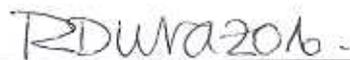


TESIS DEFENDIDA POR  
**Xavier Flores Vidal**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dr. Reginaldo Durazo Arvizu  
*Director del Comité*



M.C. Salvador Fernando Farreras Sanz  
*Miembro del Comité*



Dr. Francisco Javier Ocampo Torres  
*Miembro del Comité*



Dr. Oscar Sosa Nishizaki  
*Miembro del Comité*



Dr. Luis Zavala Sansón  
*Coordinador del programa de posgrado  
en Oceanografía Física*



Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla  
*Director de Estudios de Posgrado*

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE  
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

---

**CIRCULACIÓN RESIDUAL EN BAHÍA SAN QUINTÍN, B.C. MÉXICO**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

XAVIER FLORES VIDAL

*Dedicada a*

*Dios*

*y*

*A mis abuelos...*

*Nicanor e Isabel*

RESUMEN de la tesis de XAVIER FLORES VIDAL, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOGRAFÍA FÍSICA. Ensenada, Baja California. 30 de Junio de 2006.

## CIRCULACIÓN RESIDUAL EN BAHÍA SAN QUINTÍN, B.C. MÉXICO

Resumen aprobado por:



Dr. Reginaldo Durazo Arvizu  
Director de Tesis

Datos de ADCP's (*Acoustic Doppler Current Profilers*) anclados por 60 días se usan para estudiar el patrón de circulación residual en Bahía San Quintín, Baja California México. El patrón de circulación residual es complementado con datos de un ADCP adaptado a una embarcación, que realizó pases sobre un transecto cercano a la boca de conexión, lo que permitió estimar los flujos netos de intercambio entre la bahía y el océano adyacente. Los datos muestran una circulación de dos capas originada por el esfuerzo del viento en la superficie, mismo que da lugar a un apilamiento de agua hacia el *sur-este*, del orden de 8 cm. Durante periodos de vientos débiles el nivel del mar disminuye y da lugar a corrientes del orden de  $1 \text{ cm s}^{-1}$  en dirección contraria al viento. La marea juega un papel secundario en la circulación de la capa superficial, en contraste, es el agente dominante en la capa de fondo. Durante vientos débiles se inhibe la circulación de dos capas, dando lugar a una circulación homogénea en toda la columna de agua y modulada por la marea. En la boca de conexión la circulación es homogénea en la vertical, dominada por la marea y sin presentar ningún indicio de la influencia del viento. Aquí los flujos netos de entrada se restringen al canal profundo (lado *oeste* de la boca), mientras que los flujos de salida se ubican en el canal somero (lado *este* de la boca). Este patrón de circulación es similar al esperado por la teoría, en el que el hecho de que los flujos netos de entrada sean restringidos al canal profundo en este tipo de sistemas, se debe a que los efectos de fricción son más importantes que los efectos de la rotación de la tierra (número de *Ekman*  $\approx 1$ ).

Palabras clave: Viento, circulación, fricción, apilamiento.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **XAVIER FLORES VIDAL** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in PHYSICAL OCEANOGRAPHY. Ensenada, Baja California, Mexico. Julio 2006.

## **RESIDUAL CIRCULATION IN SAN QUINTÍN BAY, B.C. MÉXICO**

Current data from 60 days moored ADCP's (Acoustic Doppler Current Profilers) are used to study the residual circulation of the San Quintín Bay in Baja California, México. The residual circulation pattern was completed with data from a towed ADCP, that made cross transects near the inlet bay, this allowed the estimation of the mean flow between the bay and the adjacent ocean. Data showed a two layers circulation due to wind stress forcing over the surface, this caused a rising of surface level around 8 cm. During low wind periods the sea level diminish and give place to weak currents ( $\approx 1 \text{ cm s}^{-1}$ ) against wind direction. Tide has a secondary roll in the surface layer, whereas in the bottom layer it dominates the circulation. In the low wind periods, the two layer circulation is inhibited and a vertically homogeneous tide modulated circulation its developed. In the inlet bay the circulation is vertically homogeneous, dominated by the tide and without influence of the wind. Here the inflows are restricted to the deep channel (western side of the inlet), while the outflows are located over the shallow channel (eastern side of the inlet). This pattern of circulation is similar to expected by the theory, in which the net inflows are restricted to the deep channel due to large frictional influences or less important effects of the earth's rotation (*Ekman* number  $\approx 1$ ).

**Keywords:** Wind, circulation, friction, rising.

# Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar al Dr. Reginaldo Durazo por su confianza, consejos, apoyo y grandes enseñanzas durante este tiempo. Sin mencionar las desveladas y fines de semana. Gracias chief!!!

A mis sinodales, Paco Ocampo, Salvador Farreras y Oscar Sosa por las revisiones y consejos para mejorar este trabajo. Gracias!

A mi madre que siempre me ha brindado su apoyo y que nunca me ha dejado solo. Todo lo que soy y lo que seré se lo debo a ella. Gracias mamá por tu fuerza y amor interminable.

Como siempre a Poncho, por su ejemplo, por su amor y por cuidar tanto de mi madre. Gracias!

A mis hermanos Luis y Katia, por escucharme, por sus palabras y por la fuerza que le dan a mi vida.

A mi papá y a mis abuelos Conchita y Toño, gracias por estar cerca de mi.

A todos mis compañeros de generación, pre-generación, post-generación, compañeros de ecología marina y física aplicada. Gracias a todos por los consejos y por escucharme durante las noches y los días de trabajo en los cubículos.

A mi compadre! Cesar y a mi amigo entrañable Hector, socios de proyectos que sin duda marcan nuestras vidas. Gracias!!

Al Dr. Victor Camacho por su confianza y apoyo. Dr. Alejandro Souza, Dr. Adan Mejia, Nidia Angulo, Julio Figueroa y Leslie por los datos y los muestreos realizados.

A CONACYT y al DOF de CICESE por las becas y el soporte durante este tiempo, sin ellos habría sido imposible finalizar este trabajo.

A Dolores, Citlali, Ivonne, Lupita R., Lupita P., Elvia, Tere, Lina, Alina, Julieta y Roberto, gracias a ustedes los problemas de computo, tramites y papeleo se hacen fáciles.

Y por último pero no por eso menos importante, al Dr. Modesto Ortiz, Dra. Maria Luisa Argote, Dr. Carlos Torres, Dr. Rogelio Vazquez, Dr. Manuel López y Dr. Luis Zavala, gracias por creer en mi.

# Contenido

<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
I.1. Objetivo . . . . .	6
I.2. Área de estudio . . . . .	7
<b>II. Dinámica de estuarios</b>	<b>10</b>
<b>III. Metodología</b>	<b>15</b>
III.1. El experimento . . . . .	15
III.1.1. Transectos en la boca . . . . .	18
III.1.2. Corrientes dentro de la bahía . . . . .	21
III.1.3. Batimetría . . . . .	22
III.1.4. Meteorología . . . . .	23
<b>IV. Resultados</b>	<b>24</b>
IV.1. Forzamientos meteorológicos . . . . .	24
IV.2. Batimetría . . . . .	26
IV.3. Corrientes totales . . . . .	29
IV.3.1. Análisis armónico . . . . .	31
IV.4. Circulación residual . . . . .	34
IV.4.1. Análisis espectral y filtrado de datos . . . . .	34
IV.4.2. Estadística básica . . . . .	37
IV.4.3. Variación temporal . . . . .	40
IV.4.4. Funciones empíricas ortogonales FEO's . . . . .	48
IV.4.5. Influencia del viento . . . . .	60
IV.5. Flujos residuales en la boca . . . . .	66
<b>V. Discusión</b>	<b>70</b>
<b>VI. Conclusiones</b>	<b>74</b>

# Índice de figuras

1.	Bahía San Quintín, Baja California México. . . . .	9
2.	Solución analítica de la ecuación 1, tomada de Valle Levinson <i>et al.</i> (2003)	14
3.	Red de estaciones y posición de los anclajes instalados en BSQ durante junio-agosto de 2005. . . . .	17
4.	Periodo de las mediciones realizadas en BSQ durante junio-agosto de 2005.	18
5.	Esquema de la matriz <i>base</i> generada para evaluar los flujos en la boca .	20
6.	Variables meteorológicas medidas entre junio y agosto de 2005 . . . . .	25
7.	Batimetría de Bahía San Quintín . . . . .	28
8.	Corrientes totales medidas durante junio-agosto de 2005 en cuatro sitios de BSQ. . . . .	30
9.	Ajuste de una curva de marea a partir de los datos de corriente . . . . .	32
10.	Ajuste de la curva de marea a partir de los datos de corriente . . . . .	33
11.	Espectros de potencia de la series de datos originales y la serie de datos filtrados . . . . .	36
12.	Elipses de máxima variabilidad y vector promedio de la corriente residual.	39
13.	Variación temporal y espacial de la corriente residual en el anclaje CBE	44
14.	Variación temporal y espacial de la corriente residual en el anclaje CBO	45
15.	Variación temporal y espacial de la corriente residual en el anclaje CP .	46
16.	Variación temporal y espacial de la corriente residual en el anclaje CB .	47
17.	FEO's (modo 1) de la corriente residual en la superficie medida en tres anclajes instalados en BSQ . . . . .	54
18.	FEO (modo 2) de la corriente residual en la superficie medida en tres anclajes instalados en BSQ . . . . .	55
19.	FEO (modo 3) de la corriente residual en la superficie medida en tres anclajes instalados en BSQ . . . . .	56
20.	FEO (modo 1) de la corriente residual cerca del fondo medida en los cuatro anclajes instalados en BSQ . . . . .	57
21.	FEO (modo 2) de la corriente residual cerca del fondo medida en los cuatro anclajes instalados en BSQ . . . . .	58
22.	FEO (modo 3) de la corriente residual cerca del fondo medida en los cuatro anclajes instalados en BSQ . . . . .	59

23.	Perfiles verticales de la corriente horizontal en los cuatro puntos de anclaje instalados en BSQ. . . . .	63
24.	Perfiles verticales de magnitud de la velocidad en los cuatro anclajes instalados en BSQ. . . . .	64
25.	Anomalía del nivel de mar . . . . .	65
26.	Corriente residual calculada en un transecto cercano a la boca de BSQ.	69
27.	Esquema de la circulación en Bahía San Quintín. El panel A muestra la dinámica observada durante este trabajo. El panel B muestra lo que podría ser la dinámica en ausencia de viento. . . . .	73

# Índice de tablas

I.	Equipo y configuración utilizada en BSQ durante junio-agosto de 2005.	16
II.	Estadística de las variables meteorológicas medidas en BSQ. La columna std es la desviación estándar. . . . .	26

# I

## Introducción

La costa del Pacífico en la Península de Baja California México, se encuentra en una de las cuatro regiones de surgencias costeras (California, Perú, Benguela y Canarias) con mayor productividad primaria por unidad de área a nivel mundial. El sistema de surgencias costeras de Baja California es inducido por vientos del N y NW, paralelos a la costa; estos vientos se combinan con la rotación terrestre para inducir un transporte de agua superficial hacia afuera de la costa, misma que es reemplazada por aguas más profundas que son más frías, densas y ricas en nutrientes (Ibarra Obando *et al.*, 2001).

Las surgencias costeras afectan de manera indirecta a cualquier cuerpo de agua adyacente a la costa, dígase lagunas costeras, esteros o bahías. En cuerpos costeros donde la dinámica está controlada por las corrientes de marea los intercambios surgen debido a que la distribución espacial de las corrientes y de las propiedades transportadas, no es simétrica (Stommel y Farmer, 1952). Durante el flujo de marea el agua que entra a una laguna costera o bahía, proviene a menudo de un área semicircular adyacente a ésta, y durante el reflujó las aguas de la laguna regresan al océano en forma de un chorro concentrado. Si la laguna tiene una concentración de propiedades más elevada que el

océano, esta asimetría resulta en un flujo neto de la propiedad hacia el océano, aún sin un flujo neto de agua. Este mecanismo es más efectivo en presencia de una corriente a lo largo de la costa (*e.g.* Sistema de Corriente de California), la cual asegura que el agua que fluye hacia fuera de la laguna durante el reflujos sea alejada de la entrada antes del siguiente flujo de la marea. En este caso una masa de agua completamente nueva, con las propiedades del océano adyacente, es introducida en la laguna en cada ciclo de marea. En una zona donde las surgencias costeras enriquecen los niveles superiores del océano, las aguas nuevas durante cada ciclo de marea favorecen también el enriquecimiento dentro de la laguna.

El gradiente de densidad vertical es otro factor importante en el intercambio del agua entre una laguna costera y el océano adyacente. 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 de la laguna cerca de la superficie. Esta circulación de dos capas no solo transporta sal, sino también calor y otras propiedades químicas u orgánicas del agua (Bakun y Nelson, 1977).

El viento, la rotación terrestre y la fricción con el fondo son considerados factores secundarios que modifican en menor medida estos patrones de intercambio lagunas costeras-océano, ya que sólo pueden apreciarse al eliminar el efecto de la marea (circulación residual o submareal). Sin embargo son cruciales, pues la circulación residual determina que tan sano o no, es el sistema.

Stommel y Farmer (1972), encontraron que la rotación terrestre y la fricción con el fondo y paredes laterales, son los factores que determinan las zonas de entrada y salida de los flujos residuales. Valle Levinson *et al.* (2003) sugieren que la pendiente del nivel del mar en la boca de conexión de estuarios y bahías, es otro factor que ajusta o

modifica las zonas de entrada y salida de flujos residuales. Esta pendiente del nivel de mar depende a su vez del esfuerzo del viento, el gradiente de densidad transversal al canal y de la rotación terrestre.

En la costa de Baja California se encuentra Bahía San Quintín (BSQ), una bahía altamente productiva en el aspecto acuícola. BSQ es una laguna costera costera donde la salinidad se incrementa de la boca hacia su interior (anti-estuario) debido a la elevada tasa de evaporación y a la ausencia casi total de precipitación pluvial y escurrimientos Alvarez Borrego *et al.* (1975). El océano adyacente es un ambiente costero expuesto, donde las condiciones oceanográficas presentes son típicas de las regiones de corrientes de frontera *este* de latitudes medias, con surgencias costeras intensas durante el final de primavera y verano (Alvarez Borrego y Alvarez Borrego, 1982), que determinan la variabilidad en el intercambio de propiedades ecológicas entre BSQ y el océano Lara Lara (1979).

El grueso de los estudios realizados en BSQ se efectuó durante la década de los 70's y 80's. Sin embargo, la mayor parte de estos estudios son de carácter químico y biológico, con poca atención al aspecto físico de la dinámica de intercambio entre BSQ y el océano.

Durante la década de los 70's se realizaron estudios en BSQ, principalmente por la Universidad Autónoma de Baja California y el CICESE, motivados por el incipiente desarrollo de la acuicultura (*e.g.* Alvarez Borrego *et al.* (1975)).

En la década de los 80's, la revolución de los modelos numéricos y analíticos permitió un estudio más profundo de BSQ. Mediante un modelo numérico unidimensional Ocampo Torres (1980), caracterizó las corrientes ocasionadas por la marea y reportó corrientes de marea cerca de la boca del orden de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , mismas que disminuían hacia el

interior de la bahía debido a los efectos de fricción con el fondo. Monreal Gómez (1980) aplicó un modelo analítico para evaluar la dispersión dentro de BSQ, y encontró que las componentes no astronómicas de la marea y el viento, son los factores dominantes de la dispersión dentro de la Bahía. Dos años más tarde, Juárez Villareal (1982) extendió este estudio al aplicar un modelo numérico e identificó dos dinámicas de circulación diferentes entre el brazo *este* y el brazo *oeste*, e incluso sugirió una interacción hidrodinámica entre ambos brazos. El autor reportó además la circulación del brazo *este* como fuertemente influenciada por la fricción del fondo y la variación del viento, congruente con los resultados reportados por Del Valle Lucero (1979), quien reportó dificultad al simular la dinámica del brazo *este* debido a la compleja batimetría compuesta por canales constrictos.

Hasta ese momento los estudios realizados se restringían a mediciones superficiales de escasos parámetros biológicos (*e.g.* Lara Lara, 1979) y a estimaciones realizadas con modelos numéricos y analíticos, caracterizados por ser unidimensionales y por no considerar coeficientes de difusión vertical (*e.g.* Juárez Villareal, 1982).

Durante el inicio y final de la década de los 80's se realizaron estudios a partir de un mayor número de mediciones, siguiendo redes de estaciones y tratando de identificar un mayor espectro de la variación espacial y temporal del sistema. Dentro de esos trabajos destacan los de Plascencia Díaz (1980) quien mediante datos de temperatura y salinidad, sugirió un patrón de circulación debida a gradientes de densidad. Encontró que la estructura de densidad depende de la temperatura, lo que implica que el proceso de calentamiento-enfriamiento sea dominante sobre el de evaporación, y que en la mayoría de los casos las aguas de la bahía sean menos densas hacia la cabeza que en la boca. Esto resulta en una circulación hacia afuera por la superficie, mientras que el agua densa del

mar fluye hacia la cabeza por el fondo, contrario con los resultados de Alvarez Borrego *et al.* (1975). Alvarez Borrego y Alvarez Borrego (1982), reportaron la influencia de las mareas en la variación espacial de temperatura. Encontraron ciclicidad semidiurna y sugirieron que para bajas frecuencias, la variabilidad de la temperatura se relaciona con el tiempo de residencia y que este a su vez, depende de las mareas vivas y muertas, así como de las condiciones del océano adyacente. Sin embargo, sus estimaciones se basaron solo en variaciones diurnas. Martori Oxamendi (1989), hasta el momento el estudio más completo basado en datos sobre la dinámica de BSQ, utilizó registros de corrientes y de temperatura, y confirmó la influencia de la marea sobre la circulación, el recambio de agua y la variabilidad de la temperatura. También encontró giros en la circulación residual asociados a la fricción con el fondo, reflejada en el retraso y amplificación de la onda de marea hacia la cabeza. Por último, identificó la influencia del viento en tres escalas; semanal, asociada al transporte de Ekman en el océano abierto, local asociada a las variaciones del orden de 3-4 días, y “seiches” de 2-4 horas y de 44-46 minutos.

Durante la década de los 90's e inicio de la década actual, solo se reportan trabajos de interés químico y biológico (e.g. Smith y Hollibaugh, 1997; Osorno Velazquez, 2000; Camacho Ibar *et al.*, 2003). Estos trabajos solo sugieren una dinámica basada en la distribución espacial y temporal de parámetros no físicos, sin identificar los factores físicos que modifican la dinámica de BSQ.

Un aspecto relevante en el estudio de BSQ, es el hecho de que todos los estudios realizados hasta el momento solo consideran mediciones de corto periodo (un ciclo de marea) de parámetros oceanográficos y de calidad del agua, sin considerar mediciones continuas de la velocidad de las corrientes. El único estudio basado en mediciones de

corrientes ( $\approx 25$  días) es el de Martori Oyamendi (1989). Sin embargo, debido a la tecnología de aquel momento, sólo se observaron velocidades de las corrientes en la superficie y en el fondo en cuatro localidades en el interior de BSQ. El estudio sólo se enfocó a observar la circulación interna de la bahía, sin abundar mucho sobre la dinámica de la boca de conexión con el océano, misma que es responsable de la entrada y distribución de cualquier característica del agua dentro de la bahía.

Por este motivo se diseñó un experimento que permitiera estudiar, tanto los mecanismos físicos que intervienen en la circulación residual de BSQ, como el patrón de intercambio de agua con el Océano Pacífico.

El experimento forma parte de una extensa campaña de mediciones realizadas durante tres periodos de 2003, 2004 y 2005, por el Instituto de Investigaciones Oceanológicas y la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California. El presente trabajo sólo se enfoca a los resultados obtenidos durante la campaña realizada en 2005.

## **I.1. Objetivo**

Avanzar en el conocimiento de la circulación residual en BSQ y estudiar la dinámica de intercambio entre la bahía y el océano Pacífico. De aquí se desprenden los siguientes objetivos específicos.

1. Cuantificar y caracterizar la circulación residual en el interior de BSQ.
2. Cuantificar y caracterizar el flujo residual en una sección transversal cercana a la boca de BSQ.

3. Identificar y cuantificar la influencia de cada uno de los forzamientos físicos involucrados en los dos procesos anteriores.

Conocer las corrientes residuales y la dinámica de intercambio bahía-océano, permitirá observar de que medida se intercambia el agua oceánica al sistema y se distribuye dentro de BSQ. Se hará especial énfasis en relacionar la dinámica observada con los eventos de surgencias en la zona oceánica adyacente.

## I.2. Área de estudio

La Bahía San Quintín (BSQ) está localizada en la costa *oeste* del estado de Baja California México, entre los  $30^{\circ}24'$  y  $30^{\circ}30'$  de latitud N y entre los  $115^{\circ}57'$  y  $116^{\circ}01'$  de longitud W, 300 km al *sur* de la frontera con Estados Unidos (figura 1). BSQ es una laguna costera compuesta de dos brazos orientados en dirección NW. El brazo *oeste*, conocido como Bahía Falsa, tiene  $\approx 5.6$  km de largo y consiste en una plataforma submarina somera, cuyo canal principal tiene en promedio  $\approx 6$  m de profundidad y se localiza sobre la porción derecha del mismo. El brazo *este*, llamado Bahía San Quintín ó Bahía de San Simón, tiene una longitud aproximada de 11.5 km y se caracteriza por tener un fondo irregular con un canal de  $\approx 10$  m de profundidad en su primer tercio. La profundidad promedio de la mayor parte de la bahía es de  $\approx 2$  m, exceptuando los canales de navegación, donde se llegan a observar profundidades de hasta 13 m cerca de la boca. La conexión con el océano adyacente es a través de una boca relativamente estrecha (poco menos de un kilómetro) cuya profundidad máxima es de 13 m respecto al nivel medio del mar. Los sedimentos en el fondo de BSQ son muy variados, desde limos hasta arenas gruesas. Ambos brazos (*este* y *oeste*) presentan una gran porción

de fondos lodosos, con mucha abundancia de especies fanerógamas (pastos marinos) (Cabello *et al.*, 2004). El área total de BSQ ocupa un total de  $\approx 41 \text{ km}^2$ , de los que el 60% es ocupado por el brazo *este* (Osorno Velazquez, 2000). Ambos brazos (*este* y *oeste*) se encuentran separados por una formación montañosa, en la que destacan la montaña Kenton y el volcán Ceniza, ambos con una altura de  $\approx 60 \text{ m}$  sobre el nivel medio del mar.

El clima en la zona es clasificado como semi-árido, con máximo anual de temperatura ambiental ( $\approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) durante verano. Las lluvias son escasas en invierno con un promedio de precipitación anual de 5-10 cm. Los vientos dominantes son del *noroeste* con variación diurna Durazo *et al.* (2005). Las mareas son predominantemente semi-diurnas, con rangos de 2.5 y 1 m en mareas vivas y muertas, respectivamente (Ocampo Torres, 1980).

La principal actividad comercial en BSQ es el cultivo de ostión *Crassostrea gigas*, limitado a Bahía Falsa (brazo *oeste*). En este brazo los estantes de cultivo quedan expuestos al aire un promedio de 15% del tiempo durante mareas bajas. Existen un total de  $\approx 60$  estantes, que ocupan un área aproximada de  $120 \text{ m}^2$  cada uno (García *et al.*, 1999).

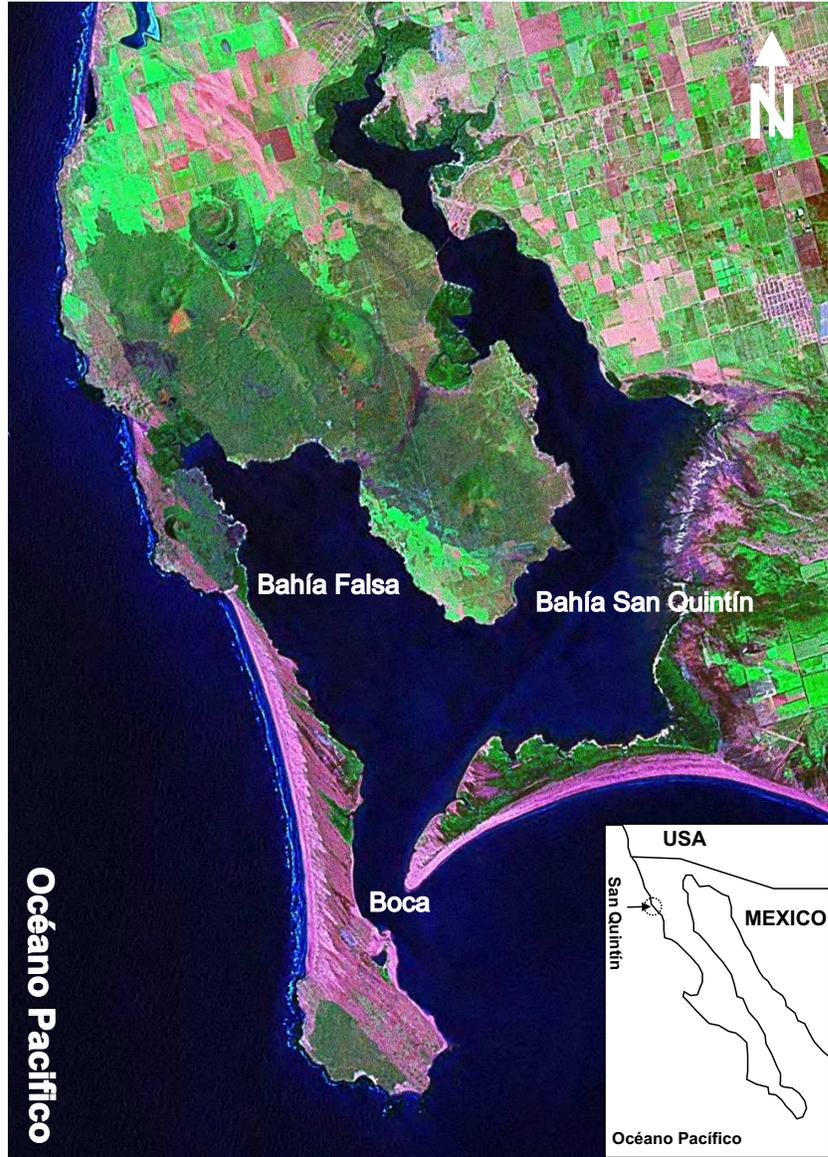


Figura 1: Bahía San Quntín, Baja California México.

## II

# Dinámica de estuarios

Esta sección se presenta con la finalidad de brindar un panorama general sobre el estado actual del conocimiento acerca de la hidrodinámica que caracteriza a bahías, estuarios y lagunas costeras. El conocimiento y entendimiento de cada uno de los factores que modifican y definen la circulación de estos cuerpos de agua, permitirá identificar y definir sobre bases más sólidas, la circulación residual en Bahía San Quintín.

Las investigaciones realizadas sobre dinámica de estuarios, define a los estuarios como cuerpos de agua influenciados por la descarga de un río (agua dulce) y parcialmente conectados a un océano o mar adyacente (agua salada). Con base en la distribución agua salada-agua dulce, se han logrado identificar cuatro tipos básicos de estuarios; cuña de sal, horizontalmente estratificado, verticalmente estratificado y verticalmente mezclado. La interacción entre estos cuatro tipos de estuarios da lugar a otro tipo de estuario, llamado estuario intermitente, en el que se pueden encontrar dinámicas representativas de los cuatro tipos básicos de estuarios, dependiendo de la época del año y de la intensidad de la descarga de agua dulce.

En ausencia de descarga de agua dulce se produce un tipo adicional de estuario

llamado estuario inverso o hipersalino, en el que generalmente la salinidad se incrementa de la boca hacia la cabeza, debido al exceso de evaporación sobre precipitación (Tomczak, 2002).

Los conceptos clásicos sobre la hidrodinámica de lagunas, bahías o cuerpos de agua costeros en general, consideran 3 agentes que modifican la dinámica de manera directa: la marea, las variables meteorológicas y la batimetría. Estos forzamientos generan patrones de circulación inmediata y dan lugar a la formación de otros factores que empiezan a interactuar con ellos (apilamientos de agua, gradientes de presión, gradientes de densidad, entre otros), y que incluso en algunas ocasiones llegan a ser más importantes que los forzamientos primarios (Fischer *et al.*, 1979).

Durante la década de los 70's y 80's los estudios se restringían a la medición de escasos parámetros oceanográficos (salinidad, temperatura y densidad) durante periodos de tiempo cortos ( $\approx 2 - 3$  días). Las corrientes, la presión, la batimetría, eran factores difíciles de medir en aquel tiempo. El uso de nuevas tecnologías de medición (ADCP's, CTD's, ecosondas, etc.) y de modelos numéricos y analíticos, fue el factor determinante que permitió desde la década de los 90's, ahondar en el estudio de la dinámica estuarina.

En la actualidad, la literatura sobre la dinámica de estuarios es basta y abarca diversos tipos de estudios sobre circulación. En bahías o lagunas costeras donde los gradientes de densidad vertical son despreciables (como es el caso de Bahía San Quintín, ver sección I), se ha demostrado que la dinámica obedece a los forzamientos de marea, viento y batimetría.

En particular el viento genera patrones de circulación superficial (Fischer *et al.*, 1979), favorece la mezcla vertical e incluso llega a afectar el nivel de mar (Bowden, 1978). Dentro de los estudios enfocados en el efecto del viento encontramos a Argote

*et al.* (1991) quienes encuentran la formación de dos giros en una bahía como respuesta al forzamiento de viento. Valle Levinson *et al.* (2001b) encontraron que la influencia del viento al interior de una laguna costera, llega a ser tan importante que da lugar a diferentes dinámicas en función de la dirección del viento. Los autores encuentran también que bajo ciertas condiciones de viento, se genera apilamiento de agua y que este a su vez induce corrientes.

Por otro lado, es bien conocido (Fischer *et al.*, 1979; Tomczak, 2002) que en sistemas parcialmente conectados al océano adyacente, la marea es el agente que modifica en primera instancia la circulación. Por lo tanto, al eliminar el efecto del flujo y reflujo de la marea es posible observar el transporte neto o circulación residual dentro del sistema.

Diversos estudios han demostrado la dependencia de los patrones de circulación residual a la rotación de la tierra y los efectos de fricción inducidos por viento y marea (alta turbulencia). Mediante datos (Valle Levinson *et al.*, 2001a; Valle Levinson y Kamazima, 1997, 1995) y modelos analíticos (Valle Levinson *et al.*, 2003; Kasai *et al.*, 2000) se ha mostrado evidencia de que el intercambio entre los cuerpos de agua costeros y el océano adyacente, se restringe a los canales profundos y a los “bajos” como respuesta al balance entre los efectos de la rotación de la tierra y los efectos de fricción. Este balance se representa mediante el número de *Ekman*,

$$E = A_z / (f H_{max}^2) \quad (1)$$

donde  $A_z$  es el coeficiente de viscosidad vertical,  $f$  es el parámetro de *Coriolis* y  $H_{max}$  es la máxima profundidad del canal (Kasai *et al.*, 2000).

Cuando  $E \approx 1$  (efectos de rotación de la tierra casi despreciables) los flujos de entrada netos se restringen a los canales profundos, mientras que los flujos de salida

se ubican en las partes someras o “bajos”. En contraste, cuando  $E < 1$  (efectos de rotación considerables) los flujos de entrada se ubican en la frontera *este* de la boca de conexión, mientras que los flujos de salida se observan por la frontera *oeste* (hemisferio *norte*), sin importar la configuración batimétrica (Valle Levinson *et al.*, 2003).

La figura 2, tomada de Valle Levinson *et al.* (2003), muestra los flujos residuales obtenidos con un modelo analítico de circulación donde los parámetros que controlan la solición están dados en la ecuación 1. La figura representa un corte transversal sintético en la boca de un estuario. Los contornos oscuros indican flujos entrando al estuario, los contornos claros indican flujos saliendo del estuario. Cuando la turbulencia es grande (efectos de la rotación de la tierra despreciables) los flujos de entrada se restringen a las zonas profundas (panel D). Cuando los efectos de la rotación terrestre son más importantes que los efectos turbulentos (panel A) los flujos de entrada se extienden hacia la frontera *este* (hemisferio *norte*), sin importar la configuración batimétrica.

Bahía de San Quintín (BSQ) es una laguna costera hipersalina fuertemente influenciada por viento del *nor-oeste* durante verano, donde hasta el momento los estudios realizados no han reportado evidencia de que los gradientes de densidad contribuyan de manera significativa a su circulación residual (sección I). En base a esto el tratamiento que se dará al estudio de BSQ durante este trabajo, se basará en los forzamientos de marea, viento y batimetría. Particularmente se hará énfasis en conectar los patrones de intercambio bahía-océano, con la competencia entre los efectos inerciales inducidos por la rotación terrestre y los efectos de fricción que originan turbulencia relativamente alta.

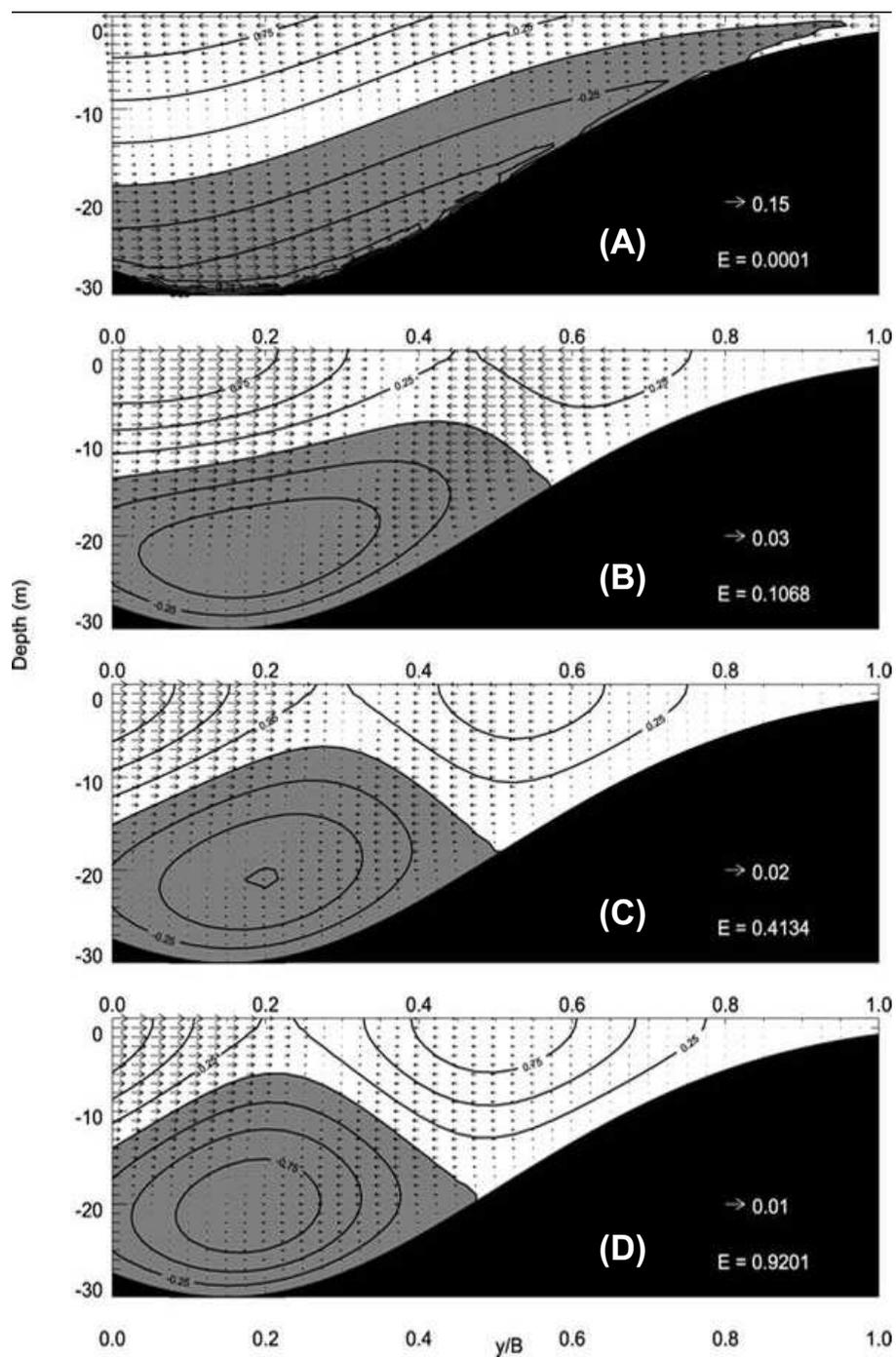


Figura 2: Solución analítica de la ecuación 1 resuelta para diferentes números de *Ekman*, sobre un corte transversal de la boca de un estuario con batimetría arbitraria. Los contornos oscuros representan flujos a lo largo del canal, hacia el interior del estuario. Los contornos blancos indican flujo hacia afuera. El panel A presenta un patrón bajo influencia de la rotación de la tierra ( $E < 1$ ), el panel D muestra el comportamiento de los flujos residuales cuando  $E \approx 1$  (alta turbulencia). Figura tomada de Valle Levinson *et al.* (2003)

# III

## Metodología

Para estudiar los mecanismos físicos que intervienen en la circulación residual de BSQ y el patrón de intercambio de agua con el Océano Pacífico, se requiere conocer la estructura transversal de los flujos y evaluar en que medida el agua entra y se distribuye por toda la bahía. Para esto es indispensable contar con mediciones de corriente en la boca y en la entrada de los canales principales, simultáneamente con mediciones de marea, gradientes de densidad y variables meteorológicas.

En el periodo junio-agosto de 2005 se efectuaron mediciones simultaneas de las variables mencionadas. La adquisición de datos se realizó tratando de cubrir los periodos con mayor ocurrencia de surgencias en la región, así como durante periodos de mareas vivas y muertas.

### III.1. El experimento

Se instalaron cinco perfiladores acústicos para medición de corrientes (ADCP, *Acoustic Doppler Current Profilers*) equipados con sensor de presión, temperatura y uno de

ellos con *bottom track* (seguimiento del fondo). Cuatro ADCP's se anclaron sobre el fondo marino midiendo las corrientes de manera continua y uno de ellos se adaptó a una embarcación para realizar perfiles verticales sobre un transecto cercano a la boca. Los detalles de ésta parte del experimento se explican en la sección III.1.1. Se obtuvieron también series de tiempo de temperatura superficial a lo largo de los dos canales principales, mediante el uso de termógrafos digitales con memoria interna. Paralelamente se realizaron perfiles verticales de temperatura, salinidad y presión (CTD, *Conductivity Temperature Depth*) a lo largo de una red de estaciones pre-definida. Por último, se midieron diversos parámetros meteorológicos como temperatura del aire, presión atmosférica, magnitud y dirección del viento, radiación solar y humedad relativa. Todos los datos fueron extraídos de los instrumentos mediante los programas del fabricante. El procedimiento, análisis y graficado final de los datos se realizó con Matlab v 7.1.

Las figuras 3 y 4 muestran los puntos y el periodo de medición respectivamente. La tabla I muestra los equipos y la configuración utilizada.

Tabla I: Equipo y configuración utilizada en BSQ durante junio-agosto de 2005. La columna *Pings*, se refiere al número de pulsos que el aparato promedió para generar un perfil. La columna *dt* [s] es el intervalo de tiempo entre cada perfil. Las columnas *dz* y  $\bar{z}$ , ambos en [m], se refieren al ancho de cada celda medida por el ADCP y a la profundidad del anclaje respectivamente. La columna *error* es el error [ $\text{cm s}^{-1}$ ] asociado a cada configuración.

Equipo	<i>Pings</i>	<i>dt</i>	<i>dz</i>	$\bar{z}$	<i>error</i>
ADCP Nortek 1 MHz Canal Brazo <i>este</i> (CBE)	120	1800	0.5	8.5	0.7
ADCP Nortek 1 MHz Canal Brazo <i>oeste</i> (CBO)	120	1800	0.5	7.5	0.7
ADCP Nortek 0.6 MHz Canal Principal (CP)	360	3600	1	14	0.6
ADCP RDI 1.2 MHz Boca lado <i>oeste</i> (BO)	360	3600	1	14	0.3
ADCP Sontek 0.6 MHz Transectos en la boca	15	15	0.5	-	0.06
Termógrafos Vemco	-	600	-	1	-
Estación Meteorológica	-	1800	-	-	-

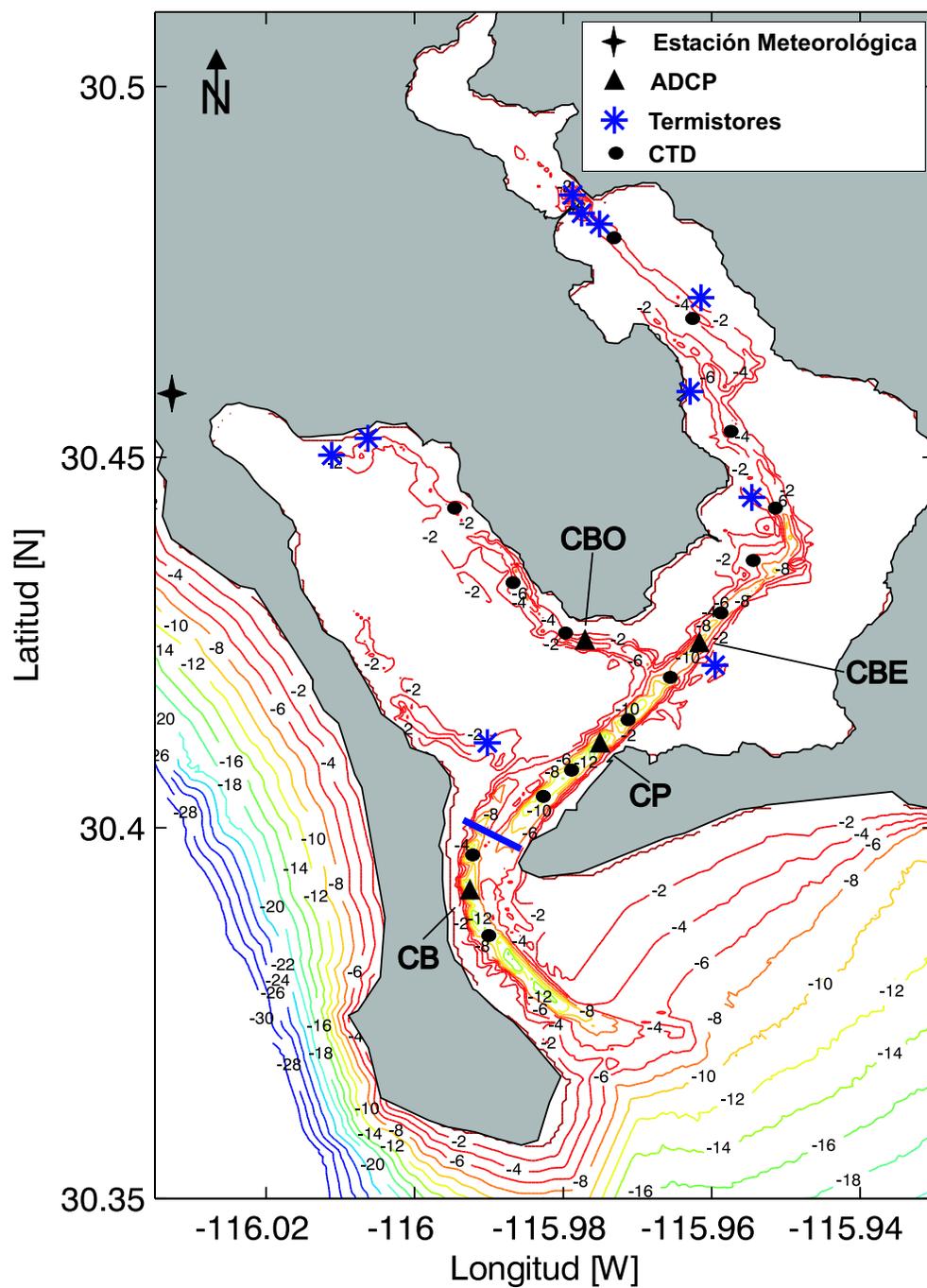


Figura 3: Red de estaciones y posición de los anclajes instalados en BSQ durante junio-agosto de 2005. La línea azul cerca de la boca indica la posición del transecto medido con un ADCP en movimiento. Las siglas CBO significan Canal Brazo Oeste; CBE Canal Brazo Este; CP Canal Principal y CB Canal Boca.

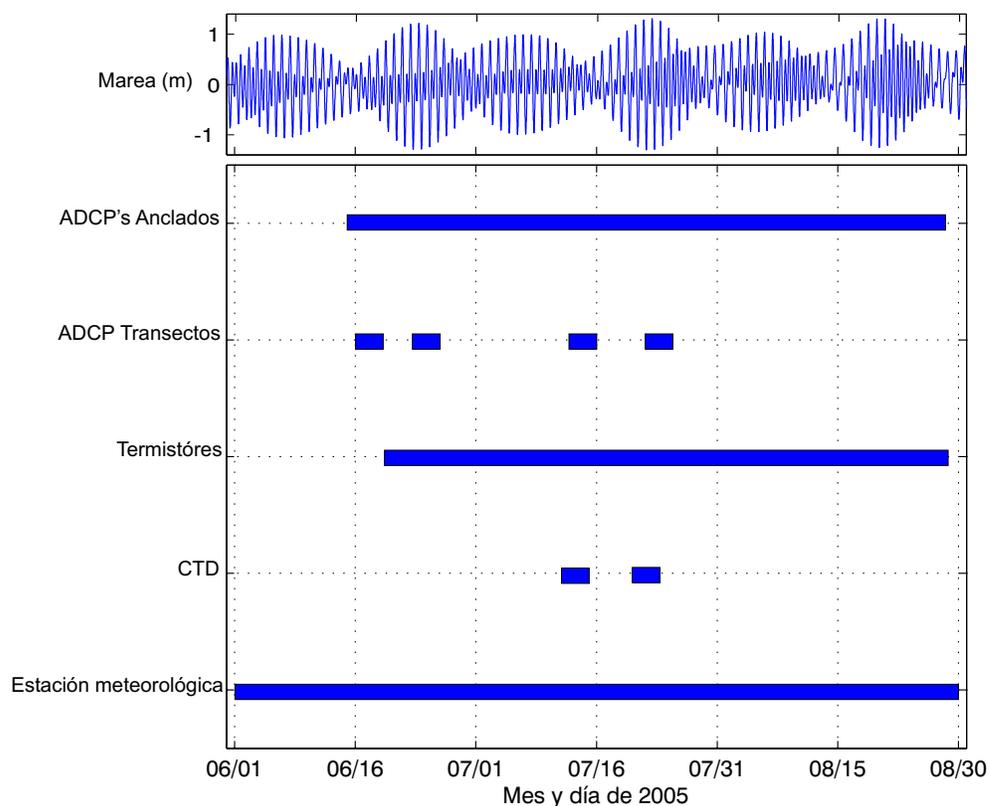


Figura 4: Periodo de las mediciones realizadas en BSQ durante junio-agosto de 2005. El instrumento denominado “ADCP Transectos” se refiere a las mediciones realizadas con un ADCP en movimiento sobre un transecto cercano a la boca, en total cuatro muestreos, dos en mareas vivas y dos en mareas muertas. Las mediciones con CTD se refieren a los periodos en que se cubrió la red de estaciones, en total dos muestreos de dos días cada uno.

### III.1.1. Transectos en la boca

Durante los días 16-17 (mareas muertas), 23-24 de junio (mareas vivas), 14-15 (mareas muertas) y 20-21 de julio (mareas vivas) de 2005, se realizaron cruces por la boca de conexión de BSQ (figura 3) con un ADCP marca *Sontek* de 600 kHz con sensor de temperatura y *bottom track*, adaptado a una embarcación menor. El instrumento se mantuvo midiendo de manera continua, generando un perfil promedio de 15 pulsos, cada 15 segundos con un error asociado de  $0.06 \text{ cm s}^{-1}$ . La velocidad promedio de la embarcación fue de  $\approx 1 \text{ m s}^{-1}$ , lo que originó un perfil de corriente cada 15 *m* aproxi-

madamente. En total se realizaron cuatro campañas de mediciones, dos en mareas vivas y dos en mareas muertas, con una duración de  $\approx 25$  horas cada una.

El objetivo de estas campañas fue obtener una matriz tridimensional de la variación temporal y espacial de la corriente en la boca. La matriz debía entonces tener en cada una de sus dimensiones, información asociada a la corriente en toda la extensión y profundidad de la boca de conexión, además de la variación temporal (por 25 horas, un ciclo de marea). El procedimiento seguido para obtener esta información se describe a continuación.

Una vez extraídos los datos de velocidad  $(u, v, w)$ , temperatura y profundidad, se eliminaron los datos marcados como erróneos durante el momento de la medición (banderas de dato dudoso) y los datos que tuvieran un valor 3 veces mayor que su desviación estándar. Así mismo, para minimizar el efecto del reflejo del fondo y eliminar datos que pudieran estar contaminados, se eliminaron datos que estuvieran incluidos sobre una franja encima del fondo equivalente al 10% de la profundidad. Todos los archivos individuales generados durante las 25 horas de mediciones (durante cada campaña) fueron concatenados en uno solo.

Posteriormente, se construyó una matriz “base” en la que la columna  $n_{final}$  representa el inicio del transecto pre-determinado (extremo *este* del transecto, figura 3) y la columna  $n_1$  representa el final del transecto (extremo *oeste* del transecto). La resolución espacial de la matriz base fue de 15  $m$  en la horizontal (columnas  $n$ ) y 0.5  $m$  en la vertical (filas  $m$ ). Mediante la posición asociada a cada perfil medido, se proyectaron posteriormente todos los perfiles a su posición correspondiente dentro de la matriz base. Por último con la ayuda de la hora de la medición de cada perfil, la matriz base generó una tercera dimensión en tiempo. Al final el resultado fue una matriz cuadrada

en tres dimensiones, con información de espacio (horizontal y vertical) y tiempo de las corrientes en la boca. La figura 5 presenta un esquema de la matriz construida. La matriz permitió tener una serie de tiempo ( $\approx 25$  horas) de la velocidad ( $u, v, w$ ) en cada punto dentro de la boca de conexión de BSQ, además de la evolución temporal de la temperatura superficial en todo lo ancho de la boca.

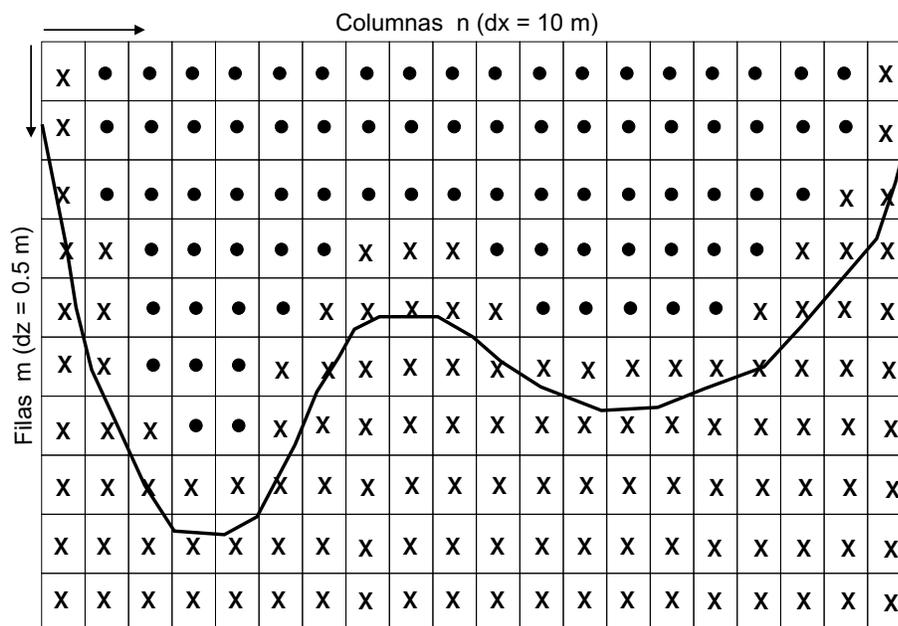


Figura 5: Esquema de la matriz *base* generada para evaluar los flujos en la boca. Los puntos indican la posición de los datos confiables, las cruces indican la posición de los datos desechados. La línea gruesa representa el fondo de la boca de BSQ. Las dimensiones reales de esta matriz son  $n=81$ ,  $m=36$ .

Con la finalidad de obtener series de tiempo cortas ( $\approx 25$  horas) de perfiles de T y S (CTD) justo en el centro del canal profundo de la boca de la bahía, se realizaron lances de manera simultanea con las campañas de medición del ADCP en movimiento. De esta manera mientras se efectuaron los cruces a través de la boca de conexión, la embarcación se detuvo cada hora y realizó un perfil de T y S con CTD.

El procesamiento de estos datos se realizó siguiendo el procesamiento estándar del manual del SBE19plus y consistió en aplicar un filtro (FILTER) pasa-bajas a la con-

ductividad con una constante de 0.5 s; la presión fue filtrada con pasa-bajas con una constante de 1 s y posteriormente se avanzó (ALIGNCTD) la temperatura relativa a la presión 0.5 s. Los perfiles se promediaron cada 0.5 m (BINAVG) y se calcularon la temperatura, salinidad, densidad, velocidad de descenso y la profundidad (DERIVE) (Sea-Bird, 2002). De esta manera se obtuvieron perfiles de los cuales se conocía su posición geográfica, fecha y hora de su medición.

### III.1.2. Corrientes dentro de la bahía

En total se instalaron cuatro perfiladores acústicos sobre el fondo (figura 3), tres de ellos marca *Nortek* Aquadopp (Tabla I), uno en la entrada del canal de navegación del brazo *este* de BSQ (CBE), otro en la entrada del canal del brazo *oeste* (CBO) y otro en el centro del canal principal (CP) que conduce a los dos canales anteriores. El cuarto perfilador acústico fue marca *RD-Instruments* WorkHorse (Tabla I) y se instaló en el canal *oeste* de la boca de conexión (CB).

El procesamiento preliminar de los datos consistió en eliminar las banderas de datos erróneos, eliminar el reflejo de la superficie y los datos que fueran tres veces mayores que su desviación estándar. En el aire la amplitud del eco arroja valores que pueden identificarse como un reflejo de las mediciones por encima de los datos arrojados por el sensor de presión (superficie real del agua). Utilizando este criterio, todos los datos irrazonables que estuvieron por encima de la medición del sensor de presión fueron eliminados. Cerca de la superficie, se eliminó una franja igual al 10% de la profundidad del anclaje, esto último para eliminar datos que pudieran estar contaminados con reflejos de la superficie. En el caso particular del instrumento RD-Instruments, la programación fue planeada para que la medición más superficial quedara 3 m por debajo de la su-

perficie, debido a que no contaba con sensor de presión. Posteriormente, debido a las diferencias en el intervalo de adquisición de datos entre un instrumento y otro (tabla I), se realizó un re-muestreo horario de los datos mediante una interpolación lineal.

Una vez con la información de velocidad  $(u, v, w)$  estandarizada y validada, se realizó un análisis de estadística básica para cada capa de profundidad medida, y se calcularon las corrientes a lo largo del eje de variabilidad principal. Con el fin de eliminar señales inducidas por la manera diurna y semidiurna, se aplicó a los datos un filtro de *Lanczos* pasa-bajas con una frecuencia de corte equivalente a 36 horas. Las señales con periodo por debajo de 36 horas fueron obtenidas mediante la resta de la señal filtrada y la original; de esta manera se obtuvieron variables separadas con la información de alta y baja frecuencia.

### **III.1.3. Batimetría**

La batimetría es uno de los factores que determinan la hidrodinámica de cualquier cuerpo de agua costero. La fricción con el fondo y paredes laterales, ocasiona amplificación y retraso de la onda de marea. Las corrientes originadas por la marea reflejan el efecto de la fricción en la capa límite con el fondo, en forma de un descenso en la magnitud del perfil de velocidad. En la sección I se hizo referencia a la complejidad de la batimetría de San Quintín, complejidad que como bien sugieren algunos autores, podría modificar la circulación residual y que incluso ha dificultado el estudio y comprensión de algunas características dinámicas de BSQ. Por este motivo se consideró de vital importancia contar con una batimetría adecuada de BSQ.

Entre el 28 de febrero y el 5 de marzo de 2006, se realizó un levantamiento batimétrico en BSQ. Las mediciones de profundidad fueron realizadas con un sistema acoplado

de ecosonda y GPS (Global Positioning System) marca *Garmin*, con precisión de 0.1 m en la vertical y de 3 a 5 m en la horizontal. Se siguió un recorrido pre-determinado que consistió en hacer cruces de costa a costa por toda el área de BSQ. Los cruces estuvieron separados 500 m entre sí en las zonas más alejadas de la boca de conexión. Con la finalidad de incrementar la resolución de la batimetría en la cercanías de la boca de conexión, la separación entre los transectos se redujo a 100 m. Para obtener el contorno de la línea de playa, se realizó un recorrido durante la pleamar por todo el polígono envolvente de BSQ (línea de costa). Los datos obtenidos fueron referidos al nivel medio del mar (NMM) e interpolados sobre una malla regular de 100 m x 100 m de resolución espacial. La batimetría obtenida se presenta en la sección IV.

#### **III.1.4. Meteorología**

Desde junio de 2003 hasta la fecha el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la UABC, mantiene en operación una estación meteorológica *Aanderaa* en la zona conocida como “La chorera”, en el extremo *norte* de Bahía Falsa (30.457 °N y -116.03 °W). Esta estación meteorológica mide datos de temperatura del aire, presión atmosférica, magnitud y dirección del viento, radiación solar y humedad relativa, cada 30 minutos. En este estudio se utilizaron sólo tres meses de datos a partir del primero de junio de 2005.

# IV

## Resultados

### IV.1. Forzamientos meteorológicos

Durante toda la campaña de mediciones se mantuvo operando una estación meteorológica ubicada en el sitio conocido como “La Chorera” (figura 3). La figura 6 presenta la variación temporal de temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar, presión, dirección y magnitud del viento. La tabla IV.1 presenta la estadística de las variables medidas. En todas las variables fue notable la variación diurna, con máximos y mínimos asociados al medio día y media noche. La temperatura presentó un incremento después del día 200, congruente con la proximidad del verano. La dirección promedio del viento fue de *nor-oeste* ( $\approx 330^\circ\text{N}$ ) durante la mayor parte del periodo de mediciones. La magnitud del viento alcanzó valores máximos de  $8 \text{ m s}^{-1}$ . Durante las inversiones de dirección del viento la magnitud disminuyó.

Para el periodo de observaciones en general se puede apreciar a BSQ como una zona influenciada por vientos promedio de  $4 \text{ m s}^{-1}$  con dirección dominante hacia el *sur-este*, temperatura promedio de  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  y humedad del 77%. La precipitación pluvial fue cero durante el periodo de mediciones, por lo que no se presenta ninguna gráfica de lluvia.

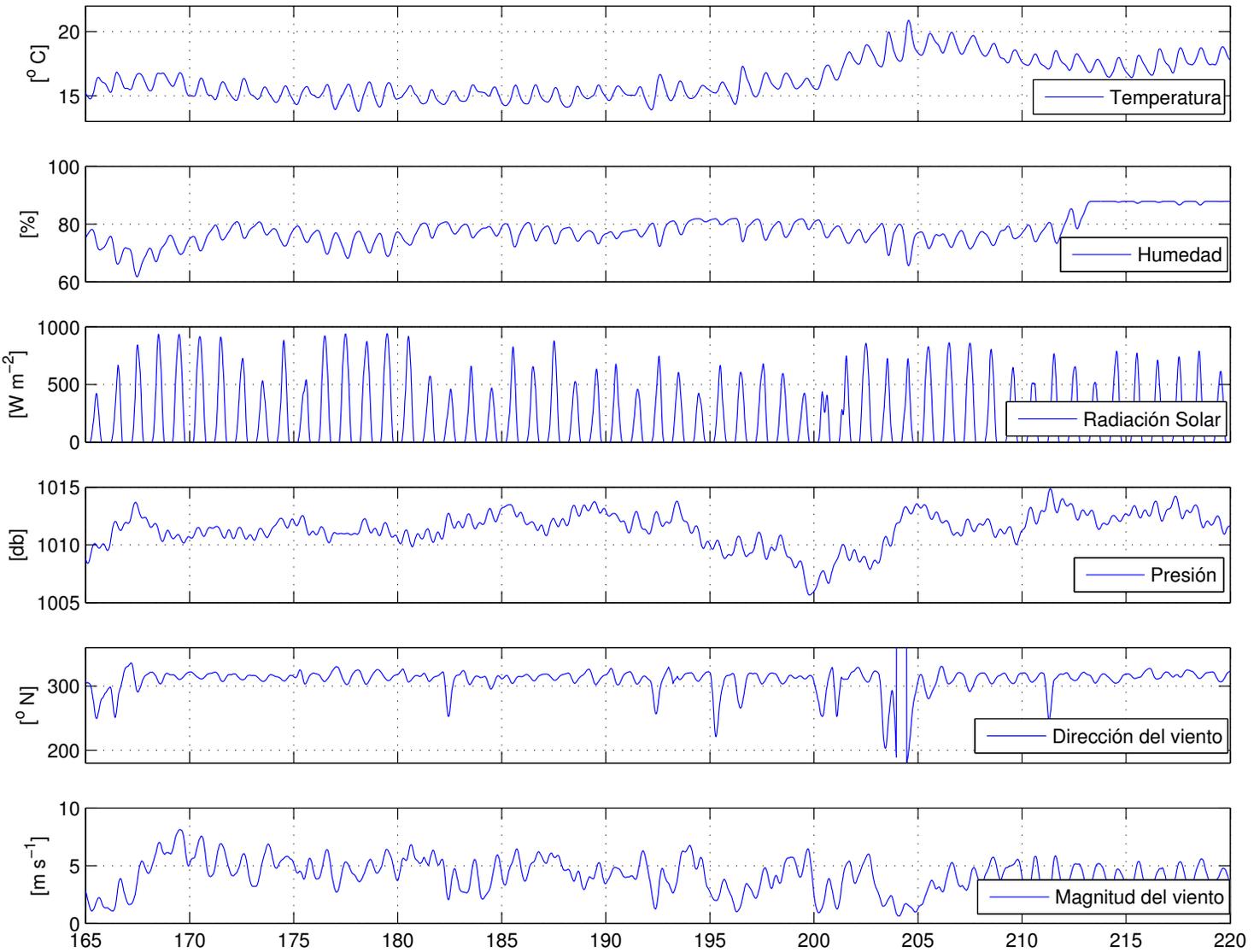


Figura 6: Variables meteorológicas medidas entre junio y agosto de 2005. El tiempo es presentado en días de 2005.

Tabla II: Estadística de las variables meteorológicas medidas en BSQ. La columna std es la desviación estándar.

	min	max	promedio	std	moda
Temperatura	13.7	20.8	16.2	1.4	14.4
Humedad	61.7	87.9	77.8	5	75
Radación Solar	0	941.7	198.9	273.2	0
Presión	1005.7	1014.9	1011.4	1.4	1010.7
Dirección del viento	270	340	340	26.8	332
Magnitud del viento	0.6	8.13	4.18	1.4	3.29

## IV.2. Batimetría

La batimetría obtenida entre el 28 de febrero y el 5 de marzo de 2006 se presenta en la figura 7. Dentro de los rasgos más notables de esta batimetría destaca la presencia de un ramal bien definido, que consta de un canal principal del que se desprenden tres canales secundarios. Del exterior hacia el interior de BSQ, se observa la presencia del primer canal con profundidad máxima de 3 m (el más somero de todos) recargado sobre la costa occidental de bahía falsa, este canal conocido como canal Sonora, tiene una longitud  $\approx$  de 3 km hacia el interior de bahía falsa. Sobre la costa oriental de bahía falsa se aprecia un canal con profundidad máxima de 6 m y que sigue el contorno de la línea de costa hasta casi el extremo interior de bahía falsa. En bahía San Simón (brazo *este* de BSQ) el canal principal se bifurca cerca del panteón inglés, en un canal con profundidad máxima de 4 m que se extiende hasta la cabeza de la bahía. El canal principal, orientado de suroeste a nor-este y del que se desprenden los canales secundarios descritos antes, presenta profundidad máxima de 12 m. Una característica interesante y que no había sido descrita anteriormente (Del Valle Lucero, 1979; Monreal Gómez, 1980; Juárez Villareal, 1982), es que al llegar a la boca de conexión el canal principal pierde profundidad, en un bajo ubicado justo en el extremo *este* de la boca de conexión. El canal principal de la boca de conexión presenta profundidad máxima de 12 m y se extiende aproximadamente

4 km hacia el interior de BSQ, sin incursionar más allá de bahía falsa. Esta última descripción de los dos canales en la boca, refleja la complejidad de la batimetría en la boca de BSQ. Como será discutido más adelante, la presencia de dos canales cerca de la boca podría influenciar de manera considerable los flujos e intercambio de propiedades del agua entre BSQ y el océano adyacente.

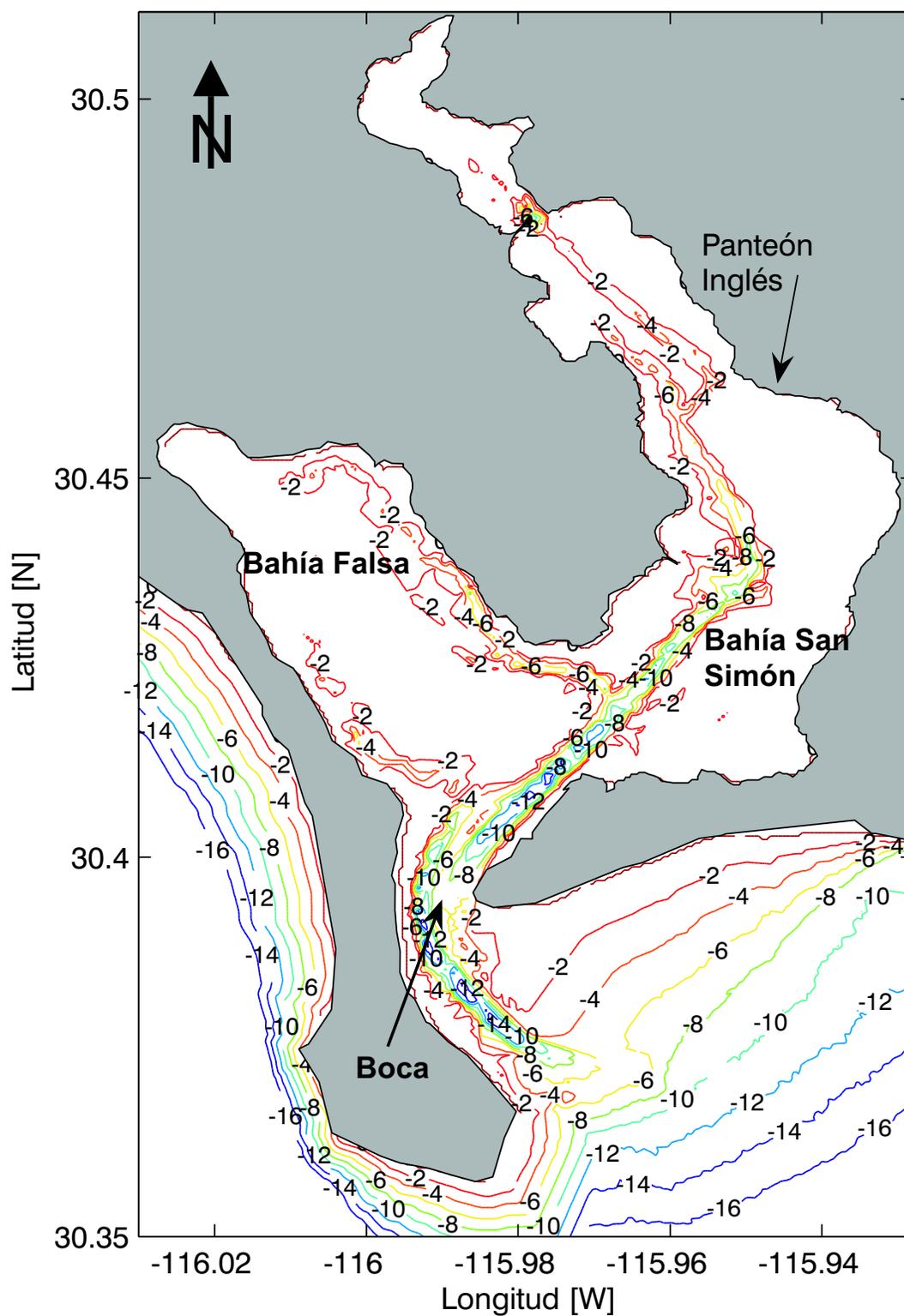


Figura 7: Batimetría de Bahía San Quintín. Referencia vertical NMM, profundidades en metros

### IV.3. Corrientes totales

Con la finalidad de brindar un panorama general sobre la circulación de BSQ, en este capítulo se presentan y discuten las diferencias observadas en los datos de corrientes y se analizan los posibles mecanismos físicos que juegan un papel importante en el balance dinámico de la bahía.

Las corrientes horarias absolutas medidas en la superficie y en el fondo de BSQ, se muestran en la figura 8 para los cuatro ADCP's anclados. La figura ilustra también la batimetría medida, y contiene una escala de magnitud gráfica en la porción superior izquierda de cada panel. La ubicación exacta de los anclajes se indica con un punto magenta. El panel A, mitad inferior de la figura, muestra las corrientes horarias a un metro sobre el fondo. Es notable la bi-direccionalidad de las corrientes, debida al flujo y reflujo de la marea, así como su restricción a la orientación de los canales. La magnitud promedio es de  $\approx 4 \text{ m s}^{-1}$  y la diferencia entre las magnitudes medidas con el anclaje ubicado en el canal de la boca CB y el anclaje más interno CBE (canal brazo este), son del orden de  $\approx 0.2 \text{ m s}^{-1}$ . En la mitad superior de la figura (panel B) se presentan las corrientes medidas a un metro debajo de la superficie. El anclaje CB no midió datos a un metro de la superficie, por lo que solo se indica la ubicación del anclaje como referencia. Al igual que en el fondo, la magnitud promedio es de  $\approx 1 \text{ m s}^{-1}$ . Sin embargo, se aprecia en esta figura una mayor variabilidad de la corriente con una tendencia promedio hacia el *sur-este*. La comparación entre los paneles A y B, sugiere una capa superficial influenciada directamente por el viento (con dirección dominante *sur-este*), mientras que en el fondo la dirección dominante de las corrientes podría ser influenciada por la marea y restringida por los canales de navegación.

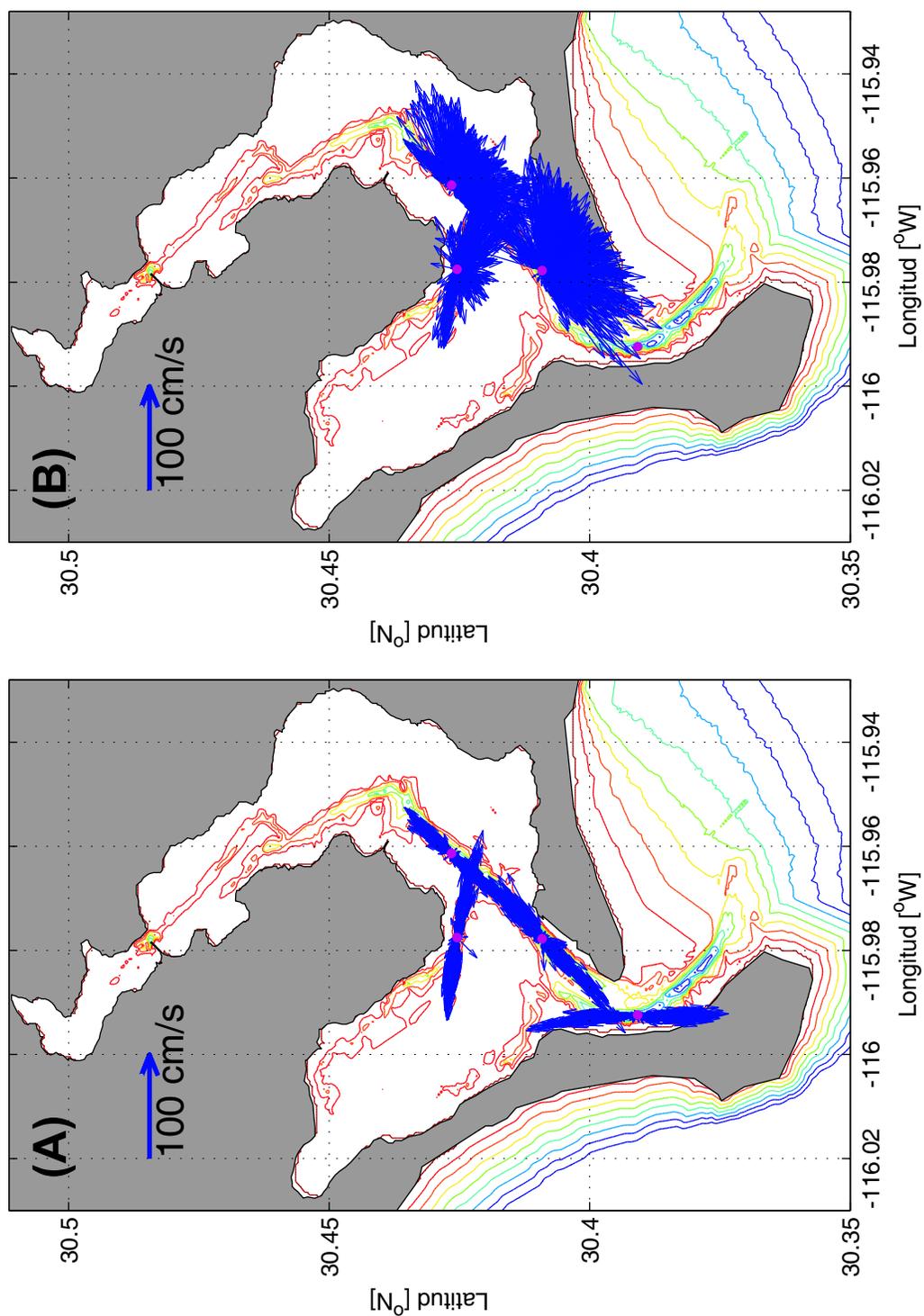


Figura 8: Corrientes totales medidas durante junio-agosto de 2005 en cuatro sitios de BSQ. El panel A presenta las corrientes medidas a 1 m sobre el fondo. El panel B presenta las corrientes medidas a 1 m debajo de la superficie. Los puntos magenta indican la posición de cada anclaje. En la esquina superior izquierda de cada panel se presenta una escala de referencia.

### IV.3.1. Análisis armónico

Con la finalidad de observar en que porcentaje la marea induce corrientes en cada uno de los anclajes instalados, se utilizó la paquetería *t\_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002) validada y utilizada en diversos estudios. Básicamente la función de esta paquetería es realizar un ajuste de una señal de marea astronómica, a cualquier tipo de señal medida (temperatura, velocidad de corriente, marea, etc.). La señal de marea astronómica se reproduce utilizando tantos armónicos de marea (K1, O1, M2 etc.) como la longitud de las series a analizar lo permitan. El grado de bondad con que la curva de marea reproducida se ajuste a los datos originales, es un indicativo de la dependencia entre la serie reproducida y la original. De esta manera se reprodujo la marea a partir de los datos de corrientes observados en la superficie y fondo de cada anclaje. Con este análisis se estimó la varianza de las corrientes debida a, o explicada por la marea.

Las corrientes medidas a lo largo de eje de máxima variabilidad, sobrepuestas a la predicción de marea realizada por *t\_tide*, se presentan en las figuras 9 y 10. Cada panel comprende las corrientes en la superficie y fondo de los cuatro sitios de anclaje; se indica además la varianza de las corrientes explicada con la marea. Para los cuatro anclajes la varianza explicada con la marea cerca del fondo es del orden del 95 %, mientras que en la superficie es del orden de 70 % para los anclajes CP y CBE. En el caso del anclaje CBO, la varianza explicada con la marea en la superficie es de 89.8 %. El anclaje CB no midió dato superficial, por lo que la serie presentada como superficie corresponde a 3 m de profundidad y explica el 99 % de la varianza debida a la marea. En el fondo del anclaje CB, la varianza explicada es del 97.6 %. A primera vista las diferencias en la variabilidad explicada con la marea entre la superficie y el fondo, podría deberse a los fuertes efectos de la fricción con el fondo de la boca de bahía y a los efectos no

oscilatorios del viento.

En general se confirma lo presentado en la sección IV.3, en el sentido de que las corrientes observadas cerca del fondo se deben principalmente a la cooscilación armónica con el océano abierto, mientras que en la superficie el forzamiento de marea en las corrientes disminuye aparentemente por los efectos del viento.

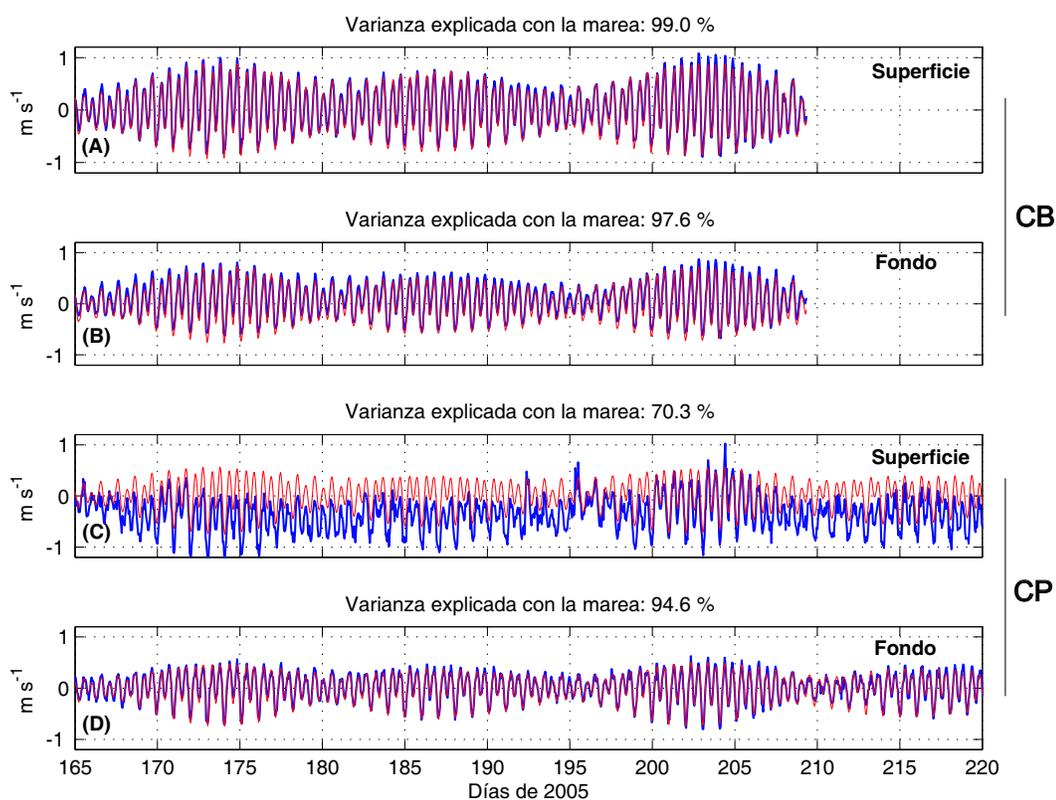


Figura 9: Ajuste de una curva de marea a partir de los datos de corriente. La línea azul son las mediciones de corrientes a lo largo del eje de máxima variabilidad, la línea roja es el mejor ajuste (95 % de confianza) obtenido a partir de los datos medidos. Los paneles A y B se refieren al anclaje CB, mientras que los paneles C y D corresponden al anclaje CP.

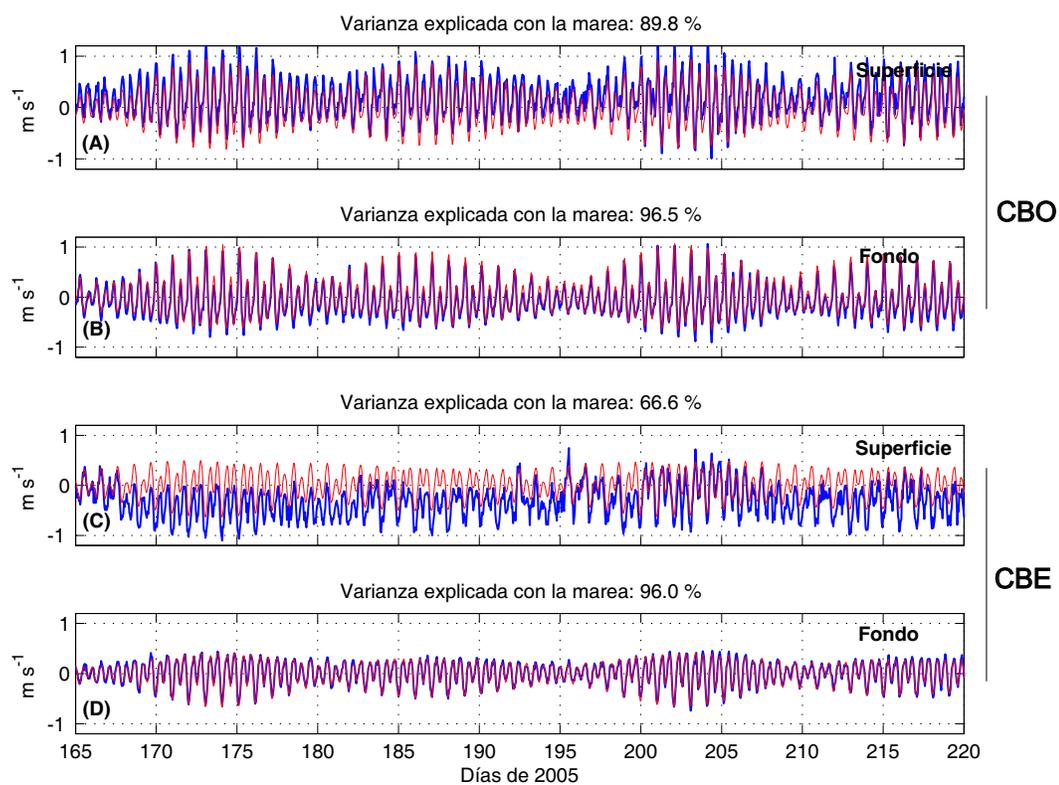


Figura 10: Igual que en la figura 9, para el anclaje CBO (A y B) y CBE (C y D).

## IV.4. Circulación residual

Un menor porcentaje de varianza explicada por las corrientes de marea en los registros de corrientes en la superficie, relativos a las corrientes de fondo (secciones IV.2 y IV.3), confirman por un lado la fuerte influencia de la batimetría sobre la circulación (Del Valle Lucero, 1979; Monreal Gómez, 1980; Juárez Villareal, 1982; Martori Oxamendi, 1989) y por otro lado muestran la influencia del viento en las corrientes superficiales, lo que podría indicar una circulación de dos capas. En otras palabras, la corriente superficial en BSQ podría ser modificada en mayor medida por el viento, mientras que al aumentar la profundidad la marea podría sobreponerse al forzamiento del viento y dominar la circulación en la bahía. Sin embargo, el flujo y reflujo semidiurno característico de la bahía (Ocampo Torres, 1980), no permite distinguir mas allá de corrientes entrando y saliendo a la bahía por el fondo y corrientes con dirección *sur-este* en la superficie. Para observar un comportamiento de largo plazo que describa la ruta y destino final de cualquier característica del agua (transporte neto), es necesario eliminar el efecto de la marea y observar únicamente la corriente residual o submareal que caracteriza a BSQ.

Para estimar la circulación residual es necesario eliminar de los datos de corrientes, las frecuencias mayores a las frecuencias de marea y de esta manera obtener únicamente las corrientes representativas de la circulación residual. El primer paso es determinar las frecuencias más energéticas en los registros de corrientes, lo cual permite definir con mayor precisión las frecuencias de corte para el diseño de los filtros.

### IV.4.1. Análisis espectral y filtrado de datos

Con la finalidad de eliminar las frecuencias cercanas y mayores a las frecuencias de marea, se aplicó un filtro de Lanczos pasa-bajas, con una frecuencia de corte ( $f_c$ )

equivalente a 72 horas. La frecuencia de corte del filtro fue fijada en 72 horas, debido a que la eficiencia del filtro en eliminar las frecuencias cercanas y mayores a las mareales, fue la óptima. La figura 11 presenta los espectros de potencia calculados para cada uno de los anclajes. Los paneles A,B,C y D se refieren a los anclajes CBE, CBO, CP y CB, respectivamente. En línea de color negro se aprecia el espectro de potencia calculado para las series originales, mientras que la línea roja es el espectro obtenido de las series después de haber sido filtradas. La línea azul vertical se ubica justo en  $f_c$ , equivalente a un periodo de 72 horas. En el espectro de potencia calculado para las series originales (línea negra) destacan como frecuencias más energéticas K1 (24 horas) y M2 (12 horas), lo que es congruente con estudios anteriores (Ocampo Torres, 1980; Martori Oxamendi, 1989). Se puede apreciar la buena respuesta del filtro al “dejar pasar” todas las frecuencias menores a  $f_c$ . Las frecuencias más energéticas observadas en los datos originales, así como todas las mayores a  $f_c$ , fueron suavizadas y disminuidas en casi 6 órdenes de magnitud, lo que prácticamente las eliminó por completo de las series de datos.

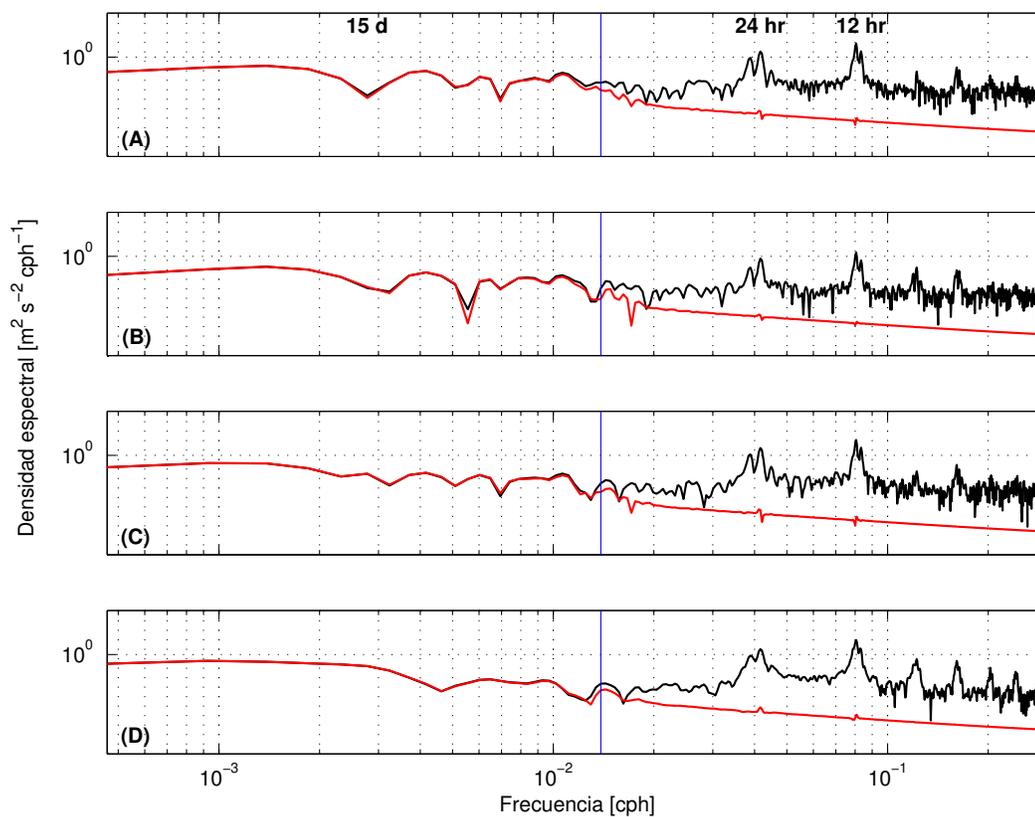


Figura 11: Espectros de potencia de la series de datos originales (línea negra) y la serie de datos filtrados con una frecuencia de corte equivalente a 72 h (línea roja). La equivalencia en periodo [horas] de las frecuencias más energéticas se indica en el extremo superior. La línea azul señala la frecuencia equivalente a un periodo de 72 horas. Los paneles A,B,C y D se refieren a los anclajes CBE, CBO, CP y CB respectivamente.

#### IV.4.2. Estadística básica

Un análisis básico que permite conocer el eje de máxima variabilidad en la distribución temporal de los datos de corrientes submareales o residuales, es la construcción de elipses de variabilidad. Si se calcula el vector promedio de la serie de datos y se grafica con la misma escala que las elipses de variabilidad, es posible conocer si la distribución de datos es homogénea. En otras palabras cuando el vector promedio es mayor que la excentricidad de la elipse, indica un promedio representativo (mayor que su desviación estándar). El vector promedio muestra también la dirección preferencial de la corriente y su magnitud.

La figura 12 muestra las elipses de variabilidad y vector promedio, calculados para las corrientes residuales obtenidas a partir de los cuatro anclajes instalados en BSQ. Cada panel cuenta con una escala de referencia en el extremo superior izquierdo. El panel A, contiene las elipses y vector promedio calculadas a un metro sobre el fondo. El panel B, contiene las elipses y vector promedio calculadas a un metro debajo de la superficie. Cerca del fondo (panel A) es apreciable la diferente dinámica de las corrientes residuales medidas en los anclajes CBO, CBE y CP, con la dinámica presente en el anclaje CB. En la boca de la bahía (anclaje CB) la excentricidad ( $\approx 1$ ) de la elipse indica una dirección de flujo bien definida y restringida al canal de navegación, mientras que hacia el interior de la bahía, la excentricidad de las elipses ( $\approx 0$ ) indica que no existe una dirección preferencial bien definida. Una forma de identificar la dirección preferencial de la corriente es observar el vector promedio. En el extremo más interior medido (anclaje CBE) el vector promedio tiene la misma magnitud que la elipse, lo que indica un promedio en la distribución de datos menor que su desviación estándar, por lo que no se logra definir una dirección preferencial. Por el contrario en los anclajes CBO, CP y

CB el vector promedio siempre es mayor que su desviación estándar (elipticidad), lo que indica que la corriente residual es hacia adentro de la bahía la mayor parte del tiempo. Para los anclajes CBO, CP y CB la dirección de la corriente parece restringirse a los canales de navegación, aunque con pequeñas modificaciones indicadas por las elipses. En el CBE la dirección preferencial es perpendicular al canal de navegación, aunque muy poco representativa debido a su distribución heterogénea y con magnitud de  $\approx 1 \text{ cm s}^{-1}$ . En el resto de los anclajes la magnitud promedio de la corriente residual es de  $\approx 5 \text{ cm s}^{-1}$ .

En la superficie (panel B) el vector promedio es muy representativo, debido a que es mucho mayor que la desviación estándar de las corrientes residuales en cada punto. Aquí la orientación de las elipses sugiere una variabilidad perpendicular a los canales de navegación, con una dirección preferencial hacia el *sur-este* casi todo el tiempo. A diferencia de las corrientes residuales sobre el fondo, la magnitud de la corriente residual llega a ser cercana a  $40 \text{ cm s}^{-1}$  cerca de la superficie. El anclaje CB no midió dato superficial, por lo que sólo se indica su ubicación con un punto azul como referencia.

En general, cerca del fondo se define una circulación residual de relativamente baja magnitud ( $\approx 5 \text{ cm s}^{-1}$ ) y restringida a los canales de navegación. En la superficie, la dirección de la circulación residual es perpendicular a la orientación de los canales de navegación (hacia el *sur-este*), con un incremento notable en la magnitud respecto al fondo.

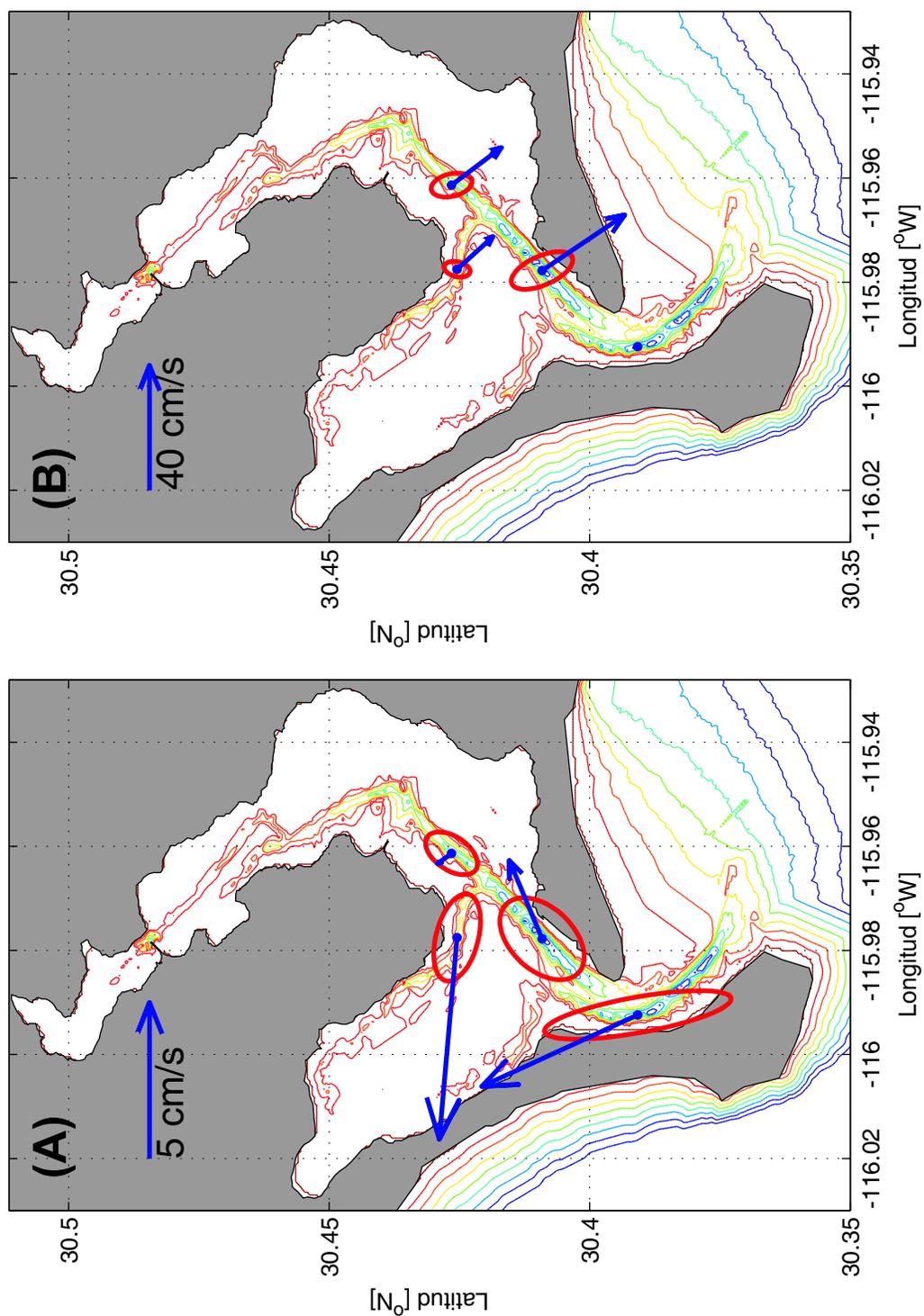


Figura 12: Elipses de máxima variabilidad y vector promedio de la corriente residual medida en cuatro sitios de BSQ. El panel A presenta las corrientes medidas a 1 m sobre el fondo. El panel B presenta las corrientes medidas a 1 m por debajo de la superficie. Los puntos azules indican la posición de cada anclaje. En la esquina superior izquierda de cada panel se presenta una escala de referencia. Note el cambio de escala de referencia en ambos paneles.

### IV.4.3. Variación temporal

Las evidencias presentadas en las secciones anteriores postulan a tres agentes que podrían modificar la circulación residual en BSQ; el viento, la marea y la batimetría. Con esto en mente, una forma de correlacionar la dinámica observada con los forzamientos presentes en la bahía, es graficar estos forzamientos de manera simultánea. En esta sección se presenta y analiza la variación temporal de la magnitud de la corriente residual, en cada uno de los anclajes instalados en BSQ. Paralelamente se presenta el viento y la marea graficados sobre el mismo vector de tiempo que la variación en la magnitud de la corriente.

La figura 13 presenta la variación temporal y espacial (vertical) de la corriente residual en el anclaje CBE. El panel superior indica la variación del viento durante el periodo de mediciones; el nivel de mar se indica con una línea roja. Los dos paneles inferiores corresponden a la componente  $v$  (a lo largo del canal de navegación) y a la componente  $u$  (perpendicular al canal). En la figura se aprecia el efecto de lo que podría ser el esfuerzo del viento, restringido a los tres primeros metros superficiales y con una corriente neta ( $10\text{-}30\text{ cm s}^{-1}$ ) hacia afuera de la bahía. Durante los días 165, 184, 198 al 205, es notable el atenuamiento del flujo superficial asociado con un debilitamiento y/o inversión del viento. Es particularmente interesante ver el atenuamiento, incremento e inversión del viento entre los días 200 y 206 y observar la respuesta dinámica de la corriente superficial. Al inicio de este periodo, el debilitamiento del viento parece ocasionar la disminución de la corriente superficial, misma que no alcanza a recuperar su magnitud característica ( $10\text{-}30\text{ cm s}^{-1}$ ) durante el corto periodo de incremento del viento que ocurrió el día 203. Debajo de la capa superficial fuertemente afectada por el viento, la corriente a lo largo del canal (componente  $v$ ), tiene una dirección opuesta

a la corriente en la superficie durante los periodos de mareas muertas y congruente con la dirección en la superficie durante las mareas vivas. En otras palabras, existe una circulación de dos capas que desaparece con una variabilidad quincenal debida a la intensificación de las corrientes durante mareas vivas. El patrón dinámico presente en esta figura, muestra la competencia entre el forzamiento del viento y la marea, notable en la componente  $v$  a lo largo del canal. La influencia del viento sobre el patrón de corrientes parece ser constante, con cambios en la dirección y magnitud de estos sólo cuando el viento cesa. La marea induce un patrón que varia con los cambios entre mareas vivas y muertas. Durante las mareas vivas, la circulación barotrópica inducida por la marea podría ser más fuerte que la circulación baroclínica del viento, por lo que domina una circulación con dirección homogénea en la vertical. En contraste durante las mareas muertas la circulación baroclínica inducida por el viento, podría ser más fuerte que la barotrópica inducida por la marea y reflejarse como una circulación de dos capas.

La figura 14 corresponde al anclaje CBO y está organizada de la misma forma que la figura anterior. Al igual que el anclaje CBE, en este anclaje se observa la influencia del viento en la superficie (primeros tres metros). Sin embargo, en este sitio no se observan inversiones ni incrementos en la magnitud de la corriente, asociados con los periodos de mareas vivas y muertas. Durante la mayor parte del tiempo se observa una circulación de dos capas. Cuando el esfuerzo del viento cesa o se debilita (días 165 y 204) la circulación de dos capas desaparece y el flujo es homogéneo en la vertical (hacia afuera de la bahía). En este anclaje la dinámica inducida por el viento parece ser más importante que la dinámica inducida por la marea. El efecto del esfuerzo del viento es apilar agua en dirección del mismo esfuerzo; en respuesta a esto la dirección

de las corrientes hacia el fondo son opuestas que en la superficie. Note que en ausencia o inversión del viento (días 165 y 204) las corrientes se re-orientan y parecen tener un comportamiento barotrópico o de dirección homogénea en la vertical.

Este resultado sugiere que de no existir forzamiento en la superficie, la circulación residual sería puramente un flujo de salida en toda la columna de agua. Sin embargo, para probar esto sería necesario contar con mediciones de corrientes durante periodos prolongados en ausencia de viento.

La figura 15 corresponde al anclaje CP y se organiza igual que las anteriores. La dinámica presente en esta figura, es muy similar a la observada en el anclaje CBO. Se observa una capa superficial influenciada por el viento y la respuesta del sistema al disminuir el viento (días 165, 196 y del 200 al 206), y la inversión en la dirección de la corriente cerca del fondo. Sin embargo, es importante notar que el núcleo de corrientes con mayor intensidad cerca de la superficie, tiene magnitudes mayores ( $\approx 40 \text{ cm s}^{-1}$ ) y es  $\approx 1$  metro más profundo con respecto a los anclajes CBE y CBO.

La figura 16 corresponde al anclaje CB. A diferencia de los anclajes CBE, CBO y CP, en este anclaje la corriente presenta un patrón completamente barotrópico, con dirección hacia el interior de la bahía todo el tiempo (componente  $v$  a lo largo del canal positiva), pero con intensificaciones de  $\approx 10 \text{ cm s}^{-1}$  durante las mareas vivas. Si bien en este anclaje la medición más superficial se ubica a 3 metros de profundidad, no se aprecia ningún indicio de una capa superficial influenciada por el viento. Esta suposición es consistente con observaciones similares realizadas durante junio de 2004 (Angulo Larios, en proceso).

De lo anterior se pueden inferir 2 características notables en la circulación residual de BSQ. Hacia el interior de la bahía (anclajes CBO, CBE y CP) la circulación tiene

un comportamiento baroclínico de dos capas. En la superficie la circulación parece ser fuertemente modificada por el viento, tanto en dirección como en magnitud, mientras que hacia el fondo la dirección es opuesta que en la superficie. Esto podría ser consecuencia de la respuesta dinámica del sistema, al ser sometido a un apilamiento de agua (hacia el sur-este) inducido por el esfuerzo del viento. Por otro lado es importante resaltar que los efectos de la marea son más apreciables en el anclaje CBE, durante las mareas vivas la circulación barotrópica de la marea parece dominar a la circulación baroclínica inducida por el viento. La segunda característica es el hecho de que la boca presenta un patrón dinámico completamente diferente al interior de la bahía y aquí la corriente residual parece ser modificada únicamente por la marea barotrópica, mientras que el efecto del viento no es perceptible.

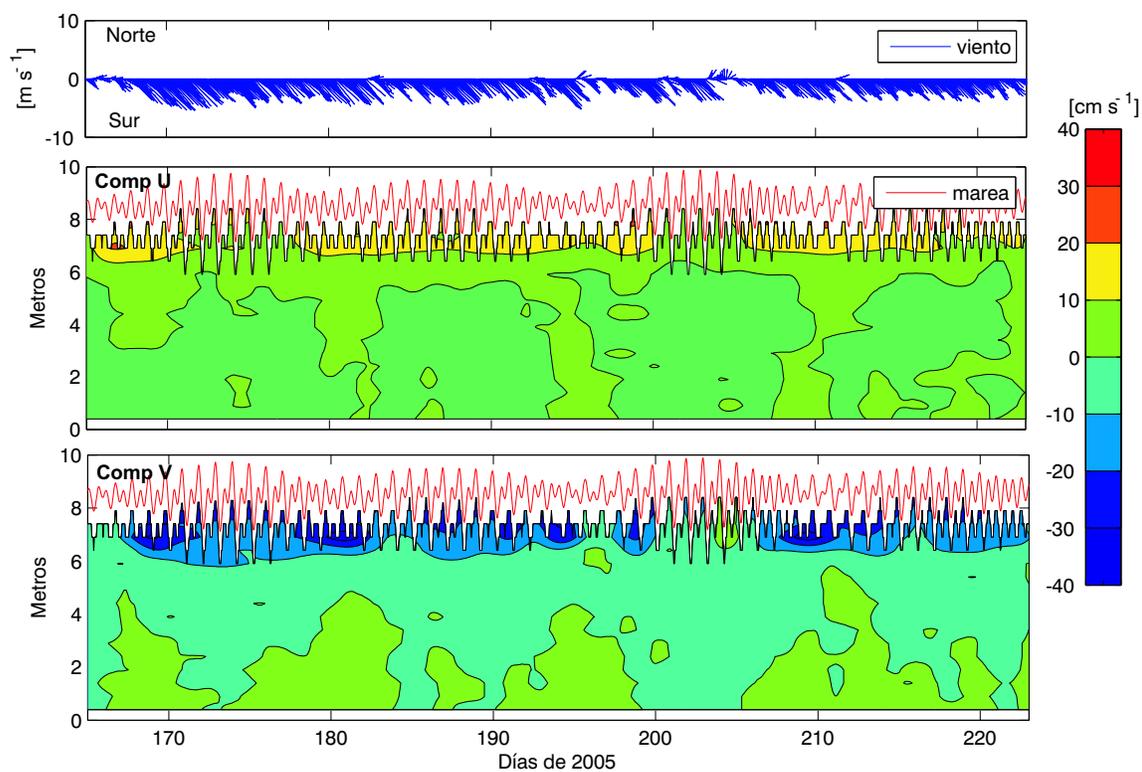


Figura 13: Variación temporal y espacial de la corriente residual transversal ( $v$ ) y longitudinal al canal ( $u$ ) en el anclaje CBE. El panel superior presenta la variación del viento durante el periodo de mediciones. La línea roja indica la marea vertical. La profundidad esta referida a la distancia sobre el fondo. Valores positivos indican flujo hacia el interior y hacia la derecha en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente.

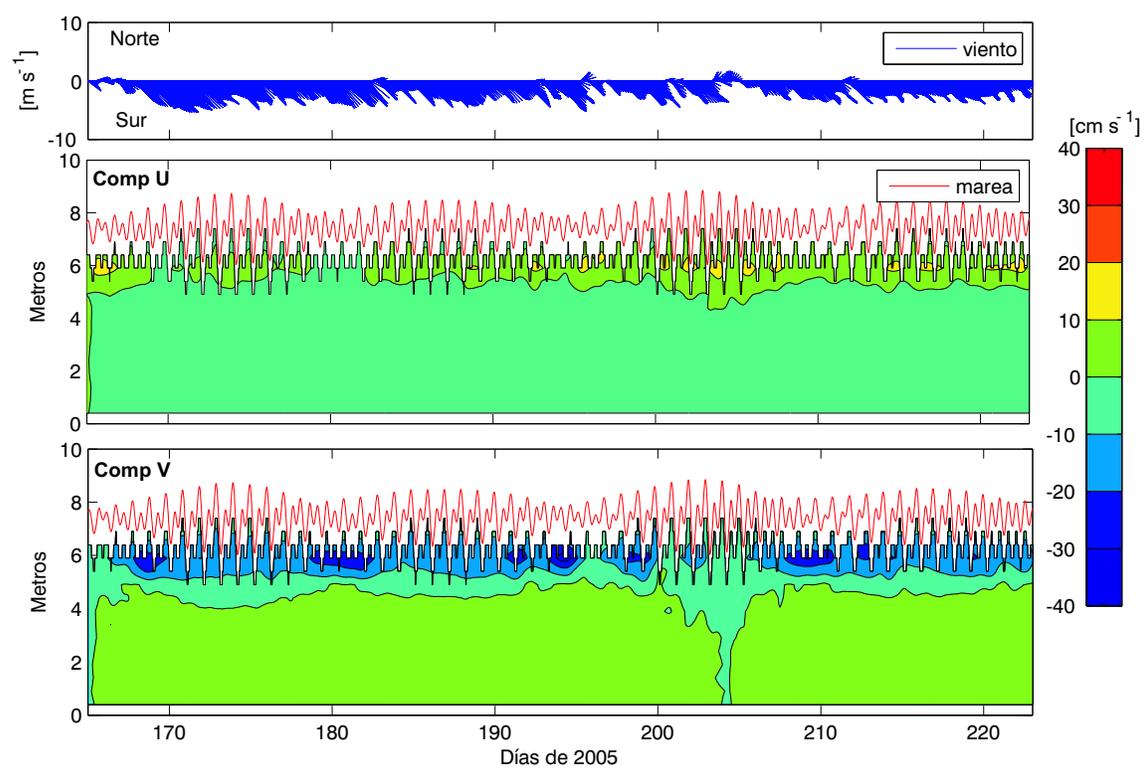


Figura 14: Igual que en la figura 13 para el anclaje CBO.

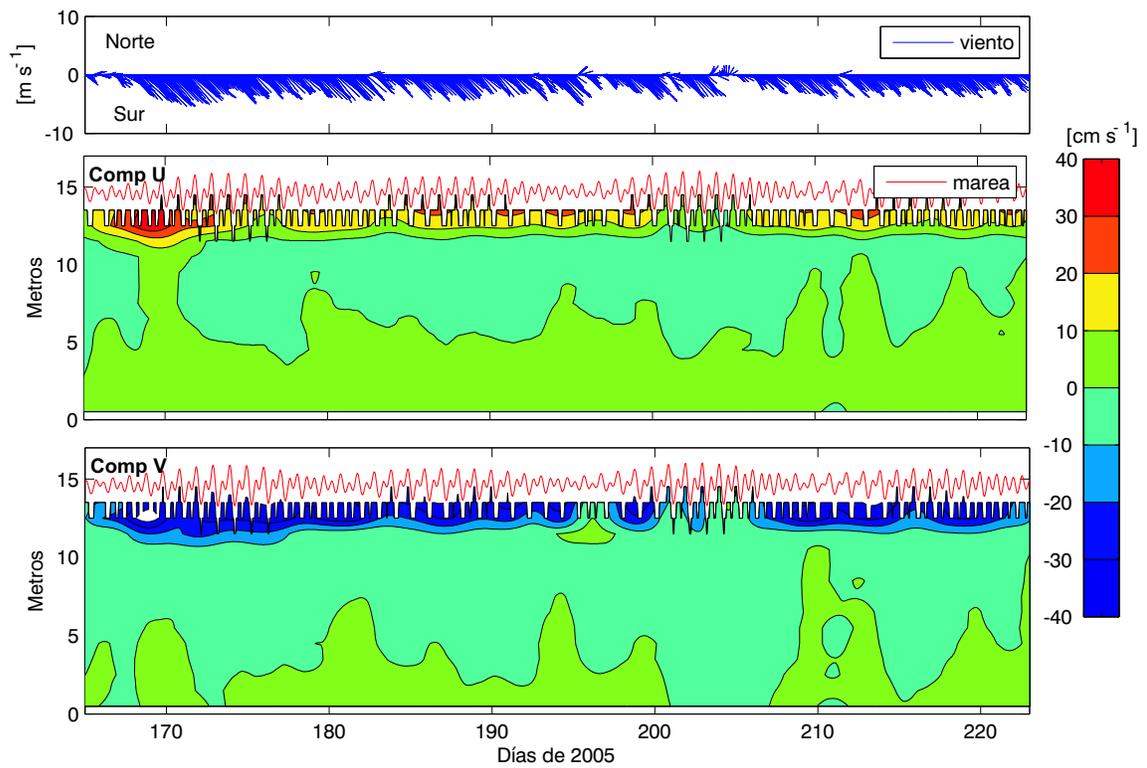


Figura 15: Igual que en la figura 13 para el anclaje CP.

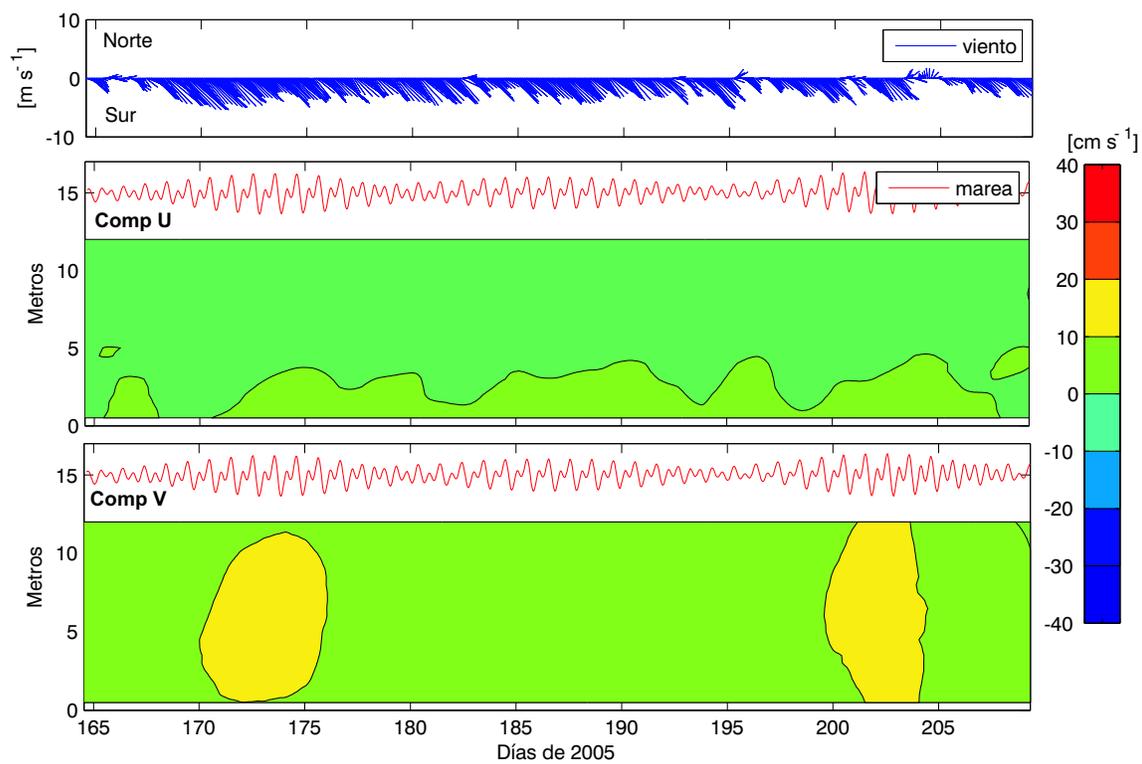


Figura 16: Igual que en la figura 13 para el anclaje CB.

#### IV.4.4. Funciones empíricas ortogonales FEO's

Se ha discutido acerca de agentes que modifican la circulación residual en BSQ, en particular los efectos del viento y la marea. Una forma de estimar en que medida estos factores tienen influencia sobre la circulación, es mediante un análisis con Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's) de los vectores de corrientes residuales. Este análisis permitirá cuantificar la influencia de esos dos forzamientos y de otros posibles forzamientos que modifiquen la variación de la circulación residual.

Para realizar este análisis, primero se eliminó el promedio y la tendencia de cada serie de tiempo y posteriormente se normalizó dividiendo entre la raíz cuadrada del número de muestras. Posteriormente se construyó una matriz ( $\mathbf{A}$ ) donde las columnas  $n$  representan las componentes  $u$  y  $v$  de cada anclaje, y las filas  $m$  son la variación temporal.

Las FEO's se obtuvieron haciendo descomposición en valores singulares (SVD) de la matriz  $\mathbf{A}$ , de forma que

$$\mathbf{USV}^T = \text{svd}(\mathbf{A}), \quad (2)$$

donde  $\mathbf{U}$  y  $\mathbf{V}$  son matrices triangulares y  $\mathbf{S}$  es la matriz de eigenvalores.

Con esta descomposición se obtienen los modos de variabilidad espaciales (columnas de  $\mathbf{V}$ ) y temporales de cada modo, con varianza unitaria (columnas de  $\sqrt{m}\mathbf{U}$ ).

El porcentaje de la varianza explicada para cada modo, está dado por el cuadrado de los valores singulares contenidos en la diagonal de  $\mathbf{S}$  ( $\mathbf{s} = \text{diag}(\mathbf{S})$ )

$$\frac{\mathbf{s}^2}{\sum \mathbf{s}^2} \times 100. \quad (3)$$

En primera instancia se presentan las FEO's calculadas para las corrientes de baja frecuencia cerca de la superficie y en seguida, cerca del fondo.

La figura 17 muestra el modo 1 del análisis con FEO's realizado para los datos de corrientes residuales medidas cerca de la superficie. En el panel A se presenta la variación espacial con unidades físicas en  $\text{cm s}^{-1}$ , mientras que en el panel B se muestra la variación temporal adimensional. Como referencia, los paneles C y D muestran la variación temporal del viento y la marea durante el periodo analizado. El porcentaje de varianza explicada por este modo es de 95.5 % y su variación espacial es completamente homogénea con dirección *sur-este*. La variación temporal del modo (panel B) es positiva todo el tiempo, lo que indica que el modo espacial no tiene inversiones de dirección. Las disminuciones más notables en la variación temporal de este modo corresponden al atenuamiento y en algunos casos inversión del viento, lo que en el patrón espacial se traduciría como disminuciones de magnitud sin que la dirección se modifique. Este patrón es muy similar al mostrado en la sección IV.4.2 donde se sugirió que los atenuamientos en la variación temporal de las corrientes residuales, parecen estar relacionados con el debilitamiento del viento (panel D), por lo que el comportamiento de este modo (modo que explica la mayor varianza en la superficie) se puede atribuir al forzamiento de viento con una correlación de  $r = 0,82$ .

La figura 18 presenta el modo 2 y se organiza de la misma manera que la figura anterior. La varianza explicada por este modo es del 2.7 % y su variación espacial indica corrientes preferentemente entrando a la bahía. Sin embargo, la variación temporal de este modo parece relacionarse nuevamente con el forzamiento del viento. Son notables las inversiones del modo temporal, lo que indica también inversiones del modo espacial, justo en los días 165 al 168, 196, 201 y 204, durante los periodos de inversion y atenu-

amiento del viento discutidos anteriormente (panel D). La relativamente baja varianza explicada por este modo (2.7%) y lo evidente del modo 1, impide atribuir este modo de manera directa al forzamiento de viento. Por otro lado es posible considerar que el esfuerzo del viento afecta de manera directa las corrientes, pero de manera indirecta la variación del nivel de mar. El efecto del viento sobre el nivel de mar, es el de apilar agua en la misma dirección que el forzamiento. Cuando este esfuerzo cesa, la superficie de el nivel de mar se ajusta y baja. Este efecto indirecto del viento es el que se podría atribuir a este modo y más adelante (sección IV.4.5) se presentarán evidencias del efecto de apilamiento de agua en la porción *sur-este* de la bahía, como efecto del esfuerzo del viento.

El modo 3 (figura 19) explica el 1.1% de la varianza y parece estar relacionado con la marea. La estructura espacial de las corrientes arrojadas por este modo indica corrientes alineadas a los canales de navegación. El cambio de signo en la variación temporal (panel B) indica inversiones en el patrón espacial de las corrientes asociadas al cambio entre mareas vivas y muertas. Durante las mareas muertas el signo en la variación temporal del modo parece ser preferentemente positivo, lo que indica corrientes saliendo de la bahía en los anclajes CBO y CP, mientras que en el anclaje CBE la corriente se dirige hacia adentro de la bahía. Durante mareas vivas el patrón se invierte.

De lo anterior se puede estipular lo siguiente; en la superficie las corrientes residuales son forzadas por el viento en un 99%, mientras que la marea solo modifica esta circulación en un porcentaje muy bajo ( $\approx 1\%$ ).

Las figuras 20 a la 22 presentan el análisis con FEO's realizado para las corrientes cercanas al fondo de BSQ. Los paneles en las figuras son organizados de la misma manera que en las figuras anteriores. En el fondo la varianza explicada por el modo

1 (figura 20) es del 87% y su evolución temporal de correlaciona al forzamiento de marea con un factor  $r = 0,63$ . El patrón espacial indica corrientes residuales orientadas a los canales de navegación y entrando a la bahía en los anclajes CB, CP y CBO. El caso particular del anclaje CBE presenta una corriente perpendicular al canal (note la similitud con el modo 3 obtenido a partir de las corrientes superficiales). Este patrón parece mantenerse durante todo el periodo analizado, ya que la variación temporal del modo siempre es positiva. La disminución de la variación temporal se presenta durante las mareas muertas. Esto último indica un atenuamiento, más no inversión, del patrón espacial arrojado por este modo durante las mareas muertas. El patrón de circulación descrito por este modo es congruente con los resultados presentados en las secciones IV.4.2 y IV.4.3, y parece ser influenciado por la marea.

El modo 2 (figura 21) explica solo un 8.7% de la varianza de las corrientes en el fondo. Al igual que el modo 1, la variación espacial de este modo se restringe a la orientación de los canales. La variación temporal es contraria a la arrojada por el primer modo y muestra cambios de signo que alcanzan su máximo valor negativo justo en las mareas vivas de mayor amplitud. El viento no se correlaciona de manera directa a la variación temporal y espacial de este modo. Sin embargo, el bajo porcentaje de varianza explicada por este modo desecha la posibilidad que su origen directo sea la marea, por lo que un candidato para explicar este modo es la fricción con el fondo y paredes laterales. Esta aseveración se basa dos argumentos principales. Por un lado, la evidencia de ajuste en la dirección de las corrientes a los canales. Por otro lado el hecho de que los efectos de fricción son directamente proporcionales a la velocidad del fluido, sugiere que los efectos de fricción son máximos durante las mareas vivas de luna llena (mareas verticales de máxima amplitud). En ausencia de fricción o con fricción reducida

(mareas muertas) los flujos residuales en la boca tenderían a salir por el lado *oeste* de la boca de conexión (sección II), debido al efecto de rotación de la tierra tal y como se observa la mayor parte del tiempo de este modo. Cuando los efectos de fricción (mareas vivas) son más importantes que las fuerzas inerciales inducidas por la rotación de la tierra, los flujos en la boca tienden a entrar por el lado oeste de la boca de conexión (Valle Levinson *et al.*, 2003). Como se mencionó en la sección II el número de *Ekman* representa la competencia entre los efectos de fricción y la rotación de la tierra. Para un número de *Ekman*  $\approx 1$  los efectos de fricción se superponen al efecto de rotación de la tierra. El número de *Ekman* depende básicamente del parámetro de viscosidad vertical y del parámetro Coriolis, por lo que durante las mareas de mayor amplitud los efectos de la viscosidad incrementan con respecto a Coriolis (número de *Ekman*  $\approx 1$ ). Esto muestra la importancia de los efectos de fricción en el fondo de BSQ mismos que pueden contribuir de manera considerable al patrón de circulación residual.

El modo 3 en el fondo (figura 22) explica el 1.5 % de la varianza y presenta un modo espacial con magnitudes menores a  $0.5 \text{ cm s}^{-1}$  en los anclajes CBE, CBO y CB, no así en el CP. Es importante mencionar esto debido a que el error asociado a la medición de los instrumentos es precisamente del orden de  $0.5 \text{ cm s}^{-1}$  (sección III) por lo que los resultados de este modo en dichos anclajes resultan irrelevantes. Sin embargo, el anclaje CP presenta una magnitud de  $\approx 1 \text{ cm s}^{-1}$ . La mayor parte del tiempo el viento tiene dirección *sur-este*, contraria a la dirección del modo espacial en el anclaje CP. Aquí la dirección de la corriente presentada en el modo espacial, es congruente con la dirección del viento solo durante los periodos de atenuamiento e inversión del mismo. Si se considera que en la superficie, el esfuerzo del viento ocasiona una corriente en la misma dirección del viento, la respuesta dinámica del sistema es generar una corriente

de regreso por el fondo (como respuesta de conservación de masa). Por lo tanto, se puede sugerir que para el sitio CP este modo es un indicio de la presencia del forzamiento del viento en el fondo.

En general la aplicación de FEO's a los datos de corriente residual medidos cerca del fondo muestra su mayor variabilidad debida a la marea. Aquí los efectos de fricción son más importantes que el esfuerzo del viento, aunque este último efecto parece estar presente en el sitio CP.

Corriente residual a ~1 m de la superficie. Modo:1 Varianza explicada:95.53

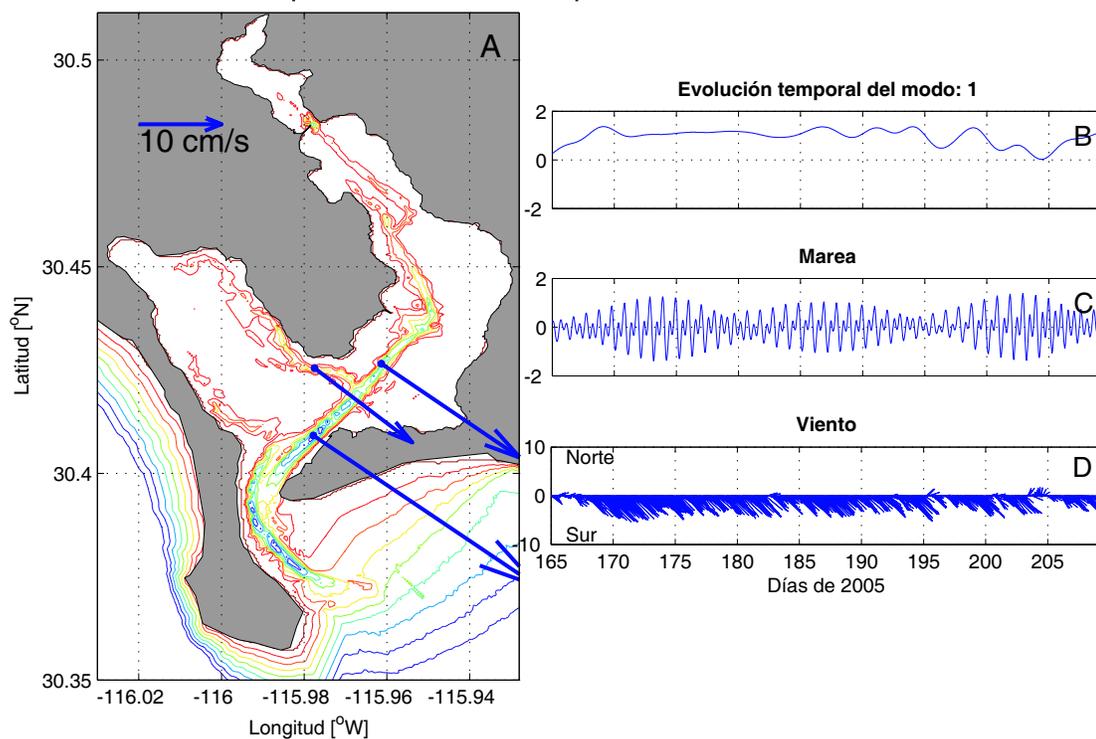


Figura 17: FEO (modo 1) de la corriente residual en la superficie medida en tres anclajes instalados en BSQ. Los paneles A y B presentan la variación espacial y temporal respectivamente. Los paneles C y D presentan la variación temporal del viento y la marea durante el periodo analizado. En el extremo superior se indica la varianza explicada por este modo.

Corriente residual a ~1 m de la superficie. Modo:2 Varianza explicada:2.72

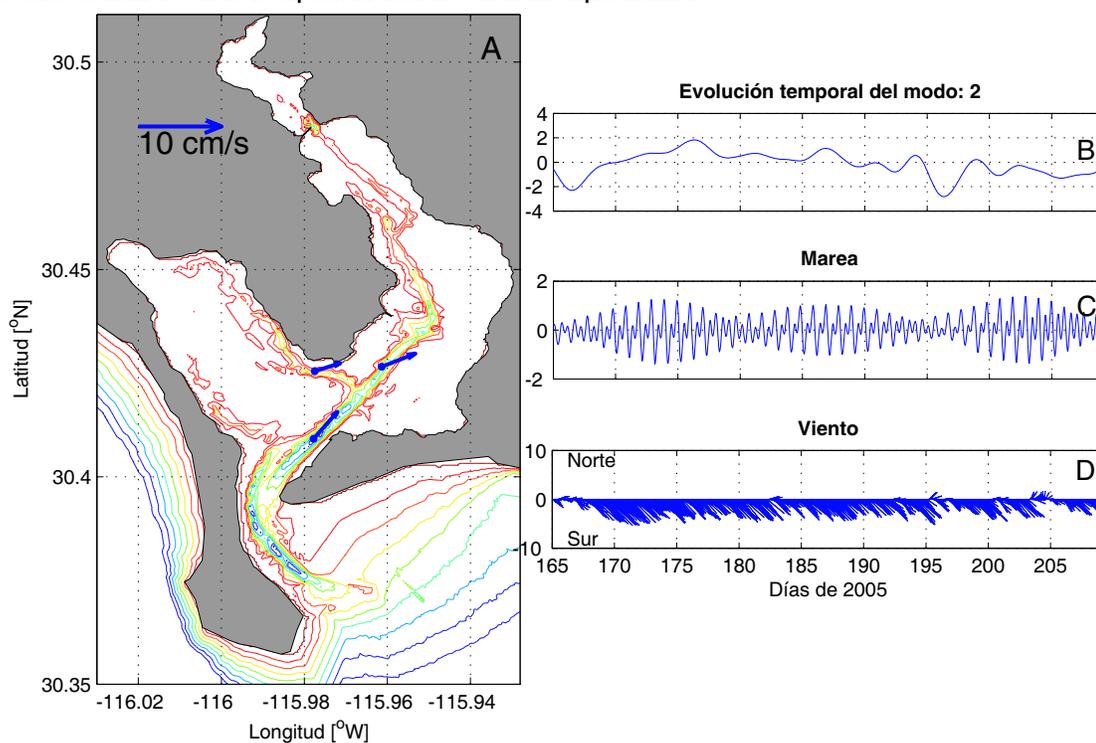


Figura 18: FEO (modo 2) de la corriente residual en la superficie medida en tres anclajes instalados en BSQ. Los paneles A y B presentan la variación espacial y temporal respectivamente. Los paneles C y D presentan la variación temporal del viento y la marea durante el periodo analizado. En el extremo superior se indica la varianza explicada por este modo.

Corriente residual a ~1 m de la superficie. Modo:3 Varianza explicada:1.08

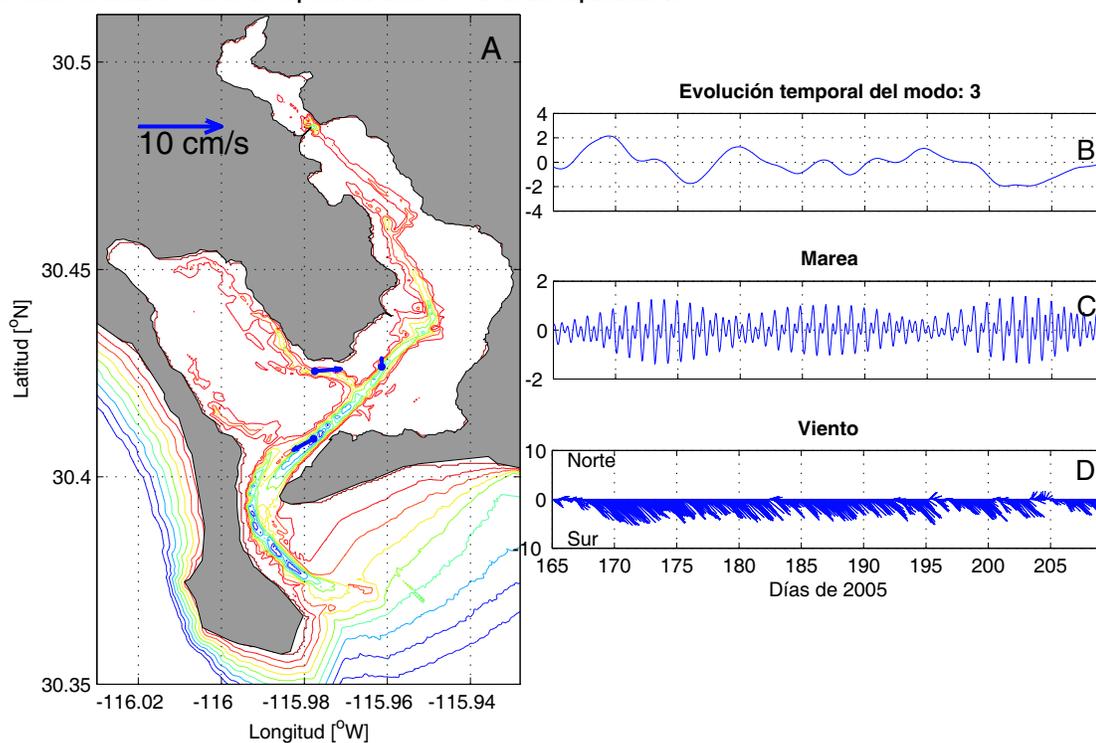


Figura 19: FEO (modo 3) de la corriente residual en la superficie medida en tres anclajes instalados en BSQ. Los paneles A y B presentan la variación espacial y temporal respectivamente. Los paneles C y D presentan la variación temporal del viento y la marea durante el periodo analizado. En el extremo superior se indica la varianza explicada por este modo.

FEO Corriente residual a ~1 m del fondo. Modo:1 Varianza explicada:87.0

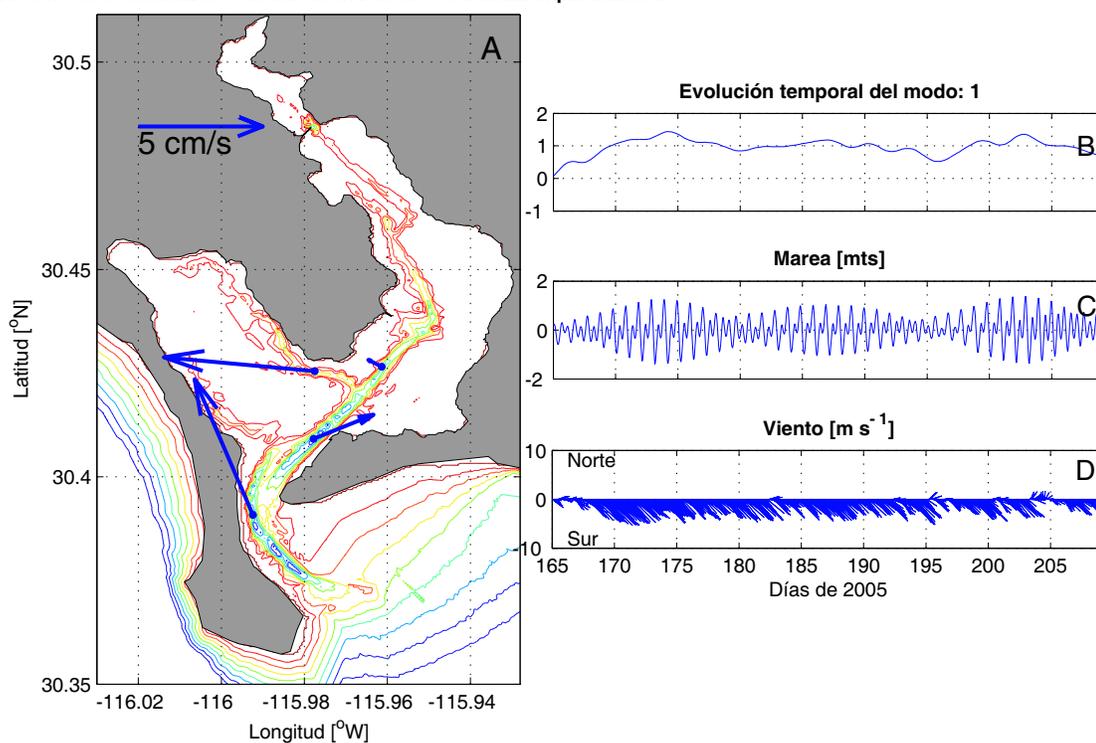


Figura 20: FEO (modo 1) de la corriente residual cerca del fondo medida en los cuatro anclajes instalados en BSQ. Los paneles A y B presentan la variación espacial y temporal respectivamente. Los paneles C y D presentan la variación del viento y la marea durante el periodo analizado. En el extremo superior se indica la varianza explicada por este modo.

FEO Corriente residual a ~1 m del fondo. Modo:2 Varianza explicada:8.75

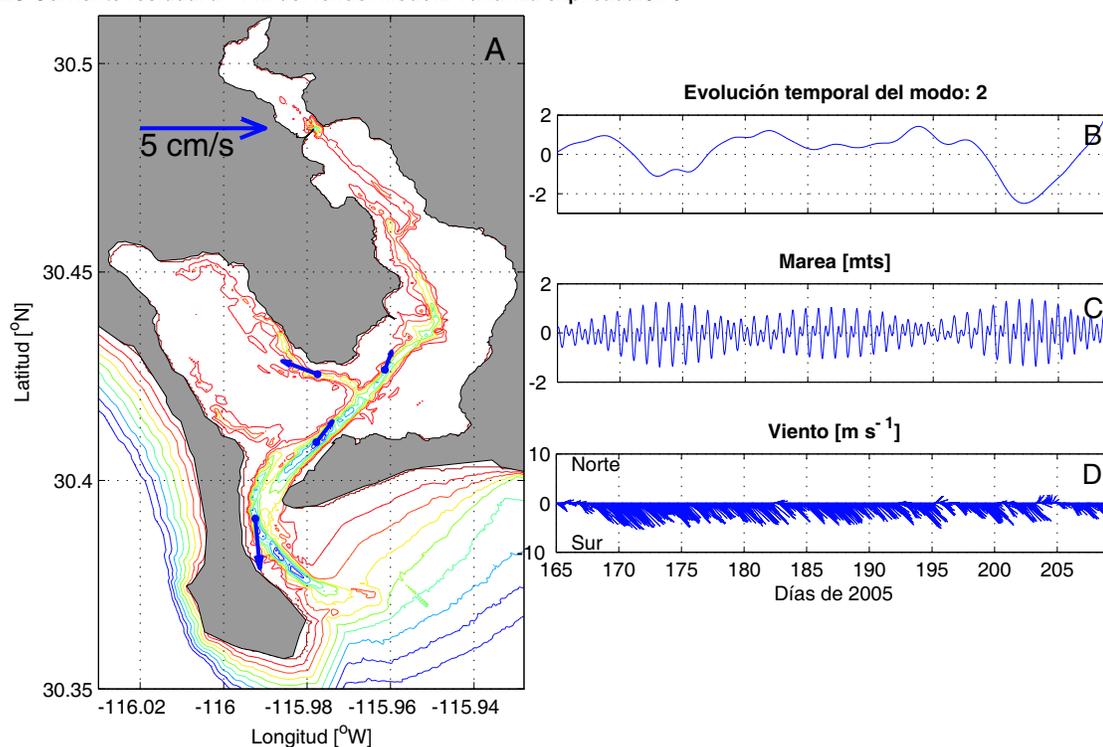


Figura 21: FEO (modo 2) de la corriente residual cerca del fondo medida en los cuatro anclajes instalados en BSQ. Los paneles A y B presentan la variación espacial y temporal respectivamente. Los paneles C y D presentan la variación del viento y la marea durante el periodo analizado. En el extremo superior se indica la varianza explicada por este modo.

FEO Corriente residual a ~1 m del fondo. Modo:3 Varianza explicada:1.50

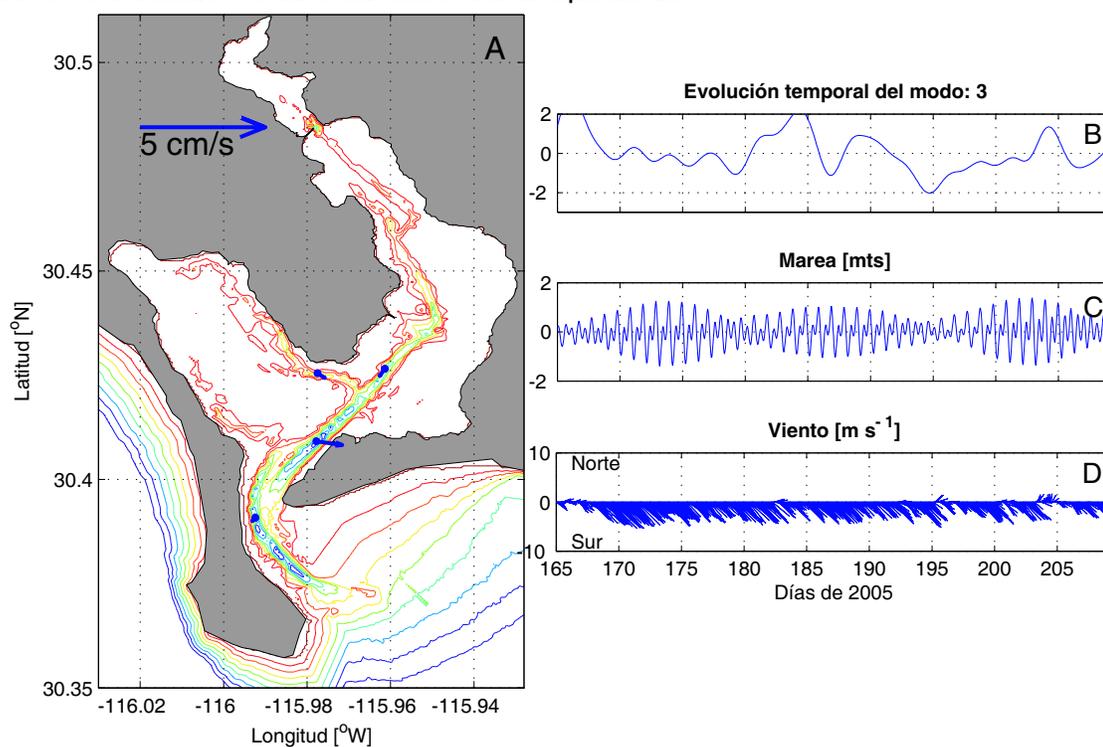


Figura 22: FEO (modo 3) de la corriente residual cerca del fondo medida en los cuatro anclajes instalados en BSQ. Los paneles A y B presentan la variación espacial y temporal respectivamente. Los paneles C y D presentan la variación del viento y la marea durante el periodo analizado. En el extremo superior se indica la varianza explicada por este modo.

#### IV.4.5. Influencia del viento

Los resultados presentados hasta este momento sugieren una dinámica diferente entre la superficie de BSQ y el fondo. En las zonas de mayor profundidad (canales de navegación) la circulación residual es influenciada casi en su totalidad por la marea. Aunque en los sitios CBO y CBE parece modulada por el debilitamiento del viento. La marea afecta de dos formas principales; de forma directa modifica la magnitud de las corrientes durante los periodos de mareas vivas y mareas muertas. En consecuencia indirecta los efectos de fricción se incrementan durante los periodos de mareas vivas. En contraste, el viento en la superficie mueve por completo las corrientes y domina la circulación residual. Por lo tanto, en esta sección se estudia de manera aislada el efecto del viento sobre la circulación de BSQ. Para este fin se analizan los perfiles promedio de corrientes en los cuatro anclajes.

La figura 23 muestra los promedios temporales de los perfiles de corriente residual obtenidos en los cuatro anclajes instalados en BSQ. La flecha roja en el centro superior de la figura es una escala gráfica de referencia. Es notable la diferencia dinámica entre la boca de conexión (CB) y los anclajes CP, CBE y CBO. En el anclaje CB, la corriente residual parece ser completamente barotrópica, con dirección hacia el interior de la bahía y magnitudes del orden de  $8 \text{ cm s}^{-1}$ . Este resultado es consistente con lo predicho por la teoría para casos en que  $E \approx 1$  (sección II). En los anclajes CP, CBE y CBO, se aprecia una circulación de dos capas, en la que la capa superior alcanza magnitudes del orden de  $20 \text{ cm s}^{-1}$ . En particular en los anclajes CP y CBO, la magnitud de las corrientes cerca de la superficie es lo suficientemente grande como para permitir identificar a la misma escala, el patrón de las corrientes cerca del fondo. En el anclaje CBE la dirección de la corriente cerca del fondo parece ser completamente opuesta a

la dirección en la superficie. La característica resaltante de este análisis, es el hecho de que en los anclajes CP, CBE y CBO, la dirección de la corriente cerca de la superficie se orienta a la dirección dominante del viento (*sur-este*) y disminuye paulatinamente hacia el fondo.

El grosor de la capa influenciada por el viento se puede inferir al observar los perfiles de magnitud de los cuatro anclajes (figura 24). En esta figura se aprecia la influencia del viento, representada como un incremento en la magnitud de la corriente residual, entre los 2 y 3 primeros metros superficiales de los anclajes CP, CBE y CBO. En particular el anclaje CP parece ser el más influenciado por el viento, ya que aquí la capa influenciada por el viento alcanza los primeros  $\approx 3.5$  metros superficiales.

Una forma de estimar el efecto del viento sobre la superficie del nivel de mar y sobre las corrientes, es obtener la anomalía de nivel mar. La anomalía de nivel de mar se calcula mediante la resta de la marea medida y la marea astronómica ajustada. De esta manera cuando el ajuste es menor que las observaciones, la anomalía adquiere valores positivos. En otras palabras, cuando el nivel de mar observado es mayor que el esperado únicamente por los efectos astronómicos, se puede pensar en un apilamiento de agua en la dirección del viento, causado por el forzamiento en la superficie.

La figura 25 presenta la anomalía del nivel de mar (ANM). En el panel A se muestra la variación del viento durante el periodo de mediciones. Los paneles B, C y D presentan la anomalía de nivel de mar para los anclajes CBE, CBO y CP respectivamente. Durante los periodos de viento intenso, en particular entre los días 170 y 180, la ANM es positiva y de  $\approx 10$  cm, mientras que durante las inversiones más marcadas (días 196 al 204) la anomalía es negativa y del orden de 8 cm. En el periodo entre los días 196 al 204, es importante observar el debilitamiento del viento el día 196, incremento los días 197 al

200, debilitamiento de nuevo el día 201, incremento los días 202 y 203, y atenuamiento e inversión el día 204. Cuando el viento cesa por  $\approx 1$  día (día 196) la ANM toma valores negativos, mismos que empiezan a incrementarse paulatinamente hacia valores positivos con viento persistente (días 197 al 200); una caída en el viento de tan solo un día (día 201) ocasiona de nuevo una caída en la ANM, caída que no alcanza a recuperarse con  $\approx 2$  días posteriores de viento persistente (días 202 y 203), ya que el viento nuevamente disminuye e incluso se invierte el día 204. De este día en adelante, la ANM incrementa paulatinamente, sin llegar a valores positivos durante los 18 días restantes de mediciones y a pesar del viento persistente.

Esto último muestra el efecto del viento al apilar agua al parecer hacia la misma dirección del esfuerzo del viento. Cuando el efecto del viento cesa la respuesta del sistema es rápida y se presenta como un descenso del nivel de mar. Por otro lado si se considera lo presentado en la sección IV.4.3 la estructura vertical de las corrientes se torna homogénea (en dirección) cuando el viento cesa, por el contrario la estructura de dos capas es reforzada durante condiciones de viento persistente.

Esto indica la importancia dinámica del viento en la circulación residual de BSQ. La respuesta dinámica del sistema a este forzamiento en la superficie es dirigir las corrientes en el mismo sentido del forzamiento y por lo tanto dar lugar a apilamientos de agua. Por conservación de masa, este apilamiento no puede ser infinito y necesita un lugar de retroceso, por lo que las corrientes tienden a regresar por el fondo en sentido contrario al esfuerzo del viento. Esto sugiere la competencia y ajuste del sistema al ser sometido a forzamientos baroclínicos y barotrópicos durante la mayor parte del tiempo.

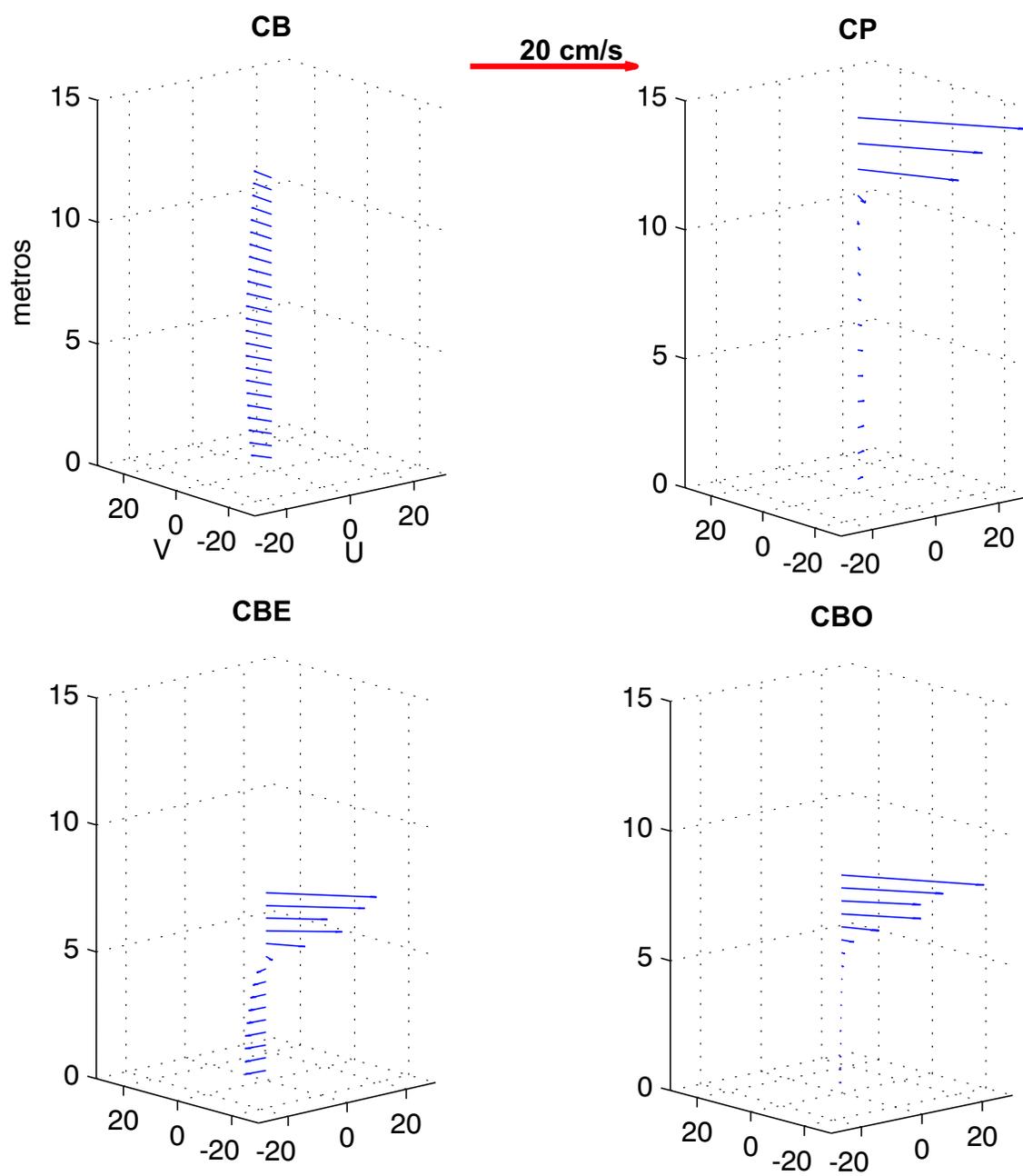


Figura 23: Perfiles verticales de la corriente horizontal en los cuatro puntos de anclaje instalados en BSQ. La flecha roja es una escala de referencia.

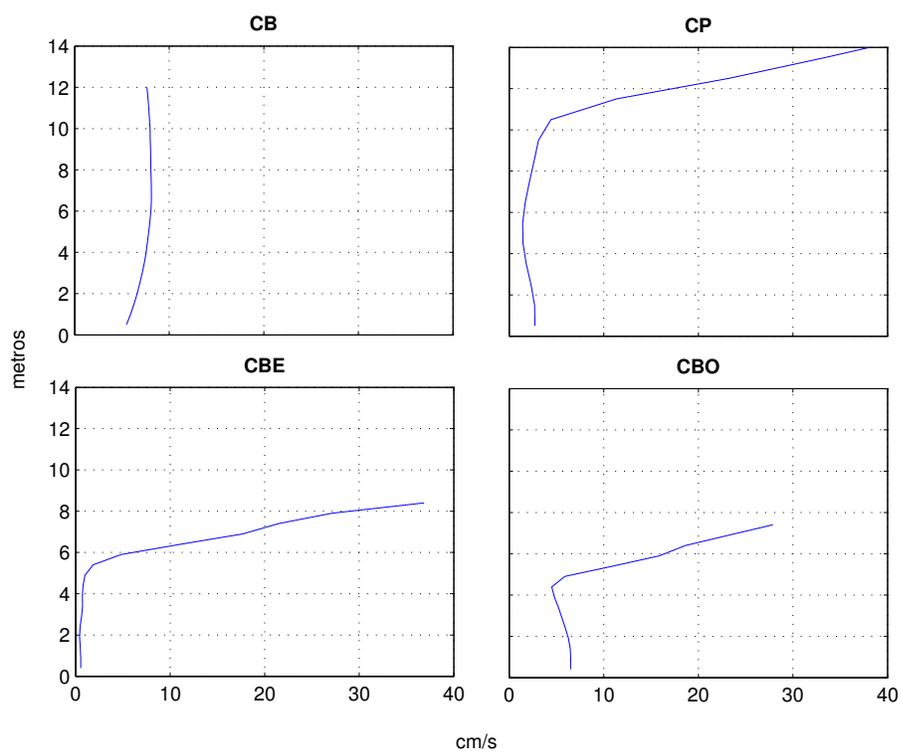


Figura 24: Perfiles verticales de magnitud de la velocidad en los cuatro anclajes instalados en BSQ.

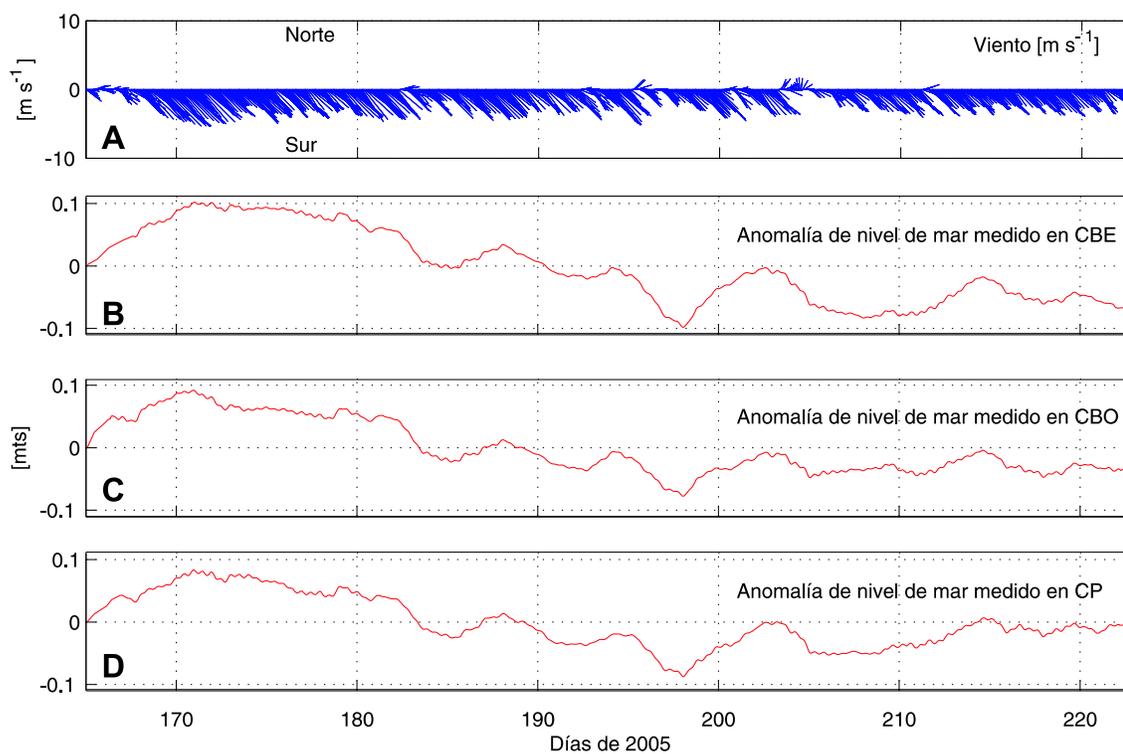


Figura 25: Anomalía del nivel de mar. El panel A contiene la variación del viento durante el periodo de mediciones, el panel B, C y D son la anomalía del nivel mar medido (medición - predicción) en los sitios CBE, CBO y CP respectivamente. Se presenta la anomalía filtrada con una frecuencia de corte equivalente a 72 horas.

## IV.5. Flujos residuales en la boca

A lo largo de las secciones anteriores se ha definido un flujo residual entrando por el lado *oeste* de la boca de Bahía San Quintín. Además se han mostrado evidencias de que el viento no afecta la dinámica de la boca. Sin embargo, los datos de los anclajes son insuficientes para definir un patrón de flujos en todo lo largo y ancho de la boca de conexión.

Se ha reportado intuitivamente en algunos trabajos anteriores (Martori Oxamendi, 1989) un flujo de salida por el lado *este* de la boca de conexión, en base a estimaciones de la conservación de masa dentro de la bahía. Hasta el momento no se cuenta con una evidencia sólida que permita corroborar dicha hipótesis, por lo que se planeó un experimento con un ADCP adaptado a una embarcación menor (ver sección III.1.1) para explorar la estructura transversal de los flujos residuales.

Las series de tiempo de velocidad en cada celda de la matriz *base*, que representa un corte transversal de la boca, fueron sometidas a un análisis armónico en el cual se realizó un ajuste de la marea con los armónicos K1 y M2 (frecuencias más energéticas en BSQ y únicas que se pueden ajustar con un periodo de mediciones de  $\approx 25$  horas, sin violar el criterio de *Rayleigh*). Mediante la resta de la curva de ajuste (marea predicha) y la variación de la corriente en dicho transecto, se obtuvo la corriente residual en toda el área de la boca de conexión.

La figura 26 presenta los flujos residuales en un corte transversal cercano a la boca de BSQ. Los paneles A y C corresponden a los muestreos realizados durante mareas muertas, mientras que los paneles B y D corresponden al comportamiento durante mareas vivas. En los cuatro paneles se observa una corriente entrando a la bahía por el lado *oeste* de la boca y un flujo de retorno o de salida, por el lado *este*. La capa

límite entre el flujo de salida y de entrada se ubica alrededor de la frontera entre el canal profundo (lado *oeste*) y el canal somero (lado *este*). Las magnitudes máximas resultantes del orden de  $10 \text{ cm s}^{-1}$  y se presentan durante mareas vivas (paneles B y D). Durante mareas muertas, las magnitudes disminuyen a  $\approx 2 \text{ cm s}^{-1}$ . Aunque el patrón dinámico de la boca es muy similar durante mareas vivas y muertas, en el panel C (mareas muertas) se aprecia una leve intrusión del flujo de entrada hacia el lado *este* de la boca en una capa de  $\approx 2 \text{ m}$  sobre el fondo. En las mareas muertas del panel A, no se aprecia este comportamiento. Sin embargo, se observan algunos núcleos de corriente nula en el lado *este* de la boca (panel A).

La teoría existente hasta el momento II, define que en ausencia de fricción los efectos inerciales de la rotación de la tierra, son perceptibles en este tipo de sistemas costeros.

La circulación observada en la boca de conexión de BSQ (figura 26), sugiere una dinámica dominada por los efectos de fricción, más que por los efectos de rotación de la tierra, consistente con lo esperado por la teoría (Valle Levinson *et al.*, 2003).

Como se ha mencionado, las mareas muertas originan corrientes de menor intensidad y por lo tanto los efectos de fricción podrían ser menos considerables. El comportamiento de los flujos en la boca durante mareas muertas (una leve intrusión de flujo por el lado *este* de la boca, panel C) puede ser evidencia de que al disminuir los efectos turbulentos, los flujos en la boca podrían ser modificados por los efectos de la rotación terrestre (flujos de entrada preferentemente en la frontera *este*). Por el contrario cuando los efectos de fricción son considerables (mareas vivas en este caso) los flujos de entrada se restringen a los canales profundos, mientras que los flujos de salida se ubican en las zonas someras (paneles B y D).

Paralelamente las evidencias presentadas durante los análisis con FEO's, muestran

también modos que bien podrían atribuirse a los efectos de la fricción. La batimetría, constituida por canales profundos en relación a la mayoría de la bahía ( $\approx 2$  metros) ampara también dicha aseveración.

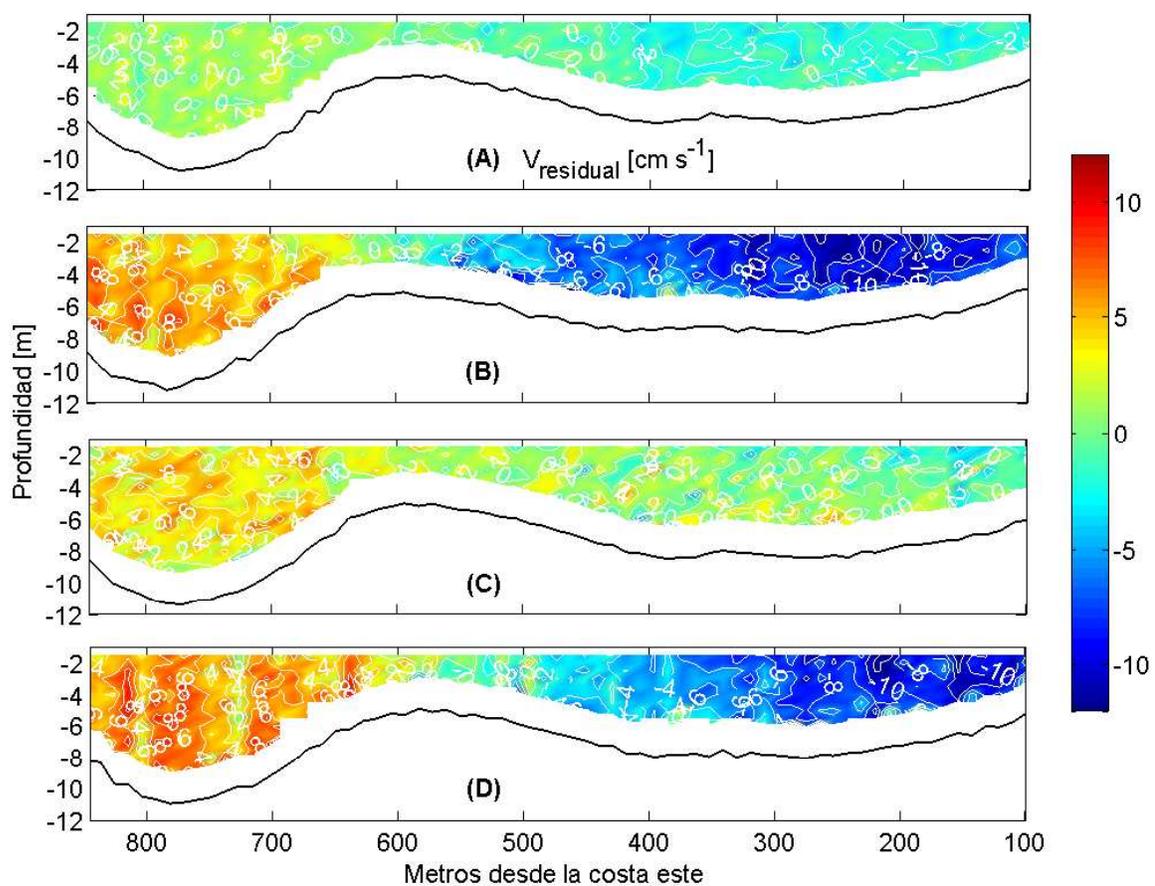


Figura 26: Corriente residual (componente de máxima variabilidad) en un transecto cercano a la boca de BSQ. Los paneles A al D presentan los transectos medidos durante las cuatro campañas de mediciones. A y C en mareas muertas, B y D en mareas vivas. La línea negra representa el fondo medido del transecto.

# V

## Discusión

Durante las secciones anteriores se ha presentado la dinámica característica de la circulación residual en BSQ. En general se observan corrientes cerca del fondo del orden de  $10 \text{ cm s}^{-1}$ , con dirección preferencial hacia el interior de la bahía y moduladas principalmente por la marea. Cerca de la superficie, las corrientes tienen magnitud de  $\approx 30 \text{ cm s}^{-1}$ , dirección preferencial hacia el *sur-este* (perpendiculares a los canales de navegación) y son influenciadas esencialmente por el viento.

La diferencia dinámica entre la superficie (regida por el viento) y el fondo (regido por la marea), muestran una circulación de dos capas. Esta circulación es inducida por el esfuerzo del viento, mismo que al cesar da lugar a que la marea induzca su circulación barotrópica característica (homogénea en la vertical). Indirectamente, el esfuerzo del viento da lugar a apilamiento de agua del orden de 8 cm y que origina leves corrientes ( $1 \text{ cm s}^{-1}$ ) de retorno cerca del fondo (en particular en el anclaje CP).

Las variaciones entre mareas vivas y mareas muertas aumentan o disminuyen los efectos turbulentos originados por la fricción con el fondo y paredes laterales. Esto da lugar a una dinámica que interactúa entre ser modificada por los efectos de la rotación de la tierra (efectos de fricción despreciables) y los efectos de fricción (efectos

de la rotación de la tierra despreciables). Cuando la dinámica es influenciada por los efectos turbulentos (fricción considerable) los flujos de entrada se ubican en los canales profundos, por lo que los flujos de salida deben de ubicarse en las partes someras de la bahía. En contraste, cuando los efectos de la rotación de la tierra son más importantes que los efectos de fricción (*e. g.* mareas muertas) los flujos de salida se ubican en la porción oeste de la bahía (ver secciones II y IV)

La dinámica en la boca de conexión es completamente diferente al interior de la bahía, dado que la corriente residual es dominada por la marea en toda la columna de agua. Las magnitudes promedio son del orden de  $10 \text{ cm s}^{-1}$  y la dirección preferencial es hacia adentro de la bahía en el canal profundo (lado *oeste* de la boca) y hacia afuera de la bahía en el canal somero (lado *este* de la boca). Este tipo de dinámica corresponde a números de *Ekman*  $\approx 1$ , lo que indica que los efectos de fricción son más importantes que los efectos de la rotación de la tierra. En general este patrón se mantuvo durante mareas vivas y muertas. Sin embargo, los datos muestran un leve indicio de que durante mareas muertas de muy poca amplitud vertical, el patrón de flujos residuales en la boca se podría invertir.

Si se consideran todos los elementos brindados hasta el momento es posible inferir una circulación residual de Bahía San Quintín caracterizada de la siguiente manera; el agua nueva proveniente del océano adyacente se introduce a la bahía por el canal profundo de la boca de conexión, incursiona por el fondo y es distribuida en toda la bahía por los canales de ambos brazos. En la superficie el agua es movida y mezclada con el agua profunda por efecto del viento.

Dado que la profundidad en la mayor parte de la bahía es del orden de 3 metros (zona de influencia del viento) los tiempos de residencia se pueden inferir en primer lugar

en función del viento y en menor medida en función de la marea. En otras palabras, se esperaría que durante periodos de viento considerable (como el periodo analizado en este trabajo) el tiempo de residencia dentro de BSQ, sea menor que durante periodos de viento despreciable.

Por otro lado, el hecho de que los flujos de salida ocurren a lo largo del canal somero de la boca de conexión, permite considerar al sistema como importador de cualquier característica del agua proveniente del océano adyacente. Esta última aseveración se basa en dos argumentos; el área transversal del canal somero es menor que el área del canal profundo y la velocidad de la corriente es igual en ambos canales. Por esto, se esperaría un transporte (de cualquier característica del agua) menor por el canal somero.

La figura 27 presenta un diagrama esquemático que representa la circulación de BSQ bajo efectos considerables de viento (verano) y en ausencia de este (invierno). En el panel A se aprecia la entrada de agua por el canal profundo (lado *oeste* de la boca) de la bahía, esta agua ingresa al sistema, es movida y mezclada por efecto del viento y finalmente abandona el sistema por el canal somero (lado *este*). El panel B muestra lo que podría ser una dinámica en ausencia de viento, inferido en base a los cortos periodos medidos durante este trabajo. El agua que entra a la bahía por el lado *oeste* de la boca, re-circula por los dos canales de navegación, quizá en un sistema de una sola capa, y finalmente abandona el sistema por el lado *este* de la boca de conexión, acorde con el esquema sugerido por Martori Oxamendi (1989). Los resultados de este trabajo han permitido identificar la dinámica de BSQ originada por el viento.

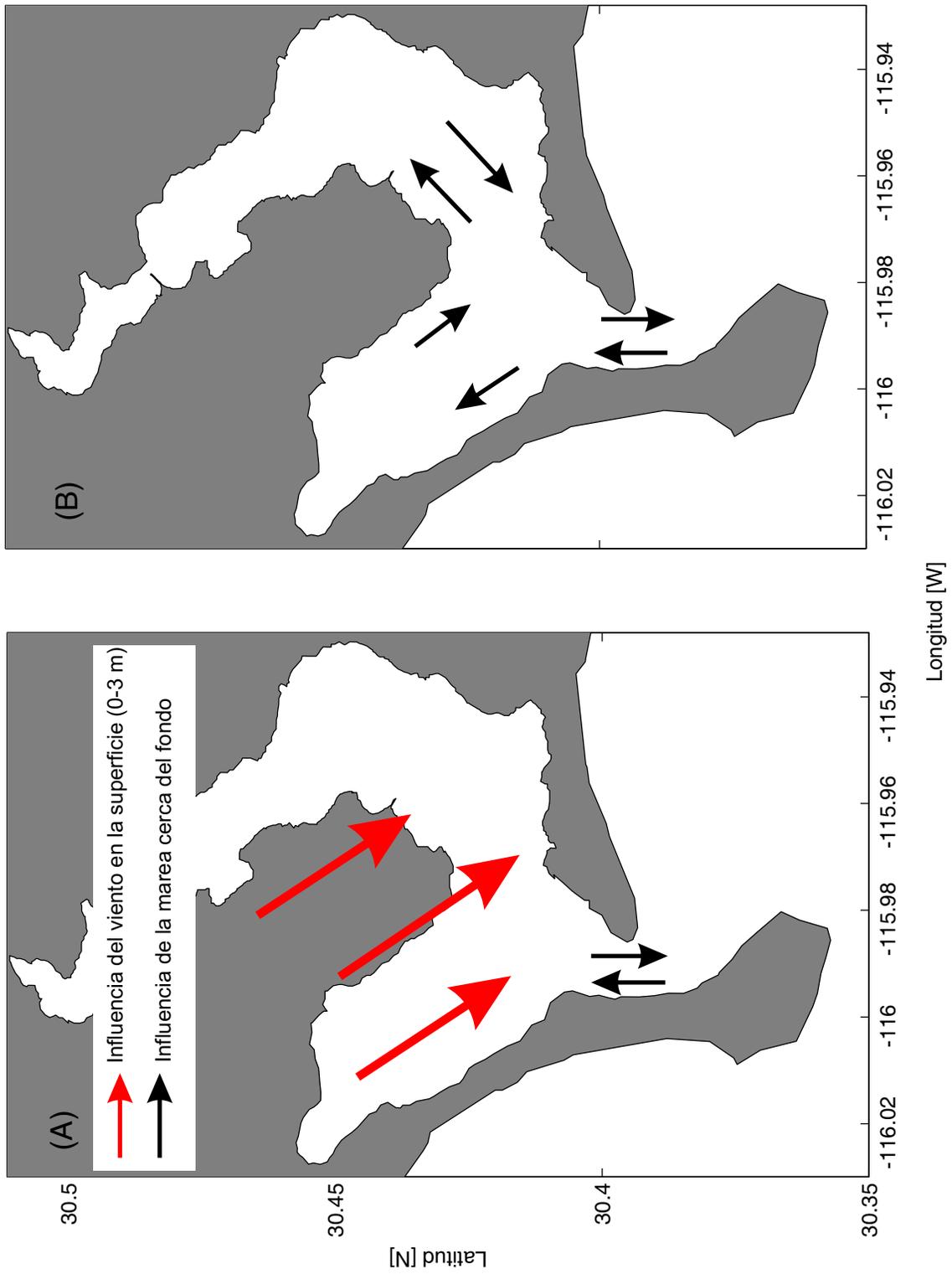


Figura 27: Esquema de la circulación en Bahía San Quintín. El panel A muestra la dinámica observada durante este trabajo. El panel B muestra lo que podría ser la dinámica en ausencia de viento.

# VI

## Conclusiones

En la superficie de Bahía San Quintín el **viento** domina la circulación residual, mientras que la **marea** juega un papel importante sólo en las corrientes cercanas al fondo. En general se observa una **circulación de dos capas** modulada por el esfuerzo del viento en la superficie. El viento induce un **apilamiento de agua** del orden de 8 cm. Durante los periodos de disminución de viento la **circulación de dos capas es inhibida**, dando lugar a una **circulación homogénea** en la vertical que parece estar en función de las mareas vivas y muertas. Durante mareas vivas la circulación parece tener un comportamiento acorde con una dinámica influenciada por los **efectos de fricción**, lo que se traduce a flujos netos de entrada por los canales profundos. Durante mareas muertas la circulación se comporta de manera inversa, presentando flujos netos de salida por los canales profundos, lo que es consistente con la teoría de flujos residuales bajo **efectos de la rotación de la tierra**.

Este estudio permitió observar la dinámica del sistema durante dos ciclos de mareas vivas y dos ciclos de mareas muertas, siempre bajo condiciones de viento persistente. Por lo tanto una línea de investigación podría ser considerar muestreos durante periodos prolongados de ausencia de viento (*e. g.* en invierno), además de idear algún experi-

mento que permita observar la dinámica de la boca (en ambos canales) por periodos prolongados de tiempo. La dinámica del extremo más interno del brazo *este*, así como de las zonas someras ( $\approx 3$  m) sigue siendo difícil de medir con la tecnología actual, por lo que se recomienda el uso de modelos numéricos 3-D, que permitan reproducir los resultados aquí presentados e inferir patrones de circulación confiables para dichas zonas.

# Literatura citada

Alvarez Borrego, J. y Alvarez Borrego, S. (1982). Temporal and spatial variability of temperature in two coastal lagoons. *CalCOFI Reports XXIII*: 188-197.

Alvarez Borrego, S., Ballesteros, G., y Chee, A. (1975). Estudio de algunas variables fisicoquímicas superficiales en Bahía San Quintin B.C. México. *Ciencias Marinas*. 2: 1-9.

Angulo Larios, N. (en proceso). Dinámica de Bahía San Quintín, B.C. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Marinas. UABC.

Argote, M., Gavidia, F., y Buenrostro, A. (1991). Wind-induced circulation in Todos Santos Bay, B.C., México. *Atmósfera*. 4: 101-115.

Bakun, A. y Nelson, C. (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. *CalCOFI Reports* 19:107-127.

Bowden, K. (1978). *Mixing processes in estuaries*. University of South Caroline Press, Inc. 140 p.

Cabello, A., Muñis, R., y Ward, D. (2004). Biochemical characterization of the eelgrass *Zostera marina* at its southern distribution limit in the north pacific. *Ciencias Marinas*. 30: 21-34.

- Camacho Ibar, V., Carriquiry, J., y Smith, S. (2003). Non conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintin Bay, Mexico. *Estuaries*. 26(5): 1220-1237.
- Del Valle Lucero, L. I. (1979). *Aplicación de un modelo numérico y análisis de condiciones hidrodinámicas en Bahía San Quintín*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada. 36 p.
- Durazo, R., Gaxiola, G., Lavaniegos, B., Castro, R., Gomez, J., y Mascarenhas, A. (2005). Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002 to 2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas*. 31(3): 537-552.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C., Imberger, J., y Brooks, N. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press Inc. New York, N.Y. 483 p.
- García, E., Galindo, M., Gonzales, G., Hernández, A., Ley, F., y Vidal, R. (1999). Mortandad de ostión en Bahía San Quintín durante 1988. *Reporte Técnico, Instituto de Investigaciones oceanológicas. UABC*. 22 p.
- Ibarra Obando, S., Camacho Ibar, V., Carriquiry, J., y Smith, S. (2001). Upwelling and lagoonal ecosystems of the dry Pacific coast of Baja California. *Springer Verlag, Germany*. 1: 315-329.
- Juárez Villareal, M. M. (1982). *Modelo unidimensional de dispersión para un estuario ramificado y su aplicación a bahía San Quintín*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 92 p.
- Kasai, A., Hill, T., Fujiwara, T., y Simpson, J. H. (2000). Effect of the earth's rotation

- on the circulation in regions of freshwater influence. *Journal of Geophysical Research*. 105(C7): 16961-16969.
- Lara Lara, J. R. (1979). Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. *Estuarine Coastal Shelf Science*. 11: 613-637.
- Martori Oxamendi, J. (1989). *Variabilidad de la circulación y sus causas en Bahía San Quintín*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada, B.C. 110 p.
- Monreal Gómez, M. (1980). *Aplicaciones de un modelo de dispersión en Bahía San Quintín B.C. México*. Tesis de maestría, Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. 84 p.
- Ocampo Torres, F. (1980). *Análisis de mareas y predicción de velocidad mediante un modelo unidimensional en Bahía San Quintín, B.C. México*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada B.C. México. 94 p.
- Osorno Velazquez, A. (2000). *Impacto del cultivo de moluscos filtroalimentadores en el fitoplancton y calidad del agua en Bahía San Quintín*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada, B.C. 48 p.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., y Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using *t\_tide*. *Computers and Geosciences*. 28: 229-237.
- Plascencia Díaz, R. (1980). *Determinación de la circulación en Bahía San Quintín B.C. por gradientes de densidad*. Tesis de licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada B.C. México. 123 p.

- Sea-Bird (2002). *SEASOFT-Win32: SBE Data Processing-Win32: CTD Data Processing and Plotting Software*. Sea-Bird Electronics, Inc. Software Release 5.26 and later.
- Smith, S. y Hollibaugh, T. (1997). Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. *Ecology monography*. 67: 509-533.
- Stommel, H. y Farmer, H. (1952). On the nature of estuarine circulation. *Woods Hole Oceanographic Inst.. Referens: 52-51, 52-63, 52-88*.
- Stommel, H. y Farmer, H. (1972). Circulation on the continental shelf. *Natural Academy Science, U.S.* 69: 3380-3384.
- Tomczak, M. (2002). *An Introduction to Physical Oceanography*. The flinders University of South Australia. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. 190 p.
- Valle Levinson, A. y Kamazima, M. (1995). The effects of channels and shoals on exchange between the Chesapeake Bay and the adjacent ocean. *Journal of Geophysical Research*. 100(C9): 18551-18563.
- Valle Levinson, A. y Kamazima, M. (1997). Bathymetric influences on the lower Chesapeake Bay hydrography. *Journal of Marine Systems*. 12: 221-236.
- Valle Levinson, A., Delgado, J., y Larry, P. (2001a). Reversing water exchange patterns at the entrance to a semiarid coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 53: 825 - 838.

Valle Levinson, A., Kuo Chuin, W., y Kathryn Bosley, T. (2001b). Observations of wind-induced exchange at the entrance to Chesapeake Bay. *Journal of Marine Research*. 59: 391-416.

Valle Levinson, A., Reyes, C., y Sanay, R. (2003). Effects of bathymetry, friction, and Rotation on Estuary-Ocean Exchange. *Journal of Physical Oceanography*. 33: 2375-2393.