

Tesis defendida por
Miriam Alin Calva Chávez
y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Paula Pérez Brunius

Director del Comité

Dr. Julio Candela Pérez

Miembro del Comité

Dr. Juan Manuel López Mariscal

Miembro del Comité

Dr. Ernesto García Mendoza

Miembro del Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres

Coordinador
del Posgrado en Oceanografía Física

Dr. Jesús Favela Vara

Director de la
Dirección de Estudios de Posgrado

Abril, 2014

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Oceanografía Física**

Variación estacional y sinóptica de la trampa de surgencia en la Bahía de Todos
Santos B. C.

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Miriam Alin Calva Chávez

Ensenada, Baja California, México,

2014

Resumen de la tesis de Miriam Alin Calva Chávez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física. Ensenada, Baja California, Abril de 2014.

Variación estacional y sinóptica de la trampa de surgencia en la Bahía de Todos Santos B. C.

Resumen aprobado por:

Dra. Paula Pérez Brunius

Este trabajo analiza la variación estacional y sinóptica de la temperatura superficial en la Bahía de Todos Santos y la zona adyacente, con datos de temperatura superficial del mar obtenidos por satélite, de corrientímetros y termistores anclados en la entrada norte de la bahía, de viento, de una cadena termistores en el interior de la bahía, y lances de CTD realizados en dos cruceros oceanográficos (Abril 2008 y Agosto 2010). Se ha observado que, en promedio, la temperatura superficial dentro de la bahía es más caliente que en el exterior, lo que sugiere que el agua queda atrapada y es calentada por la radiación solar, a esto se le conoce como trampa de surgencia. Durante los eventos de surgencias que provocan un enfriamiento de las aguas superficiales, imágenes satelitales de la temperatura superficial muestran que la temperatura al interior de la bahía es 3-4°C mayor que en la zona adyacente. Esta diferencia de temperatura es más intensa en verano cuando la radiación solar es mayor. Sin embargo, también hay mucha variabilidad sinóptica en la intensidad del frente térmico. Se ha observado que este lente de agua cálida tiene una profundidad no mayor de 10 m y un gradiente vertical de temperatura entre 0.3-0.6 °C/m. La circulación en la entrada norte es variable, con pulsos de mayor duración hacia el interior de la bahía principalmente por el lado de la Isla Todos Santos y centro de la entrada de la bahía, mientras que de lado de San Miguel hay mayor variabilidad. Se estudió la influencia del viento favorable a surgencia y el flujo en la entrada norte en la persistencia y evolución de la trampa de surgencia y se encontró una correlación significativa (0.5) entre el esfuerzo del viento y la intensidad del frente térmico a escala

estacional. Sin embargo a escala estacional el esfuerzo del viento no está correlacionado con las corrientes. Tampoco se encontró influencia de las corrientes en el frente térmico. A escala sinóptica la correlación del esfuerzo del viento con la intensidad del frente térmico es significativa (0.5-0.6), lo cual indica que cuando el esfuerzo del viento es favorable a surgencia, la intensidad del frente térmico aumenta. A escalas sinópticas si hay correlación entre el esfuerzo del viento y las corrientes (0.4). Las corrientes tardan en responder en 1-2 días a vientos favorables a las surgencias con una circulación hacia el interior de la bahía. La temperatura de fondo disminuye tanto en la entrada de la bahía como en el interior casi de inmediato, en respuesta a los vientos favorables a surgencia, lo que sugiere que el agua profunda se renueva rápidamente, mientras que el agua superficial tiene un mayor tiempo de residencia. Lo anterior puede tener implicaciones importantes para el desarrollo de organismos fitoplanctónicos e impactar en las actividades de acuicultura y pesca que se llevan a cabo en la Bahía Todos Santos.

Palabras clave: **Bahía Todos Santos, Surgencias costeras, Trampa de surgencia, Circulación costera**

Abstract of the thesis presented by Miriam Alin Calva Chávez as a partial requirement to obtain the Master or Doctor in Science degree in Physical Oceanography. Ensenada, Baja California, April, 2014.

Seasonal and synoptic variability of the upwelling trap in Todos Santos Bay, B. C.

Abstract approved by:

Dra. Paula Pérez Brunius

This work analyzes the synoptic and seasonal variability of surface temperature in the Todos Santos Bay and surrounding area, with data of sea surface temperature obtained by satellite, moored current meters and thermistors at the northern entrance of the bay, wind, a thermistor chain in the inner bay, and CTD casts taken during two oceanographic cruises (April 2008 and August 2010). It has been observed that, on average, the surface temperature in the Bay is warmer than outside, suggesting that water is trapped and is heated by solar radiation, this is known as *upwelling trap*. During upwelling events that cause a cooling of surface waters, satellite images of the surface temperature show that the temperature inside the bay is 3-4 ° C higher than in the surrounding area. This temperature difference is more intense in summer when solar radiation is greater. However, there is also a lot of synoptic variability in the intensity of the thermal front. It has been observed that this warm-water lens reaches depths of less than 10 m and a vertical temperature gradient of 0.3-0.6 ° C / m. The circulation at the northern entrance is variable, with longer pulses into the bay mainly on the side of Todos Santos Island and the central entrance of the bay, while on San Miguel's side there is greater variability. The influence of upwelling winds and flow at the northern entrance in the persistence and evolution of the upwelling trap was studied and a significant correlation (0.5) between the wind and the intensity of the thermal front was found at seasonal

scale. However, at the seasonal time scale the winds are not correlated with the currents, nor are the currents correlated with the intensity of the thermal front. At synoptic time scales the correlation of the wind with the intensity of the thermal front is significant (0.5-0.6), indicating that during wind driven upwelling events the intensity of the thermal front increases. There is also a significant correlation between the wind and the currents (0.4) at synoptic time scales. The currents respond after 1-2 days to upwelling favorable winds, resulting in flow into the bay. Following an upwelling event, the bottom temperature decreases both at the bay entrance and inside the bay almost immediately, suggesting that the deep water is renewed rapidly, while the surface water has a longer residence time. This may have important implications for the development of phytoplankton organisms and may have an impact on aquaculture and fishing activities taking place in the Todos Santos Bay.

Keywords: Todos Santos Bay, coastal upwelling, upwelling trap, coastal circulation

Dedicatorias

*A mis siempre incondicionales y amados padre y madre
Al extraño personaje que me alentó a terminar este proyecto, Marlon*

"By letting it go it all gets done. The world is won by those who let it go. But when you try and try. The world is beyond winning." Lao Tzu

Agradecimientos

A la Dra. Paula, ya que sin ella no habría podido ser posible esta tesis. Gracias por el apoyo durante toda mi estancia en el posgrado, por la paciencia y el aliento que siempre tuvo para conmigo.

A los miembros del comité, Dr. Manuel López, Dr. Julio Candela y Dr. Ernesto García, por sus comentarios, sugerencias, aclaraciones y toda la ayuda proporcionada para realizar este trabajo.

A mis compañeros de generación por las tardes de estudio, por las asesorías académicas, y demás cosas que trajo consigo esta etapa, Marlon, Eugenio, Samuel, Itzia, Rubén, Fabián y Esther, éxito y hasta siempre.

A todos mis amigos por el apoyo y ánimo para seguir adelante, principalmente a Alex por su amistad incondicional, por el soporte que me supone y esas noches de bohemia...que nunca acaben!

A CONACyT por el apoyo económico otorgado mediante la beca de posgrado, para la realización y culminación de mis estudios de posgrado.

Al personal de CICESE por las facilidades brindadas y el buen ambiente de trabajo durante todo este tiempo.

Al Dr. John Largier (UC-Davis) por sugerencias e ideas para el desarrollo de este trabajo.

A todos los que apoyaron en las campañas oceanográficas y mantenimiento de los anclajes. En particular a la tripulación del B/O Francisco de Ulloa y de la embarcación menor Rigel, el grupo de química del Dr. Francisco Delgadillo en el IIO-UABC y el grupo de Biología Algal del Dr. Ernesto García del DOB-CICESE. A Joaquín García, Aleph Jiménez y Erasmo Miranda, por el procesamiento inicial de los datos.

Contenido

Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	iii
Dedicatorias.....	v
Agradecimientos.....	vi
Lista de Figuras.....	viii
1. Introducción.....	1
2. Área de estudio	5
3. Objetivos.....	8
4. Datos y análisis	9
4.1 Temperatura superficial del mar	9
4.1.1 MUR-SST.....	9
4.1.2 AVHRR-SST.....	9
4.2 Viento.....	10
4.3 Corrientes.....	11
4.4 Temperatura en instrumentos anclados.....	12
4.5 Datos hidrográficos	12
5. Resultados.....	13
5.1 Variación estacional	13
5.1.1 Variación estacional de la temperatura superficial del mar (MUR).....	13
5.1.2 Variación estacional de la temperatura superficial del mar (AVHRR).....	15
5.1.3 Variación estacional de las corrientes en la entrada norte.....	17
5.1.4 Relación entre las corrientes con frente térmico y el esfuerzo del viento	19
5.2 Variación sinóptica.....	20
5.2.1 Primer periodo (2008)	21
5.2.2 Segundo periodo (2009)	29

5.2.3 Tercer periodo (2010).....	33
5.2.4 Temperatura profunda en la entrada norte y al interior de la bahía.....	40
6. Discusiones y conclusiones	41
6.1 Características de las surgencias en la región	41
6.2 Características de la trampa de surgencias de la BTS.....	42
6.3 Factores que influyen en la variabilidad de la trampa de surgencias	44
Referencias bibliográficas.....	47

Lista de Figuras

Figura	Página
1 Promedio de la temperatura superficial del mar entre 2008-2011. Datos de compuestos mensuales de AVHRR (NOAA CoastWatch).	4
2 Mapa de área de estudio Bahía Todos Santos. Posición de anclajes en Isla Todos Santos (ITS), Centro de la entrada norte de la bahía (EN), San Miguel profundo (SMP) y San Miguel costero (SM), estaciones de CTD (+), anclaje de hobs (◆), zona donde se calculó la diferencia de temperatura de las imágenes de satélite (x) y punto de malla de los vientos de CCMP(▼).	5
3 Promedios estacionales de la temperatura superficial del mar presentadas como anomalías de temperatura respecto al promedio espacial y temporal de cada estación, datos de compuestos mensuales de MUR. El número superior corresponde al promedio de cada estación.	14
4 Promedios estacionales de la temperatura superficial del mar presentadas como anomalías de temperatura respecto al promedio espacial y temporal de cada estación del año, datos de compuestos mensuales de AVHRR. El número superior corresponde al promedio de cada estación.	15
5 Promedios mensuales de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes (ΔT , en azul) y del Índice de surgencia (CUI, en verde).	16
6 Promedios mensuales de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes (ΔT , en azul) y del Índice de surgencia (CUI, en verde) eliminando el ciclo anual de las series.	17
7 Variación estacional de la corriente perpendicular a la entrada norte de la BTS (2008-2011); La línea azul representa la línea más cercana a la Isla Todos Santos (ITS). La línea negra corresponde a la estación central (EN) y la línea verde corresponde a la estación cercana a la costa de lado de San Miguel (SMP). Signo positivo significa circulación hacia el interior de la bahía, y signo negativo circulación hacia afuera de la bahía.	18
8 Variación mensual de las corrientes en la entrada norte de la bahía correlacionada con el Índice de surgencia (CUI) y con la diferencia de temperatura (ΔT) entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes. Los números que se presentan en la parte superior de las gráficas corresponde a la correlación de (b) las corrientes en ITS (azul), EN (negro), SMP (verde) vs CUI u (c) las corrientes con ΔT .	19
9 Disponibilidad de los datos de Temperatura Superficial del mar (SST), Índice de surgencia (CUI), mediciones de corrientes y temperatura profunda en ITS, EN, SMP, y SM, temperatura profunda en Rincón de Ballenas (RB).	21
10 Series de tiempo diarias para 2008 del (a) índice de surgencia (CUI) y filtro de 7 días, (b) corrientes en la entrada norte de la bahía (ITS, EN, SMP, y SM), (c) serie de tiempo	

- de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona adyacente (ΔT) y (d) la temperatura de fondo en los anclajes de la entrada norte de la bahía (mismos colores b y d). Las correlaciones se realizaron quitándole el ciclo anual a CUI, ΔT y TP. Los puntos negros en la serie de tiempo indican los días usados para mostrar la evolución sinóptica de SST. 24
- 11 Correlación con desfase entre a) el índice de surgencia y las corrientes, b) el índice de surgencia y la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes (ΔT), c) el índice de surgencia y la temperatura de fondo en la entrada norte, y d) correlación entre las corrientes y ΔT durante 2008. 25
- 12 Secuencia semanal de imágenes de satélite correspondientes al crucero BTS03 realizado en Abril de 2008. Se presentan como anomalías respecto al promedio espacial marcado en la imagen. Se muestra el promedio corrido de 7 días del CUI (m3s-1/100m litoral) correspondiente a cada imagen de SST. 27
- 13 Estructura vertical a través de la trampa de surgencia obtenida con datos de CTD tomados durante el crucero BTS03 en abril de 2008 (ver posición de las estaciones marcadas con '+' en la Figura 2). 28
- 14 Series de tiempo diarias para 2009 del (a) índice de surgencia (CUI) y filtro de 7 días, (b) corrientes en la entrada norte de la bahía (ITS, EN, SMP, y SM), (c) serie de tiempo de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes (ΔT), y (d) la temperatura de fondo en los anclajes de la entrada norte de la bahía. Las correlaciones se realizaron quitándole el ciclo anual a CUI, ΔT y TP. Los puntos negros en la serie de tiempo indican los días usados para mostrar la evolución sinóptica de SST 31
- 15 Correlación con desfase entre a) el índice de surgencia y las corrientes, b) el índice de surgencia (CUI) y la diferencia de temperatura entre el interior del bahía y Salsipuedes (ΔT), c) el índice de surgencia y la temperatura de fondo en la entrada norte, y d) correlación entre las corrientes y ΔT durante 2009. 32
- 16 Series de tiempo diarias para 2010 del (a) índice de surgencia (CUI) y filtro de 7 días, (b) corrientes en la entrada norte de la bahía (ITS, EN, SMP, y SM), (c) serie de tiempo de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes (ΔT), y (d) la temperatura de fondo en los anclajes de la entrada norte de la bahía (mismos colores de b y d). Las correlaciones se realizaron quitándole el ciclo anual a CUI, ΔT y TP. 35
- 17 Correlación con desfase entre a) el índice de surgencia y las corrientes, b) el índice de surgencia y la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes (ΔT), c) el índice de surgencia y la temperatura de fondo en la entrada norte, y d) correlación entre las corrientes y ΔT durante 2010. 36
- 18 Secuencia de imágenes de satélite correspondientes al BTS08 realizado en Abril de 2010. Se presentan como anomalías respecto al promedio espacial marcado en cada imagen. Se muestra el promedio corrido de 7 días del CUI (m3s-1/100m litoral) correspondiente a cada imagen de SST. 38
- 19 Estructura vertical a través de la trampa de surgencia obtenida con datos de CTD tomados durante el crucero BTS09 en agosto de 2010 (ver posición de las estaciones marcadas con '+' en la figura 2). 39

- 20 Correlación con desfase entre la temperatura de fondo en la entrada norte contra la temperatura profunda en Rincón de Ballenas al interior de la bahía para diferentes periodos de tiempo.

1. Introducción

Cuando los vientos soplan del noroeste frente a una costa meridional al este del mar en el hemisferio norte, ocasionan un transporte de agua en la capa superficial hacia afuera de la costa y, por conservación de masa, aguas subsuperficiales de menor temperatura, bajo contenido de oxígeno y rica en nutrientes emergen a la superficie (Cushman-Roisin, 1994; Lynn & Simpson, 1987). Este fenómeno de surgencias costeras derivadas del viento resulta en el enfriamiento y enriquecimiento del medio ambiente marino. Adicionalmente, la baja presión creada a lo largo de la costa también sostiene, a través de geostrofia, una corriente litoral hacia el sur. En la región de Baja California, Strub y James (2000) proponen que la formación del chorro costero observado con altimetría es consecuencia de uno o más frentes de surgencias locales. Por otra parte Durazo *et al.*, (2005) mencionan que las isotermas paralelas a la costa reflejan importancia de la surgencia costera hasta 50-100 km fuera de la costa en esta misma región.

Sin embargo, en las zonas de surgencia también existen zonas donde los vientos persistentes a lo largo de la costa se debilitan debido a la presencia de cabos y penínsulas. Estas zonas donde la surgencia está ausente están caracterizadas por agua superficial más cálida.

Un ejemplo de esto sucede en la Bahía de Monterey en California, en la que una masa de agua cálida generalmente está presente durante la época de surgencias (marzo hasta septiembre), mientras que el resto del año la temperatura superficial en la Bahía de Monterey es homogénea, a este fenómeno se le ha denominado *sombra de surgencia* (Graham, 1993; Graham y Largier, 1997). El interior de la Bahía de Monterey se encuentra protegido del esfuerzo del viento por las montañas de Santa Cruz, mientras que un flujo superficial, generado por una surgencia costera, circula paralelo a la entrada de la bahía, lo que da lugar a la retención del agua superficial al interior de la bahía. Esto se traduce en un incremento de la temperatura, fuerte estratificación y un frente convergente en el límite norte de la Bahía de Monterey (Woodson *et al.* 2009). Las temperaturas superficiales durante períodos de viento favorables a surgencias son promedio 2-5 °C más caliente dentro de la sombra de surgencia que en la zona de surgencia fuera de la bahía.

En estas condiciones, la columna de agua está estratificada con agua superficial cálida y agua fría por debajo, separadas por un frente retrogrado. Esto es, las isopicnas del frente de la sombra de surgencia están más profundas hacia la costa, contrario a un frente progrado típico de una surgencia costera, en que las isopicnas se hacen más someras hacia la costa. Estos frentes retrógrados también están asociados con estuarios, donde los frentes son ocasionados por las diferencias de densidad relacionadas con la diferencia de salinidad mientras que en la sombra de surgencia está dado por la diferencia de temperatura (Graham, 1993). Este sistema de sombra de surgencia se comporta como un flujo de dos capas, donde el contacto frontal con la parte inferior se produce dentro de 0 a 20 kilómetros de la costa (Woodson et al., 2009).

Se ha propuesto que el principal forzamiento que mantiene al frente de la sombra de surgencia y determina la variación en su posición es el viento local, el cual contrarresta el gradiente baroclínico dado por las fuerzas de flotabilidad debidas a la diferencias de temperatura, así como a un posible gradiente barotrópico de presión hacia el polo, resultante de las diferencias del nivel del mar entre el interior de la bahía y el exterior, debidas a las surgencias en Punta Año Nuevo (Graham, 1993; Graham & Largier, 1997; Woodson et al., 2009). No obstante, durante un periodo de relajación, la sombra de surgencia se mueve hacia el polo a lo largo de la costa, llegando a ser advectada fuera de la bahía cuando la duración de la relajación es mayor a 5 días. Por el contrario, si los vientos favorables a surgencia se reanudan en un lapso menor, la masa de agua cálida se ve obligada a regresar al interior de la bahía impulsada por el chorro del frente de surgencia. Por último, la posición del frente llega a desplazarse hasta cinco kilómetros durante el día debido a la variación diurna de los vientos (Woodson et al., 2009).

Otro sistema caracterizado por una masa de agua cálida al interior de una bahía es el caso de la Bahía de Antofagasta en Chile. En esta región el viento favorable a surgencias se presenta todo el año siendo más intenso en verano (Piñones *et al.* 2007). En esta bahía se observa que su interior es persistentemente más cálido que la zona expuesta. La temperatura en esta región presenta una marcada variación estacional que domina las fluctuaciones de temperatura al interior de la bahía. Mientras que la zona expuesta presenta una importante variación sinóptica (~ 5 días) donde las

variaciones de temperatura llegan a ser hasta de 5°C. Esto sugiere que el viento controla la variabilidad de la temperatura en la costa expuesta, se ha estimado que el agua al interior de la bahía es retenida por periodos de una o dos semanas. Lo que provoca que a medida que el agua se enfría en la zona costera, el agua al interior de la bahía se mantiene más cálida. Este sistema es descrito por Piñones *et al.* (2007) y Castilla *et al.* (2002) como una *trampa de surgencia*, cuya principal diferencia respecto a la sombra de surgencia es la orientación de la bahía respecto a la dirección del forzamiento del viento, lo que genera una dinámica particular en que la península favorece la recirculación y, por lo tanto, la retención del agua al interior de la bahía. Esta condición en la Bahía de Antofagasta es permanente, es decir, el frente térmico persiste aún en eventos de relajación, y perdura durante todo el año.

Un análisis preliminar de datos de temperatura superficial del mar en la región de la Bahía Todos Santos, Baja California, muestra que, en promedio, la temperatura superficial del mar de 2008 a 2011 es de 17°C (Figura 1). En la zona costera se observan surgencias, principalmente al sur de Punta Santo Tomás (31.5°N), y más débiles al norte de la Bahía Todos Santos. Al interior de la BTS se observan aguas cálidas (18°C) mientras que en las zonas de surgencia adyacentes son más frías (16°C) lo cual genera un frente térmico en la entrada norte de la bahía. Esto sugiere que la BTS es un sistema de trampa de surgencia donde, debido a la orientación de la bahía y la presencia de la península de Punta Banda, se tiene las condiciones favorables para la retención de agua al interior, lo que conduciría a un calentamiento de las aguas superficiales por radiación solar.

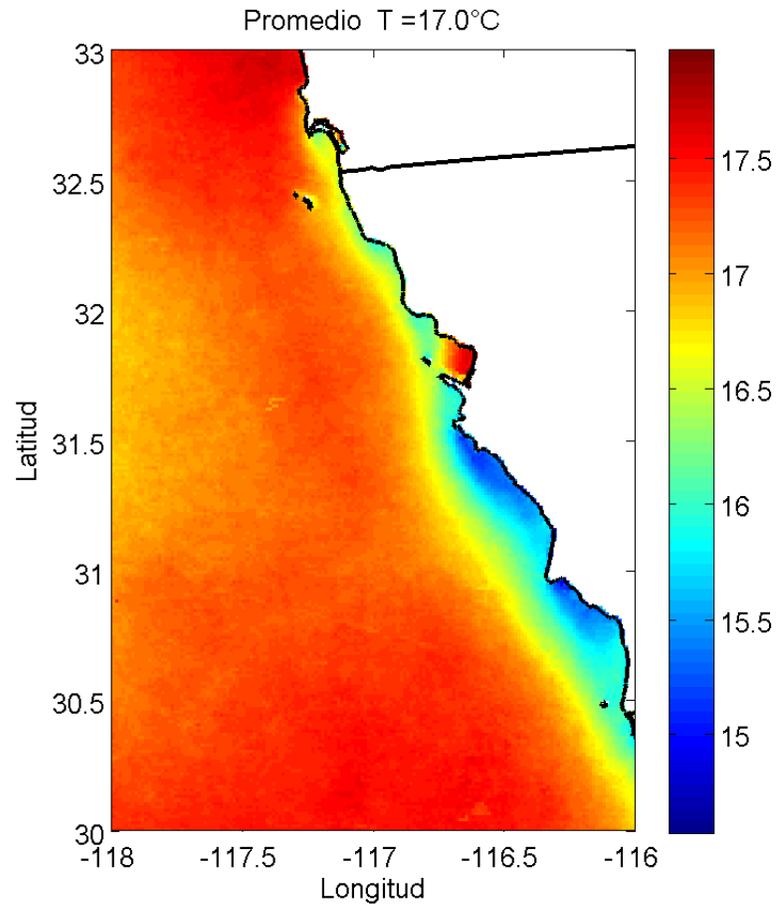


Figura 1. Promedio de la temperatura superficial del mar entre 2008-2011. Datos de compuestos mensuales de AVHRR (NOAA CoastWatch).

Este trabajo plantea estudiar la presencia de la trampa de surgencia al interior de la bahía, y determinar su variación temporal y espacial, así como tratar de explicar los procesos físicos involucrados en la aparición y persistencia de esa masa de agua cálida al interior de la bahía.

2. Área de estudio

La Bahía de Todos Santos (BTS) localizada en la costa occidental de Baja California centrada alrededor de los $31^{\circ} 48'N$ y $116^{\circ} 42'W$, es una bahía somera con una profundidad media de aproximadamente 50 m, limitada por Punta San Miguel al norte y Punta Banda al sur. Este cuerpo semicerrado cuenta con dos entradas separadas por la Isla Todos Santos, y con un cañón submarino entre Punta Banda y las Islas Todos Santos que alcanza profundidades de hasta 400 m.

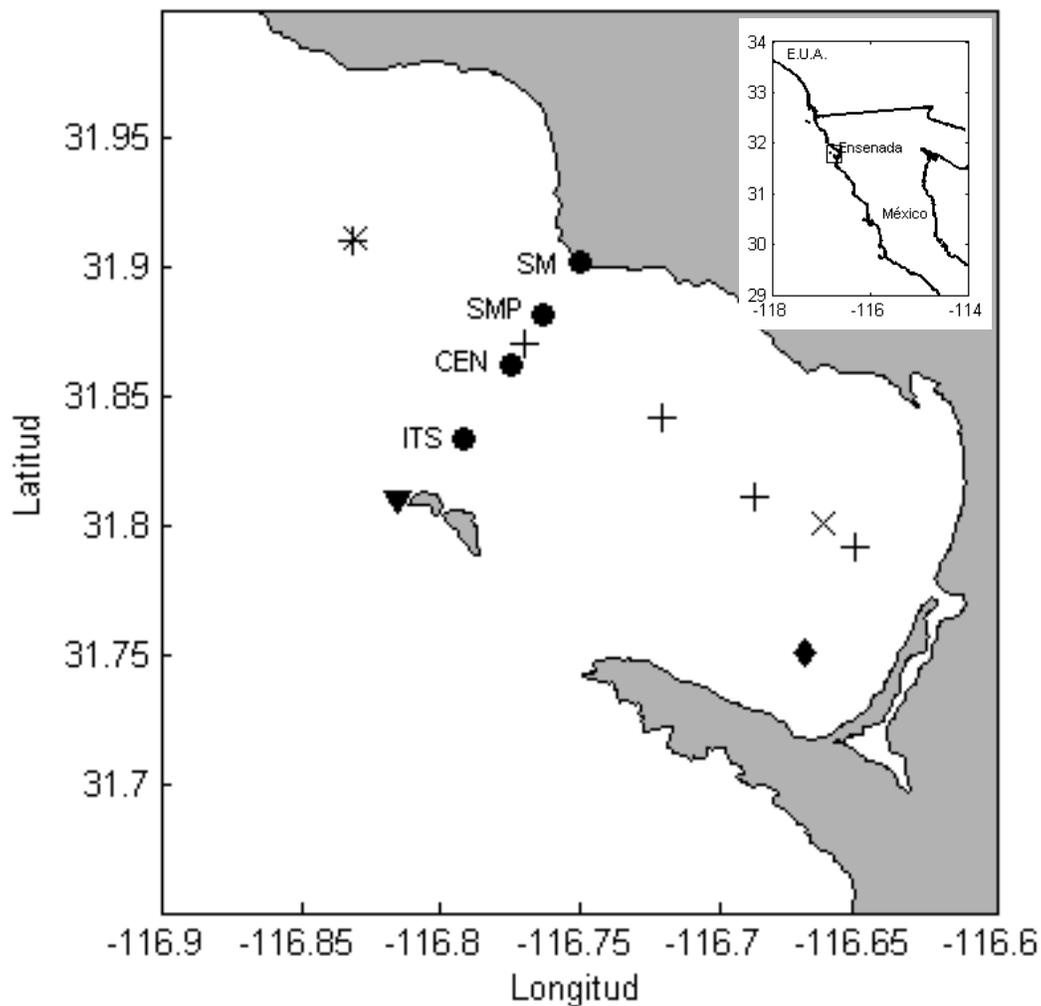


Figura 2. Mapa de área de estudio Bahía Todos Santos. Posición de anclajes en Isla Todos Santos (ITS), Centro de la entrada norte de la bahía (EN), San Miguel profundo (SMP) y San Miguel costero (SM), estaciones de CTD (+), anclaje de hobs (◆), zona donde se calculó la diferencia de temperatura de las imágenes de satélite (x) y punto de malla de los vientos de CCMP(▼).

La estadística de los vientos entre 1954 y 1968 (Álvarez, 1977) indican que existe una predominancia de los vientos del noreste al interior de la bahía, con intensidad de 4 m/s durante los meses cálidos, mientras que en los meses fríos se presentan principalmente días de calma. Fuera de la costa los vientos generalmente soplan también del noreste lo cual resulta en condiciones favorables para las surgencias costeras casi todo el año, ligeramente más intensas en abril y con un mínimo en invierno (Pérez-Brunius et al., 2007). Por lo tanto, la Bahía Todos Santos se encuentra en una región caracterizada por vientos favorables a surgencias durante todo el año.

Además la bahía se encuentra dentro del Sistema de la Corriente de California (SCC), por ello su dinámica e hidrografía están influenciadas por la Corriente de California, la Contracorriente Subsuperficial y un chorro costero (Durazo *et al.* 2010; Mateos *et al.*, 2010). La Corriente de California fluye hacia el ecuador y transporta aguas poco salinas, frías, con alto contenido de oxígeno y relativamente bajo en nutrientes en los primeros 100-200 m de profundidad (Durazo *et al.* 2010).

La corriente costera es un chorro que fluye hacia el ecuador siguiendo la línea de costa, asociado a los frentes originados por surgencias locales debido a la intensificación del viento. Aunque no ha sido medida directamente en la región se ha observado en modelos numéricos como el de Mateos *et al.*, (2009).

La Contracorriente Subsuperficial fluye hacia el norte, sus aguas son salinas con bajo contenido de oxígeno y alto contenido en nutrientes, se encuentra por debajo de los 200 m de profundidad y sobre el talud continental. Esta corriente está presente todo el año y es más intensa en primavera y verano (Lynn & Simpson, 1987).

Mateos *et al.* (2009) implementó un modelo tridimensional baroclínico en el cual encontró que pequeñas variaciones de la circulación en el exterior de la BTS modifican la circulación en el interior de la misma. En dicho estudio se reconocen dos regiones dinámicas delimitadas por la

isobata de los 30 m: una corriente intensa hacia el sur domina en la parte profunda (región externa) y remolinos de menor intensidad están en la zona somera (región interna). En conclusión, el estudio de Mateos *et al.* (2009) sugiere que el esfuerzo del viento, los flujos de calor, el transporte por las bocas de la BTS y la interacción de estos con la geometría de la bahía modulan la circulación en el interior de la bahía, reflejándose en los promedios mensuales y diarios de la velocidad.

Miranda (2012) en un estudio realizado sobre las corrientes en las entradas de la bahía entre septiembre de 2007 y octubre de 2008, determinó que el flujo promedio es hacia el interior de la bahía en la entrada norte y hacia afuera por la apertura del cañón. Además encontró una relación muy débil entre las corrientes y el esfuerzo del viento local. Únicamente las corrientes en la entrada norte presentaron coherencia con el esfuerzo del viento en las bandas de 1/6.6 a 1/5.5 cpd, donde el viento antecede a las corrientes, lo cual sugiere que el viento local está forzando las corrientes únicamente a esas frecuencias.

Por su parte, Larrañaga (2013) usando 2 radares de alta frecuencia CODAR (25 MHz) en el 2010, encontró un flujo predominante hacia el interior de la bahía, con corrientes más intensas (15 cm/s) en la entrada norte de la bahía con dirección sureste y corrientes de menor intensidad (5cm/s) al interior de la bahía en la zona cercana a la costa. Observó además que durante el invierno hay una interacción de remolinos dentro de la bahía, mientras que en verano la circulación está dominada por un remolino ciclónico al interior de la bahía. Sugiere que durante el verano el principal forzamiento es el viento, pero en invierno pueden existir otros mecanismos de forzamiento.

3. Objetivos

Un promedio general de las imágenes de satélite de temperatura superficial del mar en la región de la Bahía de Todos Santos sugiere que está actuando como trampa de surgencia. Este fenómeno no ha sido documentado en esta región, por lo tanto el objetivo general del presente trabajo es caracterizar los procesos que dan lugar a la variación estacional y sinóptica de esta trampa de surgencia, para lo cual se proponen los siguientes objetivos particulares:

- Describir la variación estacional y sinóptica de la temperatura superficial de la región.
- Caracterizar las surgencias costeras en las regiones aledañas a la BTS.
- Analizar la influencia del esfuerzo del viento y el flujo de la entrada norte en la persistencia y evolución de la trampa de surgencia en la BTS.

4. Datos y análisis

4.1 Temperatura superficial del mar

4.1.1 MUR-SST

Se utilizó el producto de temperatura superficial del mar (SST) de MUR (Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature) Nivel 4, producido por Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST) del Jet Propulsion Laboratory, NASA, y la Universidad de Miami (Chin *et al.*, 2010; <http://mur.jpl.nasa.gov/>). Este producto combina la información de todos los diferentes sensores satelitales disponibles utilizando un análisis variacional multivariado para producir mapas diarios sobre una malla regular con resolución espacial de 0.01 grados (~1km). Para los análisis presentados en este trabajo se utilizaron promedios mensuales de 2008 a 2011. La alta resolución de estos datos es óptima para estudiar la evolución de las surgencias costeras, sin embargo, el análisis mostró que no logran reproducir las características conocidas a escala estacional de las surgencias en la región de la bahía de Todos Santos. Este producto es muy utilizado sobretodo en modelación numérica, por lo tanto, decidimos añadir dicho análisis a este trabajo como referencia para los usuarios que busquen utilizar esta base de datos para reproducir la temperatura superficial cercana a la costa.

4.1.2 AVHRR-SST

Debido a que los datos de MUR no resultaron confiables, ya que no reproducen bien las surgencias costeras conocidas en la región, se utilizaron productos nivel 4 derivados de los datos del Advanced Very High Resolution Radiometer High Resolution Picture Transmission (AVHRR-HRPT), generados por el CoastWatch West Coast Regional Node de la NOAA. Estos datos tienen una resolución de 1.4 km y utilizan tanto los barridos satelitales de día como los de noche (<http://coastwatch.pfel.noaa.gov/>). Se utilizaron compuestos mensuales de los cuales se calcularon promedios estacionales.

También se utilizaron imágenes diarias de los datos compuestos semanales de 2008 a 2011. A partir de estas imágenes se obtuvieron series de tiempo de la diferencia de temperatura superficial entre el interior de la bahía y la zona adyacente (ΔT).

4.2 Viento

Se utilizó el producto de viento Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector (CCMP) distribuidos por el Jet Propulsion Laboratory de la NASA. Esta base de datos combina vientos satelitales con datos obtenidos de sistemas de teledetección (REMSS) utilizando un método de análisis variacional para producir una malla de alta resolución (0.25 grados) cada 6 horas (Atlas et al., 2011).

Se usaron estos datos para calcular los Índices de Surgencia Costero (CUI, por sus siglas en inglés), definido por Bakun (1975) como el transporte de Ekman a través de la costa por 100 m de la costa, el cual es positivo hacia afuera de la costa:

$$CUI = \frac{\tau}{\rho f} \times 100 \quad (1)$$

donde $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ es la densidad media de la capa superior del agua, f es el parámetro de Coriolis y τ es el esfuerzo del viento a lo largo de la costa, y es positivo cuando se dirige hacia el ecuador estimado como en Bakun y Nelson (1977):

$$\tau = \rho_a C_d U_{10} \|\vec{U}_{10}\| \quad (2)$$

donde $\rho_a = 1.022 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del aire; $C_d = 0.0013$ es el coeficiente de arrastre y \vec{U}_{10} es la velocidad del viento a 10 m y U_{10} su componente a lo largo de la costa, considerada positiva hacia el ecuador. Los datos fueron rotados con un ángulo de -60° con respecto al este.

El CUI se calculó en un punto que se consideró representativo de los vientos de surgencias en la región (ver Figura 2). Los datos se filtraron con un filtro Lanczos con una frecuencia de corte de $1/(48 \text{ hrs})$ y posteriormente fueron promediados diariamente.

4.3 Corrientes

Para determinar el intercambio de agua entre la bahía y el exterior se cuenta con datos de cuatro anclajes con perfiladores acústicos de corrientes (ADCP) en la entrada norte de la bahía entre Punta San Miguel y la Isla Todos Santos (ver Figura 2). Los perfiladores estuvieron anclados cerca del fondo, los datos tienen una resolución de muestreo vertical de 2 m hasta la superficie y una resolución temporal entre 5 y 30 minutos dependiendo del periodo de muestreo (Ver Figura 9).

Regularmente los datos superficiales se encuentran contaminados debido al eco del lóbulo lateral de los haces, para encontrar estos datos y calcular la profundidad correspondiente a los restantes se usó la profundidad media de la cabeza del instrumento y el ángulo al cual están orientados los haces del ADCP (25° en ITS, EN y SMP y 20° en SM). La profundidad máxima a partir de la cual los datos tienen que eliminarse está dada por $h=d(1-\cos(25^\circ))$, donde d es la distancia del instrumento a la superficie.

Los datos de corrientes, presión y temperatura fueron filtrados con un filtro de Lanczos pasa-bajas (con una frecuencia de corte = $1/(48 \text{ hrs})$) con el fin de eliminar las frecuencias de marea y posteriormente fueron decimados a datos diarios.

Se utilizó la matriz de rotación para analizar únicamente las corrientes perpendiculares a la entrada de la bahía.

$$u' = u \cos \theta - v \sin \theta \quad (3)$$

donde u y v corresponden a las velocidades norte-sur y este-oeste respectivamente y θ es el ángulo que forma el este con la sección perpendicular a la entrada de la bahía ($\theta = 30^\circ$). Los datos fueron rotados en contra de las manecillas del reloj.

4.4 Temperatura en instrumentos anclados

Para analizar la relación que hay entre el agua de surgencia que entra por la entrada norte y su influencia en la temperatura del agua profunda al interior de la bahía, se utilizó la temperatura medida en el fondo por correntímetros anclados en la entrada norte de la bahía (ITS a 48 m, EN a 41 m, SMP a 38 m y SM a 20 m, ver Figura 2). Los datos se filtraron con un filtro Lanczos con una frecuencia de corte de $1/(48 \text{ hrs})$ y posteriormente los datos fueron decimados diariamente. También se utilizaron datos de la temperatura a dos metros del fondo en el Rincón de Ballenas, medidos cada 12 minutos por una cadena de termistores (HOBO Water Temperature Pro v2 Data Logger) anclada a 20-25m (ver Figura 2). A estos datos también se les filtraron las mareas y se decimaron a datos diarios.

4.5 Datos hidrográficos

Se obtuvieron secciones transversales de temperatura de la BTS a partir de lances realizados con un perfilador de mediciones continuas CTD (Sea-Bird 9Plus). Estos fueron recopilados durante campañas oceanográficas trimestrales realizadas en la región de la Bahía de Todos Santos entre 2008 y 2012 (ver informe técnico 88503 y 106183). La posición de los lances y las campañas oceanográficas correspondientes se muestran en la Figura 2.

5. Resultados

En esta sección se presentan los resultados más sobresalientes de los análisis realizados en este trabajo: para describir la variación estacional en la Temperatura Superficial del Mar (SST) se presentan las imágenes satelitales correspondientes a los promedios estacionales; para analizar la variación estacional del esfuerzo del viento se presenta una serie de tiempo de promedios mensuales la cual se correlacionó con la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona adyacente para determinar si el esfuerzo del viento influye en la variación estacional de la temperatura superficial. Para determinar si las corrientes son influenciadas por el esfuerzo del viento a escalas estacionales se correlacionaron los promedios mensuales de las corrientes con los promedios correspondientes del esfuerzo del viento. Para describir la variación sinóptica de la temperatura se presentan imágenes de compuestos semanales de SST. Igual que en el caso estacional, se analiza si el esfuerzo del viento influye en la variación sinóptica de la temperatura superficial, temperatura profunda y en las corrientes, para lo cual se presentan las series de tiempo diarias de los parámetros mencionados y sus correspondientes correlaciones. Además se presenta la sección transversal de temperatura de los cruceros BTS03 y BTS08 para describir la estructura vertical de la temperatura al interior de la bahía.

5.1 Variación estacional

5.1.1 Variación estacional de la temperatura superficial del mar (MUR)

La Figura 3 muestra la variación estacional de la SST de 2008 a 2011, estas imágenes se obtuvieron a partir de compuestos mensuales usando Enero-Febrero-Marzo para describir el invierno, Abril-Mayo-Junio para primavera, Julio-Agosto-Septiembre para verano y Octubre-Noviembre-Diciembre para otoño. Dado que para este trabajo nos interesa la evolución estacional de los frentes térmicos en la región, y que la escala de temperatura varía mucho estacionalmente, las imágenes se presentan como anomalías de temperatura, las cuales se calcularon restando el promedio espacial y temporal de la temperatura para el periodo en cuestión, cuyo valor se muestra en la parte superior de cada figura.

Se observa en primavera una zona de surgencias a lo largo de la costa ligeramente más intensa al sur de Punta Banda con una temperatura de 15 °C, mientras que al interior de la bahía la temperatura es de 16 °C, es decir hay una diferencia de temperatura de 1°C entre el interior de la bahía y la zona adyacente. En verano tanto el interior de la bahía como la zona costera al norte de Salsipuedes se observa cálida con una temperatura de 19°C, no se observa claramente una zona de surgencias como en primavera. Durante el otoño y el invierno no se observan diferencias de temperatura entre el interior de la bahía y la zona adyacente. En invierno se observa una franja de agua fría 14.5°C en la zona costera y agua más cálida 15.5 °C hacia afuera de la costa.

Trabajos anteriores sugieren que a lo largo de la costa de Baja California se presentan surgencias costeras todo el año, las cuales son más intensas en primavera y verano (Pérez-Brunius *et al.* 2007; Durazo *et al.* 2010).

La climatología estacional de SST de los datos de MUR no presenta surgencias en verano, existiendo agua más cálida en la zona costera que en el océano profundo, además, las surgencias en primavera no son intensas. Por ello concluimos que los datos de MUR- no parecen ser confiables para explicar lo que ocurre en la zona costera, debido a esto se procedió a analizar los datos de AVHRR.

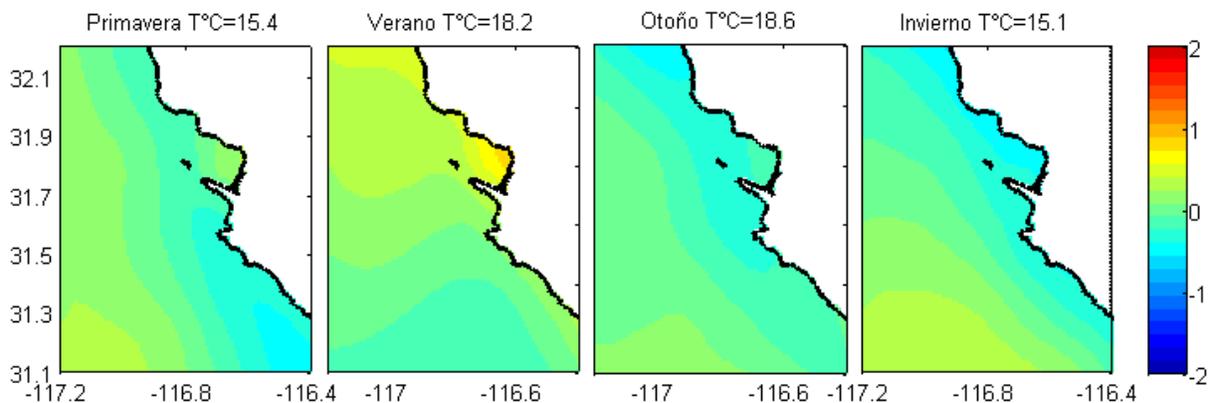


Figura 3. Promedios estacionales de la temperatura superficial del mar presentadas como anomalías de temperatura respecto al promedio espacial y temporal de cada estación, datos de compuestos mensuales de MUR. El número superior corresponde al promedio de cada estación.

5.1.2 Variación estacional de la temperatura superficial del mar (AVHRR)

Las anomalías de temperatura para los promedios estacionales calculadas igual que para los datos de MUR, se muestran en la Figura 4. Se presentan surgencias costeras todo el año, siendo más intensas en primavera y verano al sur de Punta Banda, mientras que en Salsipuedes son más intensas en verano. A diferencia de la Figura 3, en primavera y verano se observa claramente agua más cálida al interior de la bahía que en el resto de la región, sugiriendo la presencia de una trampa de surgencias. La diferencia de temperatura entre el interior y exterior de la bahía varía estacionalmente: en primavera la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona adyacente es de 2.5°C , mientras que en verano la diferencia alcanza los 3°C . Ya que las diferencias de temperatura son más intensas en primavera y verano se puede suponer que los gradientes de temperatura pueden estar favorecidos por el aumento de radiación solar en esa época. En otoño e invierno la temperatura es más o menos homogénea, y las diferencias de temperatura son de menos de 1°C entre el interior de la bahía y la zona adyacente.

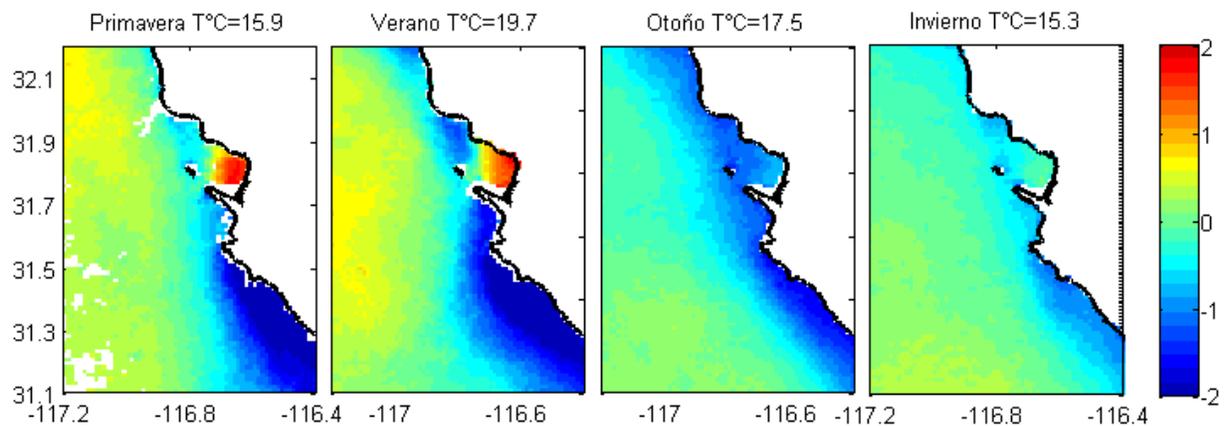


Figura 4. Promedios estacionales de la temperatura superficial del mar presentadas como anomalías de temperatura respecto al promedio espacial y temporal de cada estación del año, datos de compuestos mensuales de AVHRR. El número superior corresponde al promedio de cada estación.

Para analizar la intensidad del frente térmico en la entrada de la bahía se calculó la diferencia de temperatura (ΔT) entre el interior de la BTS y la zona de surgencias de Salsipuedes (marcados con '+' en la Figura 2), a partir de los compuestos mensuales de datos satelitales, y se correlacionó con los promedios mensuales del índice de Surgencias (CUI). Se observa en la Figura 5 que ΔT presenta una variación estacional donde las mayores diferencias de temperatura son en primavera y verano y disminuyen en otoño e invierno. Los promedios mensuales de CUI también muestran esta variación estacional, donde los vientos favorables a surgencia se presentan más intensos en primavera y verano. La correlación de estos dos parámetros es alta (0.7). También se correlacionó el CUI con la temperatura al interior de la BTS y las zonas de surgencia en Salsipuedes y Punta Banda de manera independiente, presentando correlaciones menores de 0.3-0.6. Lo anterior sugiere que los vientos favorables a las surgencias influyen sobre la temperatura de la región, pero sobre todo en la intensidad del frente térmico que se forma en la entrada norte de la bahía.

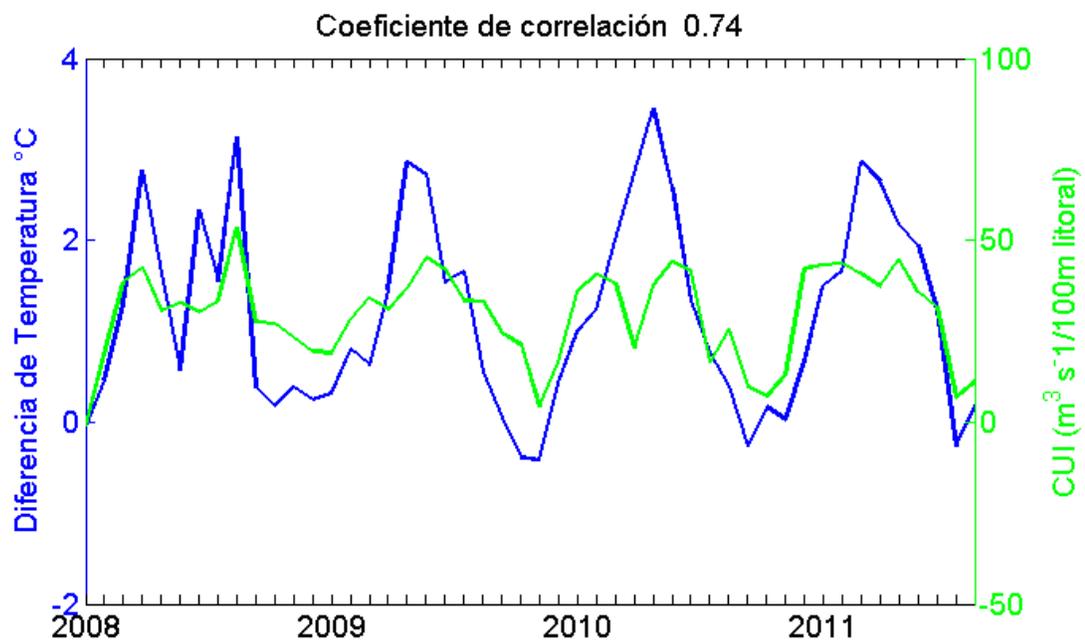


Figura 5. Promedios mensuales de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes (ΔT , en azul) y del Índice de surgencia (CUI, en verde).

Sin embargo, dado que tanto ΔT como CUI presentan una marcada variación estacional que posiblemente contribuye a su alta correlación, se eliminó el ciclo anual de las series de tiempo y se correlacionaron nuevamente. Los resultados mostraron que sin ciclo anual el ΔT y CUI tienen una correlación baja pero significativa (0.35), es decir que los vientos favorables a las surgencias influyen en la intensidad del frente térmico en la entrada de la bahía a escalas temporales mayores a un mes.

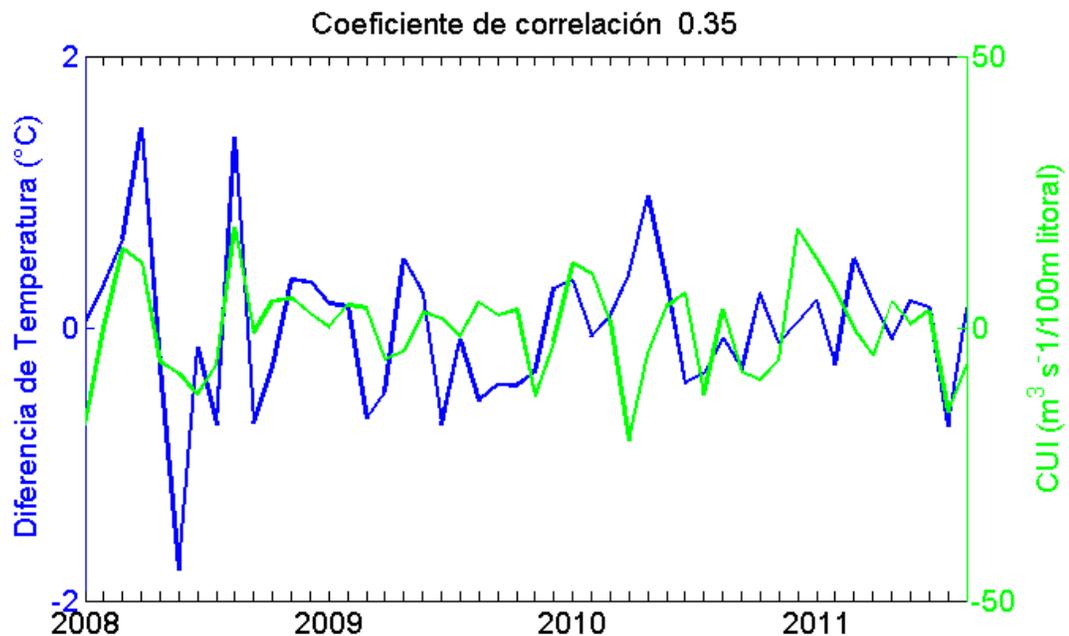


Figura 6. Promedios mensuales de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes (ΔT , en azul) y del Índice de surgencia (CUI, en verde) eliminando el ciclo anual de las series.

5.1.3 Variación estacional de las corrientes en la entrada norte

Los promedios estacionales de los perfiles de corriente medidos por los anclajes en la entrada norte (Figura 7) sugieren un flujo hacia el interior de la bahía, principalmente en el anclaje cercano a la Isla Todos Santos (ITS). En ITS las corrientes superficiales son en promedio de ~ 8 cm/s hacia el interior de la bahía y se debilitan con la profundidad donde incluso pueden invertirse, como se observa en invierno. El mismo caso se presenta en el centro de la entrada norte de la Bahía

(EN), aunque la rapidez en promedio es menor (5 cm/s). En el anclaje de San Miguel profundo (SMP) las corrientes promedio son muy débiles y no se observa claramente un flujo hacia el interior o exterior de la bahía. No queda claro si hay una variación estacional de las corrientes, sin embargo se aprecia que en primavera y verano las corrientes superficiales son un poco más intensas que en invierno.

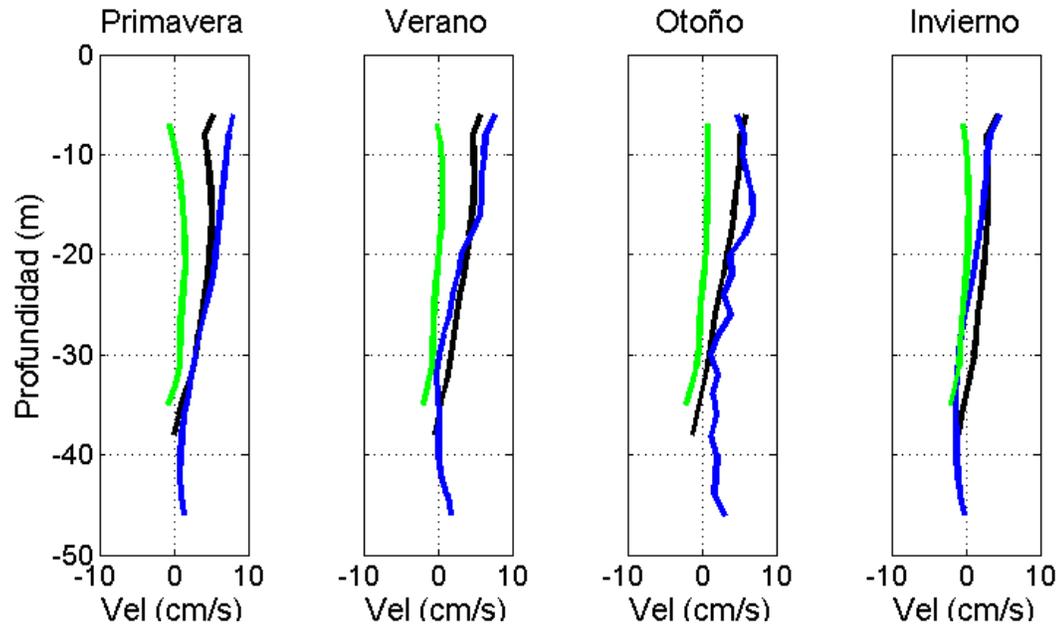


Figura 7. Variación estacional de la corriente perpendicular a la entrada norte de la BTS (2008-2011); La línea azul representa la línea más cercana a la Isla Todos Santos (ITS). La línea negra corresponde a la estación central (EN) y la línea verde corresponde a la estación cercana a la costa de lado de San Miguel (SMP). Signo positivo significa circulación hacia el interior de la bahía, y signo negativo circulación hacia afuera de la bahía.

5.1.4 Relación entre las corrientes con frente térmico y el esfuerzo del viento

Para determinar si las corrientes en la entrada norte de la bahía son influenciadas por el esfuerzo del viento a escala estacional se analizaron los promedios mensuales. Se eliminó el ciclo anual de las series de CUI y ΔT y se correlacionaron con el esfuerzo del viento. Se observa en la Figura 8 que las corrientes no tienen una variación estacional clara. La correlación no es significativa, lo cual sugiere que el esfuerzo del viento no afecta a las corrientes al menos a escalas temporales mayores a un mes. Además se correlacionaron los promedios mensuales de las corrientes con los promedios mensuales de ΔT para determinar si las corrientes en la entrada norte afectan de alguna forma el frente térmico en la entrada de la bahía, como se observa en la Figura 8 tampoco existe correlación significativa entre estos parámetros para estas escalas temporales.

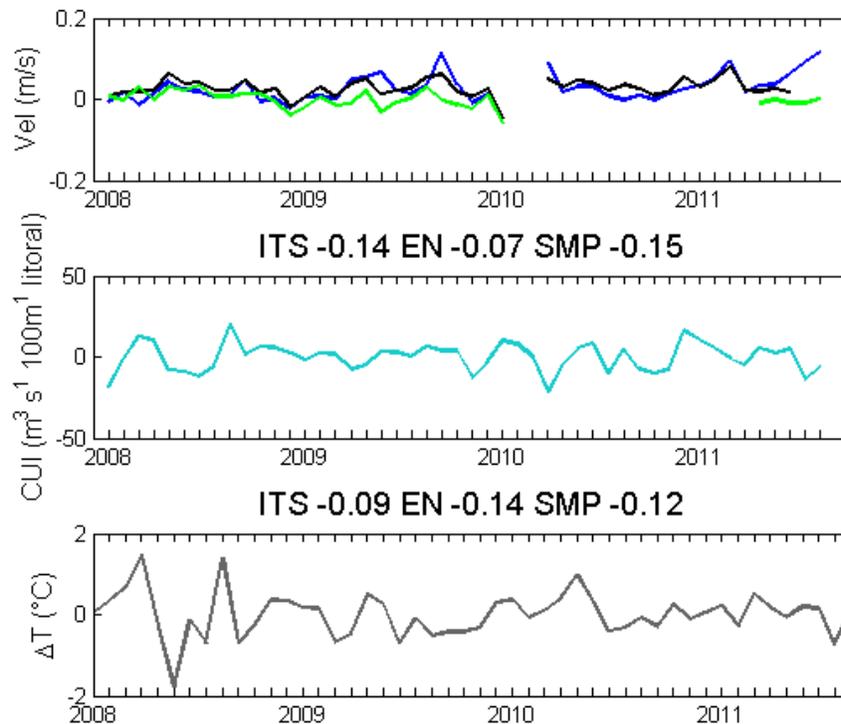


Figura 8. Variación mensual de las corrientes en la entrada norte de la bahía correlacionada con el Índice de surgencia (CUI) y con la diferencia de temperatura (ΔT) entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes. Los números que se presentan en la parte superior de las gráficas corresponde a la correlación de (b) las corrientes en ITS (azul), EN (negro), SMP (verde) vs CUI y (c) las corrientes con ΔT .

5.2 Variación sinóptica

Para determinar la persistencia y evolución de la trampa de surgencias a escala sinóptica (2 a 10 días) se presentan las series de tiempo de promedios diarios del índice de surgencia (CUI), promedios diarios de las corrientes en la entrada norte y diferencia de temperatura entre el interior de la BTS y Salsipuedes (ΔT) obtenida a partir de compuestos semanales de los datos satelitales.

Como se observa en la Figura 9 las series de datos son discontinuas, para analizar la trampa de surgencia de la bahía se trató de utilizar el mayor número posible de datos, y se analizaron tres años de datos (2008, 2009 y 2010) de forma independiente para ver la variación interanual. En la Figura 9 se muestran los periodos de los datos disponibles: Temperatura superficial (SST), Índice de surgencia (CUI), anclajes de corrientímetros en la Isla Todos Santos (ITS), anclaje central de la bahía (EN), anclaje en San Miguel profundo (SMP) y San Miguel Costero (SM). En 2008 se cuenta con el mayor número de datos disponibles, SST, CUI, y corrientes de los cuatro anclajes. En 2009 se cuenta con datos de SST, CUI, y tres anclajes con corrientímetros y finalmente 2010 con datos de SST, CUI y solamente dos anclajes con corrientímetros.

Para determinar la influencia de las variaciones sinópticas del esfuerzo del viento sobre el sistema de trampa de surgencia, mediante un análisis armónico, se eliminó el ciclo anual de las series de tiempo del índice de surgencias (CUI), diferencia de temperatura superficial entre el interior de la bahía y zona adyacente (ΔT) y Temperatura profunda (TP) en las Figuras 10, 14 y 16. De esta forma se correlacionaron y graficaron estas variables.

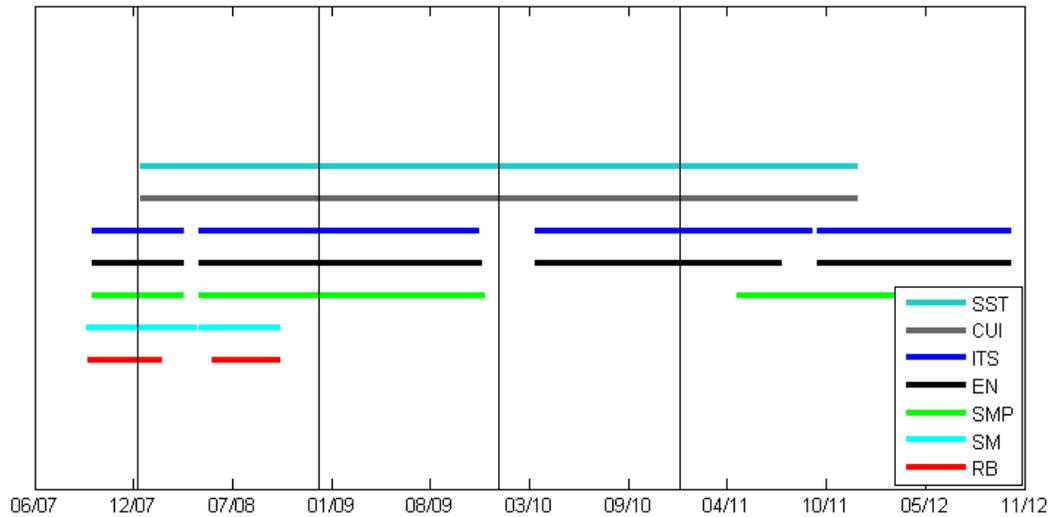


Figura 9. Disponibilidad de los datos de Temperatura Superficial del mar (SST), Índice de surgencia (CUI), mediciones de corrientes y temperatura profunda en ITS, EN, SMP, y SM, temperatura profunda en Rincón de Ballenas (RB).

5.2.1 Primer periodo (2008)

En la Figura 10 se presentan las series de tiempo diarias del Índice de Surgencia (CUI), las corrientes promediadas verticalmente, la temperatura profunda medida por los anclajes de la entrada norte (ver Figura 2) y la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes calculada a partir de compuestos semanales de SST (ΔT , donde los valores positivos indican que el interior de la bahía es más cálido que la zona de Salsipuedes). Se observa en la Figura 10a que el índice de surgencias es muy variable a lo largo del año. En los meses de invierno se aprecia, apenas, una menor intensidad en el esfuerzo del viento, incluso se observan valores negativos de CUI que indica vientos con dirección contraria a los vientos favorables a surgencia. En primavera y verano los vientos son favorables a surgencia con periodos de debilitamiento, es difícil definir con exactitud una surgencia ya que los vientos intensos no son persistentes (duran apenas 1-2 días), pero se observó con imágenes de Temperatura Superficial del Mar (Figura 12) que sí se forman surgencias cuando el viento sopla favorable al menos un par de días y con índices de surgencia sostenidos por arriba de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por 100m de litoral.

En la Figura 10b se observan las corrientes perpendiculares a la entrada de la bahía en los cuatro anclajes. Valores positivos significan que la circulación es hacia el interior de la bahía y valores negativos significan circulación hacia el exterior de la bahía. Hay mucha variabilidad en las corrientes, en los primeros meses del año se observa que el flujo es principalmente hacia el interior por el lado de la ITS y EN. El resto del año presentan mayor variación aunque en verano la circulación es principalmente hacia el interior de la bahía, con mayor intensidad en EN y SMP. En SM costero las corrientes son más variables y se observa que la circulación es principalmente hacia el exterior de la bahía.

El índice de surgencias está principalmente correlacionado con las corrientes en SMP (0.4) y menos correlacionado hacia el lado de la ITS (0.28), todas con un desfase de un día (Figura 11a). Aunque las correlaciones son bajas, son significativas, esto sugiere que parte de la variabilidad sinóptica de las corrientes se debe al esfuerzo del viento.

La Figura 10c muestra la serie de tiempo de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes (ΔT). Se observa una variación estacional, ya que las mayores diferencias de temperatura se presentan en primavera y verano, aunque existe mucha variabilidad sinóptica. Dentro de esta variabilidad sinóptica se observa que las diferencias de temperatura disminuyen en muchas ocasiones, pero en junio del 2008 se encontró un caso extremo donde la diferencia de temperatura incluso se invierte, es decir, la bahía se encuentra 1°C más fría que el exterior de la bahía. Ya que ΔT es obtenida de compuestos semanales, se aplicó un filtro semanal a los datos de CUI para hacer la correlación con el esfuerzo del viento. La correlación del esfuerzo del viento con la ΔT es de 0.46, es significativa con un desfase de 3 días, donde el esfuerzo del viento precede a ΔT (Figura 11b). Una correlación positiva indica que un incremento del viento favorable a surgencias incrementa la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes. Sin embargo, la correlación es baja por lo cual la variación sinóptica de la diferencia de temperatura no puede explicarse del todo por la variabilidad del viento local.

La Figura 10c presenta la serie de tiempo de la temperatura profunda (TP), la cual varía entre 10-14 °C, en primavera y verano desciende la temperatura 1 a 2°C y vuelve a incrementarse hacia el otoño. También se correlacionó el índice de surgencia (CUI) con la temperatura de fondo de cada uno de los anclajes en la entrada de la bahía (TP), se encontró que están correlacionadas negativamente y con un desfase de 3-5 días, lo que significa que cuando el viento es favorable para las surgencias, agua fría es advectada al interior de la bahía por el fondo. La correlación es baja pero significativa (un rango de -0.3 a 0.) en todos los anclajes excepto en SM que es aún menor (Figura 11c). Lo anterior sugiere una circulación hacia el interior de la bahía con un desfase de dos días después de que se presenta viento favorable a surgencias. Mientras que el agua fría que es transportada desde las regiones de surgencia tarda en entrar a la bahía aproximadamente dos días más.

Se correlacionaron las corrientes de los anclajes en la entrada de la bahía con la diferencia de temperatura entre el interior y la zona de Salsipuedes (Figura 11d), los resultados muestran una correlación significativa, en un rango de 0.3 a 0.4 para el anclaje de San Miguel y menor en los otros anclajes, la mayor correlación se da a los 3 días, es decir la diferencia de temperatura es mayor cuando la circulación es hacia el interior de la bahía.

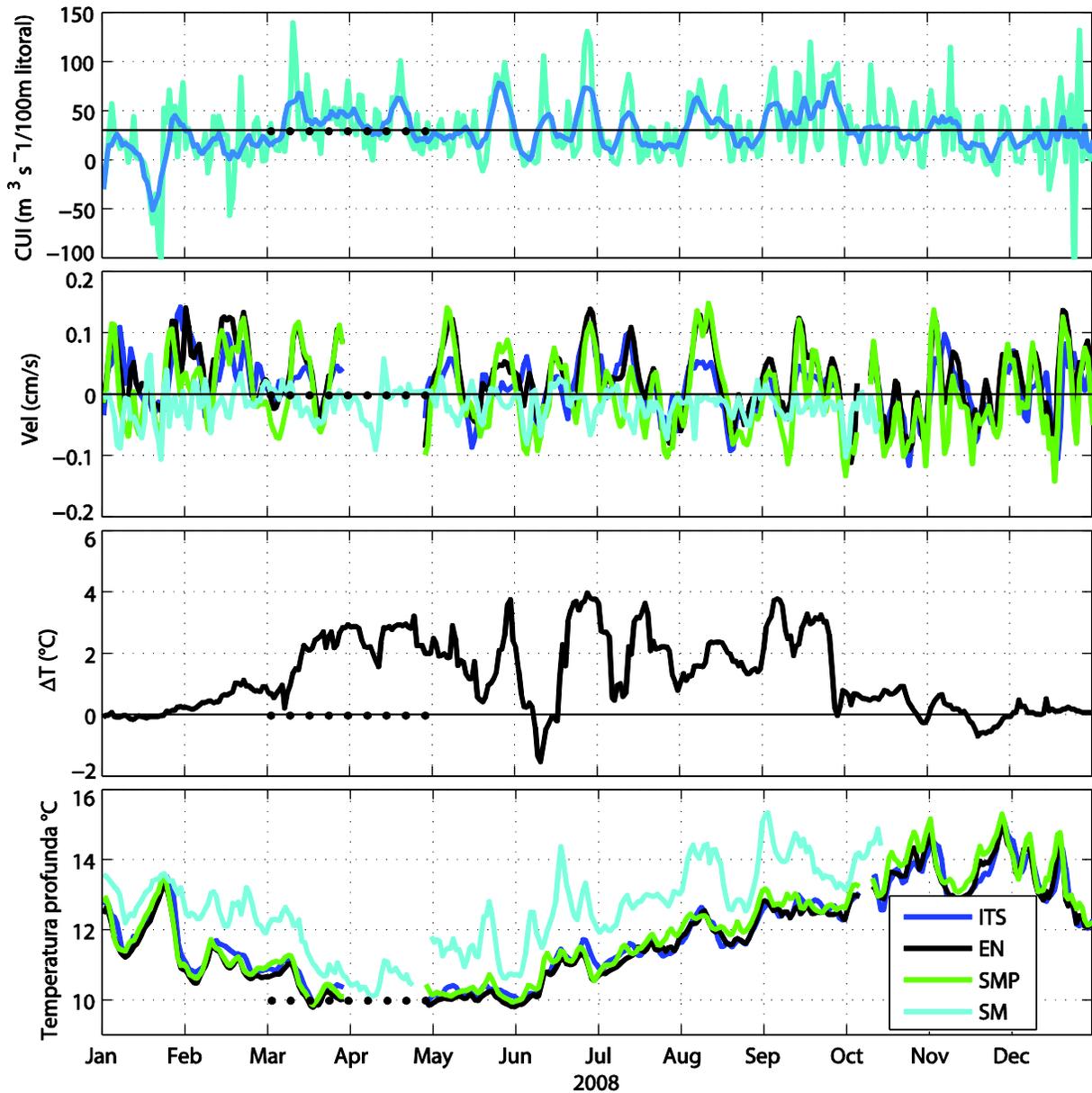


Figura 10. Series de tiempo diarias para 2008 del (a) índice de surgencia (CUI) y filtro de 7 días, (b) corrientes en la entrada norte de la bahía (ITS, EN, SMP, y SM), (c) serie de tiempo de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona adyacente (ΔT) y (d) la temperatura de fondo en los anclajes de la entrada norte de la bahía (mismos colores b y d). Los puntos negros en la serie de tiempo indican los días usados para mostrar la evolución sinóptica de SST.

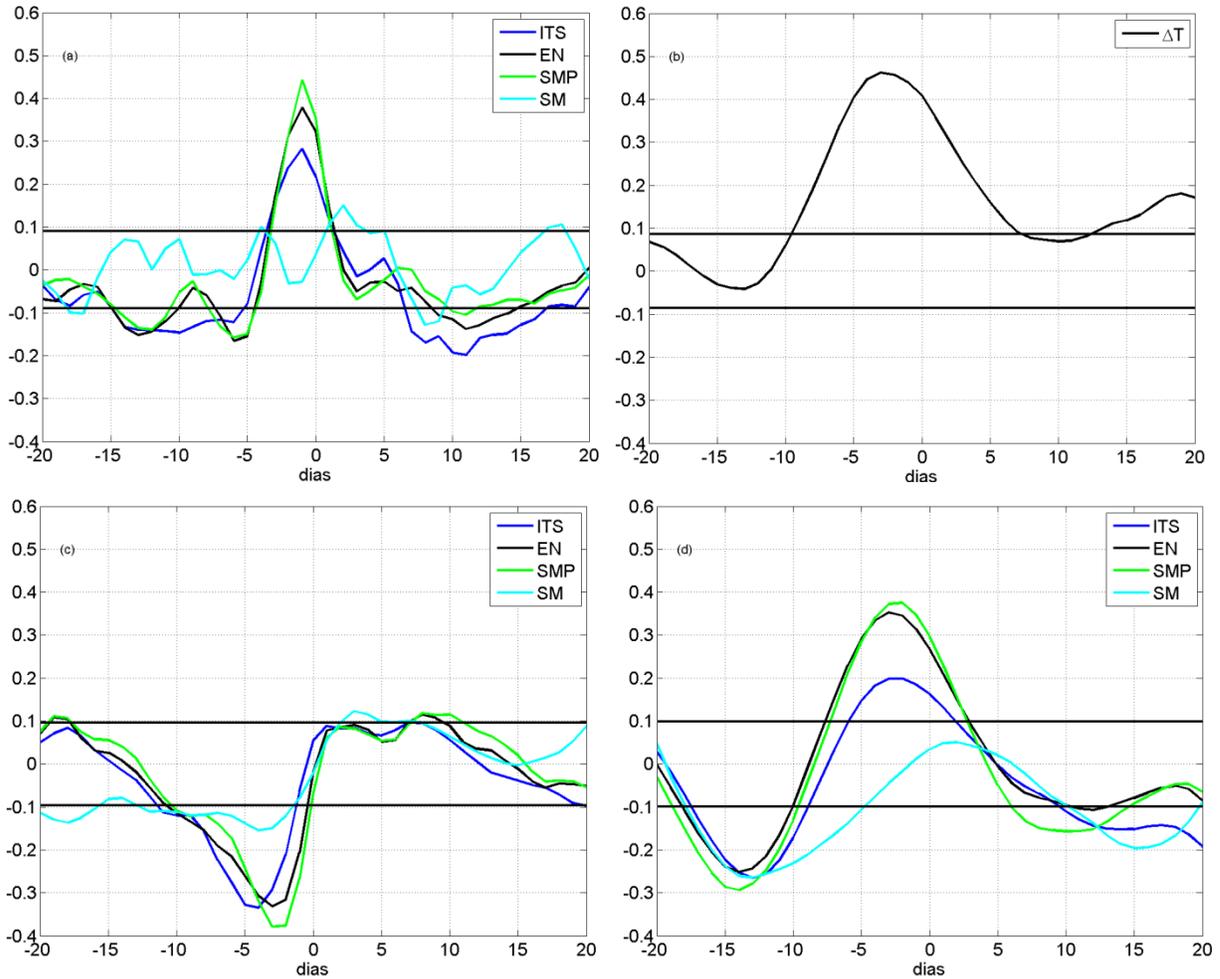


Figura 11. Correlación con desfase entre a) el índice de surgencia y las corrientes, b) el índice de surgencia y la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes (ΔT), c) el índice de surgencia y la temperatura de fondo en la entrada norte, y d) correlación entre las corrientes y ΔT durante 2008. Las correlaciones se realizaron quitándole el ciclo anual a CUI, ΔT y TP.

Se presentan en la Figura 12 la evolución espacial de la trampa de surgencia en marzo-abril de 2008, las imágenes son compuestos semanales de temperatura. La primera imagen corresponde al 8 de marzo de 2008 y las imágenes están cada 7 días a partir de esa fecha. Se observa que en marzo no hay un gradiente de temperatura marcado entre el interior de la bahía y Salsipuedes, en la imagen que corresponde al 22 de marzo se aprecia un calentamiento al interior de la bahía, lo que posiblemente se deba al aumento en la radiación solar de primavera. En la imagen siguiente se

observa una surgencia al exterior de la bahía, en Salsipuedes y al sur de Punta Banda, el interior de la bahía es aún más cálido creando un frente térmico en la entrada norte de la bahía. En la imagen del 5 de abril se observa que la surgencia se ha intensificado, además también se presenta una surgencia al norte de Salsipuedes. Esta imagen coincide con las fechas en las que se realizó el crucero BTS03 (marcada con recuadro rojo) y de la cual se obtuvo la sección transversal de los datos de CTD (ver Figura 13). En la Figura 10a se observa que en esta época el índice de surgencias se mantiene por arriba de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por 100m de litoral, lo que es consistente con lo observado en las imágenes de SST. La imagen del 12 de abril muestra que la surgencia comienza a debilitarse y el lente cálido observado al interior de la bahía se encuentra más disperso, incluso sugiere que el agua cálida puede estar siendo advectada al exterior de la bahía por el lado de la costa de San Miguel. Sin embargo, la resolución de los datos de SST no es suficiente para aseverarlo. La imagen del 19 de abril muestra nuevamente una surgencia al sur de Punta Banda, y no se alcanza a ver bien el frente térmico en la entrada de la bahía. El 26 de abril nuevamente se presenta una surgencia intensa y un lente de agua cálido más pequeño en la bahía. Nuevamente se observa el lente de agua cálido que posiblemente es advectado fuera de la bahía. Las imágenes de SST durante este periodo muestran la formación de la trampa de surgencia en la bahía, sin embargo no es posible explicar con precisión su evolución.

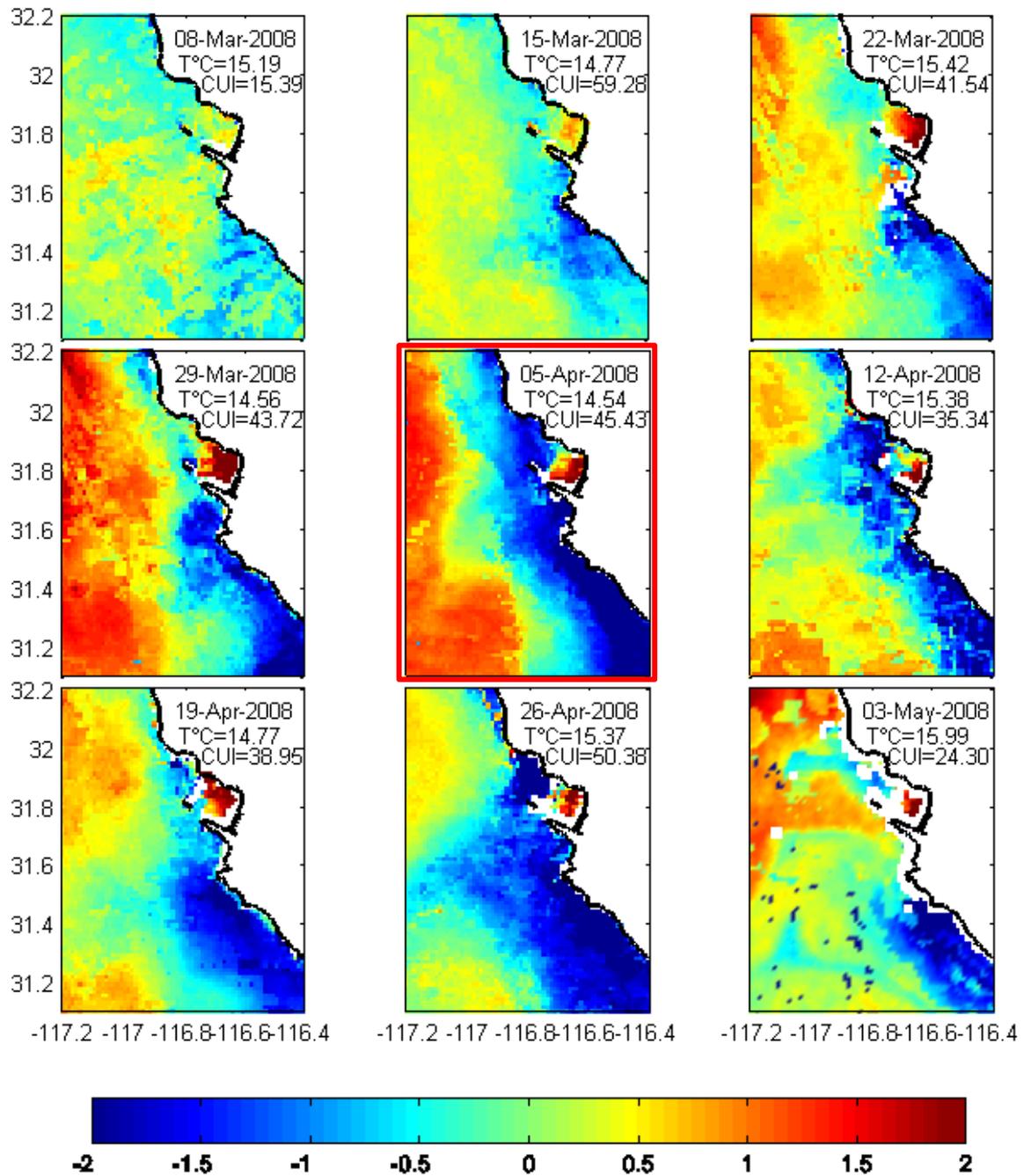


Figura 12. Secuencia semanal de imágenes de satélite correspondientes al crucero BTS03 realizado en Abril de 2008. Se presentan como anomalías respecto al promedio espacial marcado en la imagen. Se muestra el promedio corrido de 7 días del CUI ($\text{m}^3\text{s}^{-1}/100\text{m}$ litoral) correspondiente a cada imagen de SST.

La Figura 13 muestra una sección transversal de temperatura a través de la trampa de surgencia que se formó durante el periodo analizado en la Figura 12 (marcada con recuadro rojo). El lente de agua cálida alcanza una profundidad de ~ 10 m. El gradiente de temperatura vertical es marcado, la temperatura superficial es de 17°C y por debajo de 10 m la temperatura desciende hasta $\sim 11^\circ\text{C}$. Este lente cálido se ve únicamente al interior de la bahía, y está delimitado por un frente térmico horizontal muy marcado, en la que la temperatura disminuye 5°C hacia afuera de la bahía hasta la región de Salsipuedes donde se presentaron surgencias costeras.

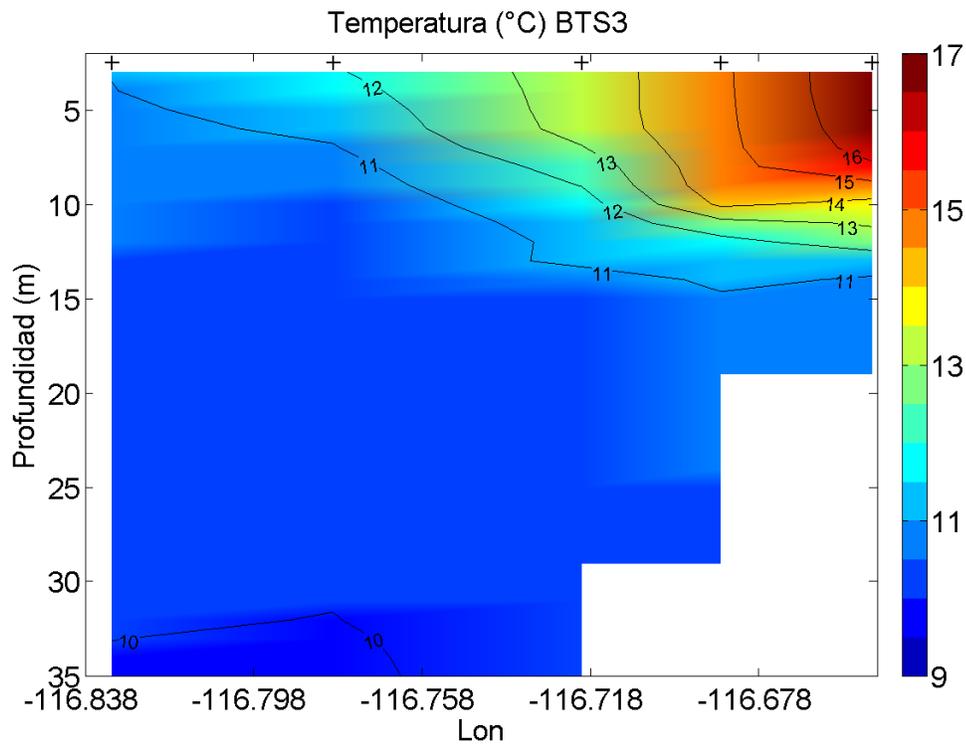


Figura 13. Estructura vertical a través de la trampa de surgencia obtenida con datos de CTD tomados durante el crucero BTS03 en abril de 2008 (ver posición de las estaciones marcadas con '+' en la Figura 2).

5.2.2 Segundo periodo (2009)

Igual que para el periodo de 2008, se presentan las series de tiempo diarias de índice de surgencia (CUI), promedios verticales de las corrientes, temperatura superficial (SST) y temperatura profunda (TP) en la entrada norte.

En la Figura 14a se observa la serie de tiempo del CUI en 2009, en los meses de invierno presenta inversiones en la dirección del viento favorable a surgencias, en los meses de primavera y verano el esfuerzo del viento es favorable a surgencias, sin embargo es muy intermitente y hay pulsos donde el esfuerzo del viento se debilita aunque casi sin inversiones en la dirección del esfuerzo del viento, esto es similar a lo que se observó en 2008, aunque en Mayo-Junio se observa una época en la que el CUI fue más débiles que en 2008.

En 2009 se observa que la dirección de la corrientes es predominantemente hacia el interior de la bahía en la ITS y EN, y se debilitan, incluso se invierten en una época en la que el esfuerzo del viento se debilitaron (otoño-invierno). En SMP la dirección de las corrientes es en ambos sentidos, aunque hay una predominancia de la circulación hacia el exterior de la bahía. A pesar de la alta variabilidad en las corrientes y el esfuerzo del viento, la correlación es significativa entre ellos, principalmente con SMP (0.4) y menor para EN (0.3), donde el desfase es de 1 día, e ITS (0.2) con un desfase de 2 a 3 días (Figura 15a). Nótese que el valor de dichas correlaciones es similar a las obtenidas para 2008.

A diferencia de lo que ocurrió en 2008 las diferencias de temperatura entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes (ΔT) en primavera no son tan grandes, apenas de $\sim 1^\circ\text{C}$ y se incrementan en verano hasta 4°C . La correlación con el esfuerzo del viento es de 0.5, ligeramente mayor que en 2008.

La temperatura profunda en los anclajes de la entrada norte desciende en primavera y verano como en el año anterior, pero esta vez las variaciones de temperatura fueron mayores que el año

anterior (4°C). La correlación de la temperatura profunda con el índice de surgencia (CUI) mostró ser significativa (0.25-0.35) con un desfase de 2 y 4 días en ITS, EN y SMP, igual que en 2008 (Figura 15c).

En 2008 se observó una correlación poco significativa entre las corrientes y la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona adyacente (Figura 15d) sin embargo en 2009 se observa una correlación de 0.4 en SMP y 0.2 en EN con un desfase de 5 días, sin embargo ITS no muestra una correlación significativa.

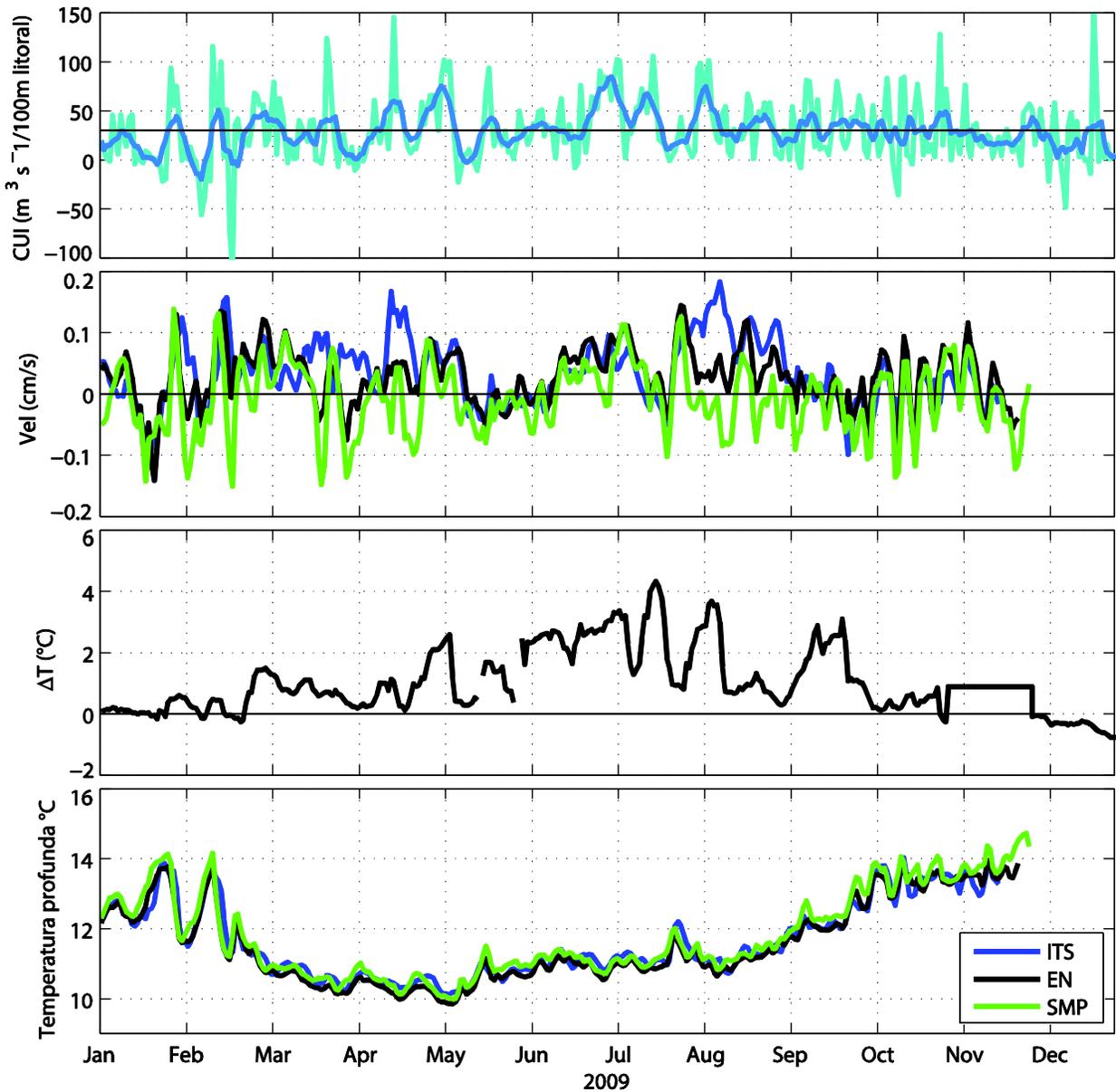


Figura 14. Series de tiempo diarias para 2009 del (a) índice de surgencia (CUI) y filtro de 7 días, (b) corrientes en la entrada norte de la bahía (ITS, EN, SMP, y SM), (c) serie de tiempo de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes (ΔT), y (d) la temperatura de fondo en los anclajes de la entrada norte de la bahía.

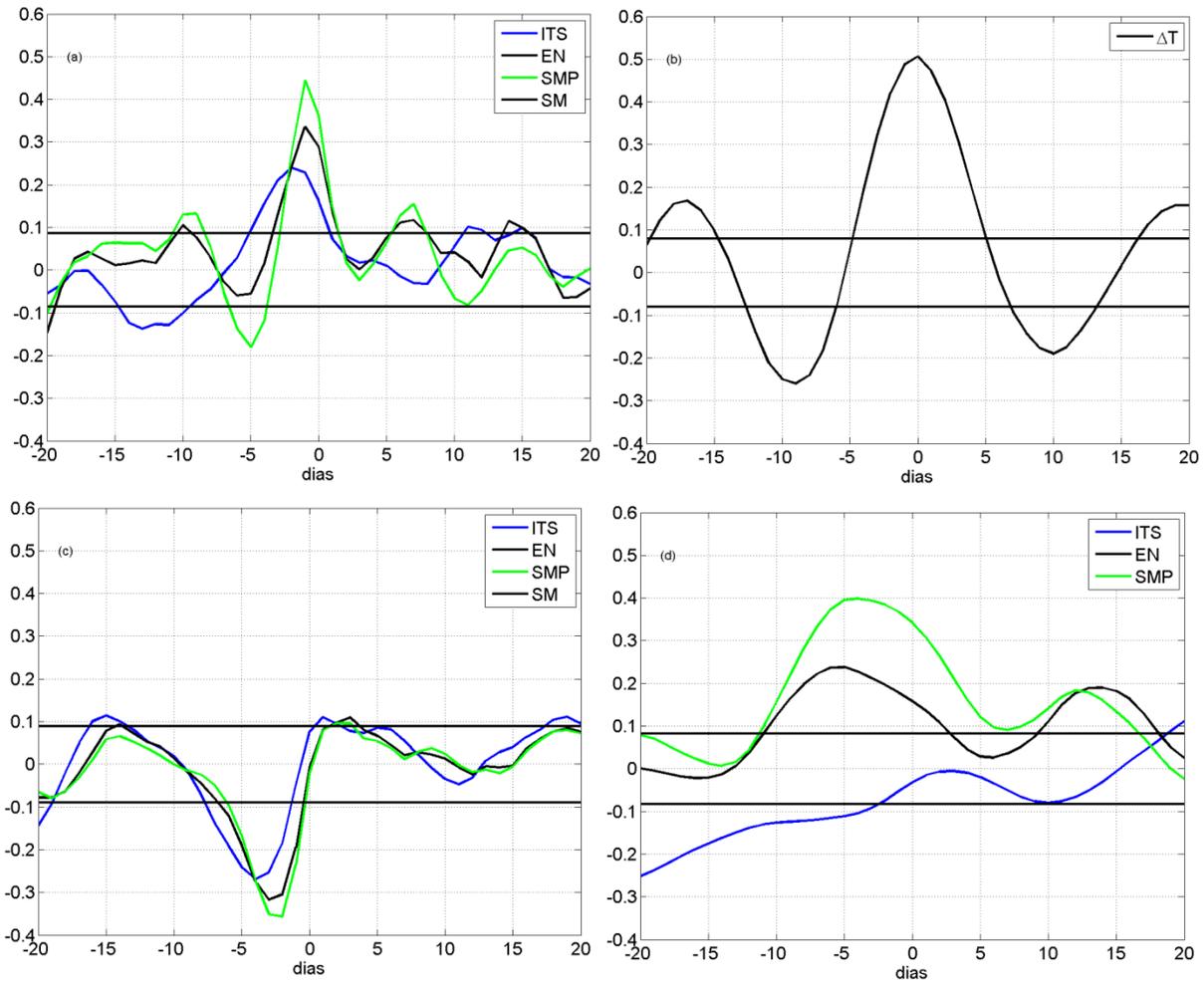


Figura 15. Correlación con desfase entre a) el índice de surgencia y las corrientes, b) el índice de surgencia (CUI) y la diferencia de temperatura entre el interior del bahía y Salsipuedes (ΔT), c) el índice de surgencia y la temperatura de fondo en la entrada norte, y d) correlación entre las corrientes y ΔT durante 2009. Las correlaciones se realizaron quitándole el ciclo anual a CUI, ΔT y TP.

5.2.3 Tercer periodo (2010)

Igual que para el periodo de 2008 y 2009, se presentan las series de tiempo de índice de surgencia (CUI), promedios verticales de las corrientes, diferencia de temperatura superficial entre el interior de la bahía y la zona adyacente (ΔT) y temperatura profunda (TP).

En la Figura 16a se presenta la serie de tiempo del CUI, se observa igual que en los años anteriores que durante el invierno el esfuerzo del viento es débil o con eventos contrarios a surgencias costeras. Durante la primavera y verano se observan vientos favorables a surgencias pero también se observan debilitamientos, más que en los años anteriores, incluso inversiones, lo que no se observó en 2008-2009.

Este año solo se tienen mediciones de los corrientímetros de la ITS y EN. Se observa en la Figura 16b que la circulación es principalmente hacia el interior de la bahía, a pesar de que existen inversiones, la intensidad es menor hacia fuera de la bahía. La correlación del esfuerzo del viento con las corrientes es poco significativa para el caso de ITS (0.3) y EN (0.25), con desfase de 1 días, similar a los años anteriores (Figura 17a).

La diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona de surgencias de Salsipuedes (ΔT) tiene un comportamiento estacional, igual que los años anteriores, sin embargo en primavera de 2009 y 2010 no se observan diferencias tan grandes como en 2008 ($\sim 3^\circ\text{C}$), en 2010 las diferencias de temperatura son de menos de 2°C y en verano llegan a ser de hasta 4°C igual que los años anteriores. En 2008 se observó mayor variación sinóptica de las diferencias de temperatura, es decir se observan más cambios abruptos, mientras que en 2010 el frente térmico es más persistente. La correlación con el esfuerzo del viento es poco significativa de 0.3 y sin desfase a diferencia de los otros años donde se encontró un desfase de 1 día (Figura 17b).

En la Figura 16d se observa que la temperatura profunda tuvo menor variación que en los años anteriores donde la temperatura varía hasta en 4°C , además fue un año más frío ya que la

temperatura varió entre los 10-12 °C, salvo por un pico en diciembre donde la temperatura fue de 14°C. En el caso de la correlación entre la temperatura profunda y el esfuerzo del viento se sigue observando una correlación negativa de 0.4 en EN y 0.3 en ITS con un desfase de 3 días (Figura 17c).

En 2010 no se observa una correlación entre las corrientes y la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y la zona adyacente, como en 2008 y 2009 (Figura 17d).

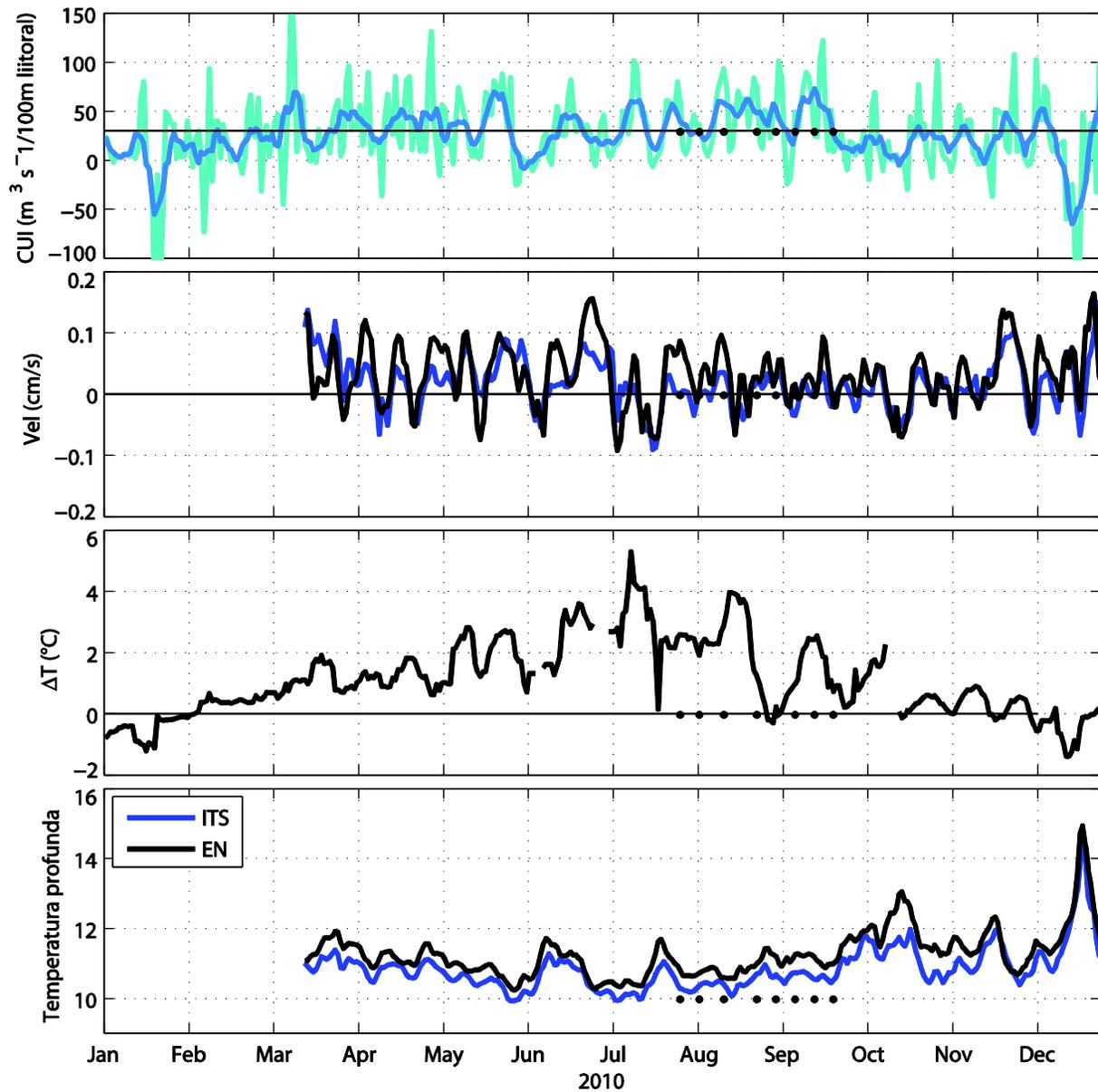


Figura 16. Series de tiempo diarias para 2010 del (a) índice de surgencia (CUI) y filtro de 7 días, (b) corrientes en la entrada norte de la bahía (ITS, EN, SMP, y SM), (c) serie de tiempo de la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes (ΔT), y (d) la temperatura de fondo en los anclajes de la entrada norte de la bahía (mismos colores de b y d). Los puntos negros en la serie de tiempo indican los días usados para mostrar la evolución sinóptica de SST.

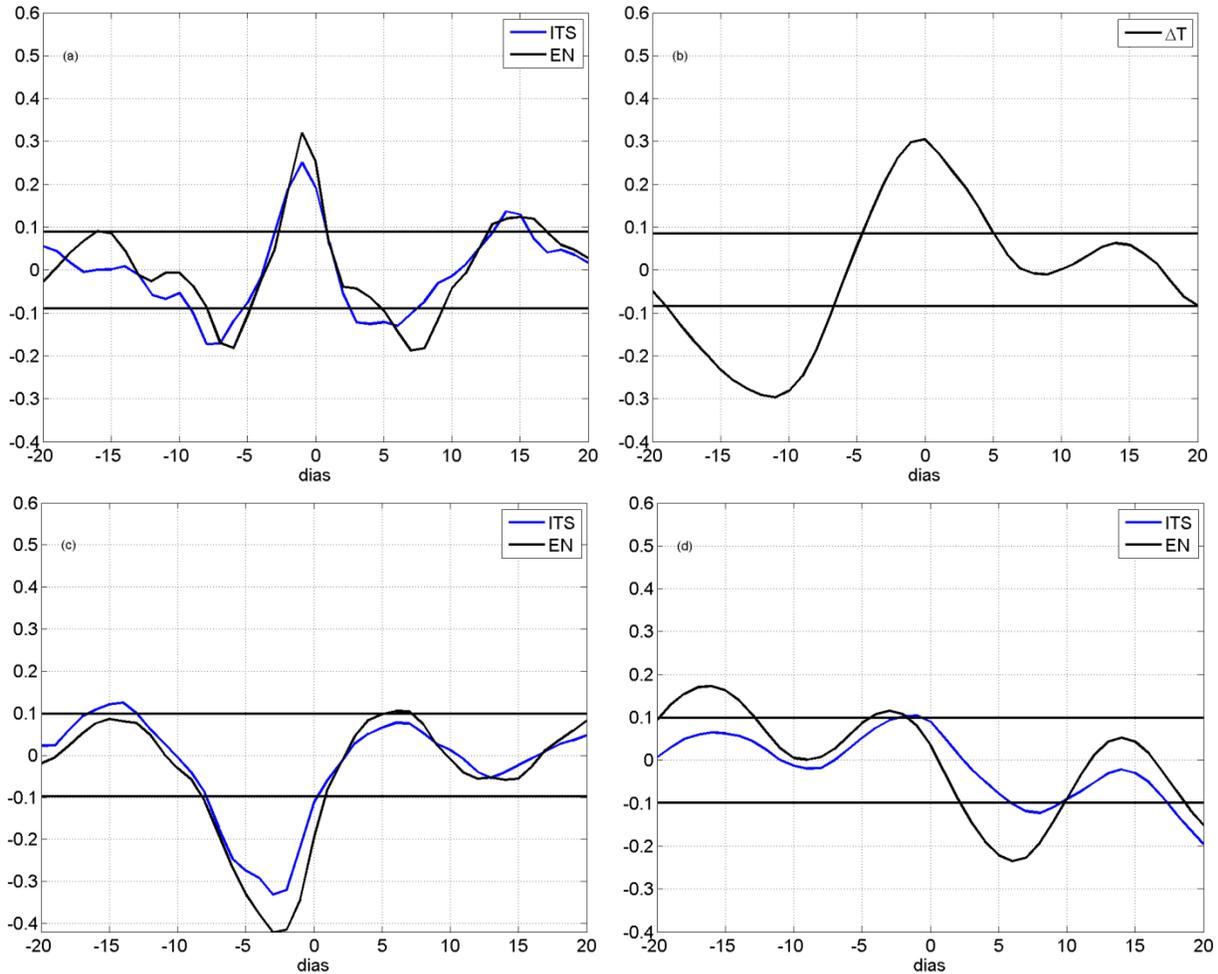


Figura 17. Correlación con desfase entre a) el índice de surgencia y las corrientes, b) el índice de surgencia y la diferencia de temperatura entre el interior de la bahía y Salsipuedes (ΔT), c) el índice de surgencia y la temperatura de fondo en la entrada norte, y d) correlación entre las corrientes y ΔT durante 2010. . Las correlaciones se realizaron quitándole el ciclo anual a CUI, ΔT y TP.

En la Figura 18 se muestra la evolución espacial de la trampa de surgencia correspondiente al crucero de agosto de 2010 (BTS09), las imágenes son compuestos semanales de temperatura. La primera imagen corresponde al 30 de julio de 2010 y las imágenes están cada 7 días a partir de esa fecha. Se observa que a finales de julio y principios de agosto la trampa de surgencia está bien definida, se observa un frente térmico en la entrada de la bahía con un ΔT de 3°C , lo cual concuerda con lo observado en el índice de surgencia que presenta vientos favorables a surgencias para los

días del crucero (ver Figura 16a). La imagen que corresponde a 27 de agosto donde la surgencia se debilita y nuevamente el lente de agua cálido se dispersa, aunque se sigue viendo agua cálida en la costa de San Miguel aun cuando las diferencias de temperatura con la zona adyacente son de solamente 1°C. Para el 17 de septiembre parece que el agua al interior de la bahía comienza a calentarse de nuevo y una nueva surgencia se presenta. Y en la última imagen correspondiente a 24 de septiembre ya no se observan surgencias costeras ni tampoco el lente cálido al interior de la bahía, esto es consistente con la Figura 16c en la que se observa que la ΔT disminuye hacia el otoño e invierno.

En la Figura 19 correspondiente a BTS09 se observa en el centro de la bahía un lente de agua cálida 18°C muy somero, hasta 5 m de profundidad, por debajo de esta capa la temperatura desciende rápidamente hasta 11°C. Este lente es más somero que el que se observó en abril del 2008 donde se presenta un lente de agua con temperatura de 16°C centrado en la bahía hasta una profundidad de ~5 m, por debajo de esta capa la temperatura disminuye con la profundidad hasta 12°C a 30 m. En BTS09 no se observa un gradiente horizontal de temperatura como en el caso de BTS03, que es el único ejemplo con que se cuenta de una trampa de surgencia bien definida, puede ser que el frente térmico se encuentre más hacia el norte de lo que es posible observar con esta sección transversal.

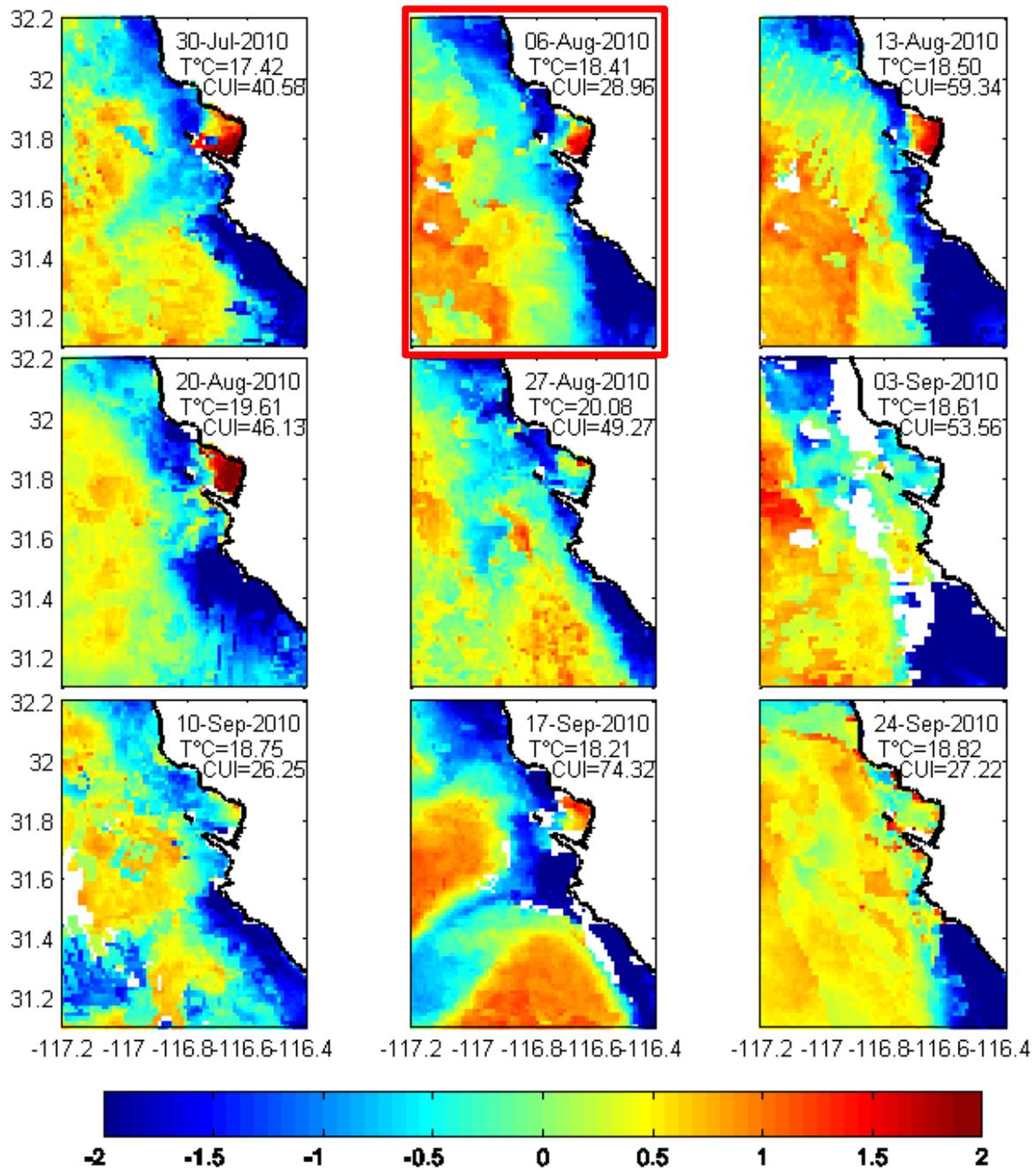


Figura 18. Secuencia de imágenes de satélite correspondientes al BTS08 realizado en Abril de 2010. Se presentan como anomalías respecto al promedio espacial marcado en cada imagen. Se muestra el promedio corrido de 7 días del CUI ($m^3 s^{-1}/100m$ litoral) correspondiente a cada imagen de SST.

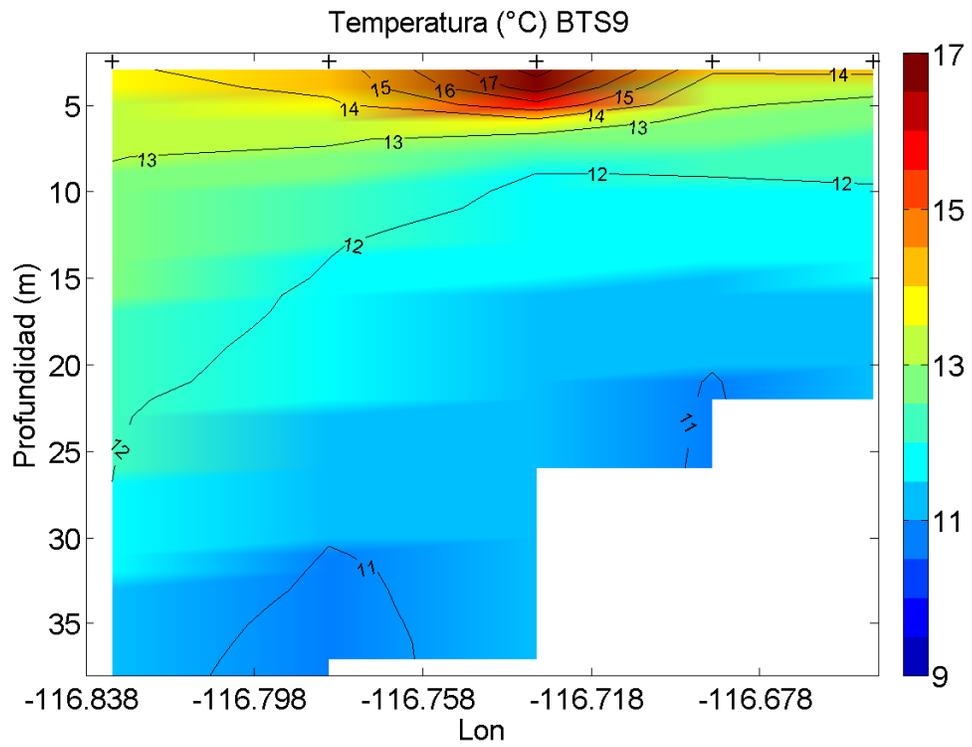


Figura 19. Estructura vertical a través de la trampa de surgencia obtenida con datos de CTD tomados durante el crucero BTS09 en agosto de 2010 (ver posición de las estaciones marcadas con '+' en la figura 2).

5.2.4 Temperatura profunda en la entrada norte y al interior de la bahía

Para ver lo que ocurre con el agua fría de surgencia que se encuentra en el centro de la entrada norte (EN), se hizo una correlación con la temperatura profunda en Rincón de Ballenas (RB), al interior de la bahía (ver posición en Figura 2). Se eliminó el ciclo anual de ambas series. La correlación de la temperatura profunda en la entrada de la bahía y al interior es significativa (0.7-0.8) con un desfase de entre -1 y cero días (Figura 20). Es decir, cuando el agua se enfría en la EN también se enfría en RB con desfase de 0 a 1 días, lo cual sugiere que el agua fría de surgencias recientes es advectada al interior de la bahía por debajo de la trampa de surgencia, alcanzando al Rincón de Ballenas de manera casi inmediata, es decir, la trampa de surgencias retiene el agua superficial, resultando en un tiempo de residencia mayor, mientras que las aguas profundas son renovadas más rápidamente.

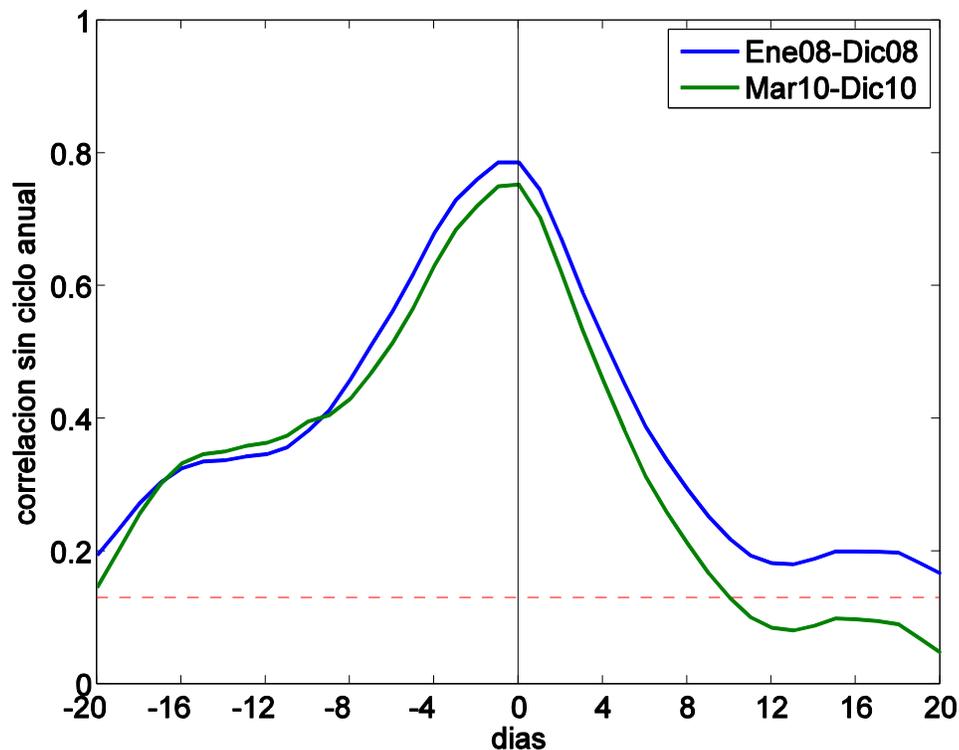


Figura 20. Correlación con desfase entre la temperatura de fondo en la entrada norte contra la temperatura profunda en Rincón de Ballenas al interior de la bahía para diferentes periodos de tiempo.

6. Discusiones y conclusiones

La Bahía Todos Santos es un sistema con una dinámica muy compleja que ha sido poco estudiada. El presente trabajo pretende describir la variabilidad de la trampa de surgencia y los factores relevantes que dan lugar a dicha variabilidad, sin embargo la resolución de los datos no fue suficiente para entender completamente su comportamiento, sobre todo a escala sinóptica. En esta sección primero se discuten las características de las surgencias costeras en la región, posteriormente se habla de las características de la trampa de surgencias de la BTS, y por último se plantean los factores que influyen en la dinámica de este lente de agua cálido.

6.1 Características de las surgencias en la región

En la región de la Bahía Todos Santos, las surgencias costeras se presentan todo el año, más intensas en primavera y verano, mientras que la intensidad en invierno es menor y la dirección del esfuerzo del viento es más variable. Esto es similar a lo que ocurre en la región de Bahía de Antofagasta en Chile donde las surgencias costeras se presentan todo el año, más intensas en verano (Piñones et al., 2007). Esto difiere a lo que ocurre en la región de California alrededor de la Bahía de Monterey donde la época de surgencias costeras está muy bien definida, con valores del índice de surgencia (CUI) superando regularmente $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por 100 m de litoral entre marzo y septiembre, mientras que el resto del año los vientos soplan en dirección contraria según Graham (1993).

En la región el índice de surgencia si llega alcanzar valores de $100\text{-}150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por 100 m de litoral pero, estos eventos no son persistentes. Se observan pulsos generalmente menos intensos y de corta duración (1-2 días). Esto difiere con la duración de eventos de surgencia en la región de California Central, donde los vientos son intensos y persisten por más de una semana en época de surgencia, con periodos de relajación de uno 1 hasta 6 días (Woodson *et al.* 2009). Sin embargo, se observó que en la región un índice de surgencia mayor de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por 100 m litoral persistente durante al menos un par de días es suficiente para provocar una surgencia.

De igual manera de acuerdo a lo observado con las imágenes de satélite las surgencias no son igual de intensas en toda la costa adyacente a la bahía, sino que las surgencias son más intensas al sur de Punta Banda y suelen ser menos intensas en la región de Salsipuedes.

6.2 Características de la trampa de surgencias de la BTS

Se encontró que en la Bahía Todos Santos existe una condición de calentamiento al interior de la bahía, la cual cumple las condiciones de una trampa de surgencia, dada por un frente térmico en la entrada norte debido a una zona de surgencias en la zona adyacente y una península que actúa como frontera y por lo tanto retiene el agua al interior de la bahía (Piñones et al., 2007).

Esta trampa de surgencia es un fenómeno estacional que se presenta únicamente en la época de surgencias más intensas que es principalmente en primavera y verano. Esto contrasta con lo que sucede en la bahía de Antofagasta en Chile donde los vientos favorables a surgencias persisten todo el año, siendo más intensos en verano, por lo que la retención de agua cálida al interior de la bahía es permanente a lo largo de todo el año (Piñones et al., 2007).

En el caso de la Bahía de Monterey, durante la época de surgencias se forma una sombra de surgencia al interior de la bahía donde la diferencia de temperatura es en promedio de 2.5°C. Durante los eventos de relajación, la sombra de surgencia se mueve hacia los polos a lo largo de la costa. Si la relajación es de alrededor de 5 días, el lente llega a ser advechado fuera de la bahía, donde eventualmente se mezcla, de lo contrario las aguas cálidas de la sombra de surgencia son advechadas de nuevo al interior de la bahía (Woodson et al., 2009). La brisa marina llega a trasladar al frente de la sombra hasta 5km. En la Bahía Todos Santos las diferencias de temperatura a través del frente de la trampa de surgencia varían entre 2-4.5 °C en verano. Aunque el análisis de este trabajo sugiere una variabilidad sinóptica en la intensidad del frente, no se pudo determinar la evolución y tiempo de permanencia del lente cálido al interior de la bahía mediante las imágenes satelitales. Sin embargo, el análisis presentado aquí sugiere que incluso en la época de surgencias

puede llegar a desaparecer, como ocurrió en junio de 2008 donde toda la región se enfrió y no se presentaron diferencias de temperatura entre el interior y la zona adyacente a la bahía. Esto es diferente a lo que sucede en Antofagasta donde las diferencias de temperatura se observan todo el año, aunque más intensas en verano (1°C en invierno hasta 5°C en verano).

La profundidad de la trampa de surgencia fue distinta en los dos cruceros oceanográficos analizados, en abril de 2008 se encontró bien definida la trampa de surgencia con una profundidad de ~ 10 m, mientras que en agosto de 2010 se encontró un lente más somero de apenas 5m de profundidad. En la Bahía de Monterey la sombra de surgencia tiene una profundidad de 5 m, mientras que en el caso de la Bahía de Antofagasta es de aproximadamente 20 m

La estratificación es muy marcada al interior de la BTS, el gradiente de temperatura en primavera es de $0.3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ y en verano de $0.6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ es decir, hay mayor estratificación en verano. En la Bahía de Monterey, el gradiente de temperatura es de $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en verano. En el caso de la Bahía de Antofagasta el gradiente de temperatura es de $0.3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en verano. Es decir, en la sombra de surgencia parece haber mayor estratificación que en la trampa de surgencia de Antofagasta y de Todos Santos. Aunque cabe resaltar que los cálculos mostrados aquí solo representan las condiciones observadas en dos cruceros oceanográficos.

Se ha estimado que en la bahía de Antofagasta el tiempo de residencia al interior de la bahía es del orden de dos semanas, con una tasa de calentamiento del orden de $0.5-1^{\circ}\text{C}$ por día, lo que se traduce en diferencias de temperatura del $\sim 6^{\circ}\text{C}$ en verano (Piñones et al., 2007). Mientras que en la bahía de Monterey se ha estimado un tiempo de residencia de 6-8 días con una tasa de calentamiento de 0.5°C por día y un incremento máximo de temperatura de $3-4^{\circ}\text{C}$ (Graham *et al.*, 1997). El tiempo de residencia no se ha estimado en este trabajo pero podemos suponer, debido a que las características hidrográficas son similares, que es del mismo orden que en Antofagasta y Monterey.

De acuerdo con la correlación alta (07-0.8) entre la temperatura de fondo en la entrada de la bahía y la temperatura al interior sugiere que el agua profunda se renueva rápidamente (1 día), a

diferencia del agua superficial cuyo tiempo de residencia se estima sea entre 3 días y 8 días. Lo anterior tiene implicaciones ecológicas, de acuerdo con Monteiro & Largier (1999) en un análisis de la estratificación térmica en la Bahía Saldanha (Sudáfrica) los flujos de agua de surgencias que entran por el fondo transportan nutrientes al interior de la bahía lo cual puede desatar la producción biológica en su interior, además el intercambio de agua también significa intercambio de fitoplancton. Esto es particularmente importante debido a las actividades económicas que se llevan a cabo al interior de la bahía como cultivos acuícolas y pesca.

6.3 Factores que influyen en la variabilidad de la trampa de surgencias

Se observó que el esfuerzo del viento muestra una correlación significativa con la variación de la temperatura superficial, principalmente con la diferencia de temperatura entre el interior de la BTS y la zona de Salsipuedes. Por su parte las corrientes integradas verticalmente en la entrada norte de la bahía (entre San Miguel y la isla de Todos Santos) muestran, en promedio, un patrón de circulación con dirección hacia el interior la bahía de acuerdo con lo observado entre septiembre 2007 y octubre 2008 por Miranda (2012). Lo anterior es consistente con lo reportado en el análisis de (2008-2011) de este trabajo, donde en general las corrientes entran a la bahía principalmente por el centro aunque son más variables del lado de la costa de San Miguel y menos variables del lado de la Isla Todos Santos.

Esta circulación predominante hacia el interior de la bahía también está evidenciado por el análisis de las corrientes superficiales durante el 2010 de Larrañaga (2013), donde encontró que el promedio anual de las corrientes superficiales mostró un flujo predominante de agua hacia el interior de la bahía por la entrada norte, con corrientes más intensas (15 cms-1) en la región expuesta al océano con dirección al sureste, y corrientes de menor intensidad (5 cms-1) con dirección al este en las zonas cercanas al Puerto de Ensenada.

Miranda (2012) encontró una relación débil entre el esfuerzo del viento y las corrientes en la entrada norte en una o dos bandas de frecuencia, $1/6$ y/o $1/5$ cpd donde el esfuerzo del viento antecede a las corrientes entre 36 y 72 horas, esto sugiere que el viento está forzando las corrientes únicamente a esa frecuencia para el año de mediciones analizado. En el presente trabajo se analizaron tres años de mediciones y lo reportado por Miranda (2012) es consistente con este trabajo, donde se encontró una correlación significativa (~ 0.4) entre las corrientes en el centro de la entrada norte de la bahía y el esfuerzo del viento, con un desfase de 2-3 días, aunque la correlación con los anclajes de la ITS es menor y no existe correlación con las corrientes en la zona costera de San Miguel.

Woodson et al., (2009) determinan que la localización del frente de la sombra de surgencia en la Bahía de Monterey está determinado por las condiciones oceanográficas regionales, como los vientos favorables a surgencias en las regiones adyacentes y un posible gradiente de presión barotrópico hacia los polos resultante de las diferencias del nivel del mar entre las regiones de surgencias y la bahía, las brisas locales, y las fuerzas de flotabilidad dadas por diferencias de temperatura entre el agua de surgencia y la sombra de surgencia. Los resultados de este estudio sugieren que el viento favorable a las surgencias en las zonas aledañas es un forzamiento para las corrientes a la entrada de la bahía, pero no explican toda su variabilidad sinóptica ni estacional.

Se trató de determinar si la existencia de un gradiente de presión barotrópico entre el interior de la bahía y la zona externa, sin embargo los datos de presión no cuentan con la resolución necesaria para determinarlo (no se muestran los resultados). Por lo tanto solo se puede suponer que este gradiente de presión barotrópico existe, y falta determinar cómo es el balance dinámico del gradiente de presión barotrópico además del gradiente de presión baroclínico que mantiene a la trampa de surgencia al interior de la Bahía Todos Santos durante la temporada de surgencias persistentes. El análisis presentado sugiere que el viento regional es un forzamiento pero no explica toda la variabilidad, falta determinar la influencia relativa de la aceleración de Coriolis y de las brisas.

Este trabajo ha sido principalmente descriptivo, ya que, debido a los pocos antecedentes que se tienen acerca de la hidrografía y dinámica de la bahía se tuvo que hacer un análisis exploratorio de los diferentes tipos de datos. En este análisis preliminar se encontró este fenómeno de trampa de surgencias que no había sido descrito en la BTS, y se describió su variabilidad estacional y sinóptica. Sin embargo, los datos no han sido suficientes para determinar la dinámica del lente de agua cálida. Pero este trabajo puede servir de base para estudios futuros en los que se pueda explicar la dinámica y los principales forzamientos que mantienen a la trampa de surgencia, así como su evolución a escala sinóptica.

Referencias bibliográficas

- Álvarez Sanchez, L. G. (1977). Vientos en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas* Vol. 4 Núm. 1.
- Amador Buenrostro, A. (1978). Análisis de vientos, corrientes y el nivel del mar en una zona de surgencia, cerca de Punta Colonet. Tesis de Maestro. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Atlas, R., R. N. Hoffman, J. Ardizzone, S. M. Leidner, J. C. Jusem, D. K. Smith, D. Gombos, (2011): A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92, 157-174. doi: 10.1175/2010BAMS2946.1
- Bakun, A. (1975). Daily and weekly upwelling indices, West Coast of North America, 1967–73. U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Rep., NMFS SSRF-693, 114 p.
- Bakun, A., and C. S. Nelson. (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 19:107–127. Bakun, A., and C. S. Nelson. 1991. The Seasonal Cycle of Wind-Stress Curl in Subtropical Eastern Boundary Current Regions. *J. Phys. Oceanog.* 21(12):1815-1834.
- Chin T.M., Vazquez J., Armstrong E., Mariano A. (2010). Algorithm Theoretic Basis Document: Multi-scale, motion-compensated analysis of sea surface temperature Version 1.1. Algorithm Theoretical Basis Document, NASA, 13p.
- Cushman-Rosin B., Beckers J. M. (2009). *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Physical and Numerical Aspects.* Academic Press.
- Durazo R., Gaxiola-Castro G., Lavaniegos B., Castro-Valdez R., Gómez-Valdés J., Mascarenhas A. Da S. (2005). Condiciones oceanográficas frente a la costa occidental de Baja California, 2002-2003: Influencia débil y del incremento de agua subártica. *Ciencias Marinas*, 31(3):537-552. 2005.
- Durazo R., Ramírez-Manguilar AM., Miranda LE., Soto-Mardones LA. (2010) *Climatología de variables hidrográficas. Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas en la Corriente de California.* ISBN: 978-607-7908-30-2

- García C., Joaquín, José M. Robles P., Paula Pérez B., Julio Candela P. y Manuel López M. (2009). Datos de CTD de la región frente a la Bahía de Todos Santos, Baja California. Campaña BTS3. Abril 4 a 7 de 2008. B/O Francisco de Ulloa. Informe Técnico. Departamento de Oceanografía Física, CICESE 113 (PA: 88503).
- García Cordova, J. A., Jimenez Dominguez A., Perez Brunius P. y Garcia Mendoza E. (2013) Datos de CTD de la región de la Bahía de Todos Santos, Baja California. Campaña BTS10, octubre 28 a 30 de 2010. B/O Francisco de Ulloa. Se muestran los datos de 83 lances de CTD realizados del 28 al 30 de octubre de 2010, en la campaña oceanográfica BTS10, a bordo del B/O Francisco de Ulloa. Las observaciones se hicieron en cinco líneas de estaciones situadas dentro de la Bahía de Todos Santos, B. C. y en seis afuera frente a las entradas noroeste y suroeste, así como mar afuera de Punta Banda. Se describe la adquisición y procesamiento de los datos de presión, temperatura, conductividad (salinidad) y oxígeno disuelto. Los datos procesados de cada lance se muestran por línea de muestreo en perfiles transversales de las series completas de datos (cada decibar). pp. 29 (PA: 106183).
- Graham W. M. (1993). Spatio-Temporal Scale Assessment of an “Upwelling Shadow” in Northm Monterey Bay, California. *Estuarines* Vol. 16. No. 1, p. 83-91.
- Graham WM, Largier JL. (1997). Upwelling shadows as nearshore retention sites: The example of northern Monterey Bay. *Cont. Shelf Res.* 17: 509–532.
- Larrañaga M. J. (2013) Variabilidad de la circulación superficial en la Bahía Todos Santos, Baja California, México.
- Lynn, R. & Simpson, J. (1987). The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92, 12,947–12,966. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas.
- Mateos E., Marinone S. G., Parés-Sierra A. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B. C. Mexico. *Ocean Modelling* 27, p. 107-112.
- Mateos Farfán, E. (2010). Modelación de la circulación costera estacional en la región norte de Baja California y sur de California y de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Doctor. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Miranda B. L. (2012). Caracterización de las corrientes en las entradas y alrededores de la Bahía Todos Santos. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

- Monteiro P. M. S., Largier J. L. (1999). Thermal Stratification in Saldanha Bay (South Africa) and Subtidal, Density driven Exchange with the Coastal Waters of the Benguela Upwelling System. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 877-890.
- Pérez-Brunius, P., M. López, A. Parés-Sierra and J. Pineda (2007). Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *CalCOFI Reports*, 48, 204-214.
- Piñones A., Castilla JC., Guíñez R., Largier JL. (2007). Temperaturas superficiales en sitios cercanos a la costa en l Bahía de Antofagasta (Chile) y centros de surgencia adyacentes. *Ciencias Marinas* 33(1):37-48.
- Trainer R., Adams V.L., Bill N.G., Stehr B.D., Wekell C.M., Moeller J.C., Busman P., Woodruff M. (2000). Domoic acid production near California coastal upwelling zones, June 1998. *Limnol. Oceanogr.* 45, 1818–1833.
- Woodson, C. B., L. Washburn, J. A. Barth, D. J. Hoover, A. R. Kirincich, M. A. McManus, J. P. Ryan, and J. Tyburczy (2009), Northern Monterey Bay upwelling shadow front: Observations of a coastally and surface-trapped buoyant plume, *J. Geophys. Res.*, 114, C12013, doi: 10.1029/2009JC005623.