2 de febrero 2017 2:10-4:40



(c) Experimento 3: 10 de marzo 2017 13:10-14:20

Figura 23: Diagrama representativo de la magnitud y dirección del viento, medidos a bordo de la embarcación a lo largo del transecto de la boca norte. En color rojo, se observa la escala de magnitud del viento.

Una herramienta eficaz para el estudio de la dinámica costera de pequeña escala espacio temporal (del orden de metros y minutos) son los radio escaterómetros oceanográficos (HFR por sus siglas en inglés). A continuación, se comparan datos de los radios escaterómetros (los cuales representan velocidad de las corrientes a una profundidad de $\approx 0.5\text{ m}$), con los datos más superficiales medidos por el ADCP a $\approx 2.5\text{ m}$ de profundidad.

La figura 24 muestra un diagrama de Hovmöller para la boca norte, en los paneles superiores se observa las condiciones del viento y el periodo de marea correspondiente al tiempo muestreado en septiembre de 2016, el tercer panel corresponde a los datos obtenidos a partir de los radio escaterómetros y en la parte inferior los datos superficiales del ADCP. Los puntos de color blanco en el panel correspondiente al ADCP representan la posición espacio-temporal de los transectos realizados. Los contornos de color rojo indican entradas de agua hacia la bahía y los contornos azules están asociados a salidas de agua.

En el panel de los datos de los radio escaterómetros se observa que la línea de velocidad cero (color blanco) presentó una inclinación, lo cual indica que los cambios de dirección de las corrientes se presentaron primero en las zonas cercanas a San Miguel (valor de distancia menor) y por último en las zonas cercanas a las Islas Todos Santos (máximo valor de distancia). Adicionalmente, se observa una similitud notable entre los datos de radio escaterómetros y del ADCP, de esta manera cuando la marea subió se observaron entradas de agua y cuando la marea bajo se observó una inversión del flujo con agua saliendo de la bahía para las dos mediciones (radio escaterómetros y ADCP). Sin embargo, es importante notar que en la región de San Miguel (hasta $\approx 2\text{ km}$ de la costa), el ADCP capturó un flujo de salida persistente durante todo el flujo y reflujo de la marea, el cual parece obedecer a una dinámica distinta a la influenciada por la variabilidad diurna de la marea.

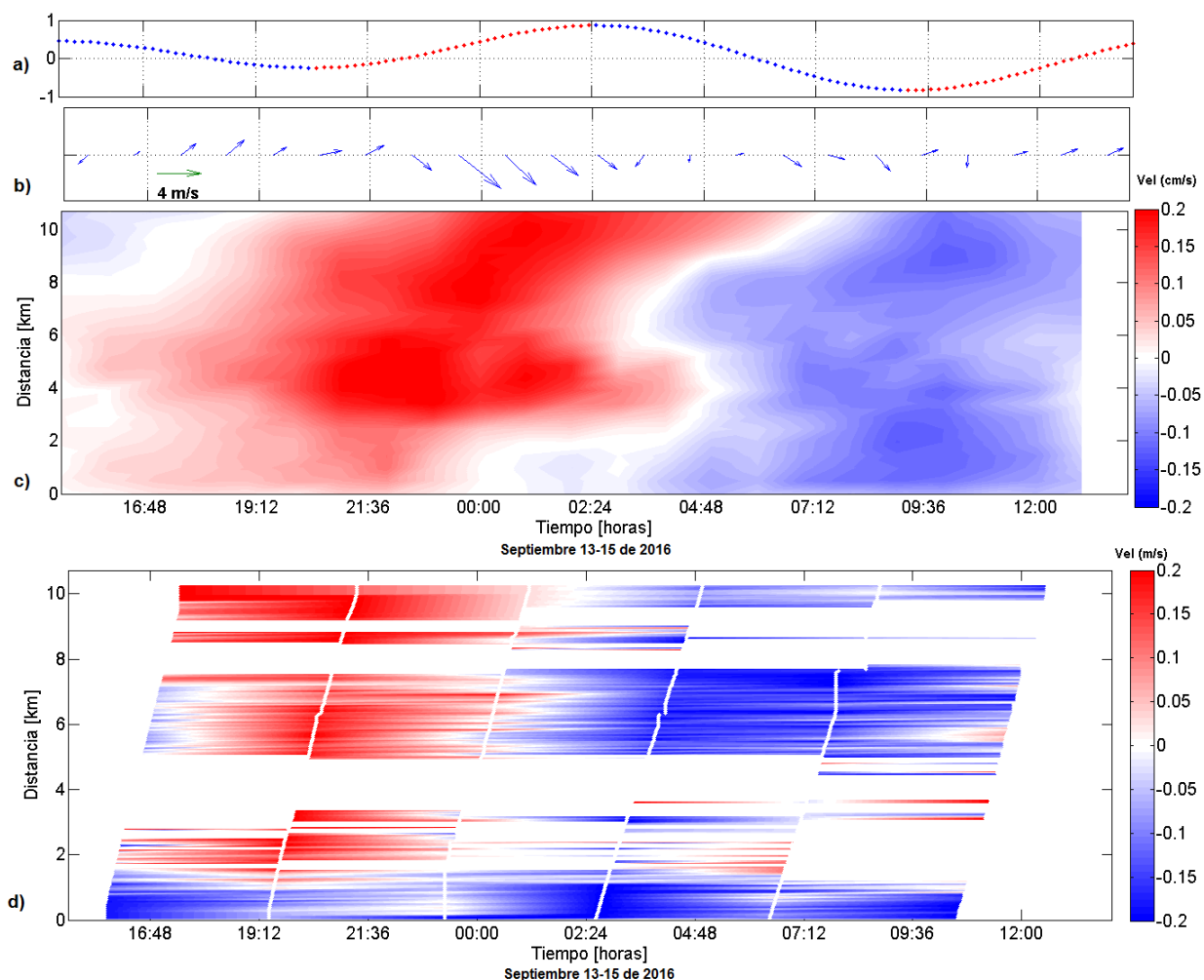


Figura 24: Diagramas de Hovmöller correspondientes a la boca norte. El panel a) indica las condiciones de la marea a línea de color rojo corresponde a periodos de pleamar y el color azul a bajamar y el panel b) corresponde al viento para el periodo de tiempo presentado. El panel c) corresponde a los datos obtenidos con los radio escaterómetros y el panel d) a los datos del ADCP. Las líneas blancas horizontales en el panel d) (ADCP) indican la posición espacio-temporal de los transectos realizados. La mínima distancia corresponde a San Miguel y el valor máximo a las Islas Todos Santos. Los valores negativos (contornos azules) corresponden a agua saliendo de la bahía y valores positivos (contornos rojos) corresponde a flujos entrando.

La figura 25 muestra el promedio de corrientes superficiales presentadas en la figura 24 (radio escaterómetros y ADCP). Nuevamente, se observa la similitud entre los datos medidos por los radio escaterómetros y el ADCP. Se observa que cerca de la costa de San Miguel predominaron los flujos de salida (valores negativos). De acuerdo al gradiente de presión estimado en la figura 18, se sugiere que el movimiento de agua desde las Islas hacia San Miguel, pudiera estar conectado con el flujo casi permanente que tiende a salir de la bahía pegado a la costa de San Miguel. Aunque el promedio medido por los radio escaterómetros muestra valores positivos para el resto del transecto (flujos entrando), el promedio de ADCP muestra una segunda zona asociada a valores negativos a los $\approx 7 \text{ km}$, lo cual pudiera estar relacionado con el cambio en la batimetría (zona menos profunda), dado que el ADCP mide corrientes más profundas, que pudiera sentir el efecto del fondo.

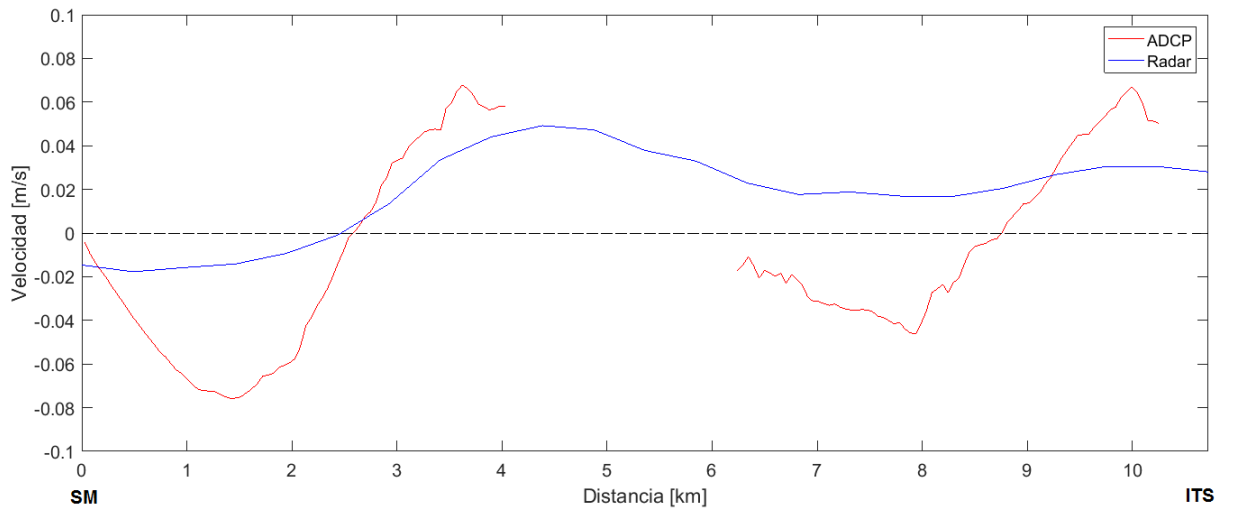


Figura 25: Promedio de corrientes en (m/s), con color rojo el promedio correspondiente al ADCP y de color azul a los radio escaterómetros. En el eje horizontal la mínima distancia corresponde a San Miguel y el valor máximo a las Islas Todos Santos.

Hasta el momento, se han analizado los rasgos más relevantes de los patrones de intercambio entre la BTS y el océano adyacente para la boca norte de la bahía. Como se observó, los rasgos dinámicos son poco triviales y con cambios importantes en escalas espaciales del orden de km.

La siguiente sección presenta resultados ordenados de manera similar pero que reflejan la dinámica de la boca sur.

3.2.2 Intercambio de agua entre la boca sur y el océano adyacente

De manera similar que para la boca norte, se realizaron mediciones a lo largo de un transecto para la boca sur, a continuación se muestra la variabilidad vertical de los campos de temperatura, salinidad y densidad a lo largo de la boca sur, medidos en un ciclo diurno completo, en condiciones de marea muerta durante febrero de 2016 y febrero de 2017. Los resultados de las mediciones realizadas en pleamar se presentan en la figura 26, mientras que los datos obtenidos en bajamar se presentan en la figura 27.

Las figuras 26 y 27 se componen de manera similar a la figura 15. Durante el muestreo de febrero de 2016 (figura 26 panel izquierdo), la termoclina se ubicó aproximadamente a 20 *m* de profundidad, mientras que durante febrero de 2017 (figura 26 panel derecho) la termoclina fue más profunda, se ubicó a ≈ 28 *m* de profundidad. Los valores de temperatura fueron más bajos en febrero de 2017 que en febrero de 2016, con diferencias en la temperatura de $\approx 2^{\circ}C$. Los valores de salinidad fueron más altos durante el muestreo de febrero de 2017. Los dos periodos muestreados mostraron salinidades relativamente homogéneas a lo largo del transecto, para condiciones de pleamar en marea muerta. Los resultados sugieren que las condiciones en la boca sur (figura 26) son más oceánicas que en la boca norte (figura 16), esto es, una termoclina más profunda asociada a agua más fría y menos salada.

La figura 27 muestra las mismas variables de la figura 26, pero en condiciones de bajamar. Durante los dos muestreos, se observó que la termoclina estuvo más profunda, se ubicó a los ≈ 30 *m*. Durante el muestreo de febrero de 2017 (paneles derechos), se observó agua de salinidad relativamente más alta ≈ 0.15 *ups* cerca de

la costa de Punta Banda (comparada con el agua cerca de las Islas). En mareas muertas, durante febrero de 2017 los valores de salinidad fueron mayores ≈ 0.15 *ups* que en febrero de 2016.

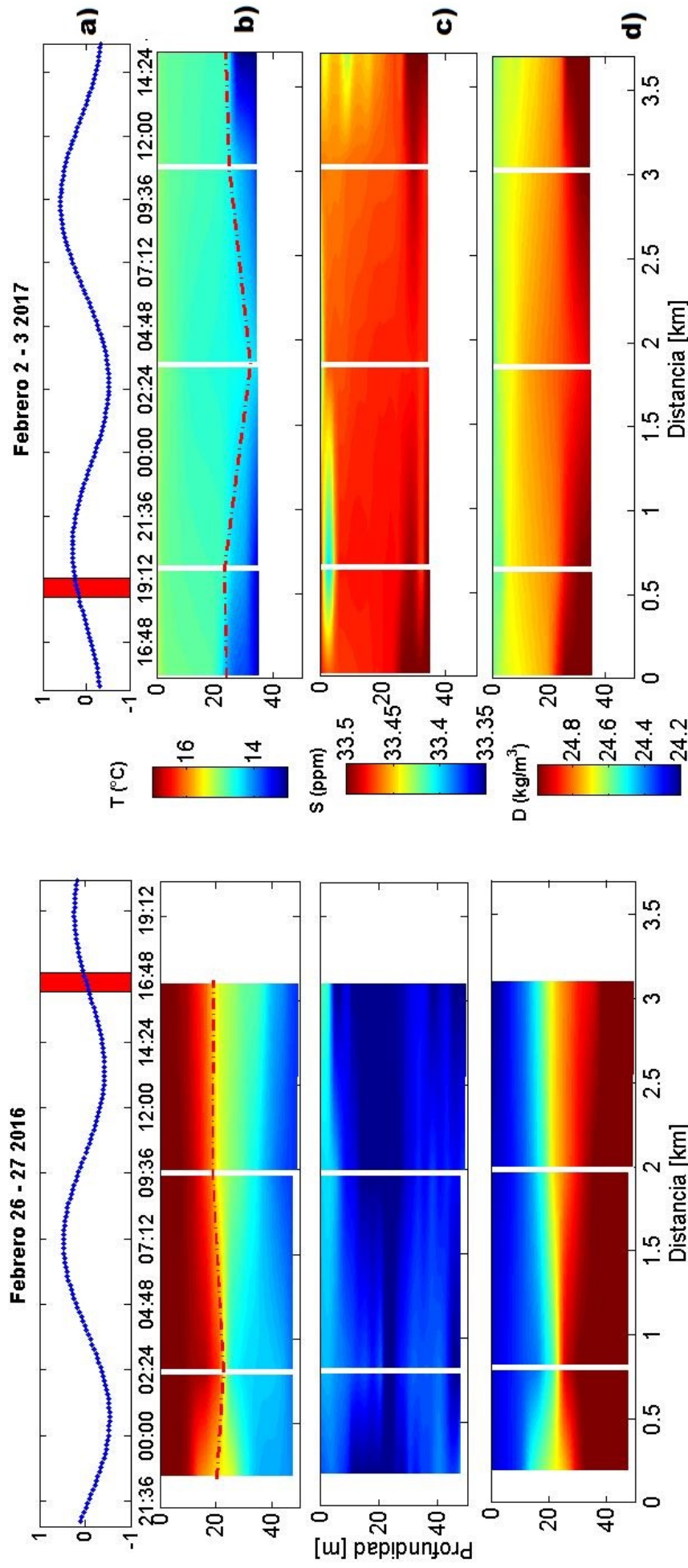


Figura 26: Contornos para la boca sur de la bahía, obtenidos a partir de los lanzes de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de pleamar en marea muerta febrero de 2016 y 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.

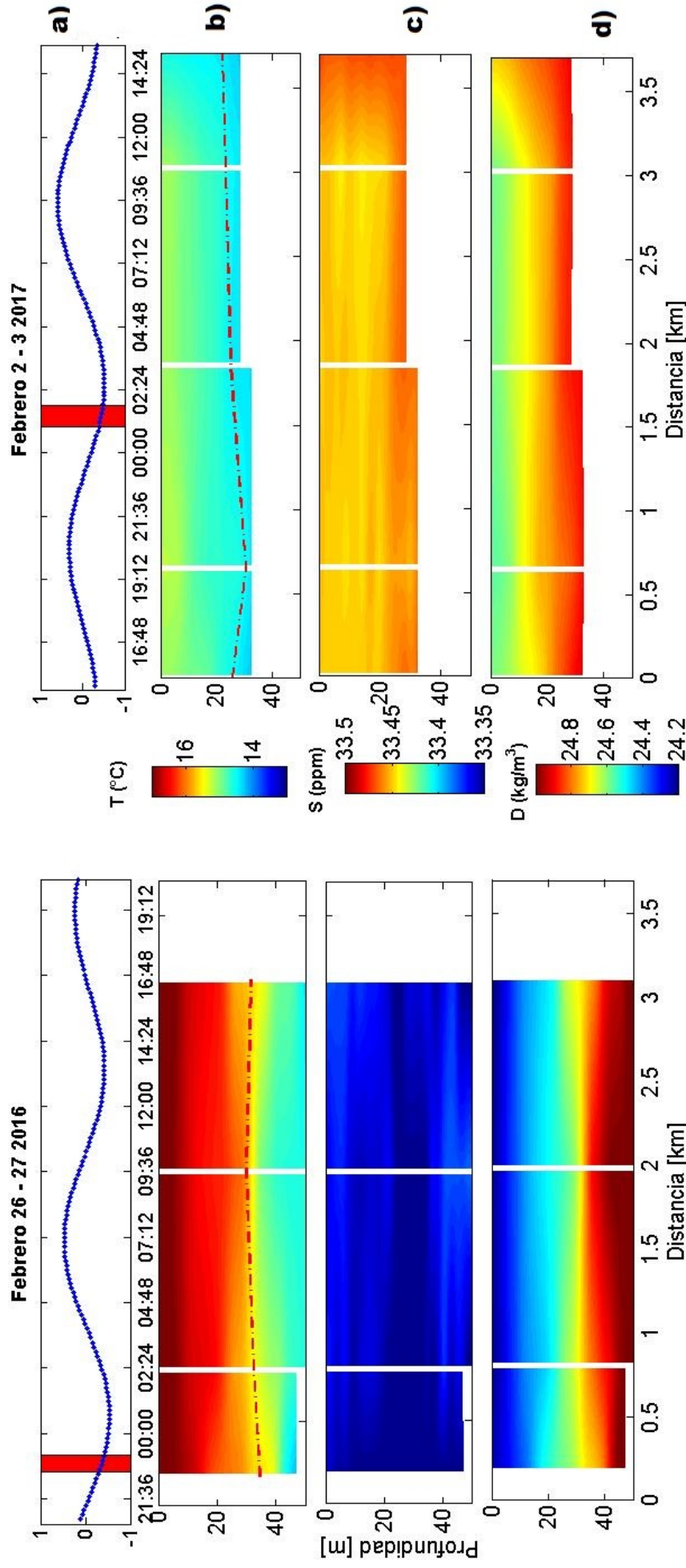


Figura 27: Contornos para la boca sur de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de bajamar en marea muerta febrero de 2016 y 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.

Las figuras 28 y 29 corresponde a las mediciones realizadas durante mareas vivas para los muestreos realizados en septiembre de 2016 y marzo de 2017. Las figuras se componen de la misma forma que la figura 26 y muestra las mismas variables.

La figura 28 muestra los datos medidos durante los muestreos de mareas vivas, tanto para el panel de la izquierda como el de la derecha (septiembre de 2016 y marzo de 2017) la profundidad de la termoclina se ubicó entre los 15 y 20 m de profundidad. El mes de septiembre (paneles izquierdos), presentó las temperaturas más altas y salinidad relativamente más alta ≈ 0.05 *ups* cerca de la costa de Punta Banda. Un rasgo importante del campo de salinidad para este muestreo (septiembre de 2016) es que se observó una capa subsuperficial de agua relativamente menos salada centrada a los ≈ 20 m de profundidad. Durante marzo de 2017 figura 28 (paneles derechos), los valores de salinidad relativamente más altos se encontraron debajo de los 20 m de profundidad, a lo largo de todo el transecto.

La figura 29, presenta los resultados para condiciones de bajamar en mareas vivas, se encontraron comportamientos similares a las condiciones de pleamar (figura 28). Sin embargo, durante el muestreo de septiembre de 2016 (paneles izquierdos), los gradientes de salinidad fueron más intensos.

De manera similar a la boca norte, a pesar de ser mediciones en periodos y estados de marea diferentes, se observó de manera recurrente agua más salada, cerca de la costa de Punta Banda. Se mantuvieron las diferencias mencionadas entre los experimentos

•

para la boca norte, donde el muestreo de septiembre fue el más cálido y estratificado, esto ocasionado por el calentamiento debido a la época del año.

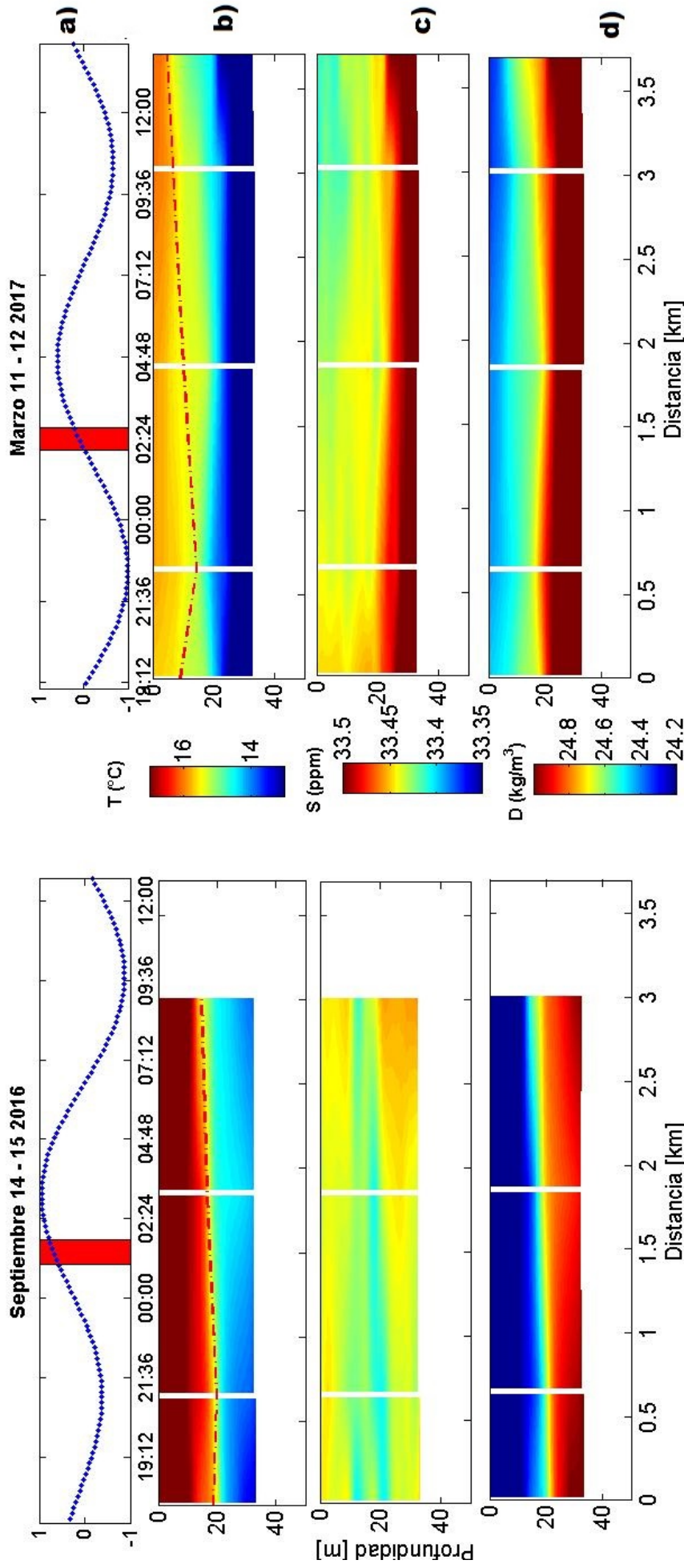


Figura 28: Contornos para la boca sur de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de pleamar en marea viva septiembre de 2016 y marzo de 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.

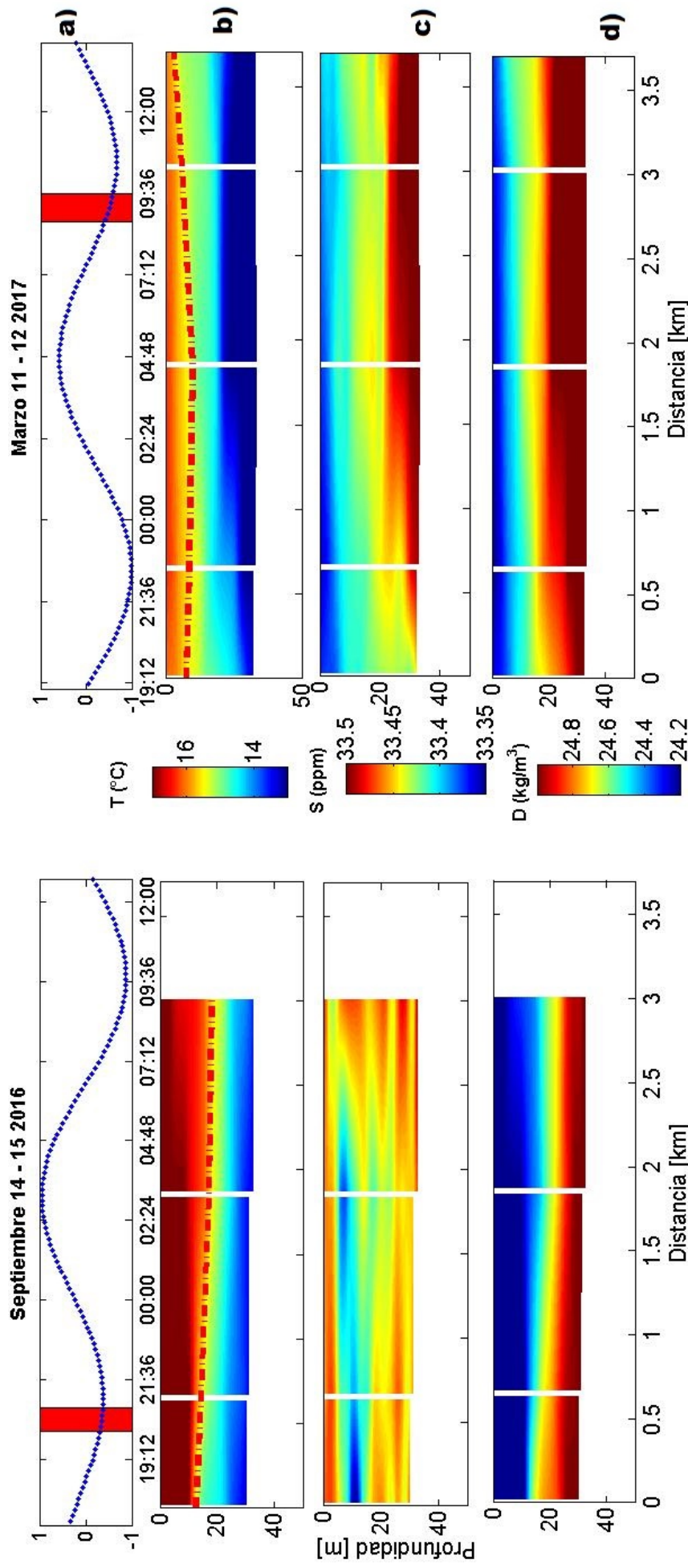


Figura 29: Contornos para la boca sur de la bahía, obtenidos a partir de los lances de CTD correspondientes a las variables de temperatura, salinidad y densidad para periodos de bajamar en marea viva septiembre de 2016 y marzo de 2017. En la parte superior el período de marea correspondiente al tiempo que tomo hacer el transecto. El lado izquierdo del eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.

Las figuras 30 y 31 muestran los residuales de temperatura y salinidad respectivamente (calculados de acuerdo a lo mencionado en la metodología), para los primeros 50 *m* de la columna de agua en la boca sur, obtenidos con los datos de las 24 horas de muestreo. Los paneles superiores corresponden a los periodos de marea muerta (izquierdo a febrero de 2016 y derecho a febrero de 2017) y los paneles inferiores a marea viva (izquierdo a septiembre de 2016 y derecho a marzo de 2017). Las líneas blancas verticales indican la posición de los lances realizados a lo largo del transecto. La línea roja punteada (figura 30) representa la profundidad de la termoclina.

Se observa en la figura 30 que las campañas realizadas en el 2016 (paneles izquierdos) presentaron valores de temperatura más altos $\approx 2^{\circ}C$ que los muestreos de 2017 (paneles derechos), dado que el año 2016 se caracterizó por ser un año cálido (año en condiciones de El Niño). Para los periodos de marea muerta (paneles superiores), la termoclina se encontró aproximadamente a los ≈ 25 *m* de profundidad, mientras que en marea viva (paneles inferiores), la profundidad de la termoclina fue menor, se ubicó a los ≈ 15 *m* para septiembre de 2016 y ≈ 10 *m* para marzo de 2017, esto puede estar ocasionado por el incremento en la temperatura para estos periodos (septiembre de 2016 y marzo de 2017, ver tabla 4), comparado con los otros muestreos, lo que ocasiona una estratificación mayor en la columna de agua.

Para el residual de salinidad (figura 31), se observó que durante periodos de marea muerta (febrero de 2016) las regiones donde las salinidades fueron relativamente altas (asociadas con regiones donde las temperaturas fueron relativamente altas) se ubicaron en las capas más superficiales (< 10 *m*). Mientras que, para los otros muestreos, se observó agua de salinidad relativamente menor en capas superficiales (menores a los 10 *m*) y para capas más profundas se encontró agua con salinidades más altas ≈ 0.1 *ups*. Es importante destacar que durante el muestreo de septiembre de 2016 (panel inferior izquierdo) se observó una capa subsuperficial centrada en ≈ 15 *m* de profundidad de salinidad ≈ 0.05 *ups* menor que la capa superficial y la capa más profunda.

Para todos los muestreos, se observó que la termoclina presentó una leve inclinación positiva desde las Islas hacia Punta Banda, es decir, es relativamente profunda del lado de las Islas Todos Santos y más somera del lado de Punta Banda. Por lo tanto, el gradiente de presión es mayor en las Islas y menor en Punta Banda, se sugiere que esto puede inducir un movimiento de aguas hacia Punta Banda por la superficie y hacia las Islas por el fondo, esto como respuesta dinámica inducida por el gradiente de presión.

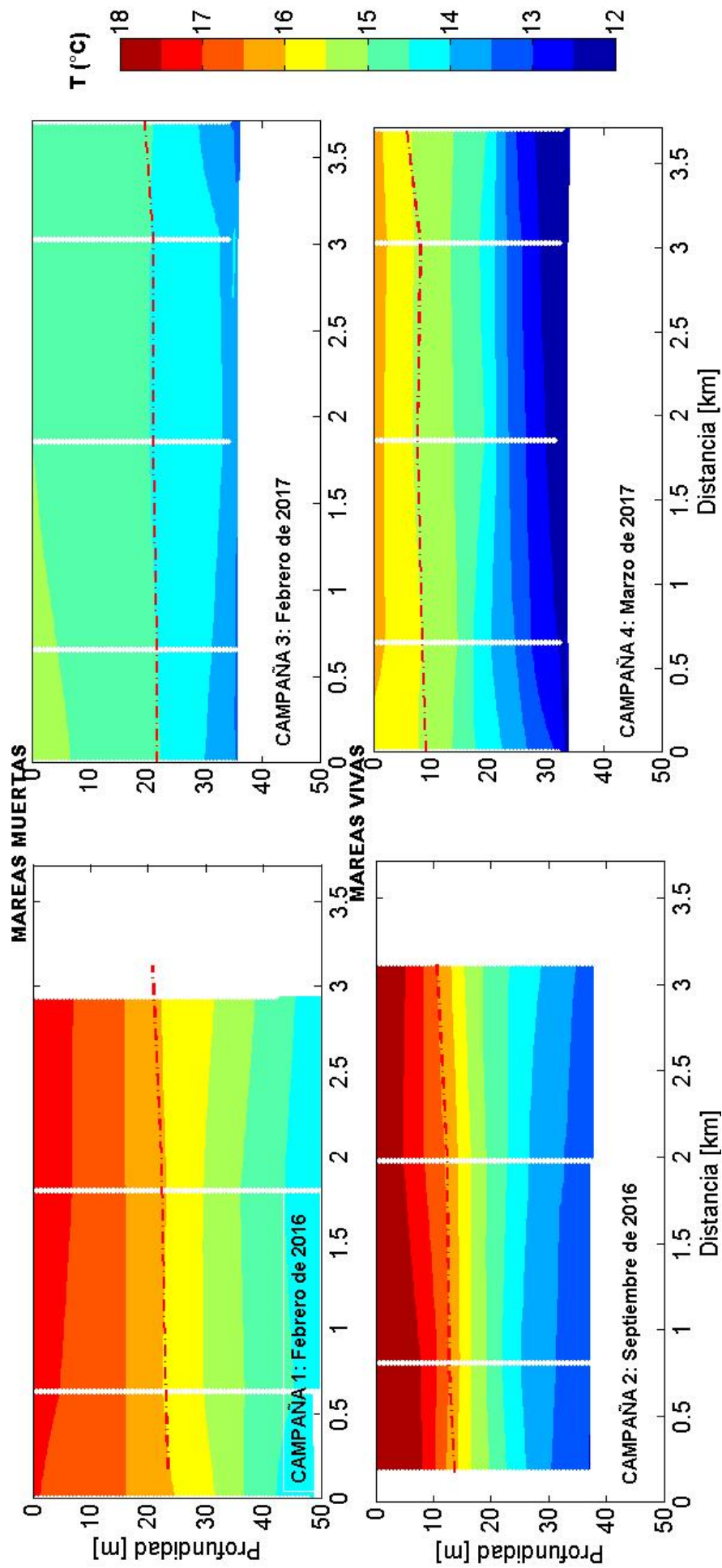


Figura 30: Temperatura promedio para cada periodo muestreado de la boca sur. El lado izquierdo en el eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.

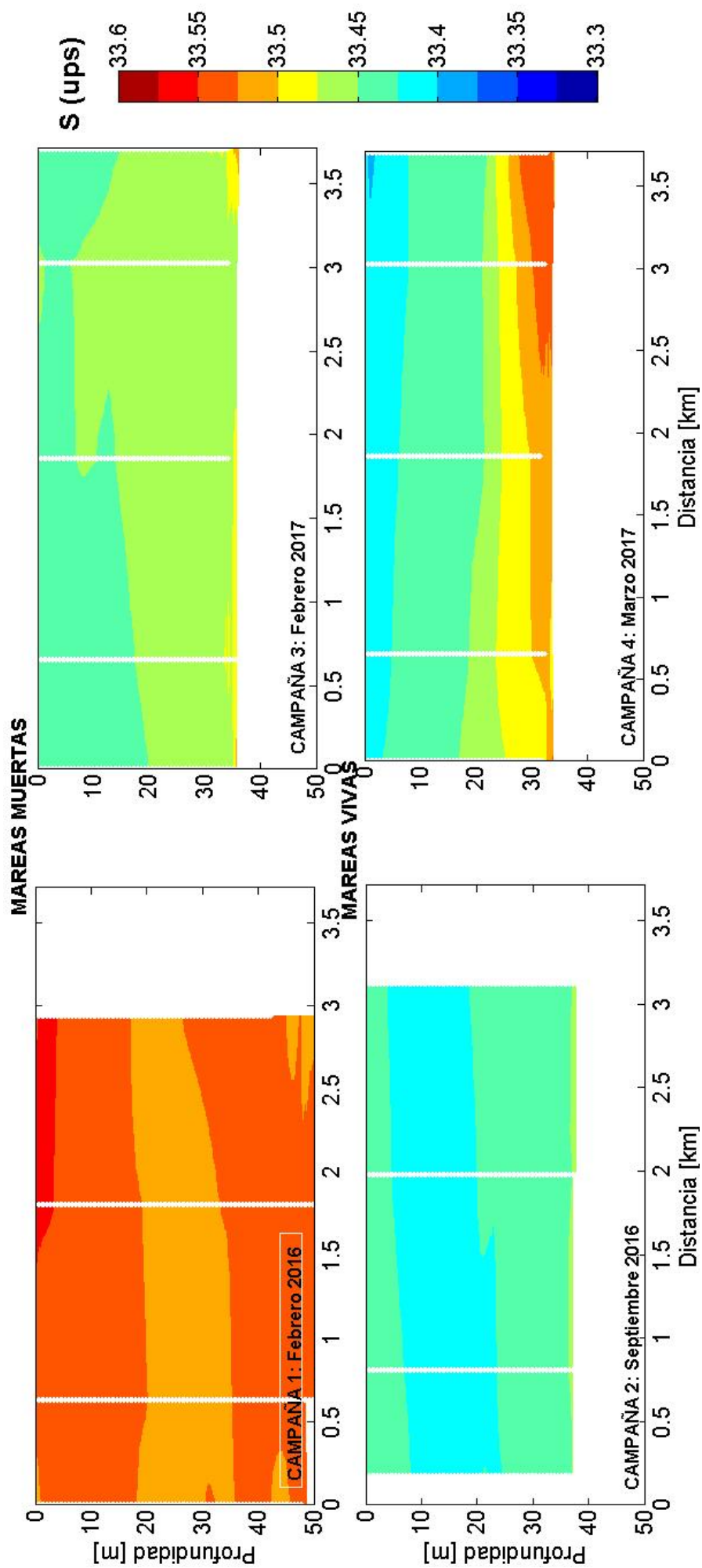


Figura 31: Salinidad promedio para cada periodo muestreado de la boca norte. El lado izquierdo en el eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda.

Con el objetivo de complementar el esquema de circulación, planteado a partir de los perfiles de temperatura, salinidad y densidad, a continuación se presenta la componente de la velocidad perpendicular al transecto de la boca sur, obtenida con el ADCP remolcado por la embarcación. En la figura 32 los paneles **a**, **b** y **c** representan el flujo residual (calculado a partir de un promedio vectorial) para las campañas de septiembre de 2016, febrero de 2017 y marzo de 2017 respectivamente.

Durante los tres periodos muestreados se observó un flujo de agua de salida cerca de Punta Banda, con velocidades de $\approx 15 \text{ cm/s}$. Adicionalmente se presentó una circulación en dos capas, con flujos entrando a la bahía por la capa superficial (profundidades menores a los $\approx 15 \text{ m}$), acompañado de un contra flujo con dirección hacia afuera de la bahía para profundidades $> 15 \text{ m}$, estos con velocidades medias de $\approx 15 \text{ cm/s}$.

Los resultados sugieren que para la boca sur predomina la circulación en dos capas, con aguas entrando a la bahía hasta aproximadamente 15 m de profundidad y una segunda capa con magnitudes negativas, asociado con un flujo de salida de la bahía, los flujos presentan velocidades medias de $\approx 15 \text{ cm/s}$.

Para las paneles **a** y **c** de la figura 32 (muestreos de septiembre de 2016 y marzo de 2017) correspondientes a periodos de mareas vivas, se observó una clara relación del cambio de dirección de las velocidades con la profundidad de la termoclina (figura 30 paneles inferiores). Mientras que, para el muestreo de febrero de 2017 (figura 32 panel **b**), dado que la columna de agua se encontraba más mezclada, la termoclina estuvo más profunda $\approx 20 \text{ m}$. En este caso, no se pudo establecer un comportamiento asociado a la termoclina, dado que la mezcla ocasionó que la termoclina se encontrara a profundidades mayores. Cabe mencionar que la región de la boca sur se encuentra en un cañón submarino de $\approx 400 \text{ m}$ de profundidad, por lo que los datos presentados fueron a las máximas profundidades que el instrumento logró medir.

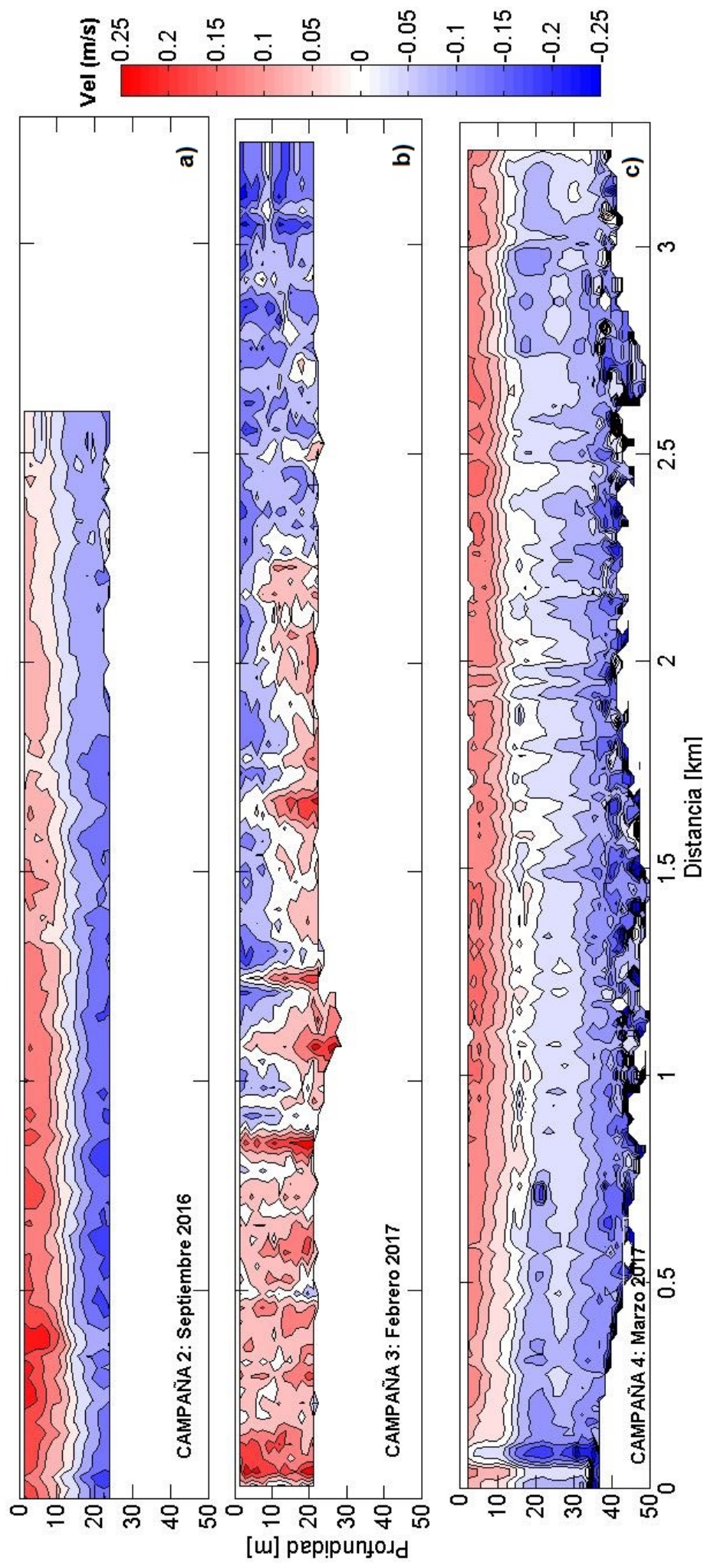


Figura 32: Corrientes residuales (de las 24 horas de muestreo) a través del transecto, medidas con el ADCP en la boca sur de la bahía. El panel superior y el panel inferior corresponden a periodos de mareas vivas, el panel del medio a mareas muertas. El lado izquierdo en el eje horizontal corresponde a las Islas Todos Santos y el lado derecho a Punta Banda. Los valores negativos (contornos azules) corresponden a agua saliendo de la bahía y valores positivos (contornos rojos) corresponde a flujos entrando.

De los resultados presentados hasta el momento se puede considerar que la circulación en dos capas presentada en la figura 32 paneles **a** y **c**, pudiera estar ocasionada por una estratificación mayor y una termoclina somera $\approx 10\text{ m}$, mientras que en el muestro de febrero de 2017 (32 panel **b**) no es tan clara la circulación en dos capas. Por el contrario, se encontraron corrientes entrando (en toda la columna de agua) para las zonas cercanas a la Islas y saliendo por la costa de Punta Banda.

Con el objetivo de corroborar la circulación en dos capas y su posible forzamiento, así como el flujo recurrente de salida por la costa de Punta Banda, se presenta a continuación la temperatura para tres profundidades 2, 9 y 22 m (figuras 33 y 34).

Para las variaciones de temperatura, se presentan dos periodos septiembre de 2016 (figura 33) y marzo de 2017 (figura 34). Las figuras se componen de cinco paneles, de manera similar a la figura 22.

En la figura 33 (septiembre de 2016), se presentaron aguas más cálidas ($\approx 19^\circ\text{C}$) en la superficie (2 m) y más frías ($\approx 14.5^\circ\text{C}$) en zonas de $\approx 22\text{ m}$. Se observó que las corrientes tuvieron una dirección homogénea hacia afuera de la bahía hasta los $\approx 20\text{ m}$ de profundidad, mientras que para la capa de 22 m se presentó una disminución en la intensidad de las corrientes.

La figura 34, correspondiente al muestreo de marzo de 2017, se compone de manera similar a la figura 33. El gradiente de temperatura en función de la profundidad fue menor que en septiembre de 2016 (figura 33), con diferencias máximas de $\approx 3^\circ\text{C}$. Para la capa más profunda (22 m) se observó que las corrientes fueron menos intensas, esto dado que para profundidades mayores se asocia a flujos de salida (figura 32). Debido a los gradientes de presión ocasionados por el forzamiento impuesto por el viento se encontró agua entrando a la bahía para capas superiores y flujos saliendo para capas más profundas.

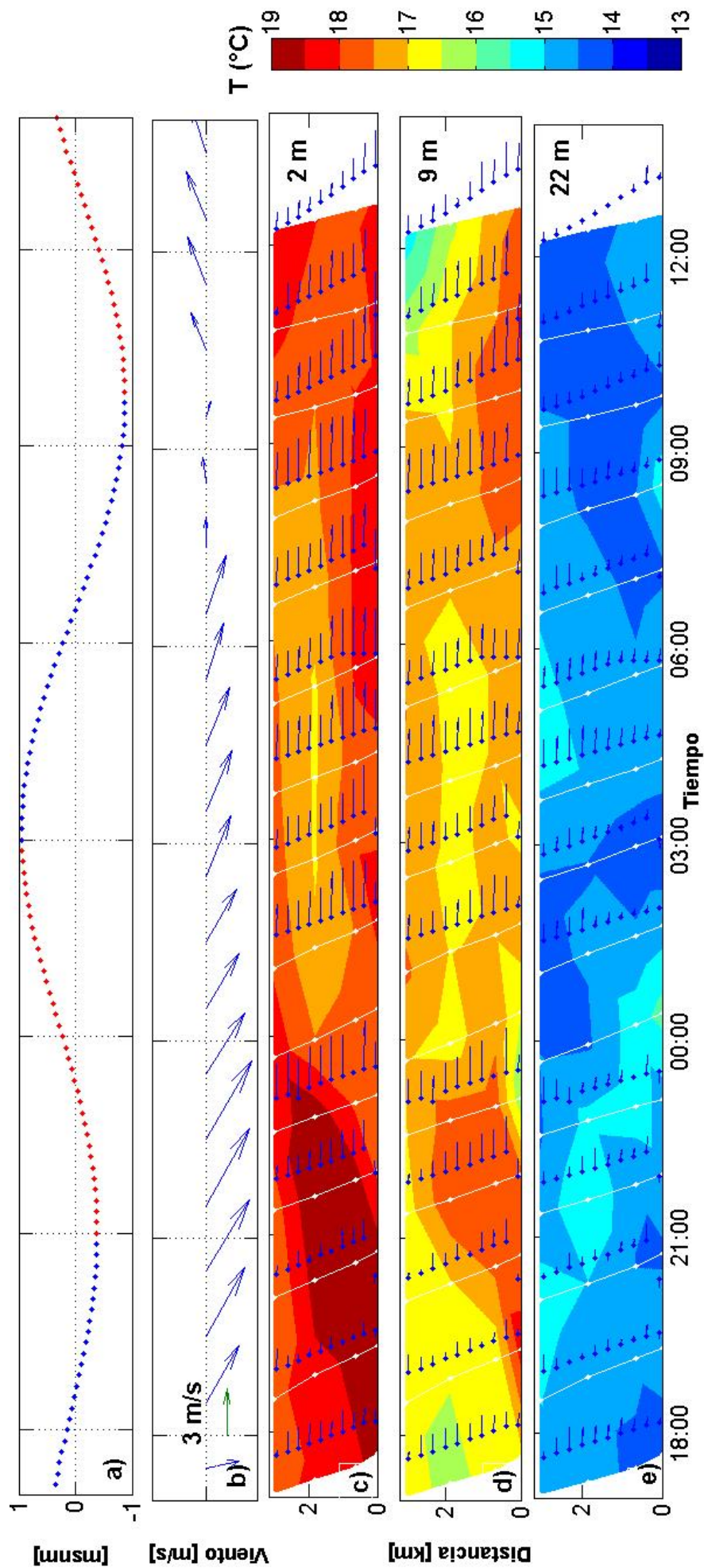


Figura 33: Perfiles verticales de temperatura correspondientes al muestreo en mareas vivas de septiembre de 2016 para la boca sur, el panel **a)** corresponde al periodo de marea, el panel **b)** representa la magnitud y dirección viento, los paneles **c**, **d** y **e** presentan los valores de temperatura para tres profundidades (2, 9 y 22 m respectivamente) con sus vectores de dirección de las corrientes (flechas azules), los puntos de color azul indican la posición espacial y temporal de los transectos medidos con el ADCP (origen de las flechas). En el eje de distancia el cero corresponde a las Islas Todos Santos y el máximo valor a Punta Banda.

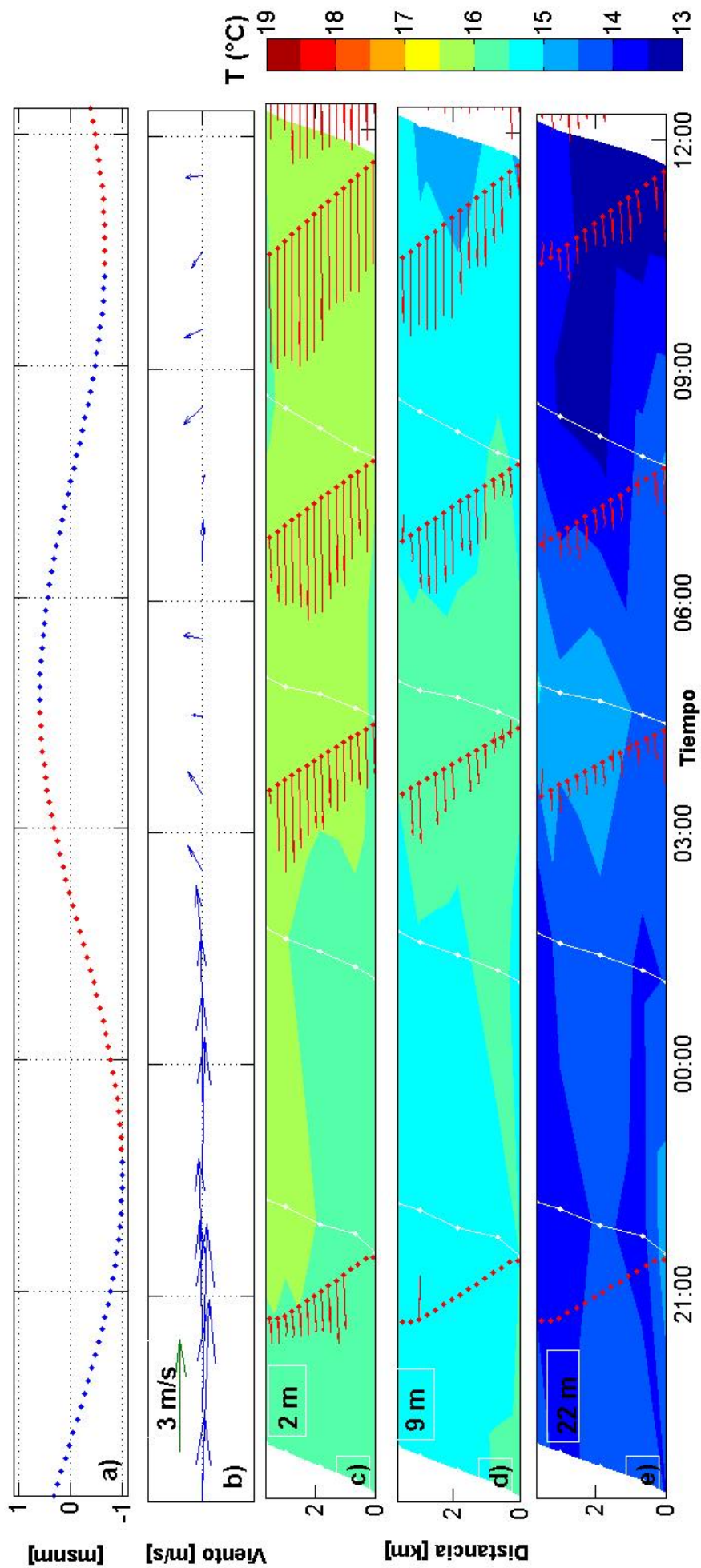
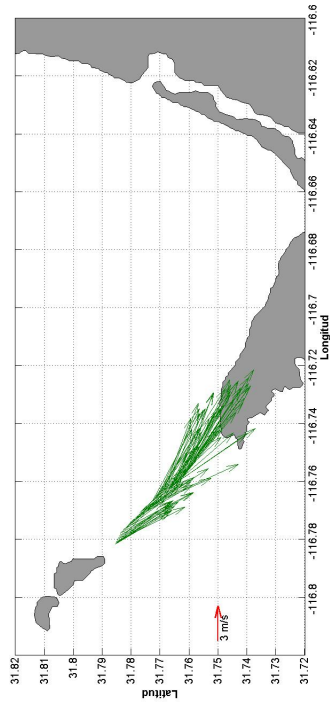


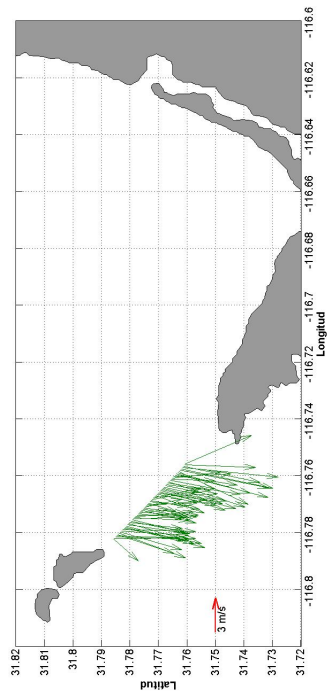
Figura 34: Perfiles verticales de temperatura correspondientes al muestreo en mareas vivas de marzo de 2017 para la boca norte, el panel **a)** corresponde al periodo de marea, el panel **b)** representa la magnitud y dirección viento, los paneles **c**, **d** y **e** presentan los valores de temperatura para tres profundidades (2, 9 y 22 m respectivamente) con sus vectores de dirección de las corrientes (flechas rojas), los puntos de color rojo indican la posición espacial y temporal de los transectos medidos con el ADCP (origen de las flechas). En el eje de distancia el cero corresponde a las Islas Todos Santos y el máximo valor a Punta Banda.

Con el objetivo de evaluar si hay una variación espacial y temporal importante del viento a lo largo del transecto, la figura 35 muestra los datos obtenidos con la estación meteorológica a bordo de la embarcación.

Los paneles **a** y **b** muestran vientos con dirección del noroeste con intensidades de 5 m/s , y los paneles **c** y **d** corresponden a vientos con dirección noreste con intensidades de 4 m/s . A pesar de la pequeña diferencia en la dirección del viento encontrada en el muestreo de febrero de y marzo 2017, no se encontró una diferencia espacial relevante a lo largo del transecto que pudiera estar relacionada con flujos de salida de agua por Punta Banda y entrada por la región de las Islas.

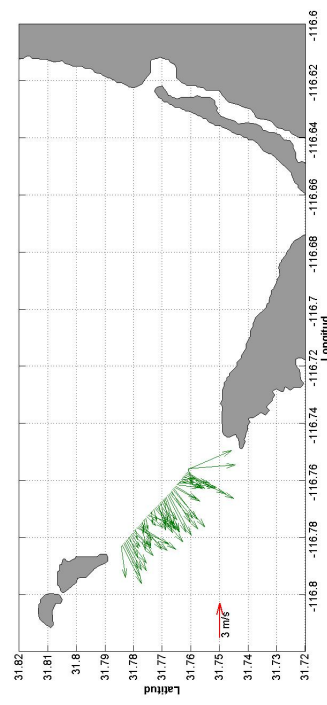


(a) Tiempo 1: 2 de febrero 2017 19:20-20:35



(c) Tiempo 3: 11 de marzo 2017 21:30-22:30

(b) Tiempo 2: 2 de febrero 2017 22:20-23:30



(d) Tiempo 4: 12 de marzo 2017 7:40-8:40

Figura 35: Diagrama representativo de la magnitud y dirección del viento, medidos a bordo de la embarcación a lo largo del transecto de la boca sur. En color rojo, se observa la escala de magnitud del viento.

Continuando con el análisis de forzamientos que pueden inducir la circulación en la boca sur, a continuación se comparan datos de los radio escaterómetros y datos del ADCP.

De manera similar a la boca norte se presenta un diagrama de Hovmöller (figura 36) pero para la boca sur. Las diferencias entre los datos de radio escaterómetros y los medidos por el ADCP resultan evidentes, sin embargo, hay que recordar que los radio escaterómetros miden la capa superficial ($\approx 0.5 \text{ m}$), mientras que la capa más superficial medida por el ADCP es a $\approx 2.5 \text{ m}$ de profundidad. Para la capa superficial medida con el ADCP, no se observó relación con la marea, pues siempre dominó entrada de agua a la bahía por la superficie ($\approx 2.5 \text{ m}$), mientras que los datos medidos por los radio escaterómetros muestran agua saliendo de la bahía. Esto se puede explicar teniendo en cuenta que la capa más superficial ($< 1 \text{ m}$ de profundidad) se encuentra altamente influenciada por el forzamiento del viento. Dicha influencia disminuye para capas más profundas, las cuales parecen responder a los gradientes de presión referidos de la figura 30 e impulsados por el efecto del viento, lo que genera una circulación de dos capas.

La figura 37 muestra el promedio de corrientes superficiales presentadas en la figura 36 (radio escaterómetros y ADCP), se observa que las corrientes promedio medidas por los radio escaterómetros tienen valores negativos, asociado a flujos de salida, mientras que los datos de la capa superficial medida con el ADCP corresponden a flujos de entrada (valores positivos), marcando una notable diferencia entre los dos instrumentos. A partir de esto, se puede sugerir la existencia de dos capas superficiales con dirección de corrientes opuesta.

Los resultados de las velocidades de corrientes mostrados para la boca sur (figura 32), mostraron una circulación en dos capas, la primera hasta los $\approx 15 \text{ m}$ de profundidad la cual estuvo asociada a entradas de agua a la bahía y una segunda capa ($> 15 \text{ m}$ de profundidad), asociada a agua saliendo de la bahía, ambos flujos presentaron velocidades medias de $\approx 15 \text{ cm/s}$. Sin embargo, a partir

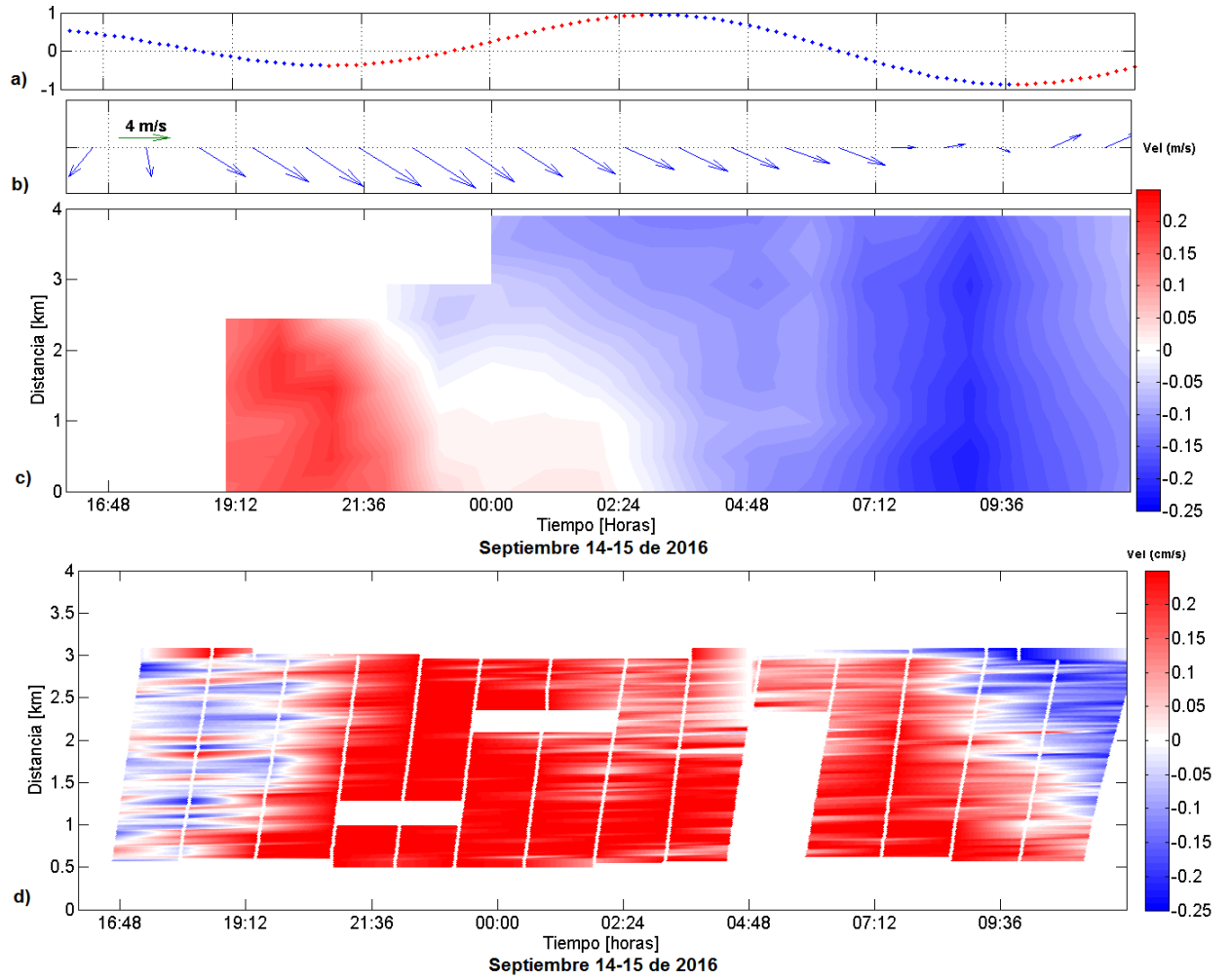


Figura 36: Diagramas de Hovmöller correspondientes a la boca sur. El panel a) indica las condiciones de la marea a línea de color rojo corresponde a periodos de pleamar y el color azul a bajamar y el panel b) corresponde al viento para el periodo de tiempo presentado. El panel c) corresponde a los datos obtenidos con los radio escaterómetros y el panel d) a los datos del ADCP. Las líneas blancas horizontales en el panel d) (ADCP) indican la posición espacio-temporal de los transectos realizados. La mínima distancia corresponde a San Miguel y el valor máximo a las Islas Todos Santos. Los valores negativos (contornos azules) corresponden a agua saliendo de la bahía y valores positivos (contornos rojos) corresponde a flujos entrando.

de los resultados observados en la figura 36, se puede deducir que existen tres capas con direcciones y forzamientos distintos. La primer capa es muy superficial ($\approx 1\text{ m}$), compuesta por un flujo de salida que parece estar influenciado por el

viento, como se pudo observar en las figuras 36 y 37. La segunda capa subsuperficial ($\approx 2 - 15 \text{ m}$) se asocia con agua entrando a la bahía que parece tener relación con el gradiente de presión. La tercer capa (profundidades $> 15 \text{ m}$) se compone nuevamente de aguas saliendo de la bahía (al igual que la capa superficial).

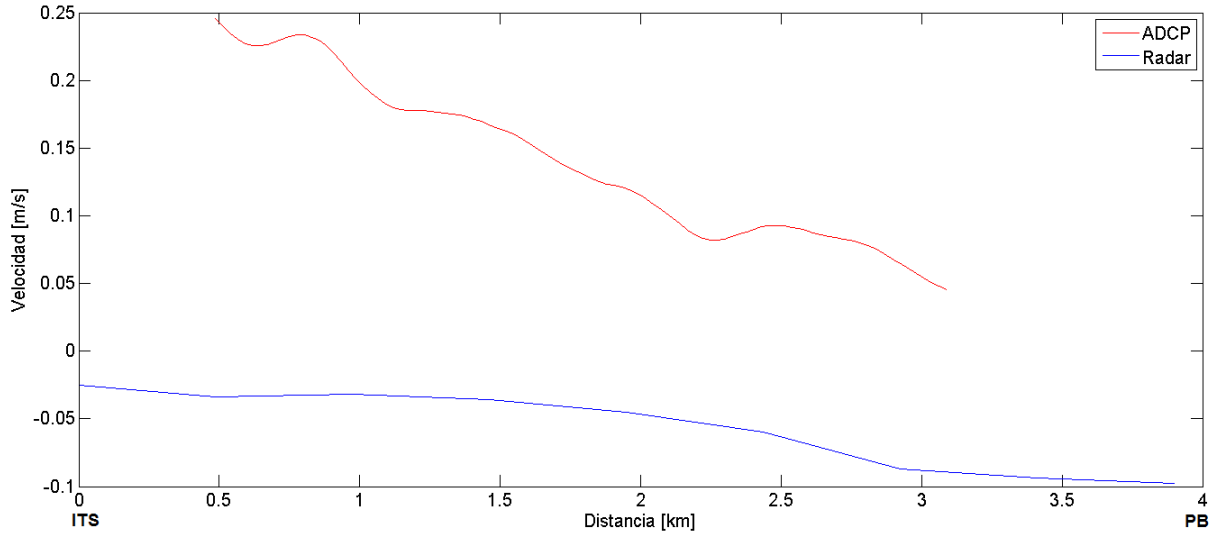


Figura 37: Promedio de corrientes en (m/s), con color rojo el promedio correspondiente al ADCP y de color azul a los radio escaterómetros. En el eje horizontal la mínima distancia corresponde a las Islas Todos Santos y el valor máximo a Punta Banda.

4 Discusiones

En el intercambio de agua entre un sistema semicerrado y otro adyacente la variación espacial del gradiente de densidad horizontal en la columna de agua es uno de los factores más importantes. El agua más salada y densa se transporta a lo largo del fondo hacia el océano, mientras que el agua menos salada y ligera lo hace hacia el interior del sistema cerca de la superficie, esta circulación de dos capas no solo transporta sal, sino también calor y otras propiedades bioquímicas del agua (Bakun y Nelson, 1977).

Otros factores son la marea, el viento, la fricción con el fondo y paredes laterales de la cuenca, así como la rotación de la Tierra, los cuales se combinan para producir la circulación residual, misma que es la responsable del intercambio neto de agua con el océano (Stommel y Leetmaa, 1972). Las variaciones de presión atmosférica, relacionadas también con el viento, producen una variación en el nivel del mar (Winant, 2004). Estas variaciones se conocen como marea barométrica y también son llamadas anomalías. En términos prácticos este efecto ocasionado por el gradiente de presión atmosférico, produce inclinación de la superficie oceánica y esto a su vez tiene implicaciones en el gradiente de presión horizontal y vertical de la columna de agua, lo que induce movimiento oceánico.

Para la circulación en la Bahía Todos Santos, en un estudio realizado sobre las corrientes en las entradas de la bahía entre septiembre de 2007 y octubre de 2008, Miranda-Bojórquez (2012) determinó que el flujo promedio es hacia el interior de la bahía en la entrada norte y hacia afuera por la apertura del cañón. En otro estudio, Mateos et al. (2009) usó un modelo forzado con viento, flujo de calor y condiciones de frontera abierta, y determinó que la circulación en la BTS consiste principalmente en la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos que evolucionan en escalas temporales de alrededor de 2 días. También determinó la existencia de un flujo de entrada a la bahía, verticalmente homogéneo en la parte superior (50 m) y que fluye hacia el sur en el lado occidental de la bahía. Para

periodos de verano, Mateos Farfán (2010) encontró que hay corrientes cercanas a las islas que ingresan por ambas entradas y que salen cerca de las costas de San Miguel y Punta Banda en las capas superficiales.

Hasta el momento, los esquemas de circulación propuestos para la bahía han establecido un patrón de intercambio relativamente sencillo. Sin embargo, en el esquema propuesto aquí, se proporciona un panorama tridimensional de pequeña escala (metros y horas) de los flujos de intercambio entre la BTS y el océano adyacente.

Los resultados muestran que tanto para la boca norte como para la boca sur, en las costas de San Miguel y Punta Banda respectivamente, hay aguas con salinidad relativamente mayor (≈ 0.1 *ups*) con respecto a la región de las islas. Si consideramos, que el agua en el interior de la bahía es expuesta a la radiación solar y procesos de evaporación durante varias horas diariamente, los niveles de salinidad deberían ser mayores que al exterior, por lo que el agua de mayor salinidad cerca de San Miguel y de Punta Banda, podría estar relacionada a flujos residuales de salida por la superficie, pegados ($\approx 1-2$ *km*) a las costas de San Miguel y Punta Banda respectivamente. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Mateos Farfán (2010), quien reportó esos flujos observados únicamente para las corrientes superficiales. Aquí, el esquema se complementa al evidenciar que es agua relativamente más salada que viene del interior de la bahía pero que se observa durante el refluo de la marea (con periodicidad diurna).

En el flujo residual, se observó que existe una región con un flujo unidireccional hacia el exterior de la bahía por la costa de San Miguel (parte más somera del transecto) con velocidades medias de ≈ 10 *cm/s*. Esto pudiera tener relación con una región (o sombra de viento), en la cual el viento parece influenciar de forma distinta que en el resto de la bahía, ocasionando una desconexión dinámica entre esta zona y el resto de la boca norte.

Otro aspecto a resaltar de la boca norte de la BTS, fue la presencia de una

circulación en dos capas, la capa superficial regida por los efectos del viento asociada a entradas de agua y con velocidades medias de $\approx 20 \text{ cm/s}$, y una segunda capa (por el fondo) compuesta por flujos de salida del orden de $\approx 15 \text{ cm/s}$ que parecieron ser forzados por un incremento en el nivel del mar hacia el límite este de la bahía, ocasionado por un efecto de “apilamiento” de agua como producto del arrastre del viento.

Para la boca sur el esquema de intercambio fue más complejo; una capa superficial ($< 1 \text{ m}$) que se encuentra modulada directamente por el viento, compuesta de un flujo residual unidireccional hacia el exterior de la bahía. Una segunda capa subsuperficial (por debajo de $\approx 1 \text{ m}$ y hasta los $\approx 15 \text{ m}$), asociada a flujos entrando a la bahía con velocidades medias de $\approx 15 \text{ cm/s}$, aparentemente ocasionado por los gradientes de presión impuestos por el forzamiento del viento (tal como en la boca norte), y una tercera capa de fondo que por efecto del mismo gradiente de presión impuesto por el viento genera un flujo de contra corriente compensatorio, con salida de agua por debajo de $\approx 15 \text{ m}$ de profundidad.

La circulación en dos capas encontradas para las bocas de conexión, puede ser explicada por el forzamiento del viento que “apila” agua hacia el límite este de la bahía, lo que podría generar una inclinación del nivel de mar y un gradiente de presión que inducirá el movimiento de agua. Sin embargo, para la boca norte cuando la intensidad del viento es menor, los flujos son unidireccionales (hacia el interior de la bahía) y homogéneos a lo largo de la columna de agua, lo que podría ser explicado dado que el viento débil no debería generar un “apilamiento” significativo y por lo tanto, el gradiente de presión sería despreciable. Adicionalmente, aparte de la circulación en dos capas, para la región de San Miguel se presenta un esquema diferente con salidas de agua casi permanentes, ubicado preferentemente en las regiones someras de la sección.

Mientras que, para la boca sur además de la circulación en dos capas (ocasionada por los gradientes de presión), existe una capa muy superficial influenciada directa-

mente por el viento (únicamente detectada por los radio escaterómetros), asociado a salidas de agua, esto podría ser explicado dado que el viento no se alinea con el gradiente de presión impuesto por el mismo viento, ocasionando que sea un flujo de contra corriente, además en la sección sur así como en la boca norte, se presenta una salida de agua casi permanente, en este caso por la costa de Punta Banda.

5 Conclusiones

Las diferencias de densidad que son regidas principalmente por la temperatura marcan un patrón importante en la circulación de la bahía, al generar lo que parece ser un transporte de agua en dos capas, con flujos hacia adentro de la bahía para capas superiores a la termoclina y hacia afuera de la bahía para profundidades por debajo de la termoclina. Sin embargo, este esquema básico parece presentar diferencias relevantes entre las dos bocas de conexión de la bahía.

Para la boca norte, se sugiere que existe una combinación entre los gradientes de presión y la variabilidad espacial del forzamiento del viento, lo cual ocasiona un transporte de agua desde las Islas hacia San Miguel, que tiende a salir pegado a la costa con velocidades medias de 10 cm/s .

El esquema de circulación vertical para el resto del transecto de la boca norte se encuentra asociado al gradiente de presión a lo largo del eje principal de la bahía, que genera una circulación en dos capas, con entradas de agua en capas superficiales (arriba de termoclina) y salidas de agua por abajo de la termoclina.

Para la boca sur, el esquema es más complejo, pues adicional al esquema de dos capas generado por el gradiente de presión a lo largo del eje principal de la bahía, se observó una capa muy superficial asociada a agua saliendo, que parece estar influenciada directamente por el viento.

Por último, es necesario mencionar la necesidad de corroborar con mediciones el incremento en el nivel del mar al interior de la bahía, y su relación con el viento y los gradientes de presión a lo largo de la bahía.

Referencias

- Alvarez Sánchez, L. G. (1977). Vientos en la Bahía Todos Santos, Baja California. Ciencias Marinas, 4:81–89.
- Alvarez Sánchez, L. G., Hernández Walls, R., y Durazo Arvizu, R. (1988). Patrones de deriva de trazadores langrangeanos en la Bahía de Todos Santos. Ciencias Marinas, 14(4):135–162.
- Argote Espinoza, M. L., Medina Gavidia, F., y Amador Buenrostro, A. (1991). Wind-induced circulation in Todos Santos bay, B. C., México. Atmósfera, 4(2):101–115.
- Bakun, A. y Nelson, C. S. (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. California cooperative oceanic fisheries investigations, 19:107–127.
- Calva Chávez, M. A. (2014). Variación estacional y sinóptica de la trampa de surgencia en la Bahía de Todos Santos B. C. Tesis doctoral. CICESE.
- Castro, R. y Martínez, J. A. (2010). Variabilidad espacial y temporal del campo de viento. In Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997–2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California, pages 129–147.
- Castro, R., Parés-Sierra, A., y Marinone, S. G. (2003). Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la Península de Baja California. Ciencias Marinas, 29(February 2002):275–281.
- Delgadillo-Hinojosa, F., Camacho-Ibar, V., Huerta-Díaz, M. A., Torres-Delgado, V., Pérez-Brunius, P., Lares, L., Marinone, S. G., Segovia, J. A., Peña-Manjarrez, J. L., García-Mendoza, E., y Castro, R. (2015). Seasonal behavior of dissolved cadmium and Cd/PO₄ ratio in Todos Santos Bay: A retention site of upwelled waters in the Baja California Peninsula, Mexico. Marine Chemistry, 168:37–48.
- Fernandez, D. (1993). High-frequency radar measurements of coastal ocean surface currents. Tesis doctoral. Stanford University, Stanford California.

- Flores Vidal, X. (2015). Hacia la creación de una red multistitucional de radares oceanográficos para la medición de corrientes superficiales en el Golfo de México. Revista de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 1:29–49.
- Flores Vidal, X., Durazo Arvizu, R., Castro, R., Navarro, L. F., Dominguez, F., y Gil, E. (2015). Fine-Scale Tidal and Subtidal Variability of an Upwelling-Influenced Bay as Measured by the Mexican High Frequency Radar Observing System. Coastal Ocean Observing Systems, pages 209–228.
- Garfield, N., Collins, C. A., Paquette, R. G., y Carter, E. (1999). Lagrangian Exploration of the California Undercurrent, 1992–95. J. Phys. Oceanogr., 29(4):560–583.
- Gaxiola-Castro, G., De la Cruz, M., Nájera-Martínez, S., Matrínes Gaxiola, M., y Rodríguez-Gamboa, A. (2010). Nutrientes: efectos de procesos locales y de gran escala. In Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997–2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California, pages 209–225.
- Larrañaga, M. J. (2013). Variabilidad de la circulación superficial en la Bahía Todos Santos, Baja California, México. Universidad Autónoma de Baja California.
- Lynn, R. J. y Simpson, J. J. (1987). The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. J. Geophys. Res.: Oceans (1978–2012), 92(C12):12947–12966.
- Mancilla Peraza, M. y Martínez García, G. (1991). Variación estacional de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en la Bahía de Todos Santos, B.C., México (marzo 1986 a junio 1987). Investigación Científica, 2:33 – 45.
- Marinone, S. y Lavín, M. F. (1997). Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California. In Contribuciones a la oceanografía física en México, pages 113–139.
- Mateos, E., Marinone, S. G., y Parés-Sierra, A. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B.C. Mexico. Ocean Modelling, 27(1-2):107–112.

- Mateos Farfán, E. (2010). Modelación de la circulación costera estacional en la región norte de Baja California y de sur de California y de la Bahía de Todos Santos. Tesis doctoral.
- Miranda-Bojórquez, L. (2012). Caracterización de las corrientes en las entradas y alrededores de la Bahía de Todos Santos. Tesis doctoral. CICESE.
- Pavía, E. y Reyes, S. (1983). Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos, B.C. Ciencias Marinas, 9:151–167.
- Pérez Brunius, P., López, M., Parés-Sierra, A., y Pineda, J. (2007). Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. CalCOFI Rep, 48:204 – 214.
- Reyes, S. y Pares, A. (1983). Análisis de componentes principales de los vientos superficiales sobre la Bahía de Todos Santos. Geofísica internacional, 22(2):179–203.
- Rivas, D., Mancilla, R., García, E., y Almazán, A. (2007). Lagrangian circulation in Todos Santos Bay and Baja California during Spring 2007 : Exploratory experiments . Technical report.
- Stommel, H. y Leetmaa, A. (1972). Circulation on the Continental Shelf. 69(11):3380–3384.
- Vivas Téllez, I. E. (2015). Aplicación de un modelo físico-biológico para las trayectorias de parcelas de agua asociadas a florecimientos algales en la Bahía de Todos Santos. Tesis doctoral. CICESE.
- Winant, C. D. (2004). Wind and Density-Driven Circulation in a Well-Mixed Inverse Estuary. J. Phys. Oceanogr., 34:1103–1116.
- Zertuche Chanes, R. (2013). Aplicación de un modelo numérico tridimensional para estudiar la hidrodinámica de la Bahía de Todos Santos. Universidad Autónoma de Baja California.