

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**SIMULACIÓN NUMÉRICA 3D DE LA HIDRODINÁMICA DE
BAHÍA SAN QUINTÍN Y SU INFLUENCIA EN LA
DISTRIBUCIÓN DE NITRATO**

T E S I S

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

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA:

REBECA ZERTUCHE CHANES

ENSENADA, B.C., MÉXICO

ENERO DEL 2016

RESUMEN

Bahía San Quintín (BSQ) es una laguna costera hipersalina en forma de “Y” que se localiza en la costa del noroeste de México, cuenta con un brazo al oeste conocido como Bahía Falsa (Bf), y un brazo al este conocido como Bahía San Quintín (Bsq). BSQ se distingue por su alta productividad al contar con una presencia extensa de pastos marinos, macroalgas, fitoplancton y surgencias casi permanentes en la cercanía de su boca. La geomorfología de ambos brazos los separa y origina diferencias importantes en los procesos físicos y biológicos más relevantes. En este trabajo se presentan y discuten los resultados de una simulación numérica en 3D que describe la hidrodinámica general de BSQ, así como la relación entre la dispersión de nitrato por procesos físicos y el efecto de la presencia de fitoplancton mediante el acoplamiento del modelo hidrodinámico a uno de calidad de agua. Con respecto a la hidrodinámica se describe la circulación en el interior de BSQ de acuerdo a la variabilidad de la marea, tiempos de residencia y dispersión de temperatura y salinidad. Así mismo, se presentan los resultados de los flujos residuales en la boca en donde se define una dinámica de estuario inverso con flujos de entrada por las regiones someras y flujos de salida por las regiones profundas. La hidrodinámica que influye en la dispersión de nutrientes dentro de BSQ depende del bombeo de marea; flujo y reflujo en la boca. Mediante el acoplamiento de modelos numéricos (hidrodinámico y biogeoquímico), se realizaron diversos escenarios de modelación utilizando el nitrato como trazador. Se encontró que la incursión y dispersión del trazador presenta una variabilidad espacial y temporal que depende de los cambios en la marea diurna y quincenal. En escenarios de simulación con marea viva la incursión del trazador cubrió más del 70% del canal central y el 50% de Bf manteniendo su concentración relativa mayor a 0.5. Mientras que durante mareas muertas la incursión del trazador se limitó al área de la boca y parte del canal central con incursiones esporádicas hacia Bf. En el brazo *este*, la incursión del trazador por forzamiento de marea fue casi nula, por lo que se cree que la presencia de nitrógeno en esta región tiene una mayor dependencia al reciclado por bacterias y la presencia de amonio.

Palabras clave: *Bahía San Quintín, Simulación numérica 3D, hidrodinámica, nitrato*

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

**SIMULACIÓN NUMÉRICA 3D DE LA HIDRODINÁMICA DE
BAHÍA SAN QUINTÍN Y SU INFLUENCIA EN LA
DISTRIBUCIÓN DE NITRATO**

TESIS

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

MAESTRO EN CIENCIAS

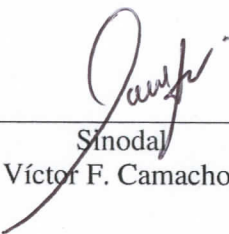
PRESENTA:

REBECA ZERTUCHE CHANES

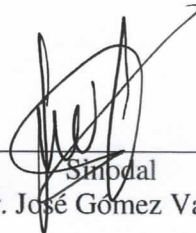
APROBADA POR:



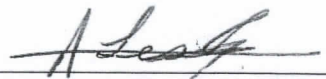
Director de Tesis
Dr. Xavier Flores Vidal



Sinodal
Dr. Víctor F. Camacho Ibar



Sinodal
Dr. José Gómez Valdés



Sinodal
Dra. Leslie Aveytua Alcázar

Enero del 2016

DEDICATORIA

Al tío Memo...



AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis Dr. Xavier Flores-Vidal por sus revisiones y comentarios, así como por el apoyo para la realización de estancias en el extranjero y participación en congreso.

Y a mis sinodales Dr. Víctor Camacho-Ibar y Dr. José Gómez-Valdés, por sus enseñanzas, su paciencia, revisiones y sugerencias además de un apoyo incondicional. Y en especial a la Dra. Leslie Aveytua-Alcázar por ser una excelente asesora con la disposición de ayudarme en todo momento (aunque se nos crucen los horarios!), por sus lecciones de vida, de trabajo, por creer en mí, y más que nada por su amistad y los buenos momentos.

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

A la Dra. Clelia Luisa Marti y al Dr. Jorg Imberger por aceptarme como estudiante durante una estancia en el Centro de Estudios del Agua (CWR) de la Universidad del Oeste de Australia (UWA). Por su ayuda, sus sugerencias, revisiones y enseñarme nuevas herramientas.

Al Dr. Cosimo Solidoro por aceptarme en una estancia de Investigación en el Instituto Nacional de Oceanografía y Geofísica Experimental (OGS).

A María, Verena, Diego, Eric, Marco, Igor, Ekin y Valeria por su amistad y apoyo durante las estancias en el extranjero, por enseñarme que a pesar de la distancia siempre están ahí y dispuestos a ayudar y hacerme sonreír.

A mis compañeros de posgrado por compartir experiencias y consejos, en especial a Emiliano, “El Compaye”, Arturo y Paulette por las tardes de desvelo, compañía y apoyo entre amigos que siempre supieron como alegrarme los días.

A mis papás, que estuvieron apoyándome siempre y motivándome a superar obstáculos, por su amor incondicional.

A todas las personas que de manera indirecta o indirecta me apoyaron para la realización de este trabajo.

A todos, ¡Muchas gracias!

CONTENIDO

Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tablas	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO.....	5
2.1 Objetivos particulares.....	5
3. ANTECEDENTES.....	6
3.1 Hidrodinámica (procesos físicos) de Bahía San Quintín.....	6
3.2 Variabilidad de nutrientes y su relación con procesos físicos.....	7
4. ÁREA DE ESTUDIO.....	10
5. METODOLOGÍA.....	13
5.1 MODELOS.....	14
5.1.1 Descripción de ELCOM.....	14
5.1.2 Descripción de CAEDYM.....	15

5.1.3 Acoplamiento de Modelos.....	21
5.2 SIMULACIÓN.....	22
5.2.1 Batimetría Condiciones de Frontera y Calibración.....	22
5.2.3 Forzamientos físicos.....	26
5.2.4 Forzamientos biogeoquímicos.....	31
5.2.5 Transectos.....	33
5.2.6 Periodo de Simulación y salidas del modelo.....	33
5.2.7 Tiempo de residencia.....	34
5.2.8 Simulación de trazadores conservativos.....	34
5.2.9 Simulación de nitrato con CAEDYM.....	35
5.3 VALIDACIONES ELCOM.....	36
5.3.1 Magnitud y dirección de corrientes.....	36
5.3.2 Circulación termohalina.....	38
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
6.1 Validación.....	39
6.1.1 Validación de la hidrodinámica.....	39
6.1.2 Validación de la circulación termohalina	42
6.2 Hidrodinámica de Bahía San Quintín.....	47
6.2.1 Circulación residual.....	47
6.2.2 Dinámica en la boca.....	54

6.3 Dinámica termohalina de Bahía San Quintín.....	59
6.4 Tiempo de residencia.....	64
6.5 Relación de la dispersión de nitrato con la hidrodinámica de BSQ.....	66
6.5.1 Dinámica del Nitrato como trazador.....	66
6.5.2 Dinámica de un trazador.....	68
6.5.3 Procesos físicos vs. procesos biogeoquímicos.....	69
7. CONCLUSIONES.....	76
8. Literatura citada.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

1.-	Localización de Bahía San Quintín, Baja California, México	... 10
2.-	Esquema de la dinámica del fitoplancton en CAEDYM obtenido de (Hannoun et al., 2006)	... 17
3.-	Ciclo del nitrógeno en un ecosistema acuático similar a BSQ. Esquema obtenido y modificado de http://wetlandinfo.ehp.qld.gov.au/	... 20
4.-	Organización del acoplamiento de ELCOM	... 22
5.-	Batimetría y recorrido para la realización de ésta reportada por Flores-Vidal (2006).	... 23
6.-	Malla del dominio del área de estudio y resultado de la interpolación de la batimetría. Se aprecia la resolución espacial en la dimensión horizontal (resolución de 100 x 100m). Con una barra de color verde se indica la posición de la frontera abierta en la parte inferior del dominio. Con barras de color amarillo se indica la posición de los transectos que definen los canales profundos y la boca	... 24
7.-	Diagrama ilustrativo que representa la resolución vertical (resolución variable de 0.5 m dentro de BSQ y de 10 m en la parte más externa del dominio).	... 25
8.-	Variabilidad temporal de la marea astronómica aplicada como forzamiento en la frontera abierta.	... 26

- 9.- Variabilidad de los forzamientos atmosféricos obtenidos de la estación ... 27
meteorológica de San Quintín, “La Chorera”.
- 10.- Posición de perfiles iniciales de temperatura, salinidad y variables ... 28
biogeoquímicas (NO₃, PO₄, NH₄, SiO₂, DOCL, DONL) (◇). La biomasa de
fitoplancton (Δ). Posición de mediciones de CTD en una línea con puntos (-o)
y posición de un ADCP (□), ambas para la validación de temperatura y
salinidad, y corrientes respectivamente. Con una estrella de color amarillo se
indica la posición de la estación meteorológica “La Chorera”
- 11.- Variación diaria y mensual del índice de surgencia de acuerdo a la NOAA ... 30
para el año 2004.
- 12.- Perfiles para definir los cambios en el tiempo de las condiciones de ... 30
temperatura y salinidad de la columna de agua en la frontera abierta del
dominio.
- 13 Perfiles de nitrato para definir los cambios en la frontera abierta del dominio ... 32
- 14.- Esquema del anclaje en el interior de la Bahía. (Modificado de ... 57
<http://www.oceanecology.ca/>).
- 15.- Validación de la componente U y variación del nivel del mar entre los datos ... 59
medidos por el ADCP (azul) y los datos de ELCOM (rojo) de un periodo de
tiempo.
- 16.- Validación de la componente V y variación del nivel del mar entre los datos ... 40
medidos por el ADCP (azul) y los datos de ELCOM (rojo) de un periodo de
tiempo.
- 17.- Validación de la componente V y variación del nivel del mar entre los datos ... 41

medidos por el ADCP (azul) y los datos de ELCOM (rojo) de un periodo de tiempo.

- 18.- Validación de temperatura superficial entre los valores reportados por ... 43
Camacho-Ibar et al. (2007) y los obtenidos por ELCOM.
- 19.- Validación de salinidad superficial entre los valores reportados por Camacho- ... 43
Ibar et al. (2007) y los obtenidos por ELCOM.
- 20.- Validación de temperatura (A y C) y salinidad (B y D) en la columna de agua ... 45
del brazo oeste (Bf). Comparación de los valores obtenidos por los lances de
CTD reportados por Durazo-Arvizu (C y D) y los valores obtenidos por
ELCOM (A y B).
- 21.- Validación de temperatura (A y C) y salinidad (B y D) en la columna de agua ... 46
del brazo este (Bsq). Comparación de los valores obtenidos por los lances de
CTD reportados por Durazo-Arvizu (C y D) y los valores obtenidos por
ELCOM (A y B).
- 22.- Magnitud de las corrientes residuales para todo el periodo de simulación en la ... 48
superficie (A) y fondo (B)
- 23.- Magnitud de las corrientes residuales promedio de la columna de agua. ... 49
- 24.- Magnitud de las corrientes promedio en la columna de agua en condiciones ... 50
de marea muerta (A y B) y marea viva (C y D) en flujo (B y D) y reflujo (A y
C).
- 25.- Representación de celdas “secas” o expuestas (A) e inundadas (B) de acuerdo ... 52
a la variación en el nivel del par (pleamar y bajamar respectivamente)

26.-	Presencia de remolinos esporádicos a lo largo de la simulación.	... 54
27.-	Flujos residuales perpendiculares a la boca de BSQ representados por las velocidades de la componente V para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).	... 56
28.-	Variabilidad quincenal de los flujos perpendiculares a la boca de BSQ representados por la componente V. En el panel (A) se muestra el residual de 5 días en periodos de marea viva y en el panel (B) el residual de 5 días en periodos de marea muerta.	... 57
29.-	Variabilidad diurna de los flujos perpendiculares a la boca de BSQ representados por la componente V. En el panel (A) se muestran las condiciones de pleamar y bajar en marea viva, y en el panel (B) se muestran en condiciones de marea muerta.	... 58
30.-	Variabilidad de salinidad (A) y temperatura (B) residual de todo el periodo de simulación (63 días).	... 59
31.-	Variabilidad quincenal de salinidad (A y B) y temperatura (C y D) para condiciones de marea viva (A y C) y marea muerta (B y D).	... 61
32.-	Temperatura residual promedio en el canal profundo de Bahía Falsa para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).	... 62
33.-	Salinidad residual promedio en el canal profundo de Bahía Falsa para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).	... 62
34.-	Temperatura residual promedio en el canal profundo de Bahía San Quintín para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).	... 63
35.-	Salinidad residual promedio en el canal profundo de Bahía San Quintín para	... 63

todo el periodo simulado (Mayo-Junio).

- 36.- Mapa de tiempo de residencia para las distintas zonas del área de estudio. ... 65
- 37.- Relación entre la concentración de nitrato NO_3 y la temperatura en la región de la boca de BSQ. ... 67
- 38.- Simulación de la incursión de un trazador hacia el interior de BSQ bajo condiciones de pleamar en marea muerta (A) y marea viva (B). ... 68
- 39.- Simulación de la incursión de un trazador hacia el interior de BSQ bajo condiciones de un aporte de concentración constante desde la frontera abierta (A) y un aporte de concentración variable (B). ... 70
- 40.- Simulación de la incursión del nitrato hacia el interior de BSQ bajo condiciones de un aporte de concentración constante desde la frontera abierta (A) y un aporte de concentración variable (B). ... 71
- 41.- Concentración promedio en la columna de agua de nitrato y trazadores para ambos escenarios en las distintas zonas de BSQ. ... 72

ÍNDICE DE TABLAS

I.-	Variables y procesos de CAEDYM dentro del ciclo del nitrógeno, así como las variables de estado incluidas en la simulación.	... 20
II.-	Parámetros para definir al grupo funcional del fitoplancton incluido en la simulación.	... 31
III.-	Descripción del ADCP utilizado por Angulo-Larios (2006).	... 57

1. INTRODUCCIÓN.

En los últimos años, debido al rápido desarrollo de las ciencias computacionales, la aplicación de los modelos numéricos se ha extendido en casi todas las áreas de la ciencia, convirtiéndose así, en una herramienta importante para el análisis de los procesos y fenómenos naturales. Un modelo numérico es una representación teórica de dichos fenómenos, lo que permite una mejor comprensión y estudio a diferentes escalas tanto espaciales como temporales. De esta manera, en la actualidad la mayor parte de los trabajos complementan los análisis tradicionales con la aplicación de modelos numéricos para encontrar explicaciones de una gran diversidad de fenómenos.

El estudio de todos los procesos dentro de los ecosistemas marinos requiere de la integración de la física y la biogeoquímica. Los ecosistemas marinos y estuarinos interactúan para formar un sistema en el cual tienen lugar el intercambio de materia y energía (Sámano-Celorio, 2011). Los procesos biológicos como la fotosíntesis y la asimilación de nutrientes están afectados por las variables físicas como la temperatura y la luz. Por otra parte el transporte de nutrientes y partículas orgánicas, así como los flujos difusivos a través del sedimento están influenciados por procesos físicos como las corrientes de marea y la turbulencia.

El efecto de la biología de un ecosistema costero ante un forzamiento físico puede ser evaluada analizando los procesos biofísicos resultantes. Cambios en un ecosistema costero, pueden inferirse evaluando la respuesta dinámica del sistema ante la presencia de elementos, compuestos o energías anómalas. Bajo este contexto se pueden cuantificar situaciones como las siguientes: balance de procesos bioquímicos e hidrodinámicos, efectos de una señal antropogénica, la contribución costera al balance oceánico de compuesto como el CO₂ entre otros (Jiménez-Hernández, 2005). Los modelos ecológicos se comenzaron a utilizar con la finalidad de entender a los ecosistemas como un sistema completo más que como una serie de componentes aislados, sin embargo estos adquirieron poca reputación debido a su complejidad y costo (Aveytua-Alcázar et al., 2008).

La importancia ecológica de lagunas costeras y estuarios resulta de su alta productividad, su capacidad de constituir hábitats de crianza, alimentación o refugio de diversas especies de

invertebrados, peces y aves, residentes o dependientes de estos hábitats en alguna fase de su ciclo de vida. La importancia económica radica en que sostienen pesquerías, acuicultura, turismo y otras actividades productivas (por ejemplo, explotación de sal y movimiento de carga marítima) que impulsan desarrollos urbanos y portuarios (Arreola-Lizárraga et al., 2008).

En la actualidad existe un creciente interés de la comunidad científica por conocer y explicar la complejidad y dinámica de las lagunas costeras en nuestro país. Entre otras cosas, se buscan métodos para el manejo adecuado de la zona, prevención y remediación de los efectos de la contaminación en estas áreas (Angulo-Larios, 2006; Lara-Lara et al., 2008).

La Bahía de San Quintín (BSQ) es una de las lagunas más importantes del Pacífico de Baja California y se caracteriza por ser una zona de alta productividad acuícola, debido a la presencia extensa de pastos marinos, macroalgas y fitoplancton, y por presentar surgencias casi permanentes en la cercanía de su boca (Rosales-Casián, 1996). Es considerada como un sistema heterótrofo, lo cual implica que el metabolismo neto de este sistema está dominado por los procesos de respiración u oxidación de la materia orgánica (Aveytua-Alcázar, 2002; Camacho-Ibar et al., 2003; Ortiz-Hernández, 2006).

La actividad acuícola del cultivo de ostión japonés (*Crassostrea gigas*) inició en BSQ desde mediados de los 70's y es ahora el recurso económico más importante de los pescadores de la región (Monreal & Salas-de-León, 1990; Aguirre-Muñoz et al., 2001; Zertuche-González et al., 2009). Para el sector acuícola es prioritario mantener en buen estado los espacios en donde realizan la ostricultura, sobre todo el estado sanitario del agua, el cual está certificado por la Secretaría de Salubridad, condición que les autoriza exportar el producto cultivado a Estados Unidos (Delgado-González, 2010). En estos cultivos, el alimento parece ser el principal factor que limita el crecimiento de los organismos y éste a su vez, se encuentra limitado por la disponibilidad de nutrientes y la cantidad de luz (Aguirre-Muñoz et al., 2001). La presencia de los nutrientes en la columna de agua promueve el desarrollo tanto de fitoplancton como de macroalgas y pastos marinos (Camacho-Ibar et al., 2007).

Los nutrientes en BSQ provienen principalmente del océano adyacente (Camacho-Ibar et al., 2003), de los mismos cultivos de ostión (Hernández-Ayón et al., 2004) y del reciclado por bacterias, dado que los vertidos de desechos orgánicos e inorgánicos asociados con la presencia humana o escurrimiento de las zonas agrícolas son mínimos o nulos. Por lo tanto, se cree que la distribución de la concentración de nutrientes a lo largo de la laguna depende de la hidrodinámica interna (Camacho-Ibar et al., 2003; Delgado-González, 2010).

Las surgencias costeras son fenómenos oceanográficos que generan alta productividad debido a que una de sus características es la alta concentración de nutrientes. Se generan cuando el viento sopla sobre la superficie oceánica y provoca un desplazamiento horizontal del agua superficial, la cual es reemplazada por agua subsuperficial fría y rica en nutrientes que favorece florecimientos fitoplanctónicos (Lara-Lara et al., 1980; Millán-Núñez et al., 1982; García-Esquivel et al., 2004).

Conforme la surgencia pasa, se presentan periodos de relajación donde los organismos expuestos a la luz asociados con las altas concentraciones de nutrientes, incrementan su fotosíntesis y se dividen rápidamente. En esta fase puede ocurrir que los nutrientes se agoten y que organismos pequeños como las bacterias comiencen a usar los nutrientes regenerados. Este ciclo, desde la surgencia hasta el agotamiento de nutrientes, puede ocurrir en un periodo de 5-7 días (Wilkerson et al., 2006 en Frias-Velasco, 2009).

En el interior de la bahía, la hidrodinámica que influye en mayor medida a la dispersión de nutrientes se rige por el forzamiento de la marea (flujo y reflujo en la boca), y el esfuerzo del viento (Monreal & Salas-de-León, 1990; Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006; Delgado-González, 2010; Vidal-Juárez, 2014). Se ha observado que la concentración total de clorofila *a* (Chl-*a*) en el interior de BSQ está asociada a la marea principalmente; la mayor abundancia de fitoplancton se presenta con la marea en flujo y viceversa (Lara-Lara et al., 1980; Millán-Núñez et al., 1982; Millán-Núñez et al., 2004).

Por otro lado, las macroalgas juegan un papel importante en la productividad y en el ciclo de los nutrientes, ya sea como suministro o sumidero por almacenamiento (Zertuche-González et al., 2009). Durante un periodo de primavera típico, la especie de macroalga *Ulva* spp. representó el 57% del total de productividad primaria en biomasa, mientras que

las hojas de los pastos marinos *Z. marina* un 40% y un 3% por fitoplancton (Aveytua-Alcázar et al., 2008). Hanisak (1993) sugirió la posibilidad de que las algas en descomposición contribuyeran como fuente de nitrógeno en las aguas costeras, aun cuando la magnitud de este mecanismo como fertilizante todavía no se ha cuantificado (Zertuche-González et. al., 2009).

Debido a la complejidad en el comportamiento hidrodinámico y los procesos biogeoquímicos que ocurren dentro de la BSQ, es necesario no sólo explicar estos procesos de manera independiente, sino relacionarlos entre sí para identificar las interacciones entre ellos, y de esta forma tener un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema. La disponibilidad de nitrógeno nuevo (nitrato) es uno de los factores principales que determinan tanto la variación estacional de la productividad del sistema (Mayo-Junio vs. Septiembre-Octubre) como la distribución espacial de los stocks de carbono en BSQ (Camacho-Ibar et al., 2007).

A la fecha, el uso de modelos numéricos para la descripción de la hidrodinámica de BSQ se limita a modelos hidrodinámicos de una dimensión (Del Valle, 1979; Monreal, 1980; Ocampo-Torres, 1980) y modelos de dos dimensiones (Jiménez, 2005). Los trabajos con modelos 3D se han enfocado en la descripción de procesos específicos como la validación y calibración de velocidades y cambios en el nivel del mar (García et al., 2015), y la influencia de los remolinos y procesos de mezcla en la región de la boca (Vidal-Juárez, 2014), ambos por medio del modelo Delft3D.

El propósito de este estudio es describir la hidrodinámica de BSQ con un modelo numérico 3D que incluye la hidrodinámica dentro de la bahía, la dinámica en la boca, la descripción termohalina y los tiempos de residencia. Además, mediante el acoplamiento de un modelo biogeoquímico de calidad del agua, se pretende explicar la relación entre la hidrodinámica y la dispersión de nitrato dentro de la bahía.

2. OBJETIVO

Identificar y describir los mecanismos físicos dominantes en la distribución de nitrato dentro de Bahía San Quintín (BSQ)

2.1 Objetivos particulares.

- Describir mediante un modelo numérico 3D la hidrodinámica en el interior de Bahía San Quintín, i.e. incursión de la marea, efecto en periodos de surgencias, tiempos de residencia, y flujos residuales entre la bahía y el océano adyacente.
- Describir mediante un modelo numérico 3D la dispersión de un trazador en el interior de BSQ, proveniente desde la frontera abierta, que represente al nitrato en dos escenarios: (1) donde la concentración del trazador se mantenga constante a lo largo del tiempo y (2) donde la concentración del trazador sea variable (un escenario en presencia de surgencia al inicio y condiciones sin surgencia al final del periodo).
- Describir mediante el acoplamiento de modelos numéricos (hidrodinámico y biogeoquímico) la dispersión del nitrato en el interior de BSQ proveniente desde la frontera abierta en dos escenarios: (1) donde la concentración del nitrato se mantenga constante a lo largo del tiempo y (2) donde la concentración del nitrato sea variable (un escenario en presencia de surgencia al inicio y condiciones sin surgencia al final del periodo)

3. ANTECEDENTES

3.1 Hidrodinámica de Bahía San Quintín

El estudio de la hidrodinámica de Bahía San Quintín cobró auge alrededor de los años 80's. En diversos estudios se utilizaron herramientas como modelos numéricos y analíticos, con los cuales se identificó a la marea como uno de los principales forzantes de la circulación, seguido por el esfuerzo del viento y la batimetría.

Los primeros estudios reportaron corrientes de marea cercanas a la boca del orden de 1 m/s, mismas que disminuían hacia el interior de la bahía debido a la fricción con el fondo (Ocampo-Torres, 1980). Algunos trabajos cuantificaron el efecto del viento (Monreal-Gómez, 1980, 1990), mientras que otros (Juárez, 1982) notaron dos dinámicas diferentes entre el brazo *este* y el brazo *oeste*, así como la influencia de la batimetría. Juárez (1982) encontró que el brazo *este* es mayormente influenciado por la fricción en el fondo y la variación del viento en comparación con el brazo *oeste*, estos resultados fueron mencionados anteriormente por Del Valle-Lucero (1979) quién al intentar simular la dinámica del brazo *este*, encuentra dificultades que él asocia a la compleja batimetría de BSQ compuesta por canales constrictos hasta la cabeza.

Asimismo, se ha reportado que las aguas en la bahía tienden a ser menos densas hacia la cabeza que en la boca, lo que sugiere que el proceso de calentamiento-enfriamiento domina sobre el de evaporación (Plasencia-Díaz, 1980). La variabilidad espacial de la temperatura se ha relacionado con los tiempos de residencia y las condiciones del mar adyacente, que a su vez, se relacionan con el flujo y reflujos por las mareas (Álvarez-Borrego & Álvarez-Borrego, 1982).

En cuanto estimaciones sobre el tiempo de residencia, existen diversos trabajos en donde por medio de modelos de caja con balances de agua y sal (Camacho-Ibar et al., 2003; Hernández-Ayón et al., 2004; Hernández-López, 2010), y por medio de un modelo bidimensional forzado por viento y marea (Jiménez, 2005), sugieren tiempos de residencia del orden de tres a cinco días para el brazo *oeste* y del orden de 10 a 15 días en el brazo *este* para periodos de primavera-verano. En cuanto al tiempo de residencia para toda la bahía, Hernández-Ayón et al. (2007) sugieren un tiempo de 24 días en condiciones de marea

muerta y 16 días en condiciones de marea viva. Camacho-Ibar et al. (2003) reportan un tiempo total de 26 días para invierno y 13 días para verano.

Estudios recientes reportan que en la boca de la laguna las corrientes residuales en superficie son de alrededor de 0.1 m/s con dirección NNW, mientras que en el interior de la bahía alcanzaron velocidades de 0.18 m/s en superficie con dirección ENE (Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006). Flores-Vidal (2006) describió una circulación de dos capas, en donde el forzamiento del viento domina la capa superficial y la marea domina la capa de fondo. La dinámica en la boca se caracteriza por un flujo residual de entrada por la zona profunda (*oeste*) y un flujo de salida por la parte somera (*este*) (Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006; Valle-Levinson et al., 2008). De acuerdo con la teoría por Valle-Levinson et al. (2003), la dirección y ubicación de estos flujos en la boca, sugiere que los efectos viscosos son más importantes que los efectos de la rotación de la tierra y sustentan a la dirección de los flujos en la boca.

Vidal-Juárez (2014), mediante un modelo Delft3D, probó que la presencia periódica de dipolos en la región cercana a la boca, la mezcla por marea y el bombeo por marea, optimizan la renovación de agua entre BSQ y el mar abierto. La formación de los giros o dipolos se ha asociado a efectos con el fondo y la influencia del viento a distintas escalas temporales y espaciales (Martori-Oxamendi, 1989).

3.2 Variabilidad de nutrientes y su relación con procesos físicos.

En BSQ se han realizado estudios en los que se ha observado la influencia de procesos físicos sobre diversos parámetros químicos, así como en la variación de los periodos productivos (ej. ver Lara-Lara et al., 1980; Millán-Núñez et al., 1982; Camacho-Ibar et al., 2003; Jiménez-Hernández, 2005; Moreno-Miranda, 2007; Rodríguez-Cardozo, 2007; Camacho-Ibar et al, 2007; Aveytua-Alcázar et al., 2008; Hernández-López, 2009; Frías-Velasco, 2009). Los estudios se han realizado en diferentes escalas de tiempo y espacio, con el objetivo común de conocer y estudiar los principales procesos internos y externos que rigen el funcionamiento de la laguna.

Mediante un modelo numérico Jiménez-Hernández (2005) mostró que la hidrodinámica controla un 30% de la productividad primaria de BSQ y que es la advección de las corrientes la principal característica que contribuye a este porcentaje.

El aporte de nutrientes hacia el interior de BSQ es principalmente debido al forzamiento de marea (o corrientes de marea) (Millán-Núñez et al., 1989; Aveytua-Alcázar et al., 2008). Las mayores concentraciones de estos nutrientes provienen del océano adyacente durante periodos de surgencia y son relevantes para determinar la estacionalidad del fitoplancton, macroalgas y pastos marinos (Camacho-Ibar et al., 2003; Aveytua-Alcázar et al., 2008), además de tener una influencia en el sector acuícola (Hernández-Ayón et al., 2004) en donde existe una correlación negativa en la que el tiempo de cultivo disminuye cuando el índice de surgencia acumulado aumenta (Rodríguez-Cardozo, 2007).

El frecuente aporte de nutrientes por las surgencias favorece al desarrollo de la biomasa de fitoplancton y macroalgas del sistema. Tan pronto entra a la bahía el agua rica en nitratos, los productores primarios que habitan cerca de la boca consumen de la columna de agua la mayoría de este nutrimento. En los periodos en los que el nitrato (NO_3) es escaso, predomina el amonio (NH_4); esto indica que probablemente la comunidad de productores primarios sostiene sus requerimientos de nitrógeno (N) con una contribución importante de nitrógeno reciclado (Rodríguez-Cardozo, 2007).

La máxima biomasa de los pastos marinos ocurre cuando la época de surgencia es débil y el aporte de nitrato es mínimo (Aveytua-Alcázar, 2008). El intenso consumo de este nutriente cerca de la entrada del sistema, tanto por *Ulva* spp. como por el fitoplancton, origina que en el brazo *este* sus concentraciones sean permanentemente bajas, de tal manera que se crean condiciones favorables para el buen desarrollo de *Z. marina* (Camacho-Ibar et al, 2007).

La razón de carbono-nitrógeno (C/N) en el material orgánico disuelto que se encuentra en la bahía sugiere que existen cambios estacionales importantes en la calidad de la materia orgánica disuelta relacionada a la producción primaria fitoplanctónica (Rodríguez-Cardozo, 2004). Aveytua-Alcázar (2002) demostró que la intensidad de los procesos que consumen carbono orgánico disuelto (COD) en la columna de agua es superada por la intensidad de

los procesos que lo generan, y sugirió que las fuentes más importantes de COD son probablemente el fitoplancton y los pastos marinos.

En un estudio sobre la variación temporal y espacial del fitoplancton (Frias-Velasco, 2009) se identificaron tres escenarios en función a la magnitud del índice de surgencia y el calendario de mareas: (1) Surgencia Intensa-Marea Viva que se caracterizó por un incremento en la Chl-a y un afloramiento de la diatomea *Nitzschia spp.* (2) Surgencia Débil-Marea Muerta, la abundancia de diatomeas en la zona adyacente a la boca se redujo, el tiempo de residencia aumentó, y se observaron las mayores concentraciones de Chl-a; y por último, (3) Surgencia Media-Marea en transición a Viva, en donde prevalecieron condiciones de alta turbulencia, se observaron los mínimos de Chl-a dentro de BSQ y afuera de la bahía comenzaron a ser abundantes los dinoflagelados.

En el interior de la bahía se encontró que el sistema es fuente neta de fósforo y consumidor neto de nitrógeno en temporadas distintas del año (Camacho-Ibar et al., 2003; Rodríguez-Cardozo, 2004). Según los stocks de nitrógeno en fitoplancton y macrofitas, el almacenamiento de nitrógeno por el fitoplancton es menor comparado con las macrofitas; sin embargo, su contribución a la productividad primaria neta a nivel de ecosistema puede ser del mismo orden de magnitud que las macrofitas (Aveytua-Alcázar et al., 2008).

Además del almacenamiento de nutrientes por productores primarios, los sedimentos pueden actuar como sumideros y almacenar estos nutrientes dentro de la bahía. Ortíz-Hernández (2006) determinó el papel que juegan algunos procesos abióticos sedimentarios en la dinámica del fósforo inorgánico disuelto (PID), a los sedimentos superficiales de la bahía como posible almacén temporal de fósforo orgánico (PO) y la difusión molecular en los flujos totales de fósforo (P) desde el sedimento hacia la columna de agua. Sus resultados mostraron que la remoción de PID de la columna es principalmente por adsorción, efecto dominante que tendrían los sedimentos superficiales si fueran sujetos a resuspensión. Con respecto a los sedimentos como almacén temporal de P, se encontró que existe una influencia de la macro-vegetación y los tiempos de residencia (dinámica física); las concentraciones más altas de PO se presentaron en invierno en donde la producción primaria tanto de fitoplancton como de pastos marinos es menor.

4. ÁREA DE ESTUDIO

BSQ es una laguna costera hipersalina que se localiza en la costa del Pacífico de Baja California, México, entre los 30° 24' y los 30° 30' de latitud *norte* y los 115° 57' y los 116° 01' de longitud *oeste* (Figura 1).

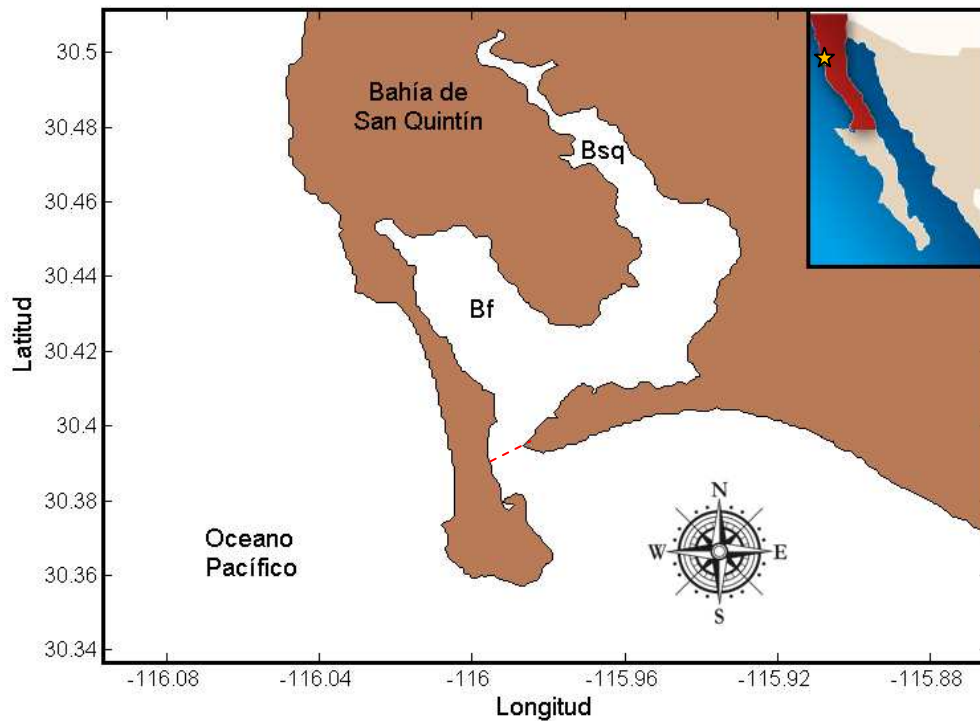


Figura 1.- Localización de Bahía San Quintín, Baja California, México

El sistema cubre un área total aproximada de 42 km² con una profundidad promedio de 2 m. Cuenta con una sola comunicación con el mar a través de una boca de no más de 1 km de ancho. BSQ es una bahía en forma de “Y”, cuenta con dos brazos: brazo *oeste* conocido como Bahía Falsa (Bf), y brazo *este*, conocido como Bahía de San Quintín o Bahía San Simón (Bsq). Ambos brazos se encuentran protegidos por barras; sin embargo, durante mareas vivas y oleaje altos, el agua puede sobrepasar la parte más angosta de la barra de Bf. Bsq tiene una forma alargada e irregular de 7 km con un ancho promedio de aproximadamente 1 km en los primeros 4 km y un adelgazamiento paulatino hacia la

cabeza. Bf tiene una forma menos irregular con dimensiones aproximadas de 5.5 km de largo por 2 km de ancho.

En BSQ se encuentra un canal de marea principal con orientación *noreste* y profundidades de hasta 15 m que se identifica a partir de la boca y que continúa hacia el extremo *este* de BSQ. A lo largo del brazo *este* discurre un canal secundario por su parte media con una profundidad máxima de ~5 m, y sobre el brazo *oeste* dos canales secundarios, uno en el extremo *oeste* de hasta 4 m de profundidad y el segundo en el extremo *este* de hasta ~6 m de profundidad. Todos los canales secundarios tienen orientación *noroeste* (Delgado-González, 2010). A los costados de los canales descritos, se encuentran planicies de marea y el sedimento que las constituye es una mezcla de arena, limos y arcillas (Daesslé et al., 2009). La región es árida en la costa y montañas con una precipitación media anual de 150 mm que ocurre en su mayoría de octubre a marzo (Camacho-Ibar et al. 2003). A lo largo del año la zona está dominada por condiciones de alta evaporación (1400 mm anuales) que convierten a BSQ en una laguna costera hipersalina (salinidad promedio de 34.7 en verano y 33.8 en invierno), por lo que existe un gradiente de salinidad al igual que de temperatura que van en aumento de la boca hacia el interior de ambos brazos (Millán-Núñez et al. 1982; Camacho-Ibar et al., 1997; Camacho-Ibar et al., 2007).

BSQ presenta características predominantes de vientos asociados a las surgencias y el sistema de brisas (Jiménez-Hernández, 2005). Los vientos favorables (del *noroeste*) para los eventos de surgencia ocurren entre primavera y verano, mientras que para los meses de otoño e invierno se caracterizan por vientos del *norte* y *noreste* que no son favorables para desarrollar surgencias.

La temperatura del agua superficial presenta una variabilidad anual entre 11-22 °C en la boca y 13-27 °C en la zona más interna de los brazos. Las mayores temperaturas se localizan al final del brazo este en el extremo norte y las menores temperaturas cercanas a la región de la boca (Álvarez-Borrego & Álvarez-Borrego, 1982; Camacho-Ibar et al. 1997; Angulo-Larios, 2006). Sin embargo, BsQ es considerada como un sistema mezclado verticalmente, es decir, que no hay gradientes verticales significativos de temperatura o salinidad en la bahía (Millán-Núñez et al., 1982; Camacho-Ibar et al., 2003).

Los rangos de marea oscilan entre 2.5 y 1.0 m en mareas vivas y muertas, respectivamente (Martori, 1989). La marea tiene un comportamiento mixto con predominancia semidiurna (Ocampo-Torres, 1980; Angulo-Larios, 2006). Los armónicos principales que rigen la marea son la M_2 , K_1 , O_1 y S_2 para un periodo de medición entre Mayo y Junio de acuerdo a las mediciones realizadas por Angulo-Larios (2006), en donde afirma que estas cuatro constituyentes contribuyen con el 95.5 % del total de la energía, siendo M_2 la dominante con un 37%. Además de estas componentes, también logra observar la presencia de las constituyentes de agua somera de la componente lunar principal como son M_4 y M_6 con menos energía, las cuales resultan de las interacciones no lineales de la marea (i.e. fricción).

La marea es el principal forzamiento que rige la hidrodinámica del agua en BSQ, explicando del 89 % al 97 % de la variabilidad de las corrientes medidas en el fondo, mientras que en la superficie explica el 70% (Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006)

5. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se aplicó un modelo numérico hidrodinámico 3D el cual fue acoplado a un modelo biogeoquímico de calidad de agua, ambos alimentados con datos obtenidos en campo. La aproximación numérica fue por medio del acoplamiento del modelo hidrodinámico ELCOM (Estuary and Lake Computer Model) y el modelo de calidad del agua CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model), ambos desarrollados por el “Center of Water Research” (CWR) de la Universidad del Oeste de Australia.

Se seleccionó ELCOM debido a que es un modelo diseñado para aguas someras, cuerpos semicerrados y que ha sido aplicado en numerosos cuerpos de agua similares a la BSQ con buenos resultados. El modelo ha sido aplicado a distintos cuerpos de agua para el estudio de la circulación, del tiempo de residencia, del transporte de sedimento y partículas, además de ser acoplado a un modelo de calidad de agua para estudios de ecología y biogeoquímica. Para mencionar algunas ejemplos: ELCOM ha sido utilizado en México en el Puerto de Ensenada dentro de la Bahía de Todos Santos (BTS) para evaluar el flujo de agua limpia y oxigenada (Coronado, 2003); en un estudio sobre la hidrodinámica de la BTS y los flujos en sus bocas de conexión (Zertuche-Chanes, 2013); en Valle de Bravo para un estudio de dispersión de partículas (Okely et al., 2010). En otros lugares del mundo como en el lago Kinneret en Israel ELCOM se ha utilizado para determinar la hidrodinámica superficial y la trayectoria de partículas (Furnans et al., 2004), del desarrollo de parches de fitoplancton y su rol en la modelación de productividad (Hillmer et al., 2008), y para modelar parches de fitoplancton y sus mecanismos de formación (Rafty, 2006), así como en Australia en el lago Burrahorang para determinar el rol del cambio climático y el desarrollo de florecimientos algales (Vilhena et al., 2009), y para determinar la calidad del agua en la cuenca Boulder de Las Vegas, EU (Hannoun et al., 2006), y en estudios sobre la hidrodinámica y biogeoquímica del norte del mar Adriático y su efecto en la dinámica de almejas en la laguna de Barbamarco, Italia (Spillman, 2006), por mencionar algunos.

ELCOM es un modelo numérico hidrodinámico tridimensional, mientras que CAEDYM es un modelo biogeoquímico de calidad de agua que utiliza a ELCOM como su “conductor”

hidrodinámico. Las salidas de la simulación hidrodinámica por ELCOM son una caracterización detallada del movimiento y la mezcla del agua, acoplada a una descripción de la estratificación de acuerdo a la termodinámica del sistema. Por otro lado, la simulación biogeoquímica (CAEDYM) da como resultado las interacciones entre los organismos vivos y la química de nutrientes de acuerdo a las condiciones de temperatura, salinidad, luz y corrientes impuestas por ELCOM. El acoplamiento de estos dos modelos provee una herramienta muy útil para el estudio espacio y temporal de las relaciones entre los procesos físicos, biológicos, y las variables químicas que puedan ocurrir en distintos cuerpos de agua (Hannoun et al., 2006).

5.1 MODELOS

5.1.1 Descripción de ELCOM

ELCOM aplica módulos termodinámicos e hidrodinámicos para simular el comportamiento temporal y espacial de cuerpos de agua estratificados sujetos a forzamientos ambientales. El método de simulación hidrodinámica resuelve las ecuaciones 3D de Navier-Stokes para fluidos incompresibles y el transporte de escalares utilizando la aproximación hidrostática y la aproximación de Boussinesq. Los algoritmos hidrodinámicos están basados en el método de Euler-Lagrange de diferencias finitas para la advección del momentum (1) con una solución de gradiente conjugado para la altura de la superficie libre (Casulli y Cheng, 1992). La advección de los escalares pasivos y activos (2) se realiza utilizando una discretización conservativa ULTIMATE QUICKEST (Leonard, 1991).

ELCOM trabaja sobre una malla cartesiana rectangular de tres dimensiones en donde Δx y Δy determinan las dimensiones en un plano horizontal y Δz en la vertical. El estencil es una malla Arakawa-C en donde las velocidades se definen en las caras de la celda y los escalares en el centro. A los bordes de la malla se les asigna una condición de frontera en donde se utilizan condiciones de deslizamiento libre (frontera abierta) en donde actúan forzamientos escalares o de no flujo (frontera cerrada), según sea el caso.

Para un espacio cartesiano con el eje x_3 o z vertical, positivo hacia arriba:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \nu_i \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_i} \right\} - \epsilon_{\alpha\beta} f U_\beta \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (C U_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + S_c \quad (2)$$

en donde η es la altura de la superficie libre, f es el parámetro de Coriolis; ν y k son los parámetros de viscosidad turbulenta y difusividad turbulenta, y S_c representa escalares. Las letras latinas distinguen a los promedio de las cantidades fluctuantes relativas a la escala de tiempo promediada, con (U, ν) representando los vectores de velocidad y (C, c) representando un escalar (*e.g.*, temperatura, salinidad o concentración de trazadores) (Hodges et al., 2000).

Se usa notación tensorial con la convención de sumas de Einstein, aplicada al espacio tridimensional para los subíndices latinos (*e.g.*, $i=1,2,3$) y al espacio horizontal de dos componentes $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 0$; $\epsilon_{12} = 1$; $\epsilon_{21} = -1$.

La evolución de la superficie libre (3) se rige por la integración vertical de la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles, aplicada a la condición cinemática de frontera (Hodges et al., 2000):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_b^\eta u_\alpha dz \quad (3)$$

en donde b es la profundidad máxima.

Según Hodges y Dallimore (2013), ELCOM es incondicionalmente estable para flujos barotrópicos y es capaz de producir resultados numéricos estables para cualquier tamaño de paso de tiempo, en donde el máximo intervalo de cálculo que puede ser utilizado, también depende de la física de los fenómenos a simular, por lo que es necesario utilizar un paso temporal adecuado para los gradientes de velocidad generados, de tal forma que éstos puedan ser aproximados adecuadamente de forma numérica.

5.1.2 Descripción de CAEDYM

El modelo ecológico CAEDYM, acoplado con el modelo hidrodinámico ELCOM, resuelve las ecuaciones de transporte para cada una de las variables involucradas en la producción primaria, ciclo de nutrientes y dinámica del oxígeno disuelto (Hillmer and Imberger, 2007).

Trabajos anteriores (Hannoun et al., 2006 agregar referencias) describen a CAEDYM como un modelo altamente sofisticado, debido a la representación de los procesos incluidos que permite analizar a diversos componentes de manera independiente, así como proveer una mejor representación de la dinámica ecológica en respuesta a perturbaciones del sistema (i.e. respuesta a estrategias de manejo).

El modelo de calidad de agua utiliza una serie de ecuaciones diferenciales ordinarias para describir los cambios en las concentraciones de nutrientes, detritus, oxígeno disuelto, la presencia de fitoplancton y zooplancton como una función de forzamiento ambiental y de interacciones ecológicas, todo esto, para cada una de las capas y paso de tiempo asignado por ELCOM.

CAEDYM es capaz de simular hasta 112 variables de estado dependiendo de la complejidad de la simulación que se pretenda utilizar, de la versión del modelo, y de la capacidad de cómputo del simulador. Entre los distintos grupos funcionales y variables de estado se encuentran las biogeoquímicas, fitoplanctónicas, de zooplancton, peces, medusas, organismos bentónicos como macroalgas, pastos marinos, bivalvos, poliquetos y crustáceos, además de metales y grupos de patógenos. Para las simulaciones, el usuario tiene la flexibilidad de seleccionar cuáles especies se incluyen en la simulación (Hannoun et al., 2006).

Para este caso de estudio, se realizó una primera aproximación en donde sólo se utilizó el grupo funcional de fitoplancton como biomasa en BSQ, con un énfasis en su rol en el ciclo del nitrógeno, en particular con el nitrato como se menciona anteriormente.

A continuación se describen los módulos biogeoquímicos que componen a CAEDYM y que se incluyen en el presente trabajo, haciendo énfasis en los procesos y ciclos que considera y verifica durante la simulación.

Módulo Biológico (fitoplancton)

La biomasa del fitoplancton es representada en términos de Chl-a. La tasa de cambio de la Chl-a puede ser un indicador de fuente de biomasa por aporte externo y crecimiento, y como sumidero en términos de mortalidad y consumo (pastoreo) por zooplancton principalmente (Figura 2). CAEDYM calcula el crecimiento de fitoplancton por medio de la multiplicación de la tasa de crecimiento potencial máxima por factores limitantes. El primer factor limitante es el crecimiento dependiente de la temperatura del agua, mientras que el segundo considera la presencia de radiación solar y el almacenamiento dentro de los ciclos de nutrientes. El consumo de los nutrientes por fitoplancton es regulado por el máximo nivel de almacenamiento (Hannoun et al., 2006).

Tasa de crecimiento, μg_a (día⁻¹):

$$\mu g_a = \mu MAX_a \min[f(I)_a, f(N)_a, f(P)_a, f(Si)_a] f_{Aa}^{T1}(T) \quad (4)$$

En donde $f(I)_a$, $f(N)_a$, $f(P)_a$ y $f(Si)_a$ representan la limitación por la luz, nitrógeno, fósforo y sílice (para el caso de diatomeas) respectivamente, f_{Aa}^{T1} define a la función de la temperatura y μMAX es la tasa de máximo crecimiento a 20 °C en la ausencia de una limitación significativa de la luz o los nutrientes.

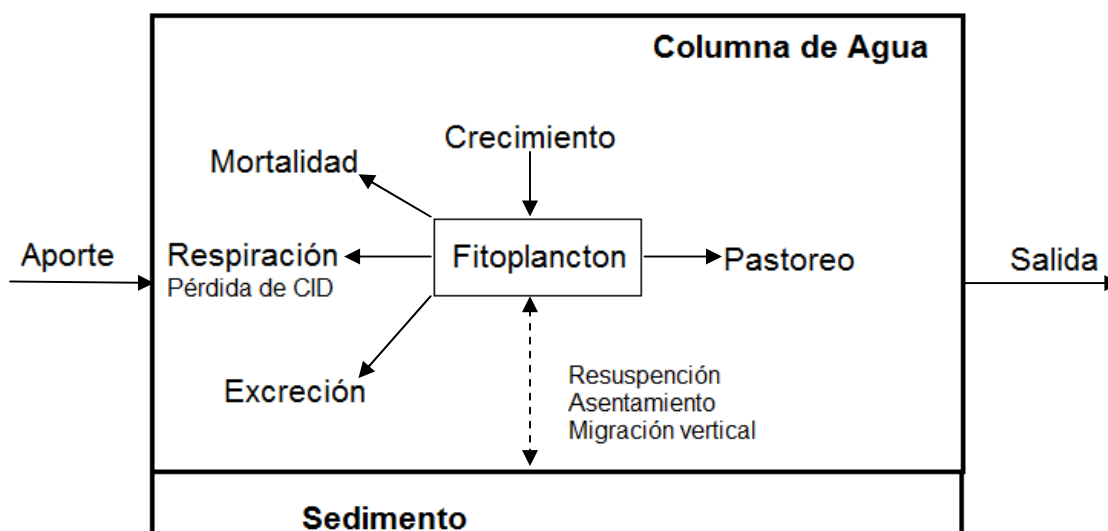


Figura 2.- Esquema de la dinámica del fitoplancton en CAEDYM obtenido de (Hannoun et al., 2006).

Ya que el presente trabajo es una primera aproximación, es importante mencionar que en escenarios reales, las concentraciones de fitoplancton a su vez pueden variar en función del pastoreo por zooplancton, peces y ostiones que no son considerados en la presente simulación y que para entender por completo el ciclo del nitrato es necesario agregar estas variables en los trabajos siguientes.

Módulo de disponibilidad de luz

La intensidad de la luz es un factor importante que modula a la productividad primaria. La variabilidad de la luz en la simulación se suministra como forzamiento físico desde ELCOM. Para la producción primaria, la intensidad de onda corta (280-2800 nm) en la superficie se convierte en el componente fotosintéticamente activo (PAR), basado en la suposición de que el 45 % del espectro incidente se encuentra entre 400-700 nm (Jellison y Melack, 1993). El modelo supone que el componente PAR penetra en la columna de agua de acuerdo a la Ley de Beer-Lambert:

$$I_{b_z} = f_b I_0 e^{\eta b z} \quad (5)$$

Donde I_{b_z} es la intensidad del ancho de banda a la profundidad z (en metros) por debajo de la superficie, I_0 es la intensidad de la onda incidente corta, y ηb es el coeficiente de extinción de la fracción $b^{t/h}$. Esto hace que el coeficiente de extinción de luz pueda ser ajustado dinámicamente de acuerdo a la variabilidad en las concentraciones de fitoplancton, algas, partículas inorgánicas, detritus, y carbono orgánico disuelto. El valor de PAR se calcula de la siguiente manera:

$$\eta PAR = \eta_w + \sum_a^{N_A} K_e^{A_a} A_a + \sum_d^{N_D} K_e^{DOC_d} DOC_d + \sum_d^{N_D} K_e^{POC_d} POC_d + \sum_s^{N_s} K_e^{SS_s} SS_s \quad (6)$$

En donde η_w es la atenuación debido al agua clara (constante), y K_e es la razón de incremento del coeficiente de extinción con respecto al incremento de la concentración de partículas.

Módulo de nutrientes y oxígeno

El transporte y ciclo de nutrientes son una parte importante al simular la interacción de los organismos con el ecosistema. CAEDYM incluye modelos de variables químicas como:

- Nutrientes: fosfato (PO_4), fósforo total (PT), nitrógeno total (NT), amonio (NH_4), nitrato (NO_3) y sílice (SiO_2).
- Oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno
- Sedimento en suspensión (No activo en el presente trabajo)
- pH

Ciclo del nitrógeno

Para comprender mejor la presencia del NO_3 en el ciclo del nitrógeno, a continuación se muestra un diagrama simplificado con los procesos más relevantes o significativos en la variabilidad del NO_3 para un sistema similar a BSQ (Figura 3) y los utilizados en la simulación con CAEDYM del presente trabajo (Tabla I).

El ciclo de nitrógeno incluye los procesos de desnitrificación, nitrificación y fijación de N_2 . Para este caso, se consideró a la desnitrificación como proceso predominante por lo que la fijación de N se despreció.

Existen otros factores que regulan la concentración de nitrógeno en la columna de agua además del aporte externo como, el consumo o pastoreo por otros organismos (macrofitas y zooplancton), la descomposición de materia orgánica y flujos bentónicos. Con el fin de simplificar el modelo, estos procesos no fueron activados en la simulación ya que no se consideró la presencia de otros organismos por lo que se considera a la presente simulación como un primer paso a una aproximación de los flujos de nitrato, para obtener simulaciones más realistas en un futuro será necesario considerar a todas las variables en conjunto.

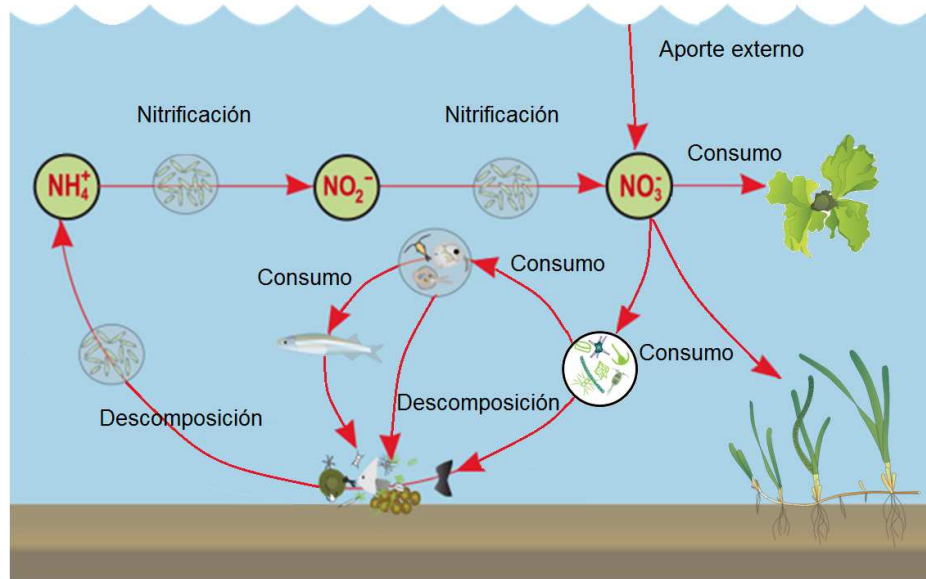


Figura 3.- Ciclo del nitrógeno en un ecosistema acuático similar a BSQ. Esquema obtenido y modificado de <http://wetlandinfo.ehp.qld.gov.au/>

Tabla I.- Variables y procesos de CAEDYM dentro del ciclo del nitrógeno, así como las variables de estado incluidas en la simulación

Modelo	CAEDYM				
Localidad	Bahía San Quintín				
		Activo			Activo
Especies de nitrógeno en la columna de agua	Amonio (NH_4)	✓	Biomasa en Bahía San Quintín	Fitoplancton	✓
	Nitrito (NO_2)	✓		Zooplancton	X
	Nitrato (NO_3)	✓		Bacterias	X
Procesos en el ciclo del nitrógeno	Aporte externo	✓		Pastos marinos	X
	Nitrificación	X		Algas	X
	Fijación	X		Cultivos de ostión	X
	Desnitrificación	✓		Peces	X
	Pastoreo (consumo)	X		Otros invertebrados	X
	Descomposición	✓			

5.1.3 Acoplamiento de Modelos

A continuación se presenta un diagrama (Figura 4) del acoplamiento de ambos modelos. Al acoplar el modelo CAEDYM con el modelo hidrodinámico ELCOM, ya no es necesario implementar nuevos forzamientos ni condiciones de frontera ya que CAEDYM utiliza estos parámetros a través de ELCOM. Los procesos de advección, mezcla y transporte que tienen influencia en los resultados biogeoquímicos de CAEDYM son dependientes de los resultados de la modelación hidrodinámica por ELCOM.

CAEDYM está diseñado como un conjunto de módulos en subrutinas que puede ser directamente acoplado a modelos de uno, dos o tres dimensiones como lo es ELCOM (Hannoun et al., 2006).

Aunque CAEDYM es capaz de funcionar utilizando la salida pre-generada por el modelo hidrodinámico (i.e. velocidad, temperatura y salinidad), el modelo pretende ser acoplado dinámicamente, es decir, las rutinas CAEDYM se llaman en cada paso de tiempo para poder ser adaptado a aplicaciones específicas de acuerdo al objetivo del estudio. Esto permite estudiar distintos procesos de diferentes periodos en una sola corrida del modelo.

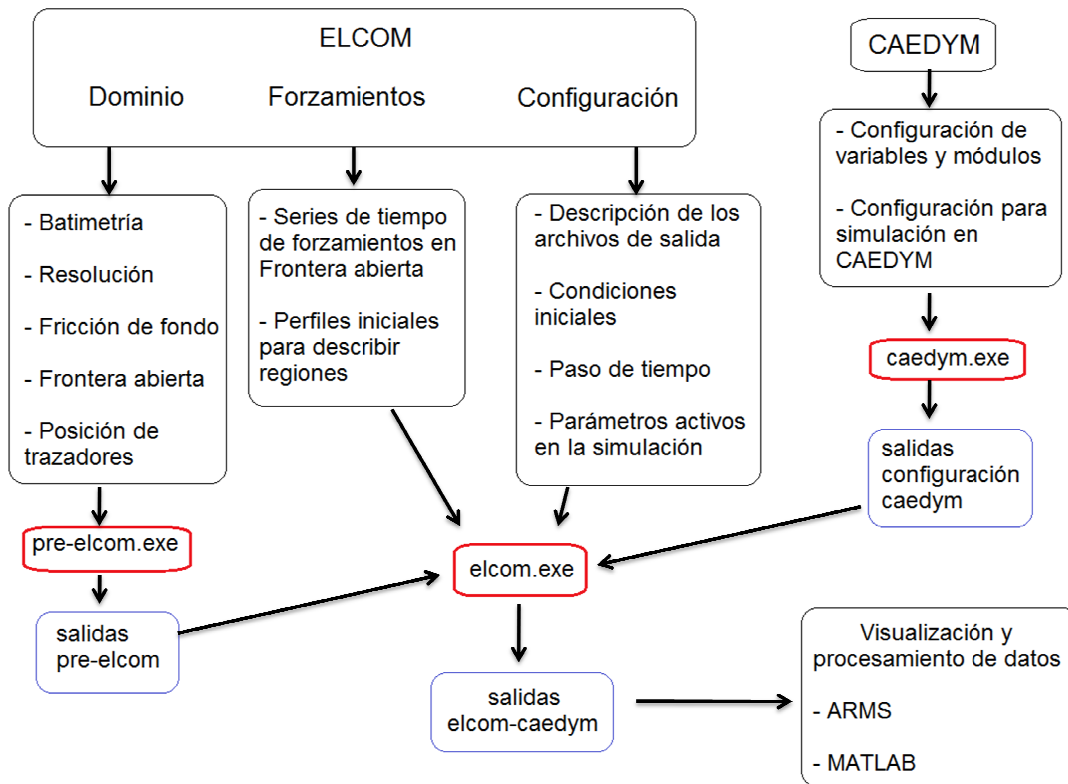


Figura 4. – Organización del acoplamiento de ELCOM.

5.2 SIMULACIÓN

5.2.1 Batimetría Condiciones de Frontera y Calibración

El área de estudio de BSQ se delimitó con un dominio que se extiende desde los 30.35° N a los 30.51° N de latitud y de los -115.93 ° W a los -116.03 ° W de longitud.

Para fines de este trabajo, se utilizaron datos batimétricos de un trabajo anterior por Flores-Vidal (2006) quien midió las profundidades a través de diversos recorridos para cubrir la mayor parte del interior de BSQ, y las completo con datos satelitales de ETOPO2 (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>) para complementar la parte externa

de la bahía (Figura 5). Las mayores profundidades se encontraron en la región de la boca y en el canal profundo central.

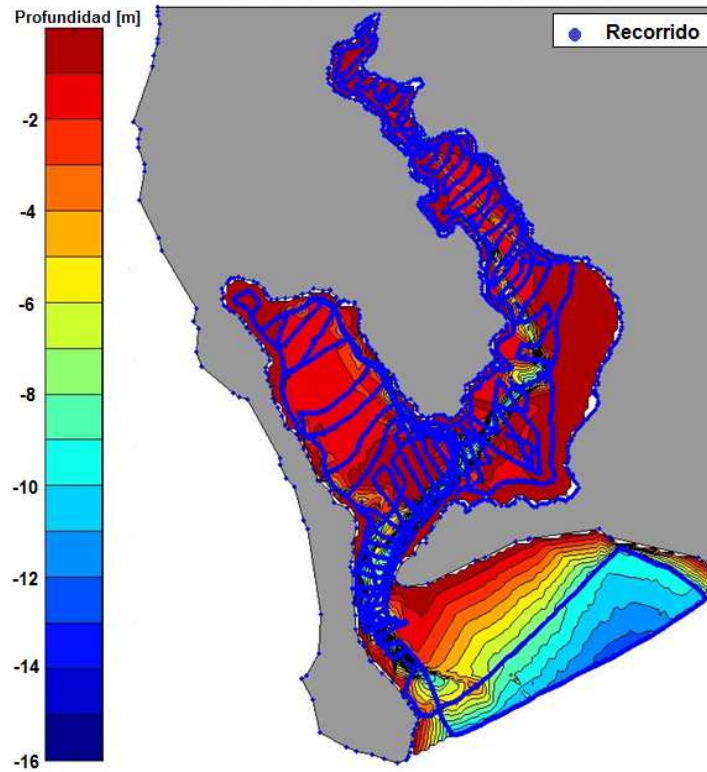


Figura 5.- Batimetría y recorrido para la realización de ésta reportada por Flores-Vidal (2006).

Para optimizar el funcionamiento del modelo y adaptarlo a las capacidades de cómputo disponibles, la batimetría se interpoló sobre una malla cartesiana en 2-D de 100 x 100 m en la horizontal (Figura 6). Una vez cargada la malla cartesiana dentro de ELCOM, se fijó una variación de 0.5- 10 m en la vertical (Figura 7) para de esta manera construir una malla 3-D sobre la cual se resolvió el modelo numérico con una condición de superficie libre en la primera capa.

Sobre esta malla se asignaron celdas representativas de tierra, agua y la frontera abierta (límite oceánico del dominio), siendo esta última las celdas sobre las cuales actúa el forzamiento de la marea.

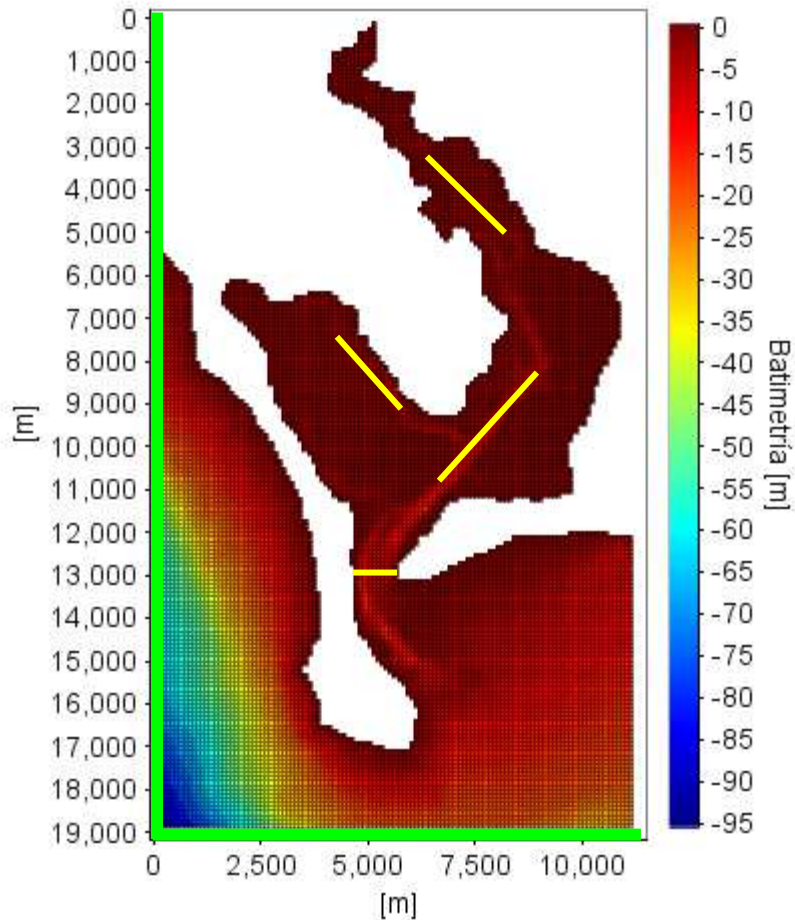


Figura 6.- Malla del dominio del área de estudio y resultado de la interpolación de la batimetría. Se aprecia la resolución espacial en la dimensión horizontal (resolución de 100 x 100m). Con una barra de color verde se indica la posición de la frontera abierta en la parte inferior del dominio. Con barras de color amarillo se indica la posición de los transectos que definen los canales profundos y la boca.

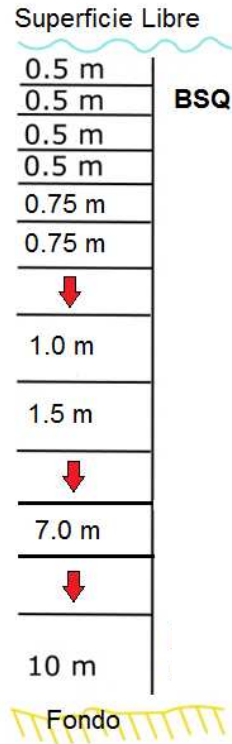


Figura 7.- Diagrama ilustrativo que representa la resolución vertical (resolución variable de 0.5 m dentro de BSQ y de 10 m en la parte más externa del dominio).

Así mismo, se experimentó con varias mallas de coeficientes de fricción variable con la misma resolución que la batimetría con la finalidad de caracterizar mejor el fondo de BSQ. Se probó con una malla de coeficiente de fricción homogéneo y otras mallas no homogéneas en donde los valores fueron variando de acuerdo al tipo de sedimento, a la geomorfología de la bahía y a la cobertura de biomasa, particularmente por presencia de pastos marinos. Para regiones externas a BSQ y más profundas se asignaron valores de coeficiente de fricción más bajos, mientras que a regiones someras y con mayor cobertura de pastos se les asignó el valor más alto. Los valores de coeficiente de fricción utilizados variaron desde 0.002 hasta 0.05.

5.2.3 Forzamientos físicos

Nivel del mar

Se utilizó una serie de tiempo de la predicción astronómica de marea para mayo y junio del 2004 (Figura 8). Los datos fueron obtenidos con el programa MARV10 producido por el laboratorio de nivel de mar del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). La serie de tiempo fue referida al nivel medio del mar y se aplicó sobre la frontera abierta señalada en la figura 6.

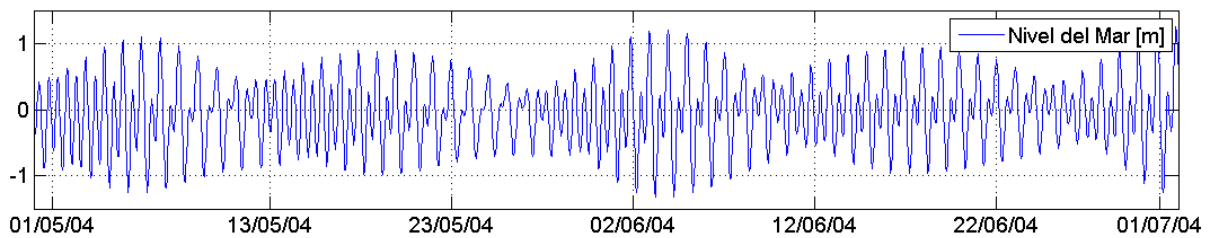


Figura 8. – Variabilidad temporal de la marea astronómica aplicada como forzamiento en la frontera abierta.

Meteorología

Para alimentar al modelo se utilizaron series de tiempo de condiciones atmosféricas obtenidas con una estación meteorológica, que midió radiación solar, temperatura del aire, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento (Figura 9) con una resolución temporal de 30 minutos, ubicada a 8.5 m sobre el nivel del mar en la localidad conocida como “La Chorera” (Figura 10). Estas series de tiempo fueron aplicadas de manera homogénea sobre todo el dominio, debido a esto, es importante considerar ciertos posibles cambios en la hidrodinámica, tanto de corrientes como en la dispersión de temperatura y salinidad, que pudieran estar afectados por la variabilidad del esfuerzo del viento y radiación solar, principalmente en las capas superficiales. Se sabe que por consecuencia de la presencia de una topografía irregular, las condiciones meteorológicas, especialmente en la dirección del viento, son diferentes en distintas regiones de BSQ.

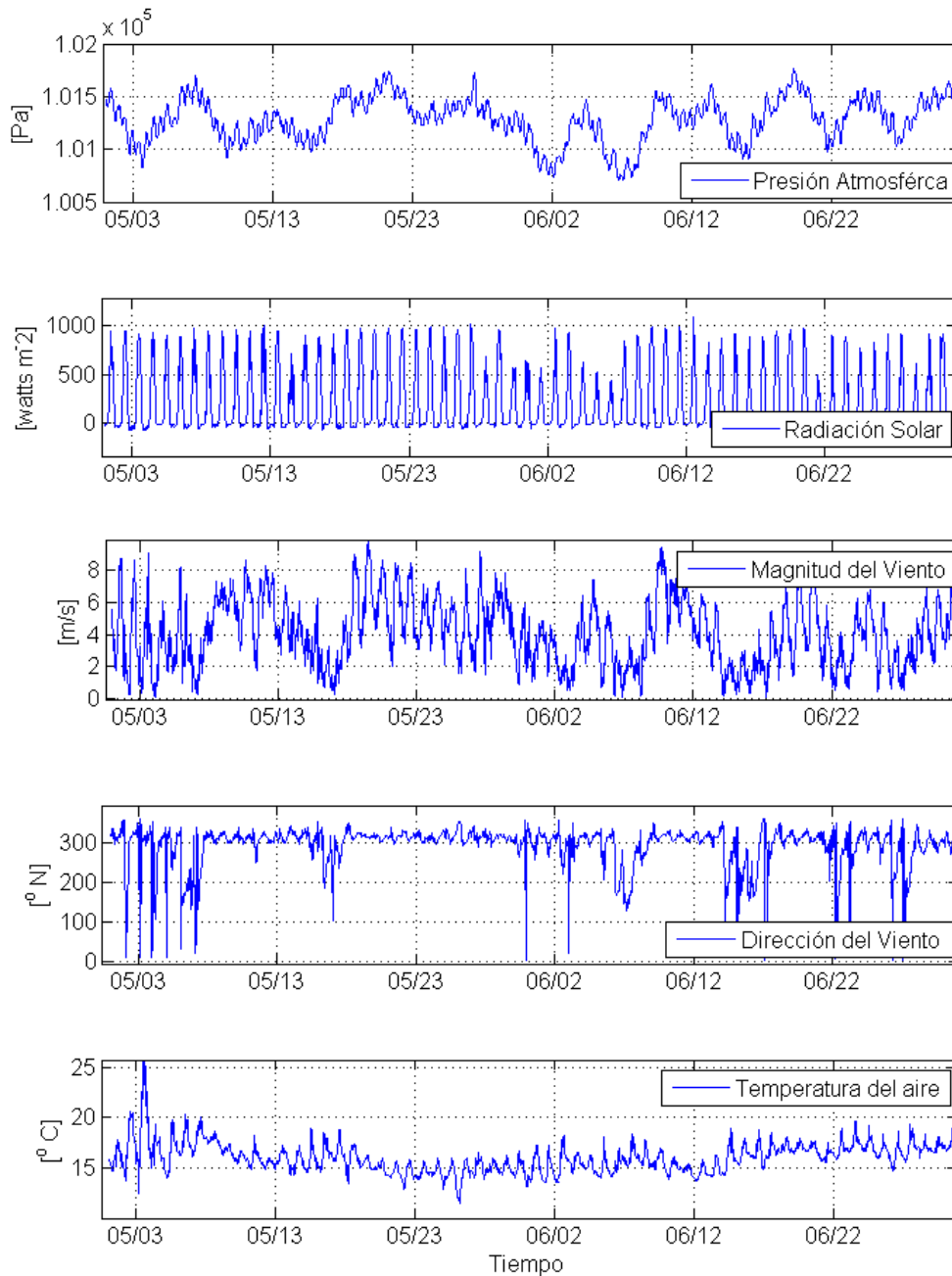


Figura 9. –Variabilidad de los forzamientos atmosféricos obtenidos de la estación meteorológica de de San Quintín, “La Chorera”.

Hidrografía

En cuanto a la hidrografía, se asignaron perfiles iniciales de temperatura y salinidad (Figura 10) de acuerdo a valores obtenidos en campañas de medición de trabajos anteriores por Durazo-Arvizu (comunicación personal), quien realizó mediciones por medio de un CTD durante distintos pleamares para los días 26 y 29 mayo y 4 de junio, y Camacho et al. (2007) quienes colectaron muestras superficiales en el nivel más alto de marea entre los días 22 de mayo al 25 de junio, esto con el fin de caracterizar las condiciones iniciales dentro de BSQ.

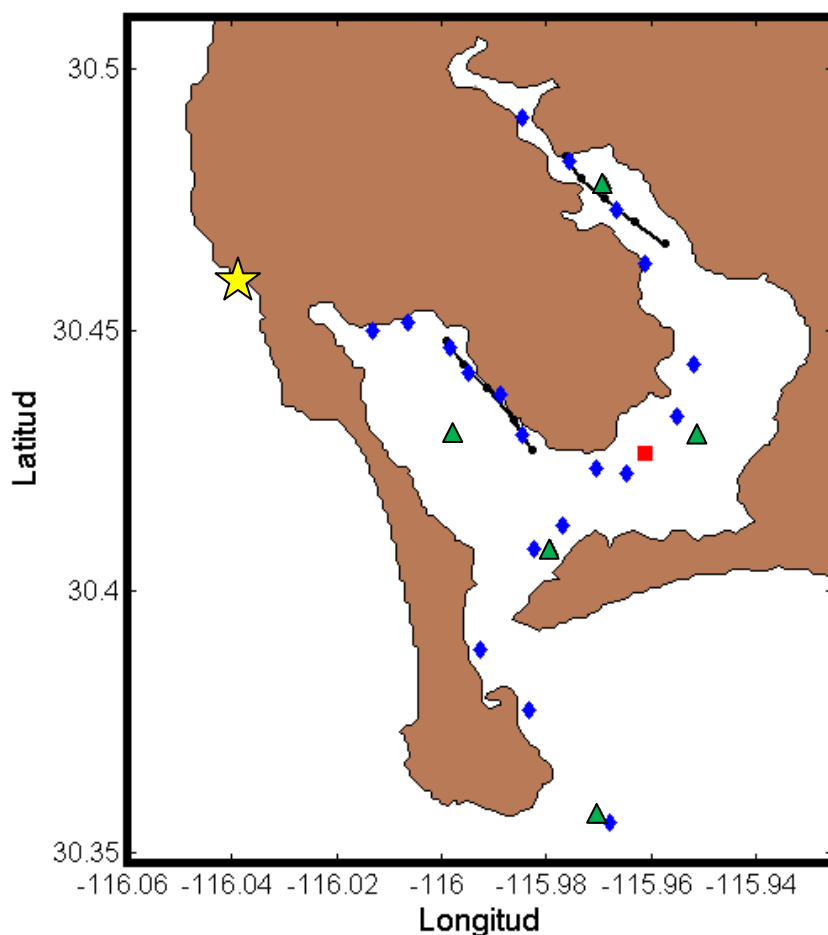


Figura 10. – Posición de perfiles iniciales de temperatura, salinidad y variables biogeoquímicas (NO_3 , PO_4 , NH_4 , SiO_2 , DOCL , DONL) (\diamond). La biomasa de fitoplancton (Δ). Posición de mediciones de CTD en una línea con puntos (-o) y posición de un ADCP (\square), ambas para la validación de temperatura y salinidad, y corrientes respectivamente. Con una estrella de color amarillo se indica la posición de la estación meteorológica “La Chorera”

Los forzamientos de temperatura y salinidad que actúan desde la frontera abierta requieren de ser actualizados para mantener el equilibrio en la modelación, para esto se asignaron perfiles cada cinco días que indicaran las condiciones de la columna de agua durante los dos meses de simulación. Se tomaron como base datos oceánicos de temperatura y salinidad obtenidos durante los cruceros oceanográficos del IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California) específicamente de la estación 107.32 localizada a ~12 km al oeste del extremo norte de Bf. Debido a la complejidad y el alto costo de las salidas de los cruceros del IMECOCAL, para el año 2004 sólo se cuentan con cuatro cruceros correspondientes a los meses de Enero, Abril, Julio y Octubre.

Es por eso que, para fines de este trabajo se utilizaron los datos de Abril y Julio con los que se buscó completar cuatro perfiles que describieran la variación en el tiempo de la columna de agua desde la frontera abierta para el periodo de simulación (Mayo y Junio). Para esto se buscaron los cambios de temperatura y salinidad de acuerdo al índice de surgencia reportado por la NOAA (Figura 11) y el resultado de trabajos anteriores a lo largo de California, EUA (Pennington & Chávez, 2000; Wilkerson et al., 2006). Con los datos recolectados se estimaron los valores de temperatura y salinidad en condiciones de surgencia y sin surgencia, y se crearon los perfiles con un cambio cada 15 días hasta llegar a las condiciones de Julio reportadas por el programa IMECOCAL (Figura 12).

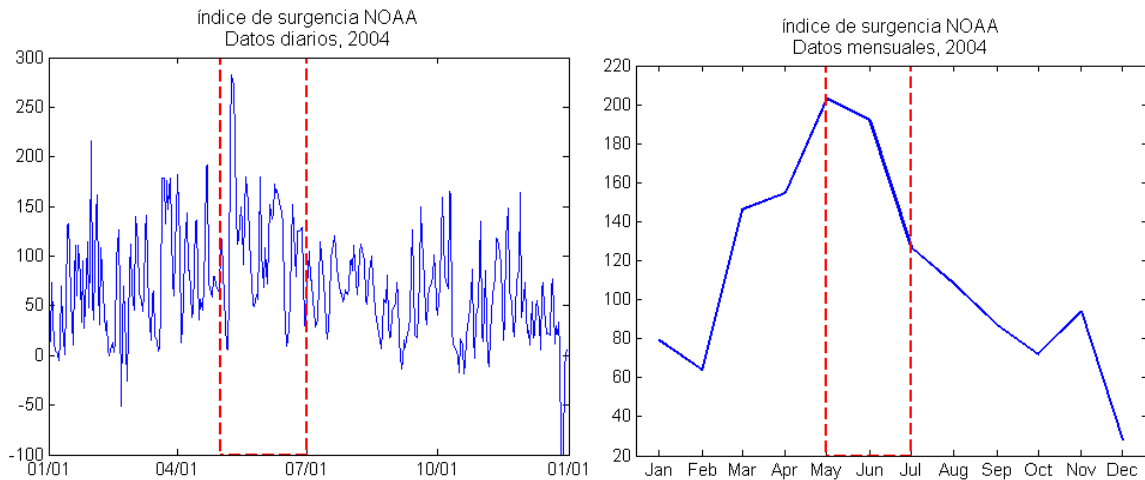


Figura 11.- Variación diaria y mensual del índice de surgencia de acuerdo a la NOAA para el año 2004.

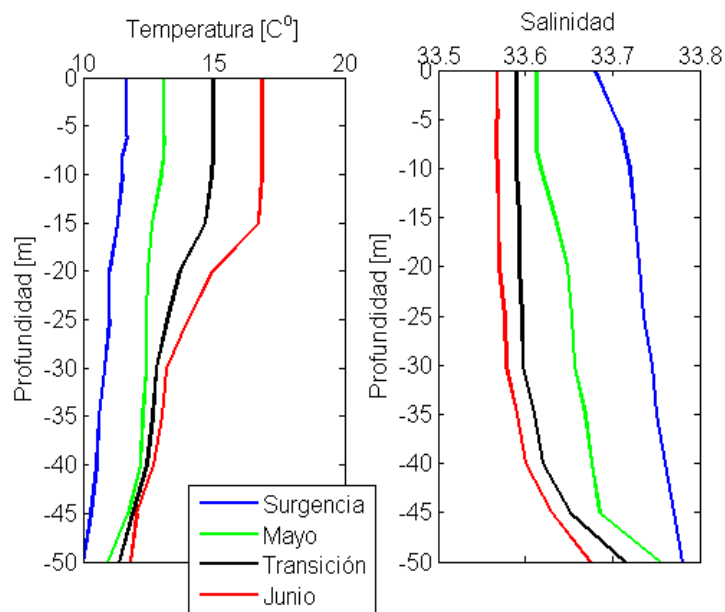


Figura 12. – Perfiles para definir los cambios en el tiempo de las condiciones de temperatura y salinidad de la columna de agua en la frontera abierta del dominio.

5.2.4 Forzamientos biogeoquímicos

Para alimentar CAEDYM se utilizaron dos grupos dominantes de fitoplancton en BSQ (diatomeas y dinoflagelados) y datos de concentraciones de nutrientes (NO_3 , NH_4 , PO_4 , SiO_2 , COD y NOD) y oxígeno con los que se crearon perfiles iniciales que describen a la columna de agua en distintos puntos del área de estudio (Figura 10). Para poder utilizar el módulo del fitoplancton, fue necesario asignar algunos parámetros que describen a cada uno de los grupos de fitoplancton utilizado (Tabla II).

Tabla II.- Parámetros para definir al grupo funcional del fitoplancton incluido en la simulación.

Variable	Unidad	Diatomeas	Dinoflagelados
Tasa de crecimiento potencial	Pmax (/día)	1.3	0.6
Relación promedio de C y Chla	(mg C/mg chla)	40	300
Parámetro para la pendiente inicial de la curva P/I	(microE/m ² /s)	120	140
Constante de saturación media de fósforo	(mg/L)	0.004	0.0001
Constante de saturación media de nitrógeno	(mg/L)	0.006	0.0001
Constante de saturación media de sílice	(mg/L)	0.14	0
Constante de saturación media de carbono	(mg/L)	2	2
Concentración interna mínima de N	(mg N/mg C)	2.5	0.02968
Concentración interna máxima de N	(mg N/mg C)	6	0.07
Tasa máxima de absorción de N por fitoplancton	(mg N/mg C/día)	1.5	0.2
Concentración interna mínima de P	(mg P/mg C)	1	0.0003
Concentración interna máxima de P	(mg P/mg C)	2	0.003
Tasa máxima de absorción de P por fitoplancton	(mg P/mg C/día)	0.2	0.01
Concentración interna mínima de C	(mg C/mg C)	15	0.214
Concentración interna máxima de C	(mg C/mg C)	80	1.143
Tasa máxima de absorción de C por fitoplancton	(mg C/mg C/día)	80	0.3
Temperatura estándar	(°C)	19	19
Temperatura óptima	(°C)	27	24
Temperatura máxima	(°C)	32	32
Coefficientes de tasa de respiración	kr (/día)	0.1	0.0001
Salinidad máxima potencial	(psu)	36	89
Constante de saturación media para el incremento de densidad	(uEm ² /s)	25	26
Densidad mínima de fitoplancton	(kg/m ³)	980.0	980.0
Densidad máximo de fitoplancton	(kg/m ³)	1050.0	1050.0
Velocidad de sedimentación constante	(m/s)	-0.60000E-6	0.0

Los datos fueron obtenidos de diversos trabajos con información sobre productividad, composición de las comunidades fitoplanctónicas y concentraciones de Chl-a, oxígeno y nutrientes en el sistema (Zertuche-González & Álvarez-Borrego, 1978; Millán-Núñez et al., 1982; Millán-Núñez et al., 2004; Camacho-Ibar et al., 2007; Frias-Velasco, 2009; García-Escobar et al., 2015; y comunicación personal con Millán-Núñez, Camacho-Ibar y Aveytua-Alcázar).

Para la frontera abierta se utilizaron valores obtenidos del programa IMECOCAL para la estación 107.32 y para completar la información necesaria, se obtuvo información de áreas con condiciones similares o relacionadas a BSQ en los trabajos antes mencionados para nutrientes y fitoplancton y los trabajos de Wilkerson et al. (2006), Pennington & Chavez (2000) y White & Dugdale (1996). Con la información recolectada se crearon series de tiempo (por día) para las variables de nutrientes y biomasa del fitoplancton para ser aplicadas como forzamiento desde la frontera abierta (Figura 13).

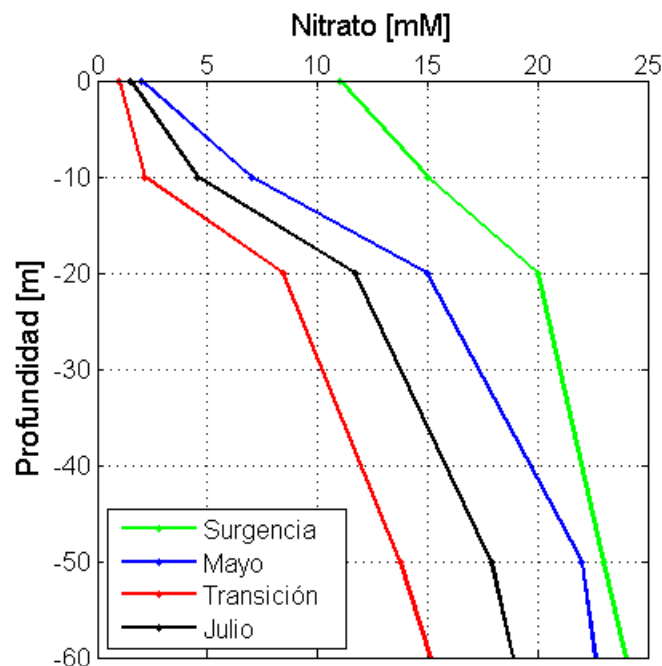


Figura 13.- Perfiles de nitrato para definir los cambios en la frontera abierta del dominio.

5.2.5 Transectos

Además de poder trabajar sobre capas a distintas profundidades, ELCOM permite trabajar de manera tridimensional por medio de perfiles y transectos. Para este estudio se seleccionaron tres transectos a lo largo de los canales profundos: uno en el brazo *oeste* (Bf) de ~ 2.6 km de longitud, otro en el brazo *este* (Bsq) de ~4.5 km de longitud y otro en el canal central entre ambos brazos de ~3 km de longitud; y por último se delimitó un transecto a lo ancho de la boca de conexión de ~1000 m de longitud (Figura 6). Los transectos a lo largo de los canales de Bf, Bsq y el canal central fueron seleccionados debido a la existencia de mediciones de variables de trabajos anteriores por Camacho-Ibar et al. (2007) y Durazo-Arvizu (comunicación personal), lo que permitió validar los resultados obtenidos con mediciones de campo.

Para definir la dinámica residual entre la laguna y el océano adyacente (flujos de entrada y salida) se consideró la componente V (Norte-Sur) de las velocidades sobre el transecto de la boca. Con la finalidad de observar si existen cambios importantes bajo condiciones de marea muerta y marea viva, se obtuvieron los promedios de cinco días bajo estas condiciones y se observó el residual. Para mostrar los cambios diurnos se utilizó el promedio de cinco horas en flujo y refluo tanto para marea viva como para marea muerta y se compararon los resultados.

Los transectos a lo largo de los canales profundos internos se utilizaron para estudiar la termodinámica residual (distribución de la temperatura y salinidad) en los brazos y así poder caracterizar a cada uno de acuerdo a sus condiciones termohalinas.

5.2.6 Periodo de simulación y salidas del modelo

Debido a la disponibilidad de los datos y con la finalidad de abarcar dos periodos de mareas muertas y dos periodos de mareas vivas, el periodo de simulación del presente trabajo fue de 63 días; desde el 1 de Mayo al 2 de Julio del 2004, y se asignó un paso de tiempo óptimo para los fines del trabajo de 30 segundos ($\Delta t = 30$) para mantener estable al modelo y obtener mejores resultados.

Aunque el Δt se fijó en 30 s, para el análisis de las simulaciones se realizaron promedios horarios, con éstos se obtuvieron animaciones de corrientes, temperatura, salinidad y dispersión de un trazador pasivo y concentración de nitrato en la capa superficial (~1 m de profundidad), de fondo y del promedio de la columna de agua, además de flujos residuales.

Se presentan resultados de la circulación residual para la descripción de la hidrodinámica ya que según Kjerfve & Magill (1989) debido a que el movimiento del agua en lagunas costeras ocurre en diversas escalas de espacio y tiempo, el flujo del agua, la mezcla y el transporte de material ocurre como resultado de las mareas, de tormentas esporádicas, de viento, de gradientes de densidad, y de oscilaciones del nivel del mar por cambios en los balances de agua y calor; es por esto que las respuestas locales a los forzamientos varían significativamente, por lo que no es práctico analizar campos de velocidades instantáneos, en lugar de estudiar la circulación o cambios residuales espaciales.

5.2.7 Tiempo de residencia

Para completar el estudio de la hidrodinámica de BSQ se calculó el tiempo de residencia. ELCOM tiene su propio módulo de tiempo de residencia que es posible activar o desactivar según sea el caso para cada simulación. Este módulo define el tiempo de residencia como el tiempo que pasa una partícula de agua dentro de un volumen determinado considerando el prisma de marea y la advección de las partículas para cada una de las celdas de la malla que comprende el dominio. El tiempo de residencia del presente trabajo es resultado de una simulación de dos meses en condiciones de Mayo y Junio (primavera) por lo que cuenta con la presencia de dos mareas vivas y dos mareas muertas, además de una variabilidad atmosférica correspondiente para este periodo de tiempo.

5.2.8 Simulación de trazadores conservativos

Con el fin de estudiar los procesos físicos que modifican la disponibilidad y distribución de nitrato, principalmente la advección por la marea y la variabilidad en la concentración de acuerdo a los fenómenos de surgencias de la localidad, se utilizó un trazador conservativo

que simula al nitrato con un aporte desde la frontera abierta durante toda una simulación libre de procesos biogeoquímicos.

El trazador se aplicó de manera homogénea en toda la columna de agua desde la frontera abierta de dos maneras distintas: a) con una concentración relativa de [1] con un aporte constante durante toda la simulación y b) con una concentración relativa variable que pretende simular la variabilidad de la concentración del nitrato en condiciones de una surgencia hasta disminuir para llegar a un escenario sin surgencia. Para ambos escenarios se obtuvo el residual de la concentración al final de toda la simulación y se analizó tanto el alcance de la incursión por medio de mapas como la variabilidad en la concentración mediante perfiles.

Además, se seleccionaron mapas de pasos de tiempo en condiciones de flujo con marea viva y muerta, y se analizó el alcance de la incursión de acuerdo a la concentración del trazador a lo largo de los brazos *este* y *oeste* y el canal central. En los mapas se buscó obtener una concentración relativa de 1 en la región de la boca, con la finalidad de observar el alcance del aporte de agua desde el océano adyacente.

5.2.9 Simulación de nitrato con CAEDYM

Para identificar el efecto del fitoplancton en la concentración de nitrato se utilizó el resultado del acoplamiento de los modelos ELCOM y CAEDYM con los que se plantearon dos escenarios de simulación similares a los del trazador: a) con una concentración de [0.9 mgNO₃/L] constante en la frontera durante toda la simulación, y b) con una concentración variable que pretende simular la variabilidad de la concentración del nitrato en condiciones de surgencia hasta disminuir para llegar a un escenario sin surgencia. Estas variaciones consistieron cambios en el aporte cada 15 días, en total se definieron 4 cambios en el periodo de simulación desde una concentración inicial de 0.9 mgNO₃/L con tendencia a disminuir de 0.6 mgNO₃/L a 0.3 mgNO₃/L y por último 0.06 mgNO₃/L.

En las simulaciones de CAEDYM sólo se consideró al fitoplancton (diatomeas y dinoflagelados) y a los procesos de desnitrificación (/día) como se describe anteriormente.

De igual forma, para ambos escenarios se obtuvo el residual de la concentración al final de toda la simulación y se analizó tanto el alcance de la incursión por medio de mapas como la variabilidad en la concentración por perfiles y se comparó con los resultados obtenidos para el trazador.

5.3 Validaciones ELCOM

Con el fin de reducir la incertidumbre de los datos obtenidos por las simulaciones, se realizó una validación de los resultados que nos permitió calibrar el modelo y asegurarse de la asimilación de los datos iniciales y de forzamiento. El objetivo de la calibración es afinar un conjunto de parámetros, por ejemplo la profundidad, la amplitud y fase de marea, y la rugosidad del fondo. Mientras que la asimilación de datos, permite mejorar la posición de partida del forzamiento para que las estimaciones de las simulaciones se ajusten más a la realidad.

5.3.1 Magnitud y dirección de corrientes

Para verificar el buen funcionamiento de los parámetros iniciales y forzamientos por medio de procesos físicos (i.e. marea, termodinámica), fue necesario validar los resultados obtenidos de la hidrodinámica por medio de ELCOM con datos colectados en campo de diversos trabajos.

Las validaciones de la hidrodinámica consistieron en comparar los resultados de la magnitud y dirección de las corrientes en un punto dentro de BSQ (Figura 9) obtenidas del modelo y las obtenidas por medio de mediciones de un ADCP (perfilador acústico de corrientes por efecto Doppler) reportadas por Angulo-Larios (2006). Angulo-Larios (2006) reporta mediciones realizadas durante el periodo del 23 de Mayo al 13 de Junio del 2004. La campaña de muestreo fue programada con la finalidad de cubrir días susceptibles a la presencia de surgencias en la región. El trabajo de campo fue realizado por el personal del Proudman Oceanographic Laboratory del gobierno británico, de la Facultad de Ciencias

Marinas (FCM) y del instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

El perfilador se ubicó sobre el lecho marino, en una zona profunda del canal central, lo anterior debido a que son zonas muy dinámicas y por lo tanto de mayor interés oceanográfico (Angulo-Larios, 2006).

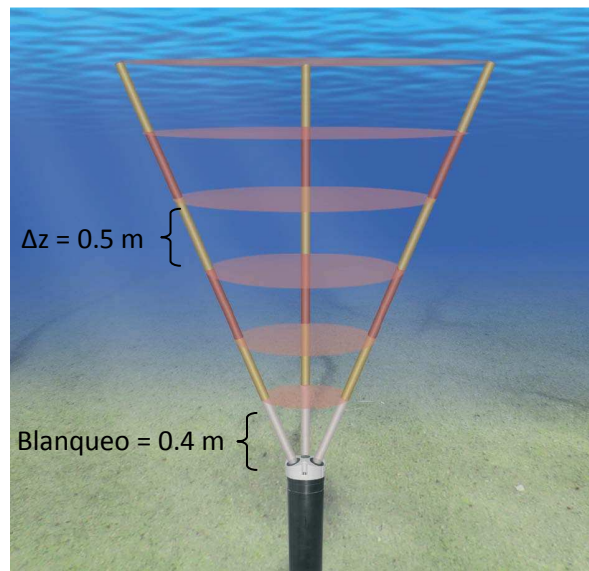


Figura 14.- Esquema del anclaje en el interior de la Bahía. (Modificado de <http://www.oceanecology.ca/>).

Tabla III.- Descripción del ADCP utilizado por Angulo-Larios (2006).

Equipo	Marca	Modelo	Periodo de Muestreo
ADCP Est. A	Nortek	Aquadopp Profiles 1000 –kHz	23 Mayo – 13 Junio

El ADCP fue programado para registrar las componentes zonal y meridional (U, V) de las corrientes a lo largo del perfil vertical de la columna de agua. Cada perfil de corriente se obtuvo al promediar 180 pulsos acústicos (pings) cada diez minutos ($\Delta t = 10 \text{ min}$). Se midieron celdas (bins) de 0.5 m de espesor, por encima de una zona de blanqueo de 0.40 m

(Figura 14). Las mediciones se realizaron durante días consecutivos. La precisión del perfil de velocidad del perfilador Nortek es del 1% del valor medido ± 0.5 cm/s y su desviación estándar es de 12.9 cm/s (Angulo-Larios, 2006).

Las validaciones se muestran con un gráfico del promedio de las corrientes en la columna de agua, tanto de ELCOM como las medidas por el ADCP. Para poder identificar mejor la variación en magnitud de las corrientes obtenidas, se realizó una validación de las componentes de velocidad U y V por separado junto con la variabilidad del nivel del mar para el mismo punto y el mismo periodo de tiempo.

5.3.2 *Circulación termohalina*

Para validar la termodinámica, se compararon los valores de temperatura y salinidad en distintos puntos a lo largo de los canales profundos de BSQ obtenidos de la simulación y los valores reales de mediciones de lances de CTD realizadas por Durazo-Arvizu (comunicación personal) para transectos y mediciones superficiales reportadas por Camacho-Ibar et al. (2007) para perfiles, ambas mediciones para un periodo de Mayo-Junio 2004.

Las validaciones superficiales se realizaron por medio de una comparación entre los datos reales y los datos obtenidos de la capa superficial (1 m de profundidad) de ELCOM. Para esto, se realizó un promedio de las dos series de tiempo (datos vs. ELCOM) para el mismo periodo de muestreo de cada una de las estaciones.

Con los valores de temperatura y salinidad obtenidos por Durazo-Arvizu, se logró realizar una validación en 3D de las zonas de los canales profundos de ambos brazos. Las mediciones de CTD tienen una duración del orden de horas para un solo día para cada una de las zonas (26 de Mayo, 4 de Junio). Debido a que el modelo obtiene salidas cada hora, se buscó la hora más cercana que correspondiera a las mediciones realizadas con el CTD y se compararon los resultados con los obtenidos por el modelo. Si los datos de la simulación se asemejan a los datos obtenidos en campo, se puede argumentar el buen funcionamiento del modelo y se puede continuar a realizar las distintas simulaciones de escenarios

experimentales. En este caso, una vez validado el modelo hidrodinámico, se prosiguió a realizar las simulaciones hidrodinámicas, de la dispersión de trazadores y el acoplamiento del modelo biogeoquímico.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Con el fin de facilitar la descripción y comprensión de cada una de los temas que incluye este estudio, se presentan los resultados y discusión de cada uno por separado.

6.1 Validación

6.1.1 Validación de la hidrodinámica (magnitud y dirección de corrientes, onda de marea)

En la validación de las corrientes promedio en la columna de agua (Figura 15) se observa un comportamiento similar en dirección con una ligera diferencia en la magnitud, particularmente para los días del 31 de Mayo al 8 de Junio que corresponden a días en condiciones de marea viva. Las mayores diferencias en magnitud se observan en las corrientes hacia el sur con dirección hacia la boca.

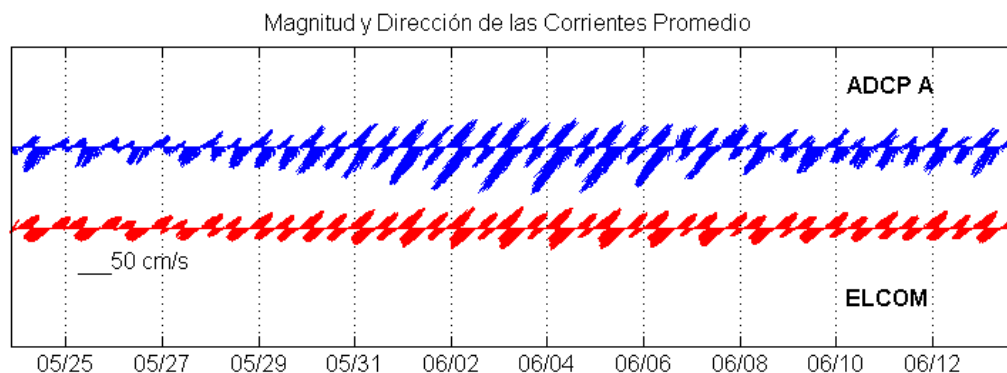


Figura 15.- Validación del promedio de las corrientes en la columna de agua. Comparación de los datos obtenidos por el ADCP (azul) y los datos de la simulación (rojo).

Los resultados de validación por componentes de la velocidad muestran magnitudes para la componente U similares a los datos reales, con magnitudes de alrededor de los 0.3 m/s para ambas series de tiempo, con un comportamiento de acuerdo a la variación diaria de la marea (flujo y reflujo de la marea) (Figura 16). A diferencia de la componente U, la componente V muestra magnitudes diferentes entre los resultados del ADCP y ELCOM. Los resultados del perfilador presentan una magnitud mayor de hasta 0.9 m/s, mientras que los resultados de ELCOM se mantienen similares a los de la componente U en magnitudes de 0.3 m/s pero con un mismo comportamiento de acuerdo a la marea (Figura 17).

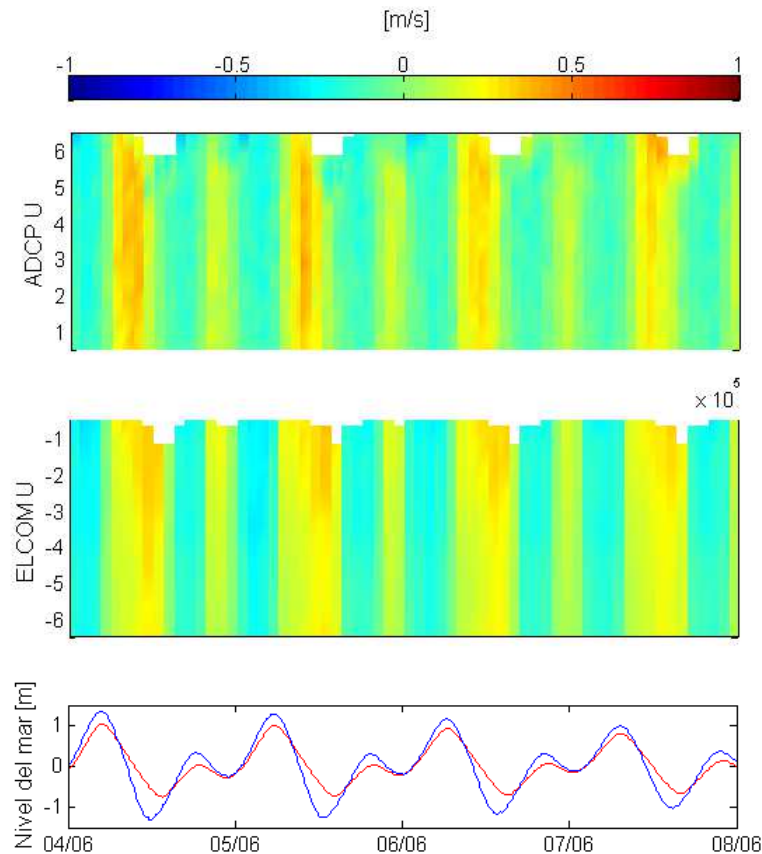


Figura 16.- Validación de la componente U y variación del nivel del mar entre los datos medidos por el ADCP (azul) y los datos de ELCOM (rojo) de un periodo de tiempo.

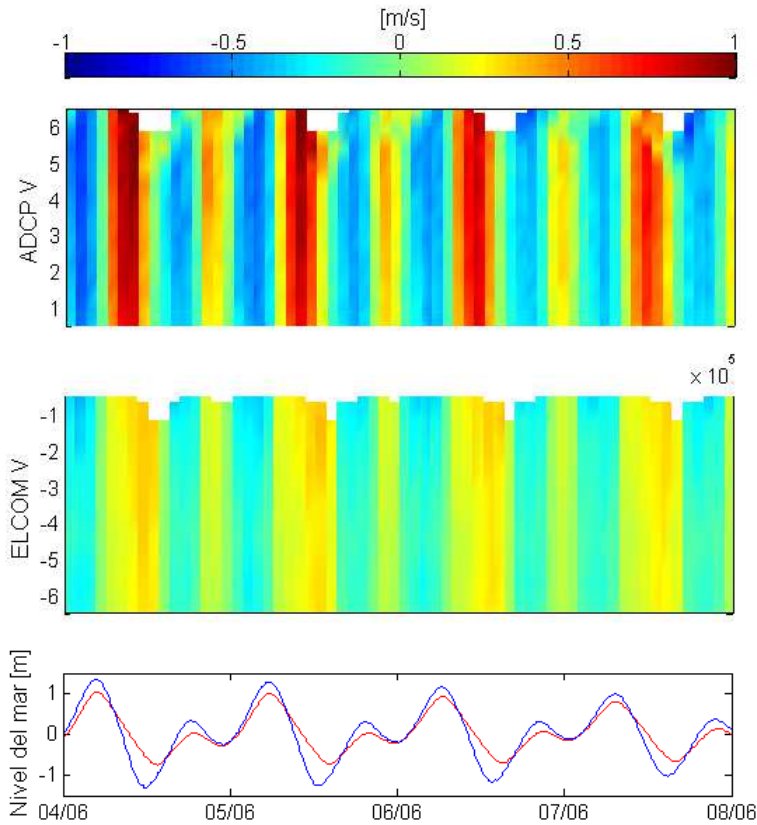


Figura 17.- Validación de la componente V y variación del nivel del mar entre los datos medidos por el ADCP (azul) y los datos de ELCOM (rojo) de un periodo de tiempo.

Al observar el comportamiento de la variación del nivel del mar (Figuras 16 y 17), se encontró una variación en la amplitud entre ambas series de tiempo, en donde las mediciones del sensor de presión del ADCP dan como resultado una amplitud mayor a la obtenida por ELCOM de hasta 0.5 m en el caso de bajamares más intensos y una diferencia de 0.1 m en pleamares intensos. Se cree que las diferencias en amplitud pudieran estar relacionadas a las diferencias entre la batimetría real y la que se utilizó para la simulación, así como los efectos de fricción que pudieran afectar la incursión de la marea en BSQ desde el océano exterior.

Cabe mencionar que a pesar de que se realizaron varios intentos para crear una malla de coeficientes de fricción adecuada para la simulación, no se logró encontrar un efecto relevante y se cree que el modelo fue incapaz de asimilar la fricción en el fondo. Esto pudiera tener repercusiones en las corrientes que cambien la hidrodinámica, particularmente en zonas estrechas y someras como lo son los canales y la profundidad en la mayor parte de BSQ. Sin embargo, estas limitaciones no fueron evidentes en la validación de la termodinámica.

6.1.2 Validación de la circulación termohalina

Los valores de temperatura y salinidad superficial obtenidos por la simulación comparten un mismo patrón a los obtenidos en campo.

La temperatura (Figura 18) llegó a ser tan similar que en las estaciones 10, 12, 14, 16 y 30 presentó los mismos valores entre el promedio de los datos medidos y ELCOM, en el resto de las estaciones de mantuvo una diferencia mínima de no más de 1.5 °C, a excepción de la zona más al norte del brazo de Bsq que presenta una mayor variación de temperatura de alrededor de 3°C en la estación 21.

Los valores de salinidad (Figura 19) fueron relativamente iguales desde la estación 1 hasta la estación 10 que se encuentra cerca a la parte sur de Bf. La diferencia entre los valores es más notoria en los brazos, los valores predichos por ELCOM fueron mayores a los de los datos reales pero siempre manteniendo una diferencia menor a 1 en todas las estaciones. La mayor diferencia, al igual que la temperatura, se presentó en la estación más al norte de Bsq.

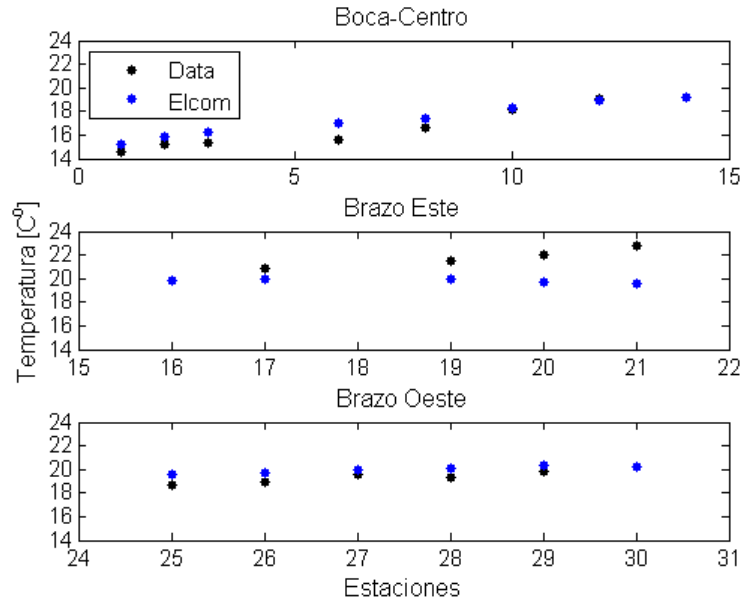


Figura 18.- Validación de temperatura superficial entre los valores reportados por Camacho-Ibar et al. (2007) y los obtenidos por ELCOM.

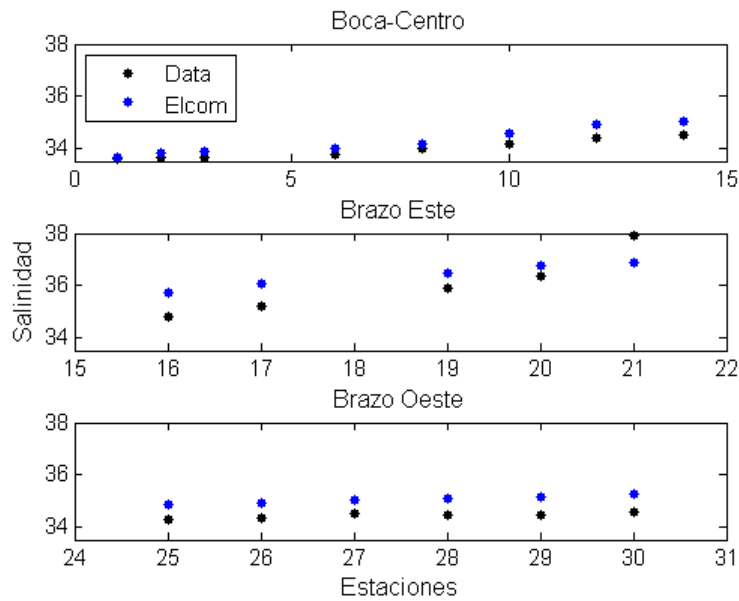


Figura 19.- Validación de salinidad superficial entre los valores reportados por Camacho-Ibar et al. (2007) y los obtenidos por ELCOM.

La diferencia en el norte de Bsq, de los valores de la temperatura y los de salinidad, pudiera explicarse debido a la variabilidad espacial de la radiación solar que no se logró simular ya que los flujos atmosféricos se aplican de manera homogénea en todo el dominio. Además existe una variación en el tiempo de residencia, en donde a mayor tiempo de residencia, mayor es la evaporación y por ende, aumentan los valores de salinidad y temperatura.

Las validaciones de las mismas variables en 3D (Figuras 20 y 21) también demostraron el buen funcionamiento de ELCOM para su simulación. Las temperaturas y salinidades más altas se encuentran hacia la cabeza en ambos brazos.

Las mediciones de CTD muestran en algunos lances una estratificación en la columna que no se logra observar en los transectos por ELCOM ya que éste presenta una columna de agua bien mezclada en la vertical en todos los casos. Esta diferencia pudiera estar relacionada con la circulación hidrodinámica o con los flujos atmosféricos que no se lograron reproducir en el modelo, ó con algún error en la medición particularmente en Bsq en donde se observan núcleos de baja temperatura y alta salinidad en los valores cercanos a superficie en sólo uno de los lances (Panel C y D de la figura 21); este valor pudiera propagar un error al ser interpolado con el resto de las mediciones y lances que conforman el transecto.

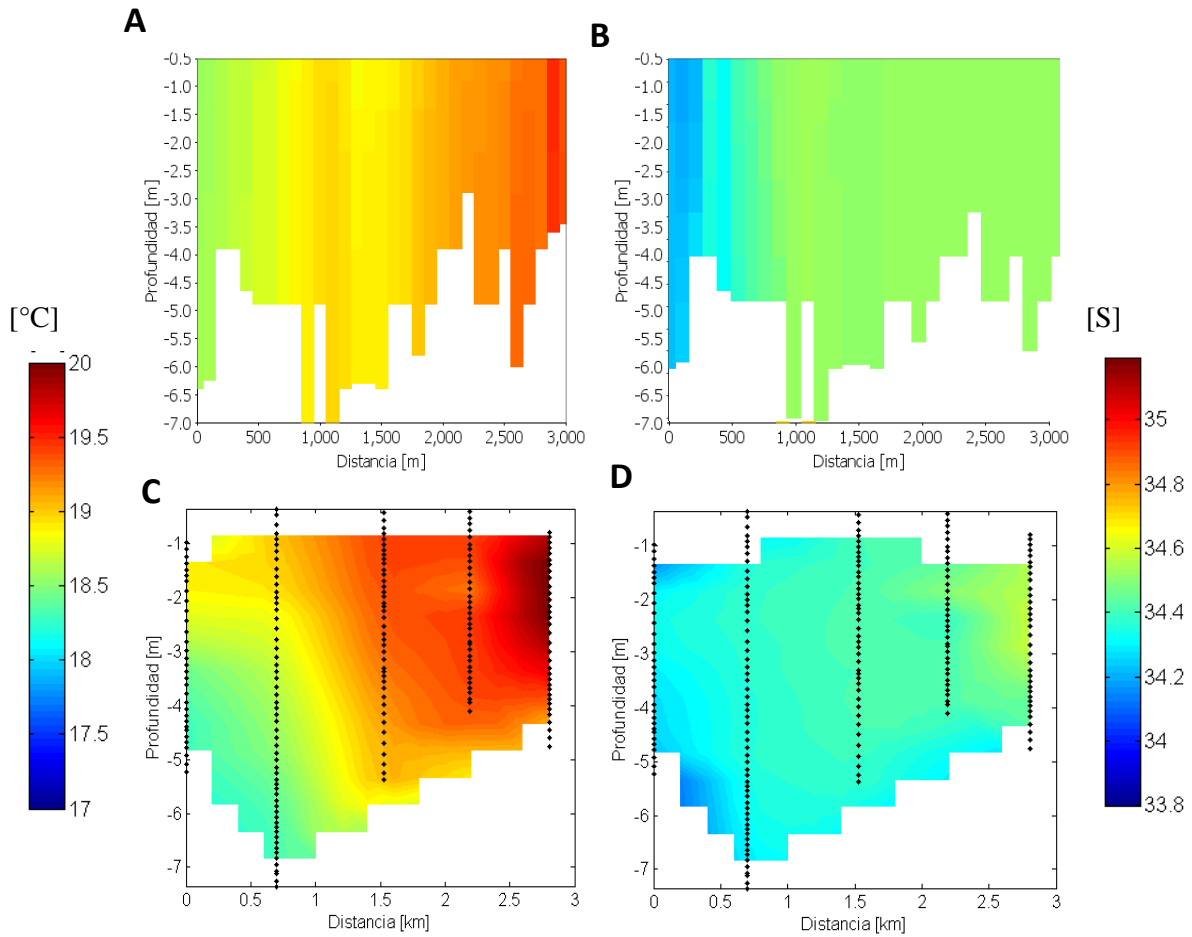


Figura 20.- Validación de temperatura (A y C) y salinidad (B y D) en la columna de agua del brazo oeste (Bf). Comparación de los valores obtenidos por los lances de CTD reportados por Durazo-Arvizu (C y D) y los valores obtenidos por ELCOM (A y B).

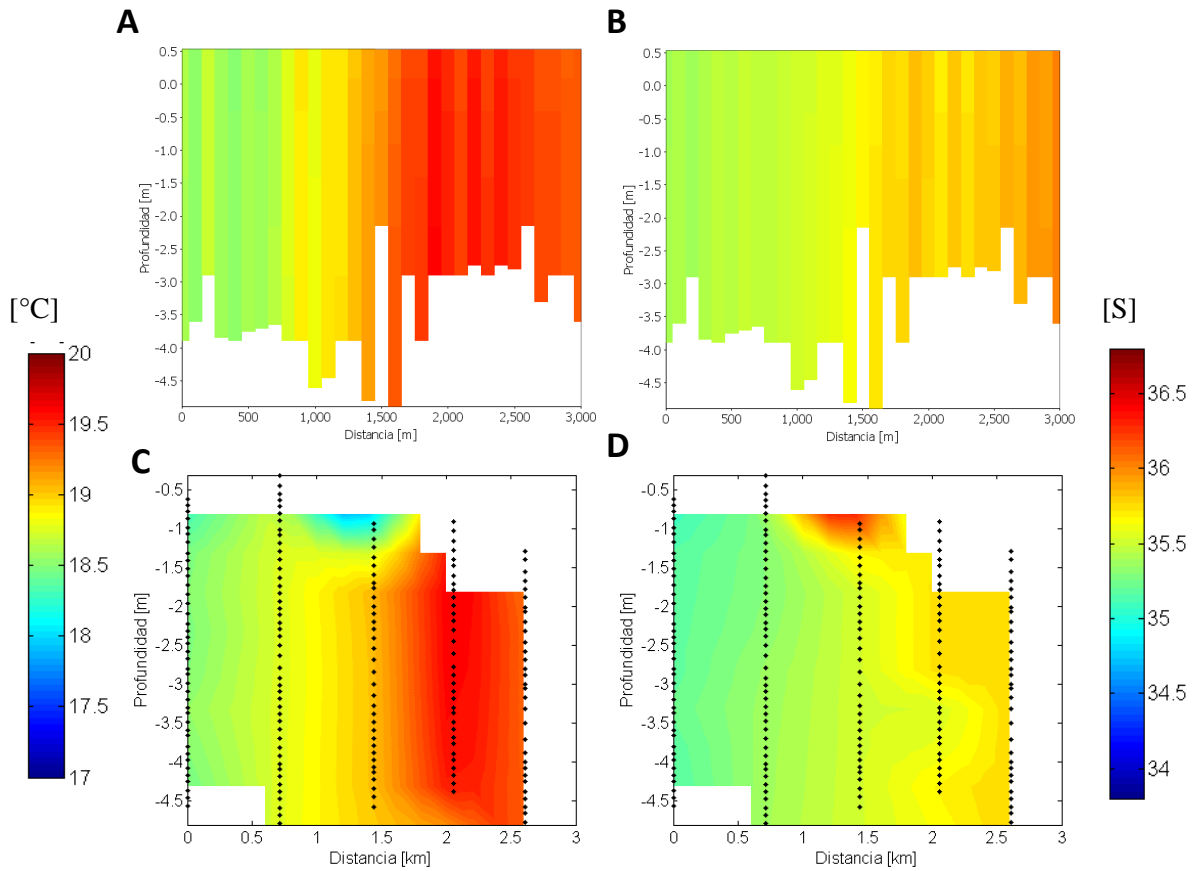


Figura 20.- Validación de temperatura (A y C) y salinidad (B y D) en la columna de agua del brazo este (Bsq). Comparación de los valores obtenidos por los lances de CTD reportados por Durazo-Arvizu (C y D) y los valores obtenidos por ELCOM (A y B).

6.2 Hidrodinámica de Bahía San Quintín

A continuación se muestran resultados que describen por primera vez con un modelo 3D la hidrodinámica general en todo el sistema de BSQ incluyendo la circulación residual de toda la simulación, la variabilidad diurna y quincenal del sistema, y el tiempo de residencia. En cuanto a la termodinámica, se presentan los resultados del residual de temperatura y salinidad de toda la simulación, así como de los transectos sobre los canales profundos de Bf y BsQ. El intercambio de flujos entre el océano y BSQ se describe en un transecto perpendicular a la boca de conexión de acuerdo a los flujos residuales de toda la simulación, y a los flujos de acuerdo a la variabilidad diurna y quincenal. Para describir la influencia de los procesos físicos en la dispersión del nitrato, se muestran figuras de la distribución de los trazadores en comparación con la distribución del nitrato al activar el módulo de CAEDYM.

6.2.1 Circulación residual

De acuerdo con los resultados de la simulación, las corrientes de mayor magnitud ocurren en la superficie (primera capa en la simulación $z = 0.5$ m) a diferencia de las corrientes en el fondo (Figura 22). Algunos autores sugieren que esta diferencia es un efecto del viento sobre la superficie del agua que incrementa las velocidades, mientras que en el fondo hay una mayor influencia de la fricción, y la circulación es dominada principalmente por efecto de la marea (Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006).

Flores-Vidal (2006) reporta que la circulación en BSQ está controlada esencialmente por la marea, en donde ésta explica el 95 % de la magnitud de la velocidad de las corrientes medidas en el fondo, mientras que en la superficie explican el 70 %. Esto pudiera explicar la magnitud cero en el canal profundo central de la capa de fondo, en donde al considerar al residual, se elimina el efecto de la marea por lo que el flujo menos el refluo tiende a dar velocidades residuales de cero o cercanas a cero entre mayor sea su dependencia con la marea.

Las regiones adyacentes al canal con velocidades mínimas pueden estar relacionadas a la misma circulación interna del sistema, efectos de la batimetría y fricción con el fondo, y expuestos a mayor influencia del viento en la capa superficial.

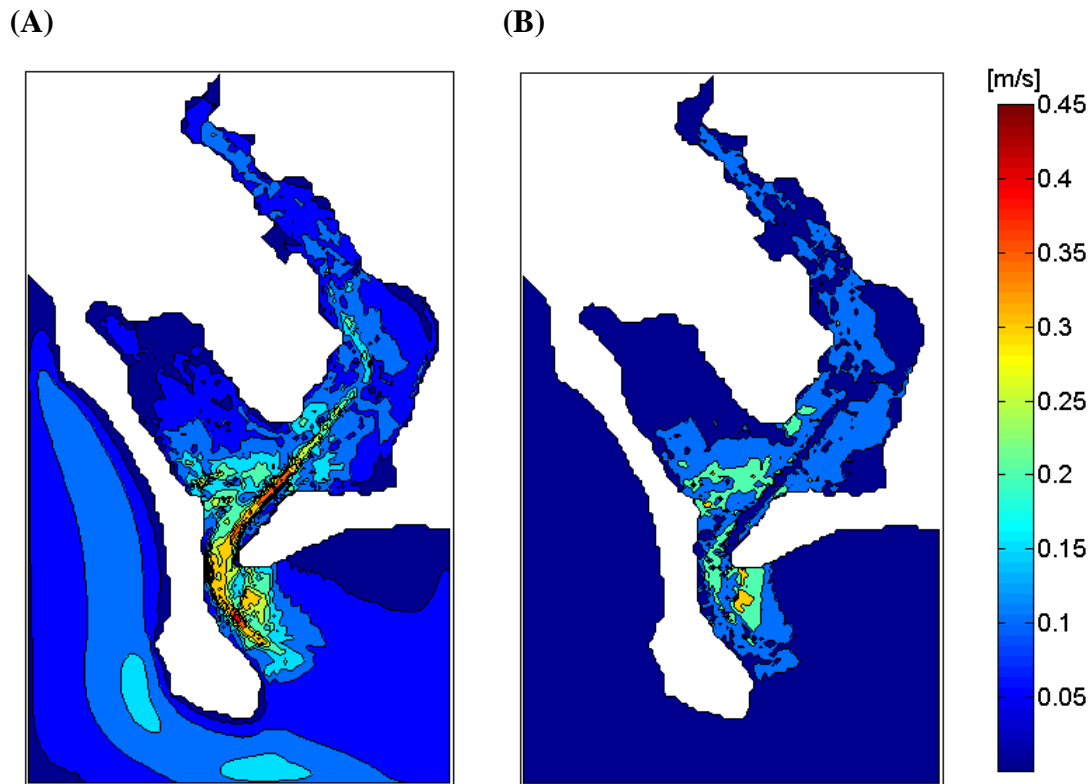


Figura 22.- Magnitud de las corrientes residuales para todo el periodo de simulación en la superficie (A) y fondo (B)

En general, las velocidades en el interior de la bahía, tanto en la superficie como en el fondo (Figura 22), no superan los 0.4 m/s. Trabajos anteriores con datos de mediciones de ADCP registran velocidades en el interior que oscilan alrededor de 0.1 m/s (Angulo-Larios, 2006; Flores-Vidal, 2006). Por otro lado, por medio de una simulación numérica, Juárez-Vidal (2014) registra corrientes residuales de hasta 0.18 m/s en superficie con dirección ENE principalmente. En el caso de la simulación por ELCOM, los resultados muestran una

sobreestimación en la magnitud de las corrientes, particularmente en la región de la boca y parte del canal central en donde las velocidades alcanzan los ~ 0.3 m/s en superficie. De acuerdo a algunas limitaciones en el uso del modelo, se cree que esta diferencia pudiera estar relacionada con una variación en el coeficiente de fricción empleado en la simulación, además del efecto del viento en superficie.

De las simulaciones obtenidas se observa que las corrientes de mayor magnitud en promedio de la columna de agua se efectúan a lo largo del canal principal (Figura 23), principalmente en la región de la boca que se encuentra fuertemente influenciada por el bombeo de la marea que modifica las corrientes hasta el interior de BSQ. Al norte del brazo *este* (Bsq), se observan corrientes de 0.1 m/s que se cree, podrían estar relacionadas a un efecto de cuello de botella por lo estrecho y diferencia de profundidad relacionada al canal.

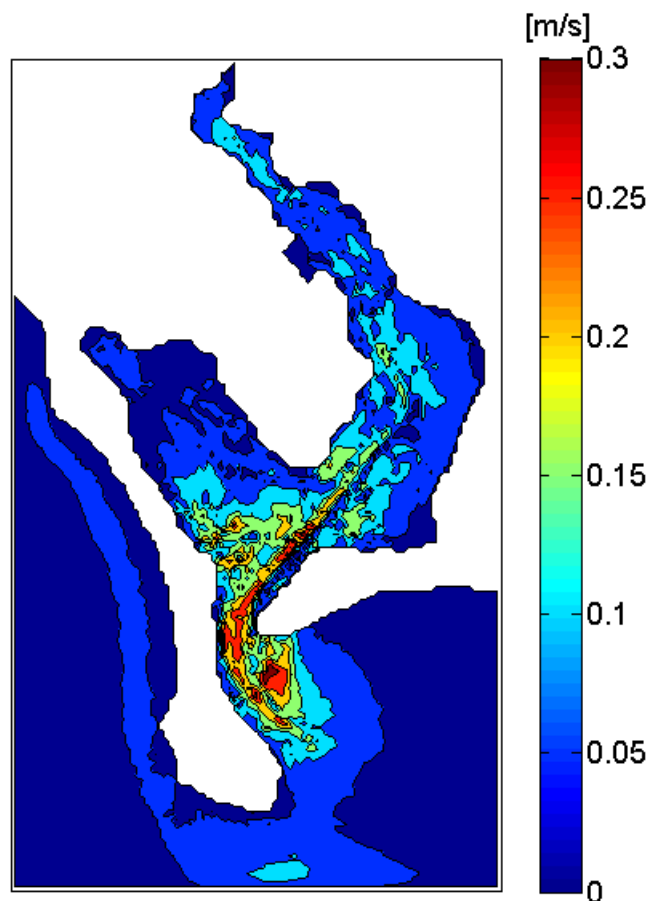


Figura 23.- Magnitud de las corrientes residuales promedio de la columna de agua.

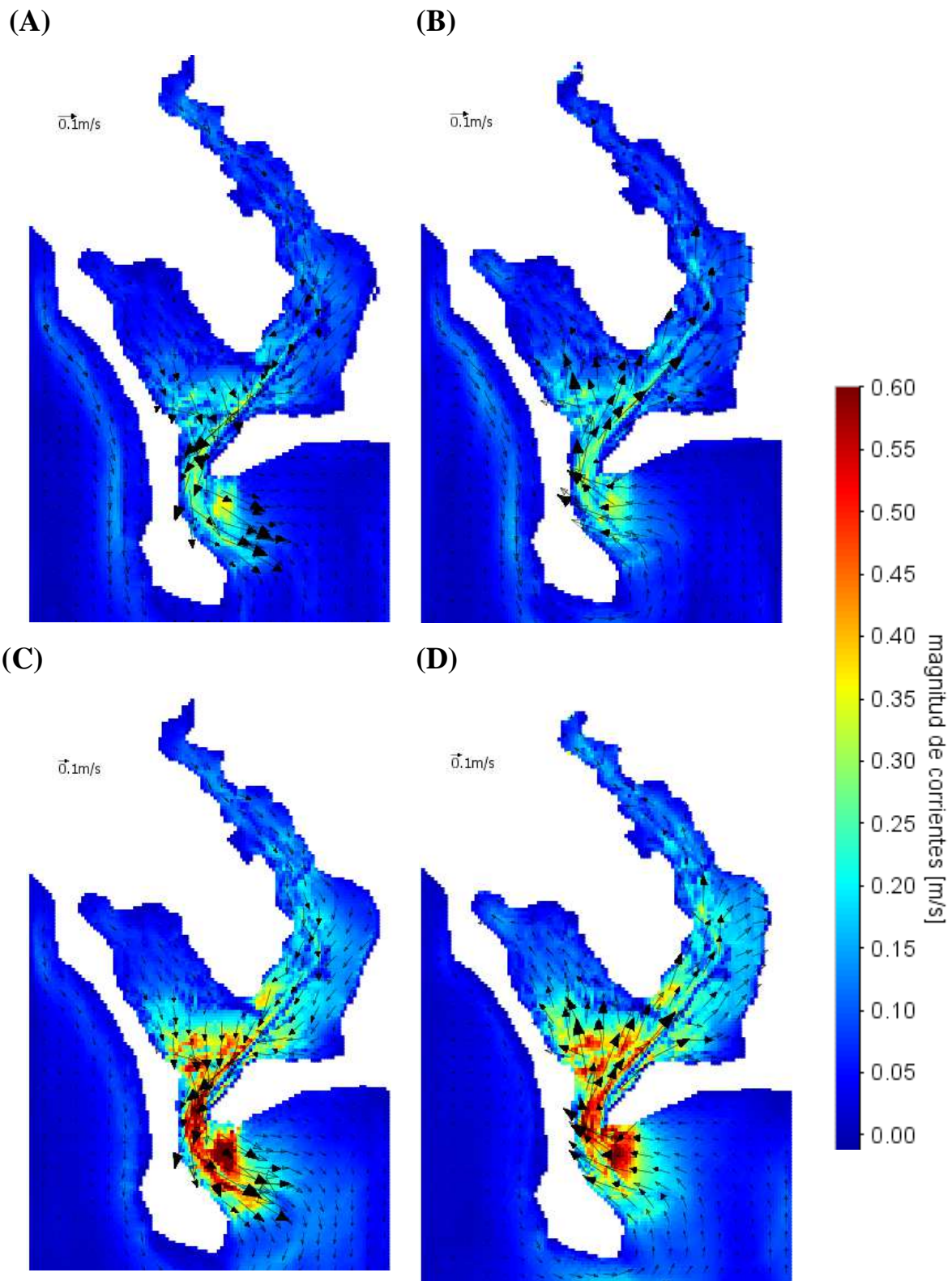


Figura 24.- Magnitud de las corrientes promedio en la columna de agua en condiciones de marea muerta (A y B) y marea viva (C y D) en flujo (B y D) y refluo (A y C).

En cuanto a la variabilidad diurna (Figura 24) las corrientes hacia el norte se relacionan al flujo (bombeo de agua hacia el interior), y las corrientes hacia el sur con el reflujo (bombeo de agua hacia el exterior). Estas a su vez varían en intensidad de acuerdo con variaciones en la amplitud entre marea viva y marea muerta.

Las animaciones muestran resultados similares a los descritos por Vidal-Juárez (2014) y Delgado-González (2010) en donde durante el flujo y reflujo, los flujos de agua que entran y salen se canalizan en la boca ocasionando un aumento en la velocidad de la corriente en esta región. En esta misma simulación, es posible observar que existe una dinámica distinta entre los diferentes brazos de BSQ que no fue posible distinguir con flujos residuales. La proximidad hacia la boca, el ancho de la base y el tamaño de Bf, provocan una mayor influencia directa del flujo y reflujo que ocurre en la boca reflejada en la dirección de la corriente (corrientes hacia el *norte* en flujo y corriente hacia el *sur* en reflujo). Por otro lado en Bsq se observa un retraso en el cambio de dirección de estas corrientes que pudiera estar influenciado en un retraso de la onda de marea hasta la cabeza, además de las limitaciones del flujo por el ancho de su base. Esta diferencia en la dinámica pudiera tener un efecto en el tiempo de residencia que a su vez, podría estar relacionado con procesos biogeoquímicos distintos para cada región.

Una característica importante a resaltar de las animaciones obtenidas con ELCOM, es la capacidad de la simulación de inundar y secar algunas regiones de la bahía por efecto de los cambios en el nivel del mar y la baja profundidad que caracteriza a BSQ como lo reporta Delgado-González (2010). Durante las animaciones se observan cambios en el área de cobertura por la variación en el nivel del mar, la línea de costa aumenta en pleamar y se reduce en bajamar, además de exponer zonas someras en la región interna de la bahía. En la figura 25 se muestra que durante el reflujo la bahía se “vacía”, de manera que el nivel del mar es más alto fuera de la bahía y el nivel más bajo en el interior; por otro lado, durante el flujo la bahía se inunda, el nivel del mar es mayor en el interior que en el exterior, esto demuestra el empuje de la masa de agua por el flujo de la marea y se acumula en la parte norte hasta cubrir la región más somera hasta la cabeza de Bsq.

Las zonas someras expuestas durante el reflujo se localizan principalmente hacia la cabeza de ambos brazos, particularmente en Bsq, y en la costa interna *este* de la bahía; además de

estos cambios en la línea de costa al vaciarse, se observa una región somera expuesta en la base del brazo de Bf. Esta región probablemente tiene una influencia importante en la hidrodinámica de Bf al canalizar el flujo de entrada de la boca por los canales profundos secundarios que se encuentran a sus costados *este* y *oeste*.

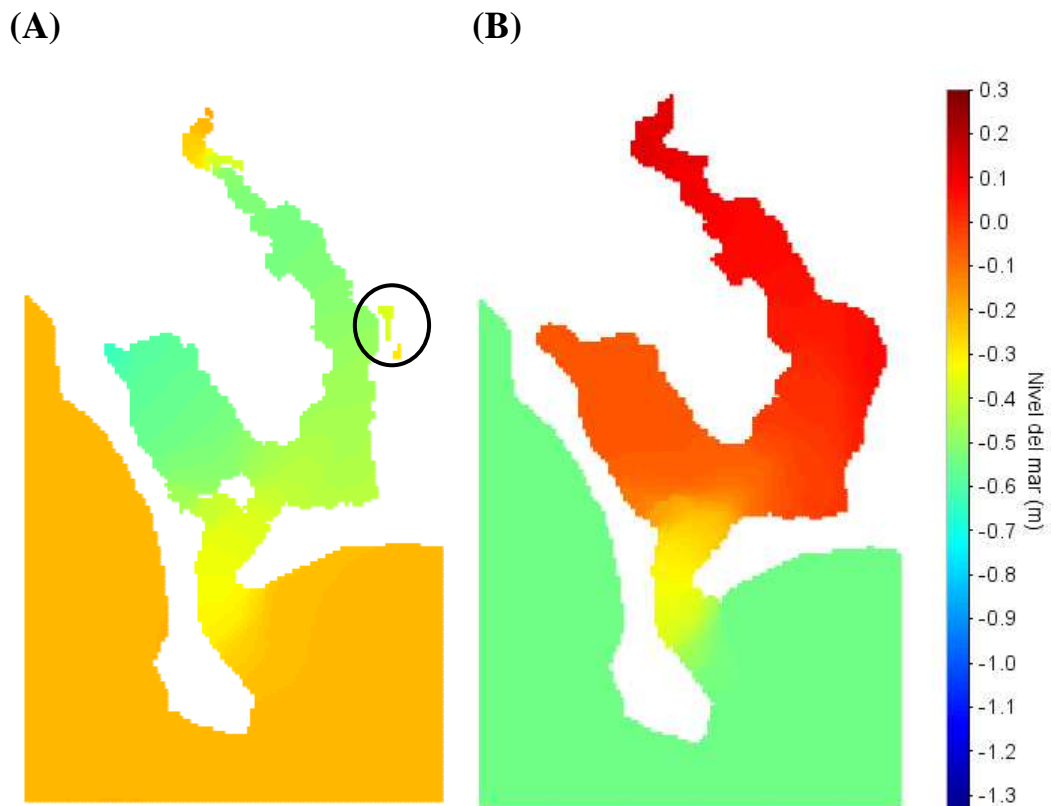


Figura 25.- Representación de celdas “secas” o expuestas (A) e inundadas (B) de acuerdo a la variación en el nivel del mar (flujo y refluo respectivamente). Con un círculo se muestran celdas “aisladas” del resto de la masa de agua.

Debido a estos cambios de nivel del mar y a la resolución de la batimetría, se encontró una limitación relacionada a la presencia de celdas “desconectadas” del resto de la malla al bajar el nivel del mar (Figura 25). Estas celdas quedaron aisladas, lo que las hizo

vulnerables al calentamiento o enfriamiento prematuro en relación a las demás celdas adyacentes de acuerdo a la variabilidad de la radiación solar durante el día o la noche y al esfuerzo del viento. Esto se observó principalmente en la región de la cabeza de Bsq en donde las celdas más al norte se desconectaron y se cree que pudieran estar relacionadas a la diferencia observada de la temperatura residual y los datos medidos en esta región; lugar donde se esperaba encontrar los valores más altos de temperatura al tener profundidades mínimas y estar expuestas a la radiación solar con mayor tiempo de residencia.

La presencia de remolinos en el exterior de BSQ se observa en ciertos pasos de tiempo que se obtuvieron de la simulación y con mayor definición en los resultados promedio de la columna de agua. Se cree que las posibles limitaciones para observar con mejor definición y mayor número de remolinos reportados en trabajos anteriores (Juárez-Vidal, 2014), se debe a la resolución de la malla, a la profundidad a la que se forman, a los pasos de tiempo empleados y a la ubicación de la frontera abierta (FA) (particularmente en la FA al sur del dominio).

Los remolinos más evidentes fueron de vorticidad ciclónica que se lograron observar de forma esporádica afuera de la boca, particularmente en el extremo *sur-sureste* de la barra entre BSQ y el océano adyacente (Figura 26); zona de remolinos similar a la reportada por Juárez-Vidal (2014), sin embargo la autora describe la formación de una vorticidad anticiclónica pequeña al *este* y una vorticidad ciclónica mayor el *sur-este* de esta región, entre los 10 y 15 m de profundidad, además de pequeños giros en el interior que no se observaron en este trabajo.

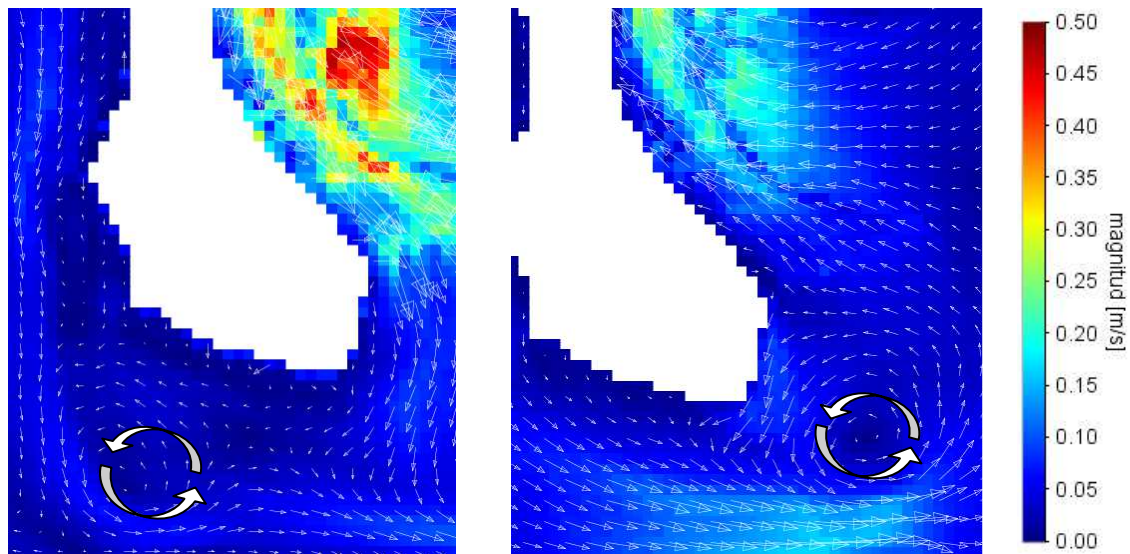


Figura 25.- Presencia de remolinos esporádicos a lo largo de la simulación.

El remolino que se forma en la parte sureste de la barra fue el de mayor frecuencia, el cual se genera justo antes del cambio entre el flujo al refluo y es desplazado hacia el océano hasta desaparecer en menos de dos horas.

6.2.2 Dinámica en la boca

Las magnitudes de los flujos residuales obtenidas con ELCOM (Figura 27) fueron ligeramente menores que las reportadas en trabajos anteriores con valores por debajo de los 0.05 m/s, mientras que Angulo-Larios (2005) reporta magnitudes del orden de 0.05 m/s en la columna de agua y de hasta 0.28 m/s en superficie, y Vidal-Juárez (2014) encuentra velocidades de ~ 0.05 m/s en el canal somero y ~ 0.1 m/s en el canal profundo. Los flujos de salida (azules) de mayor magnitud en el presente trabajo (0.04 m/s) se localizan alrededor de los 4-5 m de profundidad cerca de la parte media del canal, mientras que las mayores magnitudes de los flujos de entrada (rojos) se encuentran en la superficie (0.05 m/s).

De acuerdo con varios autores (Wong 1994; Valle-Levinson et al., 2003; Valle-Levinson et al., 2009; Arnott et al., 2012), en los estuarios los flujos residuales de entrada tienden a

ocurrir por los canales, mientras que los flujos de salida por las partes someras del canal. Sin embargo Valle-Levinson et al. (2003) describen una circulación inversa para antiestuarios (i.e. Golfo de Fonseca y Bahía de Guaymas) en donde el flujo transversal en la boca se caracteriza por un flujo residual de salida por los canales profundos y un flujo de entrada por las partes someras.

Trabajos anteriores han caracterizado a BSQ como una laguna hipersalina debido a la poca o la nula influencia de aportes de agua dulce y en donde la mayor densidad se encuentra en el interior (Álvarez-Borrogo, 1975; Millán-Núñez et al., 1982 y Camacho-Ibar et al., 1999), tomando esto en cuenta, se puede definir a BSQ como un estuario inverso por lo que se esperaría una circulación inversa a la descrita en la literatura para esta misma área.

A pesar de que en trabajos anteriores se han descritos estos flujos para BSQ como condiciones de un estuario (Flores-Vidal, 2006; Angulo-Larios, 2006; Valle-Levinson et al., 2009), con flujos de entrada por el oeste (canal profundo) y los flujos de salida por el este (zonas someras), en el presente trabajo se observó un comportamiento inverso similar a las condiciones teóricas de un antiestuario. Sin embargo, se ha observado que en ocasiones las salinidades más altas se encuentran en la superficie debido a que el efecto del calentamiento del agua es mayor al de la evaporación (Camacho-Ibar, comunicación personal), y esto pudiera definir una circulación estuarina para BSQ. Flores-Vidal (2006), al describir la dinámica en la boca, encuentra que en uno de los escenarios de mareas muertas, en donde el efecto de fricción es menor, existe un flujo de entrada por el lado *este*; sin embargo, el autor sugiere que el cambio en dirección del flujo es una posible evidencia de que al disminuir los efectos turbulentos, los flujos en la boca podrían ser modificados por los efectos de rotación terrestre en donde los flujos de entrada ocurren preferentemente en la frontera *este*.

Limitaciones encontradas en ELCOM con respecto a la variabilidad de los coeficientes de fricción y el efecto “escalonado” en la malla que repercute en las zonas cercanas al fondo y paredes, pudieran tener una influencia en las corrientes observadas en la boca que modifique la localización y dirección de los flujos.

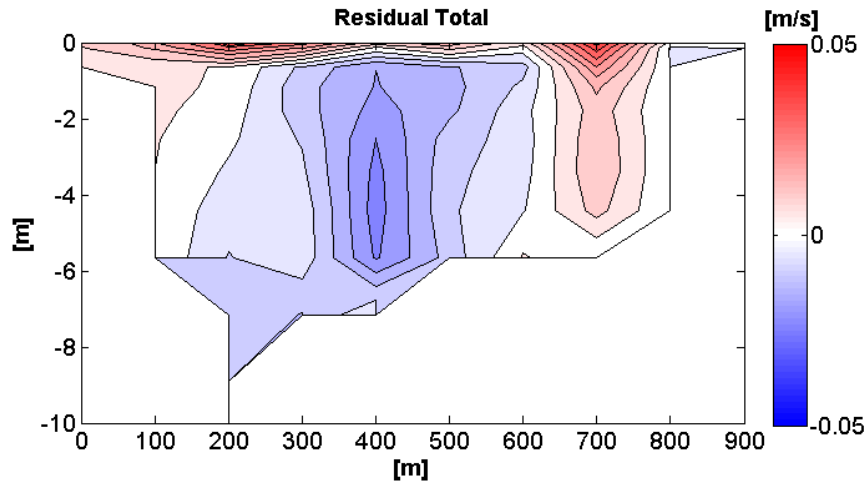


Figura 27.- Flujos residuales perpendiculares a la boca de BSQ representados por las velocidades de la componente V para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).

Los flujos estuario-océano cambian de una variabilidad transversal cuando dominan los efectos de fricción, a una variabilidad en la vertical cuando estos efectos disminuyen (Valle-Levinson et al., 2003). En general, la distribución de los flujos de entrada y salida a lo largo de la columna de agua sugiere una clara influencia de los efectos de fricción. Sin embargo, todavía se logra ver un flujo de entrada por superficie a lo largo de todo el transecto que se limita hasta los ~ 0.5 m de profundidad (Figura 27).

Bajo fuerte influencia de los efectos de fricción, los flujos residuales de entrada ocurren desde la superficie hasta el fondo en los canales y los flujos residuales de salida ocupan todas las partes someras. Mientras que la fricción decrece y los efectos de rotación prevalecen, los flujos de entrada permanecen en los canales pero ahora restringidos a la capa de Ekman en el fondo, mientras que los flujos de salida ocupan toda la capa superficial (Valle-Levinson et al., 2003; Valle-Levinson et al., 2009), por lo que se espera una misma dinámica en la vertical pero con la dirección de los flujos invertida para condiciones de antiestuario.

A pesar de que en el canal profundo se distinguen flujos de salida, el núcleo de mayores magnitudes se localiza hacia el centro del transecto y no directamente sobre el canal. Esta localización pudiera estar relacionada a la forma del transecto en esa región en donde la

variabilidad de profundidad entre el canal somero y profundo es de tan sólo ~ 2 m y pudiera no tener influencia significativa si se compara con el ancho de la boca (~ 900 m).

La dirección de los flujos se mantiene a pesar de la variabilidad quincenal (Figura 28), sin embargo, la magnitud de los flujos residuales en marea viva es mucho más intensa que en marea muerta con una variación de hasta casi el doble en la parte media del flujo de salida y en la superficie para el caso de los flujos de entrada.

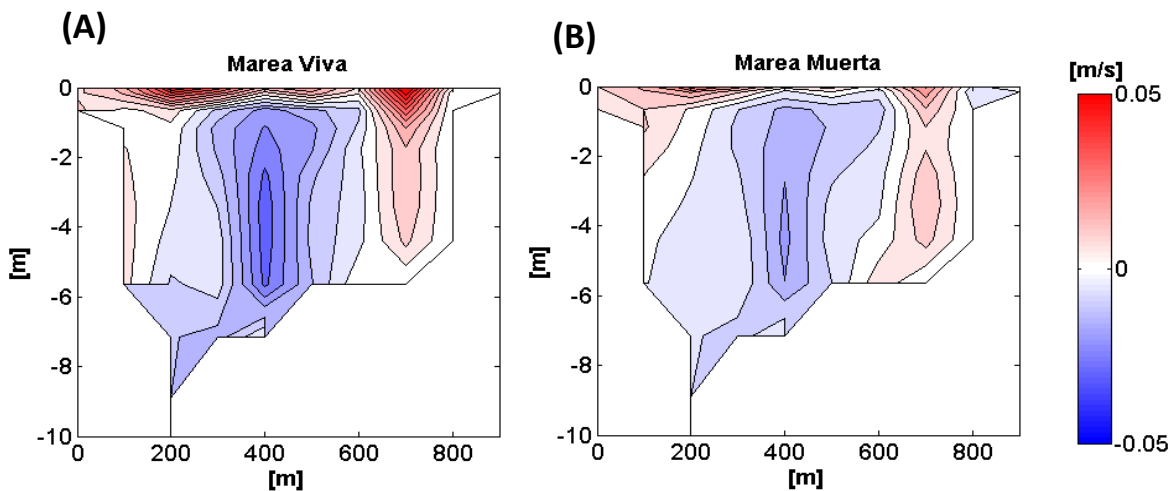


Figura 28.- Variabilidad quincenal de los flujos perpendiculares a la boca de BSQ representados por la componente V. En el panel (A) se muestra el residual de 5 días en periodos de marea viva y en el panel (B) el residual de 5 días en periodos de marea muerta.

A diferencia de los flujos residuales en marea viva y marea muerta, los flujos en la incursión de la marea se definen como flujos de entrada a BSQ a lo largo de todo el transecto de la boca y flujos de salida en el reflujó de la marea a lo largo de todo el canal (Figura 29).

De igual forma, en cuanto a la variabilidad entre la pleamar y la bajamar se observaron las mayores magnitudes en condiciones de marea viva hacia el *oeste* y parte media del canal. En esta ocasión, las velocidades llegan a alcanzar magnitudes de hasta > 0.1 m/s en marea viva y 0.7 m/s en marea muerta. ELCOM sobreestima estas magnitudes ya que en trabajos

anteriores (Flores-Vidal, 2006; Angulo-Larios, 2006) reportan magnitudes menores tanto para marea viva de ~ 0.1 m/s como para marea muerta con magnitudes de ~ 0.3 cm/s.

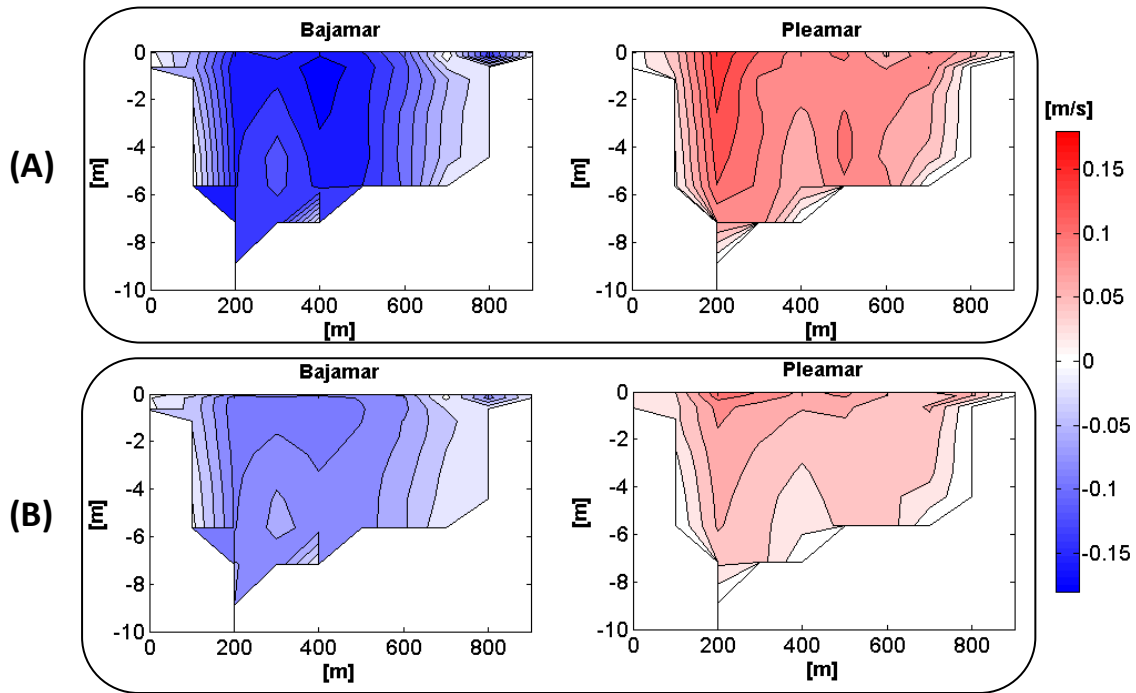


Figura 29.- Variabilidad diurna de de los flujos perpendiculares a la boca de BSQ representados por la componente V. En el panel (A) se muestran las condiciones de pleamar y bajar en marea viva, y en el panel (B) se muestran en condiciones de marea muerta.

Vidal-Juárez (2014) describe que durante el pleamar, agua más fría proveniente del océano incursiona por el fondo y la columna de agua se estratifica e infiere que la estratificación se debe al transporte de agua de océano-BSQ. Sin embargo, los resultados de la variabilidad diurna del presente trabajo muestran una columna de agua bien mezclada tanto para pleamar como bajar.

6.3 Dinámica termohalina de Bahía San Quintín

Los resultados de distribución de temperatura y salinidad en el interior de BSQ (Figura 30) muestran un aumento gradual de estos valores hacia el norte (cabeza) de ambos brazos, mismo comportamiento reportado anteriormente por Camacho-Ibar et al. (2007), Hernández-Ayon et al. (2007) y Hernández-López (2009).

Las salinidades (Figura 30 panel A) más altas son de ~ 37 y se encuentran en la cabeza del brazo *este* (Bsq) y las mínimas oscilan entre los 34 - 34.5 en la región de la boca. Por otro lado, los valores más altos de temperatura (Figura 30 panel B) oscilan alrededor de los 20°C en la cabeza del brazo *oeste* (Bf), y los mínimos en el interior de $\sim 16^{\circ}\text{C}$ en la región de la boca. A pesar de que los resultados de ELCOM demuestran una similitud en el rango de variabilidad reportado por Hernández-Ayón et al. (2007) (temperaturas en la zona oceánica 4°C y 7°C más bajas que en la zona media y la cabeza de Bsq respectivamente), en este caso la temperatura mayor se encontró en el brazo *oeste* (Bf) en lugar del brazo *este* (Bsq).

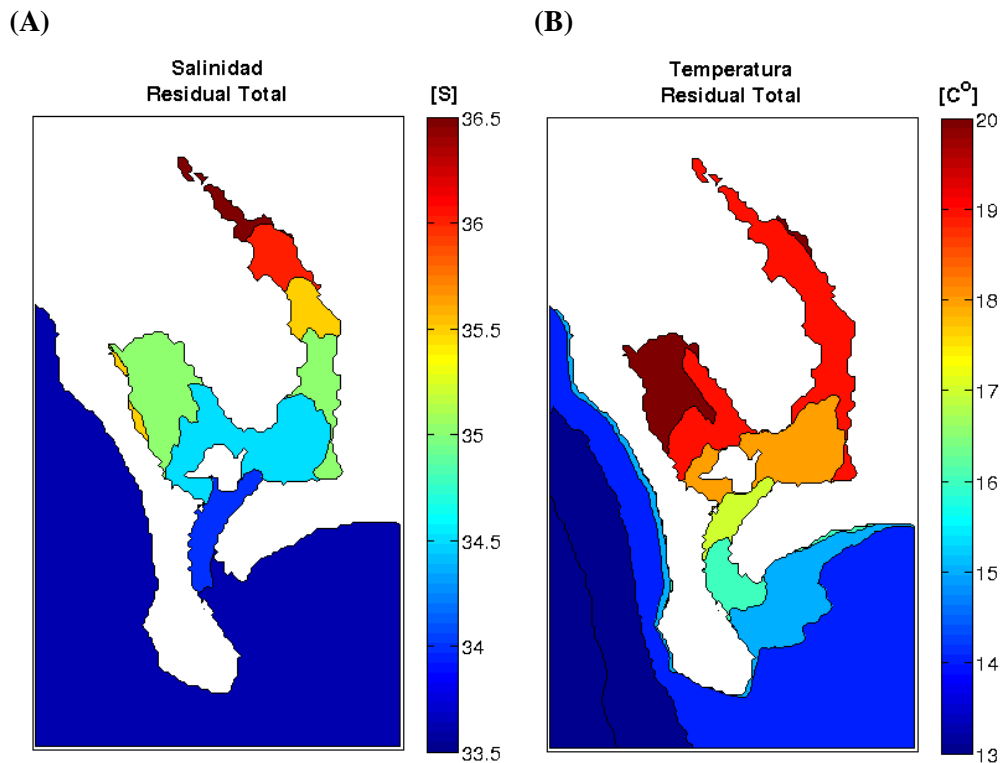


Figura 30.- Variabilidad de salinidad (A) y temperatura (B) residual de todo el periodo de simulación (63 días).

Los valores altos de temperatura hacia la cabeza de ambos brazos son explicados debido a la poca profundidad y mayor tiempo de residencia que caracterizan a esta región en donde los efectos de evaporación son más notorios. Sin embargo, los mayores tiempos de residencia y las zonas más someras se encuentran en el brazo *este* y no en el brazo *oeste* en donde se observan las mayores temperaturas en el residual de la simulación. Probablemente las celdas aisladas o “desconectadas” al bajar el nivel del mar pudieran alterar el residual de este brazo al quedar expuestas a cambios de radiación solar y esfuerzo del viento que provoquen un enfriamiento.

La tendencia del aumento de temperatura y salinidad hacia la cabeza que presenta BSQ ha sido descrita anteriormente, y es atribuida a la alta tasa de evaporación, baja tasa de precipitación y al intercambio entre océano-BSQ (Álvarez-Borrego, 1975; Millán-Núñez et al., 1982; Camacho-Ibar et al., 1999). Para la región más dinámica de la boca, Lara-Lara (1980) concluye que la variabilidad de los valores que ocurren en esta región se debe principalmente a tres factores: eventos de surgencia (según la temporada), ciclos de marea, y la radiación solar. Mismos factores que Millán-Núñez (1981) relaciona con los cambios de salinidad, temperatura, nutrientes, clorofila *a* y abundancia de fitoplancton para toda la bahía.

Lo mismo ocurre al observar el residual de la variabilidad quincenal (Figura 31) en la temperatura, los valores más altos suceden en Bf y se distinguen celdas aisladas de menor temperatura hacia la cabeza de BsQ. En esta misma figura se logra observar el efecto de la marea viva en los valores de temperatura, en donde la influencia del flujo permite incursionar agua más fría hasta la parte alta del brazo de BsQ, provocando una disminución en la temperatura. En condiciones de marea viva el gradiente de temperatura es menor, tanto para el exterior como para el interior, en donde las temperaturas permanecen por debajo de los 18 °C. Se sugiere que la poca variabilidad del gradiente de temperatura bajo estas condiciones pudiera ser resultado del menor tiempo de residencia y procesos de mezcla por el flujo y reflujos de la marea. En periodos de marea muerta, en donde en conjunto con el mayor tiempo de residencia y la poca mezcla que generan estas condiciones, la temperatura en el interior es más alta y se observa una mayor variabilidad en el exterior.

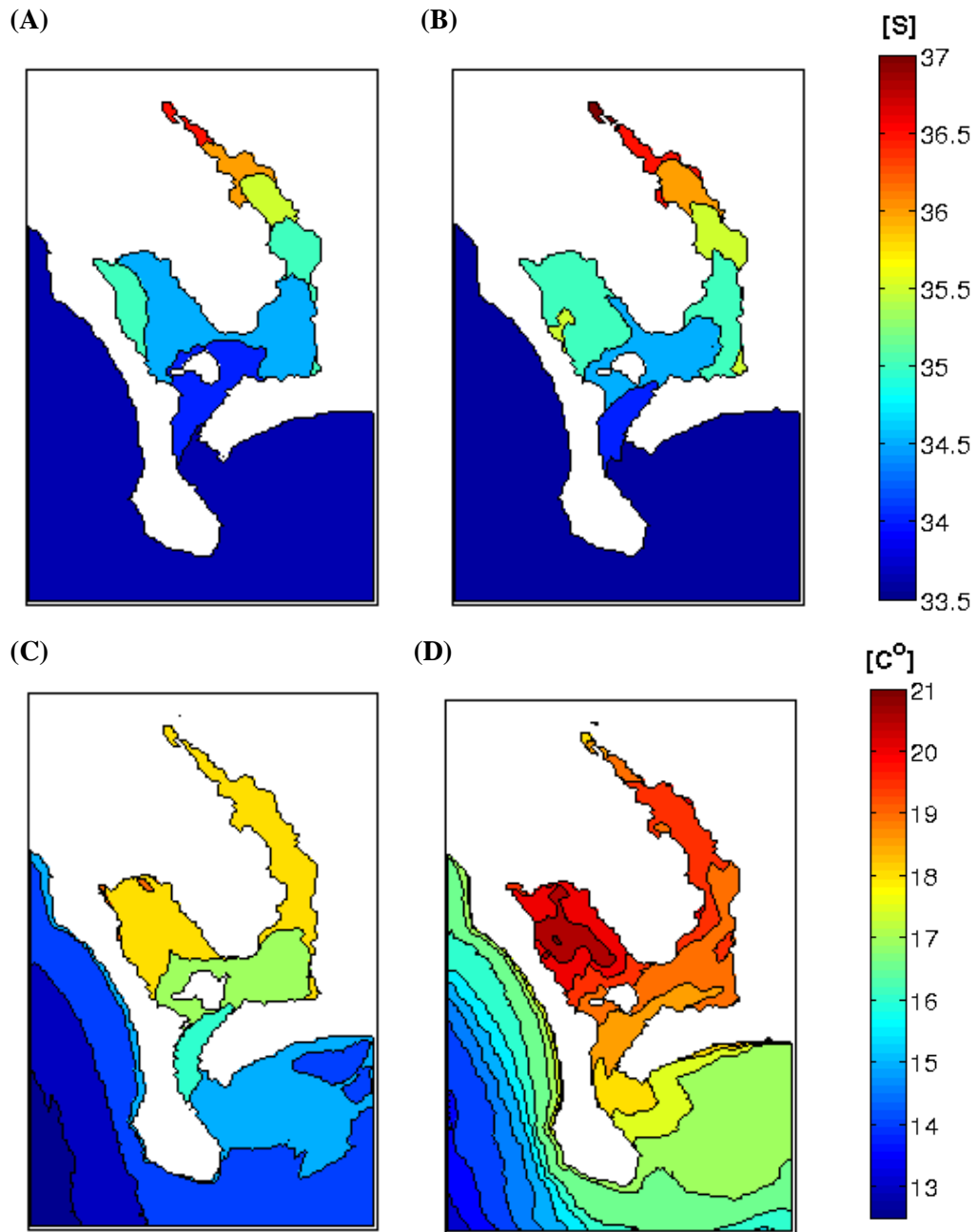


Figura 31.- Variabilidad quincenal de salinidad (A y B) y temperatura (C y D) para condiciones de marea viva (A y C) y marea muerta (B y D).

Los transectos sobre los canales profundos muestran los valores más altos de temperatura y salinidad residual hacia la cabeza de ambos brazos (Figuras 32 - 35) con excepción de la temperatura en el brazo de Bsq (Figura 34); en donde en la cabeza presenta una menor temperatura que en la parte central del transecto, sin embargo es una variación de tan sólo 0.1°C .

En estas figuras se puede observar que existe una mayor variabilidad de temperatura en Bf ($\sim 1.5^{\circ}\text{C}$), que en Bsq ($\sim 0.2^{\circ}\text{C}$), y de manera inversa en la salinidad en donde Bf presenta una variabilidad de ~ 0.5 y Bsq de ~ 1.5 .

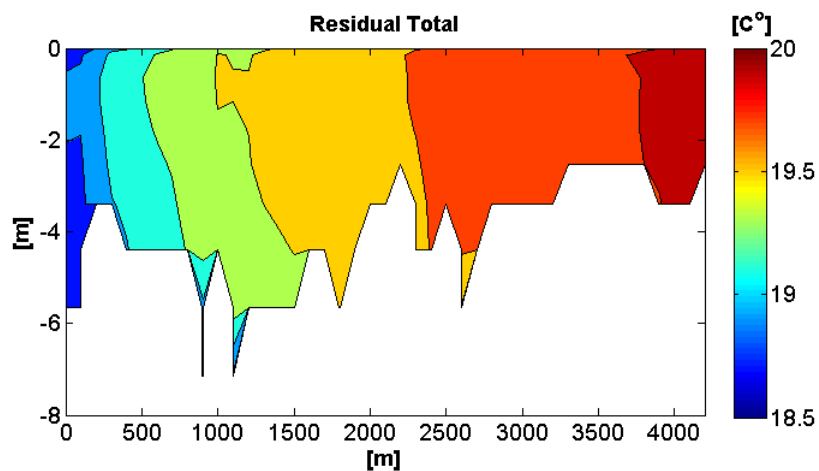


Figura 32.- Temperatura residual promedio en el canal profundo de Bahía Falsa para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).

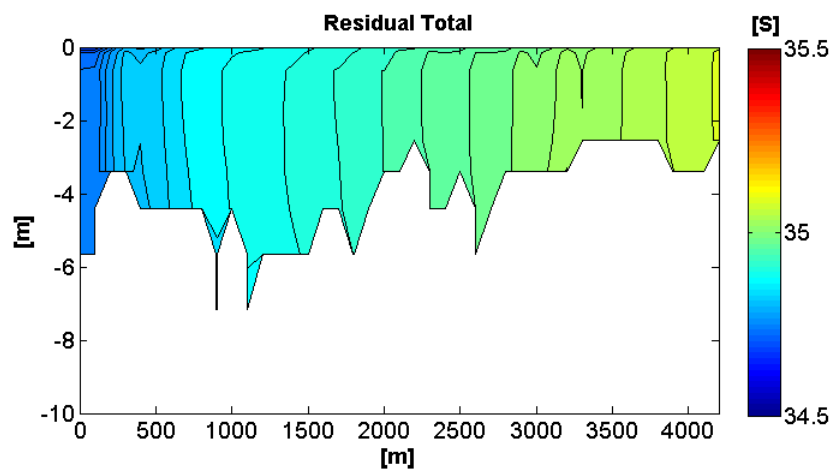


Figura 33.- Salinidad residual promedio en el canal profundo de Bahía Falsa para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).

La cercanía de Bf a la boca permite una influencia directa del aporte de agua del exterior, que se ve reflejada en un mayor gradiente de temperatura en el transecto en comparación con el gradiente en Bsq. Sin embargo, se cree que en Bf por ser más dinámica y por tener menor tiempo de residencia, provoca un gradiente menor en la salinidad en comparación con el brazo de Bsq, en donde se encuentran los mayores tiempos de residencia relacionados al aumento de la temperatura con poca mezcla y una mayor variabilidad en la salinidad por efectos de evaporación.

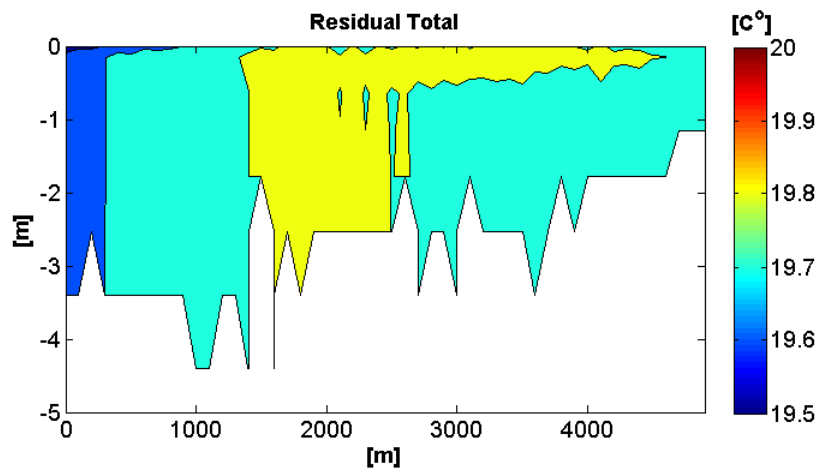


Figura 34.- Temperatura residual promedio en el canal profundo de Bahía San Quintín para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).

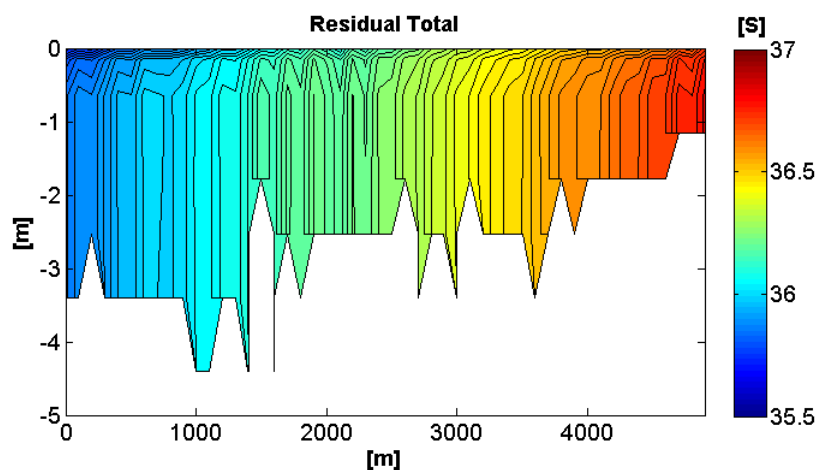


Figura 35.- Salinidad residual promedio en el canal profundo de Bahía San Quintín para todo el periodo simulado (Mayo-Junio).

Los resultados del presente trabajo muestran una columna de agua bien mezclada en todos los pasos de tiempo. Los valores de temperatura y salinidad en la columna de agua son relativamente homogéneos desde la superficie hasta el fondo, por lo que la estratificación vertical es mínima, tanto en marea viva como en marea muerta, y un gradiente de variación horizontal en todos los transectos estudiados; esto sugiere que el balance de sal dentro de BSQ se mantiene por procesos difusivos desde la cabeza hasta la boca.

En bahías o lagunas costeras donde los gradientes de densidad vertical son despreciables (como es el caso de BSQ), se ha demostrado que la dinámica obedece a los forzamientos de marea, viento y batimetría principalmente (Flores-Vidal, 2006).

6.4 Tiempo de residencia.

El tiempo de residencia determinado con ELCOM para BSQ (Figura 36) indica que los mayores tiempos de residencia se encuentran en el brazo de Bs_q, en donde en la región de la cabeza presenta un tiempo de residencia de ~ 16 días y en el resto oscila entre los 12 y 14 días. Por otro lado en el brazo de B_f los mayores tiempos de residencia fueron de ~ 14 días limitados a una mínima región en la parte más al norte de la cabeza del brazo oeste y el resto varía desde los ~ 6 hasta los 12 días desde la boca del brazo hasta la cabeza.

Como se ha mencionado anteriormente, en la región de la boca existe una dinámica muy variable e influenciada por el flujo y reflujo de la marea; esta dinámica se observa y corrobora al mostrar tiempos de residencia cercanos a cero días, lo que sugiere un continuo recambio con un posible tiempo de residencia en el rango de horas. Para el canal central, los tiempos de residencia oscilan entre los cero días en la región próxima a la boca, hasta los 12 días en la base del brazo de Bs_q.

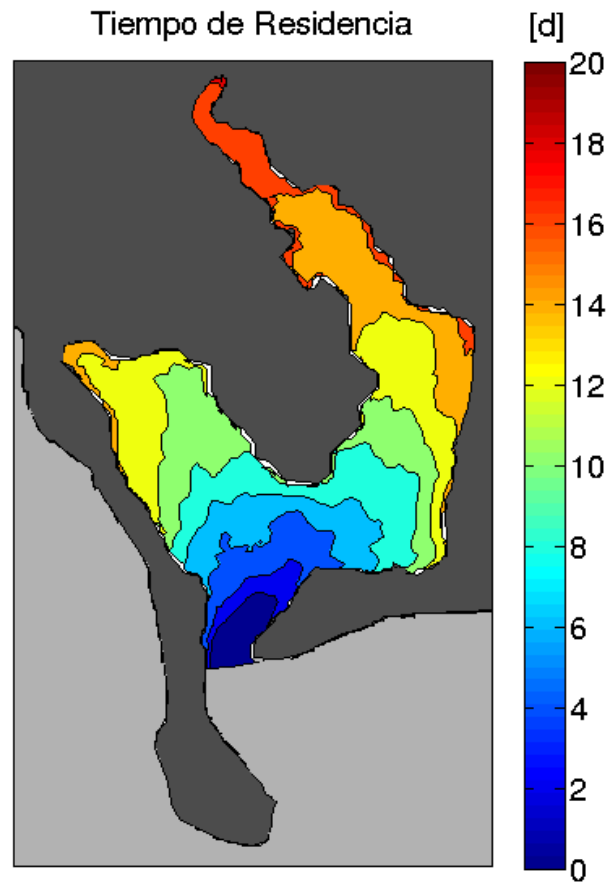


Figura 36.- Mapa de tiempo de residencia para las distintas zonas del área de estudio

Trabajos anteriores en donde se calcula el tiempo de residencia por medio de modelos de caja con volúmenes de agua y sal fijos (Camacho et al., 2003; Hernández-Ayón et al, 2004; Hernández-Ayón et al., 2007; Hernández-López, 2010), y por medio de un modelo bidimensional forzado con viento y marea (Jiménez-Hernández, 2005), se determinaron valores promedio de alrededor de 5 días para Bf y de 15 días para Bsq. Mientras que, ELCOM predice tiempos de residencia mayores para BSQ (~ 5 días), en particular para el brazo de Bf y la parte alta del brazo de Bsq.

Estas diferencias pudieran estar relacionadas al método utilizado para el cálculo del tiempo de residencia y a las condiciones de la bahía al momento del muestreo. Los métodos de cajas son derivados al asumir ciertas condiciones de flujo y volumen idealizado, como por

ejemplo, una mezcla completa e instantánea en la región de interés y la variación de los mismos flujos y volumen por condiciones externas (Aikman III & Lanerolle, 2005). Debido a esto, hay algunos procesos físicos importantes a tener en cuenta, como las mareas que promueven la mezcla y disolución de trazadores, o partículas y fluidos que oscilan debido al flujo y reflujo en las bahías o estuarios. Los modelos simples son adecuados si la preocupación es por la condición del promedio en toda una bahía o estuario, pero en gran medida subestiman o no abordan, los tiempos de residencia asociados a las regiones más pequeñas de circulación restringida. La ventaja de utilizar modelos numéricos en 3D para la estimación del tiempo de residencia, reside en su capacidad de considerar todo el volumen de la columna de agua y sus variaciones en los cambios del nivel del mar, los efectos de marea, la densidad del agua, la temperatura, la salinidad y la distribución de velocidades (Aikman III & Lanerolle, 2005).

Es importante mencionar que los tiempos de residencia estimados con ELCOM están sujetos a limitantes de la malla escalonada (sin pendientes o fronteras suavizadas), a la resolución de la batimetría, a las limitaciones en efectos de fricción y a la variación en los forzamientos meteorológicos que pudieran tener un efecto en la circulación y el volumen, ocasionando mayor o menor tiempo que los reales.

6.5 Relación de la dispersión de nitrato con la hidrodinámica de BSQ

6.5.1 Dinámica del Nitrato como trazador

La temperatura del océano y la concentración de los nutrientes inorgánicos (nitrato, fosfato y sílice) mantienen una correlación negativa consistente entre ellas. Esta correlación puede ser afectada por la radiación solar, advección y mezcla en la vertical, el consumo de nutrientes por fitoplancton en la superficie, y la tasa de regeneración de nutrientes. (Zentara & Kamykowski, 1977). Los mismos autores al analizar la relación entre la temperatura y el nitrato encontraron que las mayores diferencias en la pendiente se observan en regiones en donde existe la mezcla de dos masas de agua. Tiempo después, Chavez y Service (1996) determinan la relación entre las pendientes de temperatura-nitrato (TN), en donde las

pendientes más pronunciadas son asociadas a altas latitudes e influencia de agua oceánica, mientras que las pendientes más suaves son asociadas a aguas costeras.

Hernández-de-la-Torre et al. (2003) determinaron el total de la producción primaria por medio de algoritmos basados en la relación entre el nitrato y la temperatura con un ajuste lineal de $R^2 = 0.89$ para la estación del programa IMECOCAL más cercana a BSQ (estación 107.32). En cuanto a BSQ, Camacho-Ibar y Aveytua-Alcázar (comunicación personal), describen la relación entre el nitrato y la temperatura para una estación cercana a la boca en donde sugieren la mezcla de dos masas de agua, una del interior de BSQ explicada por un ajuste cúbico y otra proveniente del océano adyacente explicada por un ajuste lineal de 10 días de medición con una $R^2 = 0.53$.

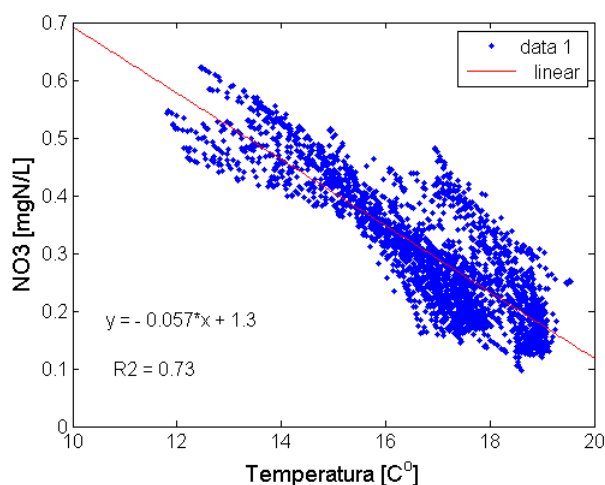


Figura 37.- Relación entre la concentración de nitrato NO_3 y la temperatura en la región de la boca de BSQ.

En el presente trabajo se obtuvo un ajuste lineal de la estación más cercana a la boca con una $R^2 = 0.73$ (Figura 37) por la cual se considera que en la simulación existe una fuerte influencia de la masa de agua oceánica hacia BSQ. Las mayores concentraciones de nutrientes se relacionan con las bajas temperaturas. Al determinar que el aporte de los nutrientes es principalmente desde el exterior, y debido a que el nitrato es uno de los nutrientes abundantes en los eventos de surgencia para la localidad, de termina a éste como un trazador conservativo por su forma inorgánica.

6.5.2 Dinámica de un trazador (escenarios de simulación)

La incursión y dispersión del trazador presenta una variabilidad espacial y temporal que depende de los cambios en la marea diurna y quincenal. Como se observó en los estudios de la hidrodinámica, el flujo y reflujo de la marea son los responsables de modular la entrada y salida de agua del sistema por lo que son los que regulan el aporte de nutrientes o del trazador hacia el interior.

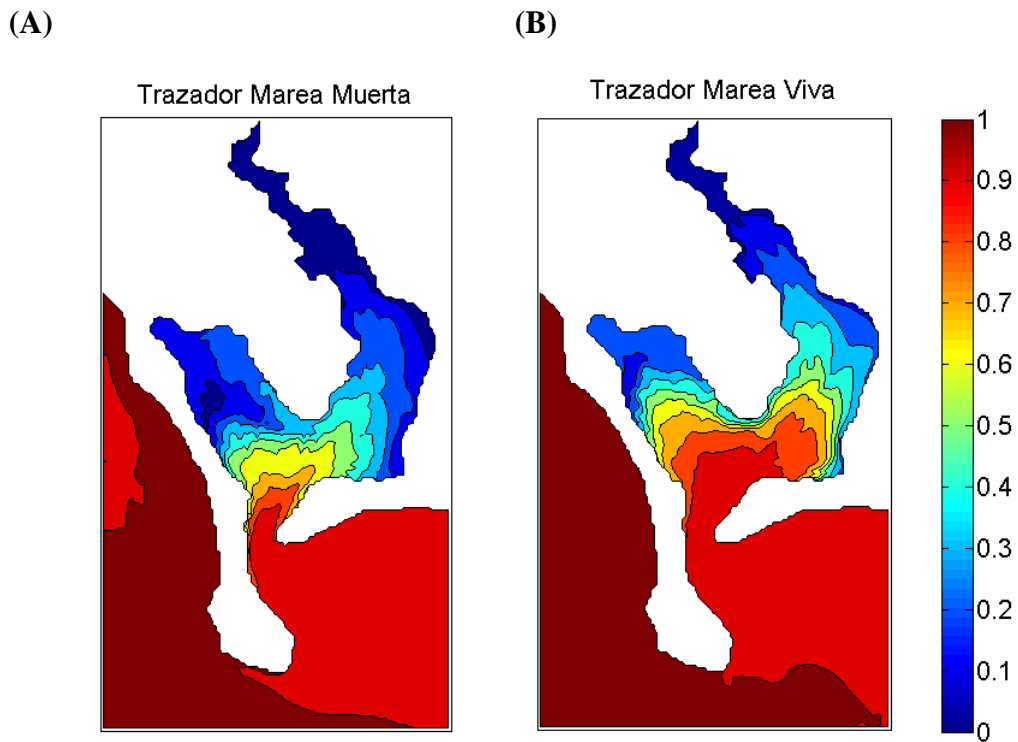


Figura 38.- Simulación de la incursión de un trazador hacia el interior de BSQ bajo condiciones de pleamar en marea muerta (A) y marea viva (B).

De acuerdo con la variabilidad quincenal, se observó una clara diferencia en la magnitud de la incursión del trazador (Figura 38). En escenarios de simulación con condiciones de flujo en marea viva la incursión del trazador proveniente del océano adyacente cubrió casi un 70% del canal central y más del 50% de Bf con una concentración relativa mayor que 0.5; mientras que durante las condiciones de flujo en mareas muertas la incursión del trazador se limitó al área de la boca y parte del canal central con incursiones esporádicas hacia Bf (Figura 38).

En condiciones de marea viva, las concentraciones permanecieron por debajo de ~ 0.8 y ~ 0.3 para el brazo *oeste* (Bf) y brazo *este* (Bsq) respectivamente. En condiciones de marea muerta la incursión del trazador fue menor y se limitó a menor a una concentración relativa de ~ 0.2 en Bsq y menor a ~ 0.5 en Bf. Cabe mencionar que en ambos escenarios (marea viva y marea muerta) se observó una concentración relativa cercana a 1 desde la frontera abierta hasta la región de la boca antes de propagarse en el interior.

6.5.3 *Procesos físicos vs. procesos biogeoquímicos.*

El cálculo de los residuales en la dispersión del trazador y nitrato al final del periodo simulado mostró una concentración que disminuye considerablemente desde el exterior hasta la parte norte de BSQ (Figura 39 y 40). En el caso teórico, si no hubiera procesos biológicos activos, las figuras 39 y 40 tenderían a disminuir hacia el interior en la misma proporción que el trazador conservativo.

El escenario con aporte de concentración constante desde la FA reveló una concentración relativa del trazador de ~ 0.7 en la región de la boca hasta concentraciones cercanas a cero en la región más al norte de Bsq (Figura 39). Las mayores concentraciones en el interior permanecieron en la región próxima a la boca, en donde existe una mayor influencia del flujo y reflujo de la marea; la proximidad de Bf a esta región permite una incursión mayor del trazador, alcanzando una concentración de 0.2 en la cabeza, a diferencia del brazo de Bsq en donde las concentraciones son cercanas a cero desde la mitad superior y de ~ 0.1 en la mitad inferior.

Por otro lado, los resultados de un aporte de concentración variable de nitrato, muestran una clara disminución en la concentración total en todo el dominio (Figura 39 panel B). Igualmente, las mayores concentraciones se encuentran en la región de la boca pero con concentraciones más bajas que ~ 0.4 , lo que crea una disminución en la concentración para todo el resto de la bahía.

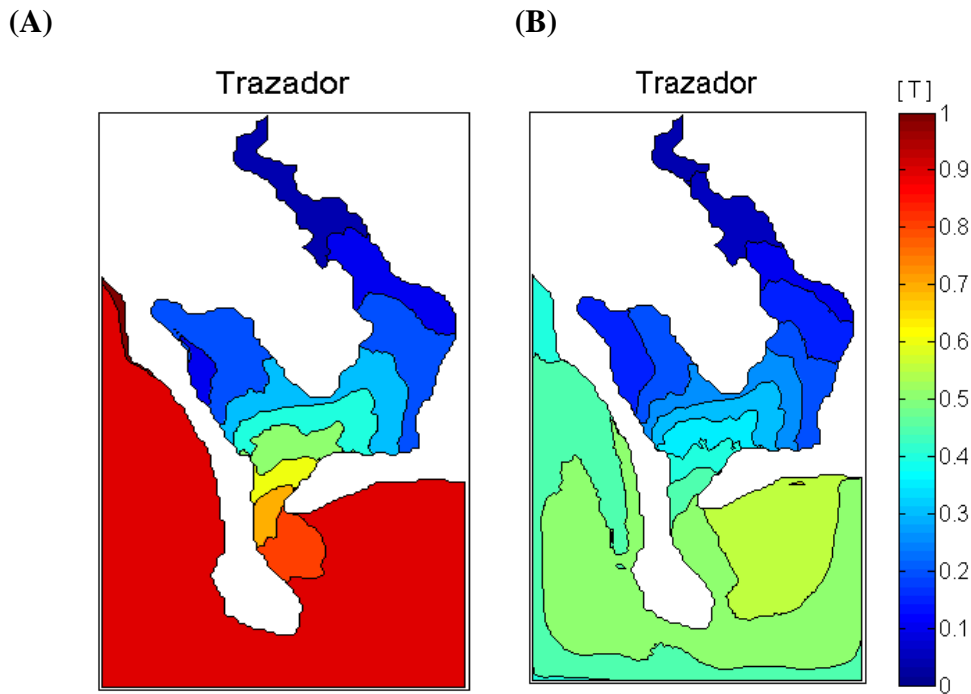


Figura 39.- Simulación de la incursión de un trazador hacia el interior de BSQ bajo condiciones de un aporte de concentración constante desde la frontera abierta (A) y un aporte de concentración variable (B).

Al igual que en la simulación de la distribución obtenida para el trazador, la distribución del aporte de nitrato (Figura 40) muestra una disminución considerable cuando el aporte de concentración es variable con un mínimo alcance hacia el interior. Las concentraciones más bajas se observan en la parte alta de la cabeza de BsQ. Todas las concentraciones en el interior permanecen por debajo de 0.2 mg NO₃/L.

En el exterior de BSQ se observó un decremento en la concentración de nitrato que pudiera reflejar a la actividad fitoplanctónica en esta región. Desde la frontera abierta, al igual que los nutrientes, fue necesario asignar un valor de aporte de fitoplancton, esta biomasa de fitoplancton pudieran estar relacionados al consumo del nitrato proveniente de la FA antes de ser introducido a BSQ.

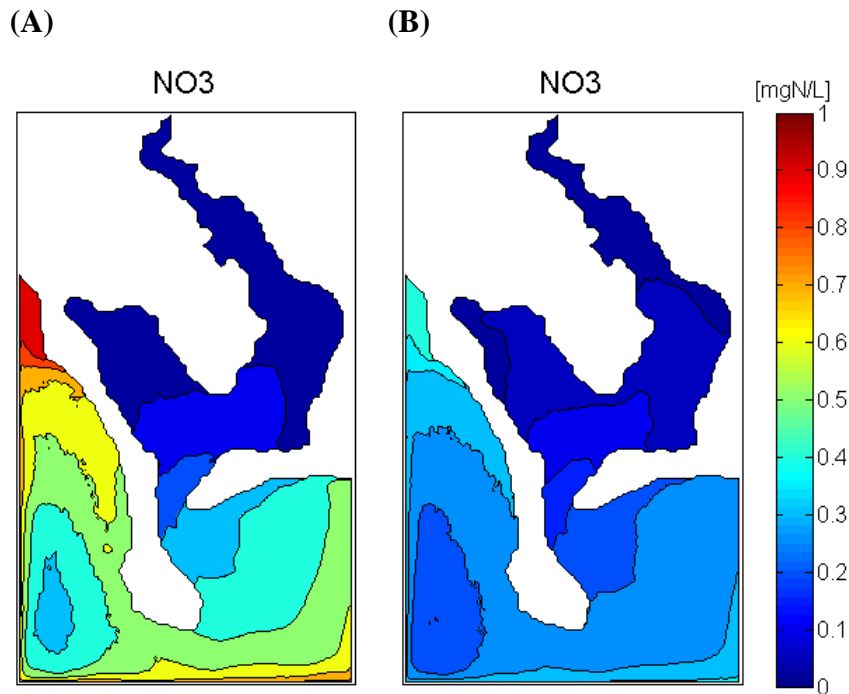


Figura 40.- Simulación de la incursión del nitrato hacia el interior de BSQ bajo condiciones de un aporte de concentración constante desde la frontera abierta (A) y un aporte de concentración variable (B).

De acuerdo a la variabilidad espacial de las concentraciones de nitrato que definen las regiones de manera puntual en cada una de las estaciones (Camacho et al., 2003; Camacho et al., 2007;) de BSQ (Figura 41), la diferencia entre el residual de las simulaciones (63 días de simulación) del aporte constante y aporte variable se da principalmente en el área de la boca y canal central, seguida por Bf y por último en Bsq, esto nos puede indicar que los procesos biológicos más relevantes en la simulación ocurren en la región de la boca o desde el exterior y después influyen los procesos físicos para especialmente el nitrato proveniente del océano adyacente.

En general, las simulaciones con el trazador y con el nitrato para ambos escenarios de (aporte constante y variable), muestran un mismo patrón de disminución de nitrato hacia el interior de BSQ. En la región de Bsq las concentraciones permanecen por debajo de los 0.3 mg NO₃/L y por debajo de los 0.5 mg NO₃/L en Bf.

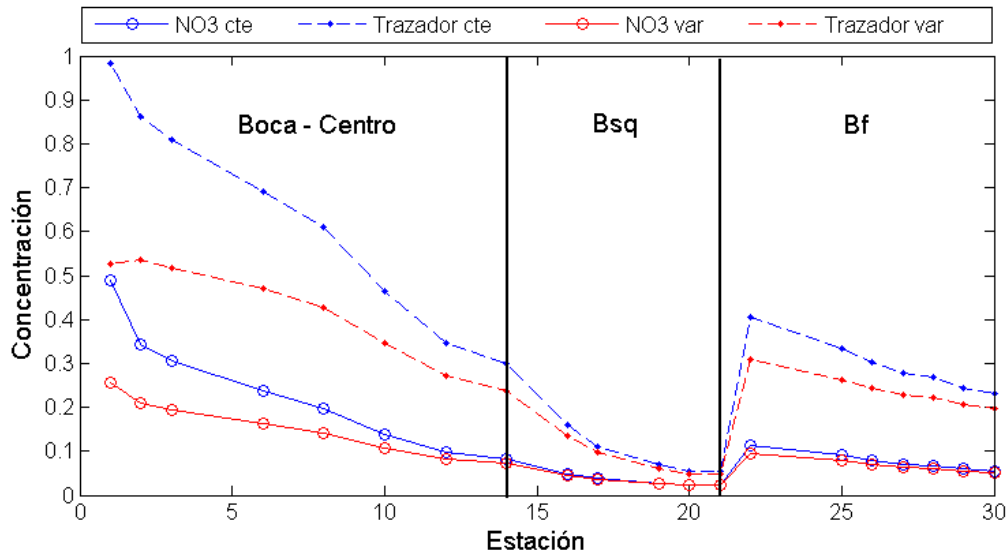


Figura 41.- Concentración promedio en la columna de agua de nitrato y trazadores para ambos escenarios en las distintas zonas de BSQ.

En Bf, a pesar de tener una mayor influencia por la incursión de la marea, se presenta una disminución importante de la concentración de nitrato en relación a la de los trazadores, esta diferencia refleja la presencia del fitoplancton utilizado en la simulación para esta región. Camacho-Ibar et al. (2003) describe que la alta productividad primaria que ocurre en Bf en comparación a Bsq se debe al menor tiempo de residencia y a una mayor influencia de los eventos de surgencia.

En regiones como Bsq, que presentan poca concentración tanto de nitrato como del trazador, además de estar limitadas por el alcance del bombeo de marea, tienen tiempos de residencia mayores que pudieran estar relacionados con procesos de reciclamiento de los nutrientes. A mayor tiempo de residencia, mayor tiempo tienen los procesos biogeoquímicos para actuar sobre los nutrientes. En escenarios reales la biomasa que se encuentra en estas regiones puede obtener amonio como fuente de N, producto de la descomposición de la materia orgánica y desecho de la fauna de la localidad, y a la disponibilidad de nutrientes que se encuentran en el sedimento, como es en el caso de los pastos marinos, mediante su consumo desde el sedimento por medio de sus raíces (Valiela et al., 1997).

Zertuche-González et al. (2009) encontraron altas concentraciones de NIDT (nitrógeno inorgánico disuelto total) cercanas a la boca relacionadas principalmente a la alta concentración de nitrato proveniente del océano adyacente, mientras que el ligero aumento de NIDT hacia el interior lo relacionan principalmente con la concentración de amonio. Esto pudiera ser un indicador de la preferencia o desarrollo de hábitats en los que crecen las macroalgas y los pastos marinos.

La fuerte disminución de nitrato en el área cercana a la boca se relaciona a la localidad con mayor biomasa de fitoplancton. El fitoplancton al ser un productor primario de crecimiento rápido, consume los nutrientes de la columna de agua al ser inyectados del océano adyacente. La concentración disminuye desde la boca para ser advechado al interior de la bahía en presencia de menos biomasa de fitoplancton. Es posible que debido a florecimiento de fitoplancton en el exterior de la bahía, el nitrato sea consumido antes de poder incursionar hacia el interior de BSQ. En las simulaciones del presente trabajo, se logra observar un aumento en la biomasa de fitoplancton en el exterior, principalmente al sur-este del dominio, y después se observa el aumento dentro de BSQ.

A pesar de que la presente simulación se encuentra limitada por algunas variables, como por ejemplo la presencia de otros productores primarios, se utilizaron valores promedio de biomasa de fitoplancton para definir regiones en BSQ. Esta primera aproximación al comportamiento del nitrato dentro de BSQ demostró tener buenos resultados en su funcionamiento pero cabe resaltar que para obtener resultados más cercanos a la realidad será necesario implementar todas las fuentes y sumideros del nitrato en un futuro.

En escenarios reales, es importante considerar las diferentes fuentes y sumideros de nutrientes que existen en BSQ. Además del aporte por surgencias y cultivos como se mencionó anteriormente, existen otros factores que pueden influenciar en la variabilidad de nitrato en la columna de agua, como por ejemplo, el mismo consumo por otros productores primarios importantes como lo son las macrofitas.

Además de los grupos de fitoplancton dominantes utilizados en la simulación, se ha observado la presencia de otros seis diferentes grupos importantes por su abundancia en BSQ. Dentro de estos grupos se encuentran especies de Haptofitas, Clorofitas, Criptofitas,

Prasinofitas, Cianobacterias y Prochlorofitas (Millán-Núñez et al., 2004; García-Escobar et al., 2011).

En BSQ se ha reportado la existencia de 46 especies de macroalgas, de las cuales 47 % son Rhodophyta, 26 % Phaeophyta y 26 % Chlorophyta, que se desarrollan en diferentes sustratos o en estado de vida libre, con diferentes periodos de desarrollo; siendo las de vida libre representadas principalmente por las especies de *Ulva* responsables de la formación de grandes mantos dentro de BSQ (Aguilar-Rosas & López-Carrillo, 2005). Además de las macroalgas presentes, se presentan dos especies de pasto marino, siendo *Zostera marina* dominante sobre la segunda especie *Ruppia marítima* con una cobertura de 40 % y 3 % respectivamente de la extensión superficial de la bahía (Ward et al., 2004). De acuerdo con Ward et al. (2004), los pastos marinos, principalmente *Z. marina*, se encuentran en toda la bahía, en donde crecen en un rango de alrededor de los 3.0 m de profundidad, desde el nivel medio inferior de bajamar hasta la zona submareal, con excepción de los canales profundos. Por otro lado, los mantos de macroalgas son difíciles de determinar debido a que se encuentran a la deriva y en constante movimiento. Los mantos de macroalgas reportados por Zertuche-González et al. (2009) se observan en la región entre la boca y el canal central, cercanos a los canales profundos de Bf y sobre la zona de planicies lodosas y arenosas en el extremo este del canal central. Se ha reportado que los mantos más densos de macroalgas se localizan particularmente en la región de Bf y en la boca, zonas de tiempos de residencia bajos y por lo tanto de mayor influencia oceánica (Camacho-Ibar et al., 2003; Zertuche-González et al., 2009). Se puede suponer que al igual que en la simulación, existe una disminución fuerte de nitrato que ocurre en la zona de la boca relacionada a una mayor biomasa de productores primarios de crecimiento rápido como lo son el fitoplancton y *Ulva* spp. (Camacho-Ibar et al., 2007; Zertuche-González et al., 2009)

A pesar de la diferencia en biomasa entre la cobertura de pastos marino y macroalgas con respecto al fitoplancton. El fitoplancton en el mar presenta razones de fotosíntesis/ biomasa (P/B) altas en comparación con las macrofitas, por lo que su contribución a la productividad primaria neta a nivel de ecosistema debe ser del mismo orden de magnitud que la de las macrofitas (Kaldy et al., 2002; Camacho-Ibar et al., 2007).

En un estudio por medio de un acoplamiento de un modelo físico-biogeoquímico (GOTM-ERSEM) en presencia de *Ulva*, fitoplancton y *Z. marina*, Aveytua-Alcázar et al. (2008) reportaron en una estación dentro de BSQ cercana a la boca de Bf que, durante la primavera, *Ulva* representó el 57 % de la biomasa total de productores primarios, mientras que las hojas de *Z. marina* y el fitoplancton representaron el 40 % y 3 % respectivamente. Estos resultados demuestran que, durante la primavera tardía y el inicio en el verano, cuando la *Ulva* es más productiva en BSQ, esta macroalga pudiera almacenar una fracción importante (~ 50 %) del stock de nitrógeno total en el sistema pelágico (Zertuche-González et al., 2009).

Para soportar a la biomasa de flora que se encuentra en Bf además de la fuente de nutrientes por el océano adyacente, Bf tiene el aporte de nutrientes por las actividades de acuicultura de ostión (Hernández-Ayón et al. 2004). Zertuche-González et al. (2009) relacionaron los florecimientos de *Ulva* relativamente nuevos en esta región de Bf con la adición de nutrientes como producto del cultivo de ostión

Otra variable a considerar como fuente potencial de nitrógeno es el decaimiento de las macroalgas (Hanisak, 1993). Para el caso de BSQ, Zertuche-González et al. (2009) en un estudio sobre la *Ulva* como sumidero temporal de nutrientes, demostró el consumo importante de C, N y P durante los meses de surgencia (Mayo-Junio). Sin embargo mencionan de igual manera su potencial a ser una fuente por su decaimiento en el transcurso del tiempo después de alcanzar su máxima biomasa, como lo sugiere Aveytua-Alcázar et al. (2008) en el modelo de dinámica de la *Ulva*.

7. CONCLUSIONES

El uso de un modelo 3D para describir la hidrodinámica de BSQ permitió confirmar algunos de los aspectos particulares descritos anteriormente de la bahía como la influencia de la marea en la circulación tanto en los flujos residuales como en la variabilidad en mareas vivas y muertas, la distribución y gradientes de temperatura y salinidad con una tendencia a aumentar desde la boca a la cabeza, y la presencia de remolinos en la región *sur-sureste* de la boca relacionados a flujo y reflujos.

Sin embargo, las estimaciones de los tiempos de residencia y la estructura de circulación en la boca presentan diferencias con trabajos anteriores. ELCOM sobrestima el tiempo de residencia para las partes más altas de cada uno de los brazos que conforman a BSQ. La estimación de los tiempos de residencia partir de modelos 3D es la capacidad de evaluar cambios reales en el volumen en donde se consideran los efectos de marea, la densidad del agua, la temperatura, la salinidad y la distribución de velocidades a lo largo del sistema, a diferencia de los modelos de caja en donde se asumen ciertas condiciones de flujo y volumen idealizado, por lo que es probable que las estimaciones del presente trabajo estén sobreestimadas a pesar de las limitaciones de modelo.

En relación a la estructura de circulación en la boca ELCOM predice de acuerdo a la teoría que la circulación es antiestuarina, característica para sistemas hipersalinos como lo es BSQ, donde los flujos de salida ocurren por las partes más profundas (canales) y los flujos de entrada por las zonas someras.

Los procesos físicos que mayor influencia presentaron para la distribución de nitrato estuvieron relacionados a las variaciones y la incursión de la marea. Sin embargo, en este trabajo, el acoplamiento de ELCOM con CAEDYM permitió definir la influencia de procesos por la presencia de fitoplancton sobre el nitrato en tiempo y espacio lo cual permitió explicar diferencias en la definición de hábitats para las especies de flora que habitan en BSQ, relacionadas así mismo a los tiempos de residencia.

8. Literatura citada.

Adame, H. G. M. (1983). Análisis de componentes principales para variables fisicoquímicas en Bahía San Quintín. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B. C., México. 40 pp.

Aguilar-Rosas, L.E., (2005). Macroalgas Marnas de la Bahía de San Quintín, Baja California, México. Polibotánica, México, (19) 19-38 pp.

Aguirre-Muñoz A., R.W. Buddemeier, V.F. Camacho-Ibar, J.D. Carriquiry, S.E. Ibarra-Obando, B.W. Massey, S.V. Smith, y F. Wulff. (2001). Sustainability of Coastal Resource Use in San Quintin Mexico. *Journal of the Human Environment (AMBIO)*, 30(3): 142-149 pp.

Aikman III, F., y L.W.J. Lanerolle. (2005). Report on the National Ocean Service Workshop on Residence/Flushing Times in Bays and Estuaries. NOAA Technical Report. NOS CS 20. 32 pp.

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

Álvarez -Borrego, S., G. Ballesteros-Grijalva y A. Chee-Barragán. (1975). Estudio de algunas variables físico-químicas superficiales en Bahía San Quintín, en verano, otoño e invierno. *Ciencias Marinas*. 2: 1-9 pp.

Angulo-Larios, N. T. (2006) Hidrodinámica de la Bahía de San Quintín, B.C. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México. 128 pp.

Arnott, K.D., A. Valle-Levinson y M. Luther. (2012). Friction dominated Exchange in a Florida estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 113: 248-258 pp.

Arreola-Lizárraga, J.A., G. Padilla-Arredondo, C. Méndez-Rodríguez, L. Morquecho, R. Mendoza-Salgado, C. Lechuga-Devezé, W. Valenzuela-Quiñones, M. López-Tapia, B. Acosta, A. Castillo-Durán, A. Reyes, C. Elizalde-Servín, A. Hernández-Ibarra, M.S. Burrola-Sánchez, D. Urías-Laborín. (2008). Propuesta de Manejo para tres lagunas costeras prioritaria del noroeste de México. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. Guaymas, Sonora, México. 9 pp.

Aveytua-Alcázar, L. (2002). Carbono orgánico disuelto en Bahía San Quintín, Baja California. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México. 59 pp.

Aveytua-Alcázar L., V.F. Camacho-Ibar, A.J. Souza, J.I. Allen y R. Torres. (2008). Modelling *Zostera marina* and *Ulva* spp. in a coastal lagoon. *Ecological Modelling* 218: 354-366 pp.

Aveytua-Alcázar, L. 2008. Modelación de la dinámica biogeoquímica de una laguna costera. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Baja California, México. Ensenada, B. C., México. 219 pp.

Camacho-Ibar, V.F., J.D. Carriquiry, y S.V. Smith. (1997). Arid Pacific and Gulf of California Coasts: Bahía San Quintín. 9-15 pp. En S.V. Smith, S. Ibarra-Obando, P.R. Bourdreau, y V.F. Camacho-Ibar (eds.), Comparison of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes in Mexican Coastal Lagoons. Reporte y Estudios de LOICZ, No. 10. LOICZ, Textel, Países Bajos.

Camacho-Ibar, V.F., J.D. Carriquiry y S.V. Smith. (1999) Bahía San Quintín, Baja California: N/P budgets within compartments in a coastal lagoon, p. 65-78. En S. V. Smith, J. I. M. Crossland, y C. J. Crossland (eds.), Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes (Workshop Regional II). Reportes y Estudios de LOICZ, No. 13. LOICZ, Textel, Países Bajos.

Camacho-Ibar, V. F., Carriquiry, J. D., Smith, S. V. (2003) Non-conservative P and N fluxes and Net Ecosystem Production in San Quintín Bay, México. *Estuaries and Coasts* 26 (5):1220–1237 pp. doi:10.1007/BF02803626

Camacho-Ibar, V.F., J.M. Hernández-Ayón, E. Santamaría-del-Angel, L.W. Daesslé-Heuser, y J.A. Zertuche-González. (2007). Relación de las surgencias con los stocks de carbono en Bahía San Quintín, una laguna costera del NW de México. En: Hernández-de-la-Torre, B., Gaxiola-Castro, G. (eds.), Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México. INE CICESE. 335-370 pp.

Casulli, V. y R.T. Cheng. (1992). Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15: 629-648 pp.

Chavez, F.P. y K.S. Service (1996). Temperature-nitrate relationships in the central and eastern tropical Pacific. *Journal of geophysical research*, 101: 20, 553-563 pp.

Coronado, C.A., (2003). Aplicación de un modelo hidrodinámicos tridimensional en el Puerto de Ensenada, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Ensenada, Baja California, México. 74 pp

Del Valle L.I., (1979). Aplicación de un Modelo Numérico y Análisis de Condiciones Hidrodinámicas en Bahía de San Quintín, B.C. Tesis de Maestría. Centro de Estudios Superiores de Ensenada. México.

Delgado-González O.E., (2010). Desarrollo y aplicación de una herramienta de gestión para el aprovechamiento acuícola en Bahía San Quintín, Baja California. Tesis Doctoral. 198 pp.

Flores-Vidal, X., (2006) Circulación residual en Bahía San Quintín, B.C. México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, Ensenada, Baja California, México. 80pp.

Frías-Velasco, A., (2009). Variación espacial y temporal del fitoplancton durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín, B.C. México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Baja California, México. 81 pp.

Furnans, J.E., B.R. Hodges, y J. Imberger. (2004). Lake Kinneret Surface Drifters and Model Particle Tracking. 17th ASCE Engineering Mechanics Conference. Universidad de Delaware, Newark, DE. 5 pp

García-Escobar, M.F., R. Millán-Núñez, E. Valenzuela-Espinoza, A. González-Silvera, E. Santamaría-del-Angel. (2015). Changes in the Composition and Abundance of Phytoplankton in a Coastal Lagoon of Baja California, México, during 2011. *Journal of Marine Science*, 5: 169-181 pp.

García-Ezquivel, Z., M.A. González-Gómez, F. Ley-Lou, A. Mejía-Trejo. (2004). Potencial ostrícola del brazo oeste de Bahía San Quintín: Biomasa actual y estimación preliminar de la capacidad de carga. *Ciencias Marinas*, 30(1A): 71–84 pp.

Gil-Silva E., O. E. Delgado-González y A. Mejía-Trejo. (2011). Datos meteorológicos de la estación San Quintín, BC. Durante el periodo 2002-2009. Informe Técnico, DOFIOSQ2002-2009, 23 pp.

Gorsline, D. S. y R. A. Stewart, (1962). Benthic Marine exploration of Bahía de San Quintín, B. C. 1960-61. *Pacific Naturalist*. 2: 275-280 pp.

Hanisak M.D. (1993) Nitrogen release from decomposing seaweeds: species and temperature effects. *J Appl Phycol* 5:175–181 pp. doi:10.1007/BF00004014

Hannoun, I., E.J. List, K. Bowman-Kavanagh, W. Chiang, L. ding, A. Preston, D. Karafa, I. Rackley. (2006). Use of ELCOM and CAEDYM for water quality simulation in Boulder Basin. Water Environment Foundation, WEFTEC. 28pp

Hernández-Ayón, J. M., M. S. Galindo-Bect, V. F. Camacho-Ibar, Z. García-Esquivel, M.A. González-Gómez y F. Ley-Lou, (2004). Dinámica de los nutrientes en el brazo oeste de Bahía San Quintín, Baja California, México, durante y después de El Niño 1997/1998. *Cienc. Mar.* 30(1A): 129–142 pp.

Hernández-Ayón, J. M., V.F. Camacho-Ibar, A. Mejía-Trejo y A. Cabello-Pasini. (2007) Variabilidad del CO₂ total durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín, México. cap

12. En: Hernández-de la-Torre, B., Gaxiola-Castro, G. (eds.), Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México. INE CICESE.187-200 pp.

Hernández-López, J. (2009). Biogeoquímica del sílice disuelto en la columna de agua en Bahía San Quintín. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Baja California, México. 88 pp.

Hernández-de-la-Torre B., G. Gaxiola-Castro, S. Álvarez-Borrego, J. Gómez-Valdés y S. Nájera-Martínez. (2003) Inter-annual variability of new production in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Research II* (50), 2423-2430 pp.

Hipsey, M.R., Antenucci, J.P., y Hamilton, D. (2014) Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v3. V3.2 Science Manual (DRAFT). Center for Water Research. University of Western Australia. 112pp

Ibarra-Obando S.E., Solana-Arellano E., Poumian-Tapia M. 2007. El Papel de *Zostera marina* en el Ciclo del Carbono en Bahía San Quintín, Baja California. En: Hernández de la Torre B, Gaxiola-Castro G (eds) Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México. Instituto Nacional de Ecología, Distrito Federal, México, pp 201–213

Jiménez-Hernández, S.B. (2005). Análisis de procesos físico-biológicos acoplados en la Bahía de San Quintín, B.C., México. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Baja California, México. 100 pp.

Juárez, V. M. 1982. Modelo Unidimensional de Dispersión para un Estuario Ramificado y su Aplicación a Bahía de San Quintín. Tesis de Maestría, División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México 79 pp

Lara-Lara, R., J.A. Arreola-Lizárraga, L.E. Calderón Aguilera, V.F. Camacho-Ibar, G. de la Lanza Espino, A.M. Escofet-Giansone, A.M., et al., (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En: Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, pp. 109-134.

McGlathery KJ, Anderson CI, Tyler AC (2001) Magnitude and variability of benthic and pelagic metabolism in a temperate 3coastal lagoon. *Mar Ecol Prog Ser* 216:1–15. doi:10.3354/meps216001

Millán-Núñez, R. (1981) Effects of Physical Phenomena on the Distribution of Nutrients and Phytoplankton Productivity in a Coastal Lagoon. Tesis de maestría. Universidad del Estado de Oregon. Oregon, Estados Unidos. 68pp

Millán-Núñez, R., E. Millán-Núñez, S. Álvarez-Borrego, C.C. Trees, E. Santamaría-del-Ángel. (2004) Variabilidad de la comunidad del fitoplancton en Bahía San Quintín estimada mediante el análisis de pigmentos. *Ciencias Marinas*, 30(1A): 145-153 pp.

- Millán-Núñez, R., S. Alvarez-Borrego, D. M. Nelson. (1982). Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 15:317-335 pp.
- Monreal-Gómez, M. 1980. Aplicaciones de un modelo de dispersión en Bahía San Quintín, Baja California, México. Tesis de Maestría, División de Oceanología, CICESE. 84pp.
- Monreal-Gómez, M.A. y D.A. Salas-de-León (1990) Modelo unidimensional de corrientes en Bahía San Quintín, B.C., México. *Geofísica Internacional*, 29 (4): 249-257
- Moreno-Miranda, C. (2007) Variabilidad espacial de la composición taxonómica del fitoplancton en Bahía San Quintín. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, México (UABC). 81pp
- Morillo, S., Imberger, J., & Antenucci, J. (2006). Modifying the residence time and dilution capacity of a reservoir by altering internal flow-paths. *International Journal of River Basin Management*, 4(4), 255-271 pp.
- Ocampo-Torres, F.J., (1980). Análisis de mareas y predicción de velocidad mediante un modelo unidimensional en Bahía San Quintín, B.C. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C. México. 96 pp.
- Ortiz-Hernández, M.C., (2006) Contribución de las interacciones abióticas a los flujos no conservativos del fósforo inorgánico disuelto en la Bahía de San Quintín, B.C. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Baja California, México (UABC). 135pp
- Plascencia-Díaz, R.M. 1980. Análisis de temperatura, salinidad y determinación de circulación por gradientes de densidad en Bahía San Quintín, B.C. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, México (UABC). 123 pp.
- Rafty, M., (2006). Computer modeling of *Peridinium* patchiness and mechanisms of patch formation in Lake Kinneret. Honours Dissertation. Universidad del Oeste de Australia, Centro de estudios del Agua (CWR). 115 pp.
- Rodríguez-Cardozo, L. 2004. Evaluación del nitrógeno disuelto en los balances de nitrógeno en Bahía San Quintín, B.C. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, México (UABC). 58 pp.
- Rodríguez-Cardozo, L. 2007. Valoración económica de las surgencias en Bahía San Quintín, Baja California. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Baja California, México (UABC). 74 pp.
- Rosales-Casián, J.A., (1996). Ictiofauna de la Bahía de San Quintín, Baja California, México, y su costa adyacente. *Ciencias Marinas* 22(4): 443-458

Sámamo-Celorio, M.L., (2011) Desarrollo e integración de modelos numéricos de calidad de agua en un sistema de información geográfica. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Departamento de Ciencias y Técnicas del agua y del Medio Ambiente. Santander, Cantabria, España. 79pp

Valiela, I. 1995. Marine Ecological Processes, New York, USA: Springer-Verlag.

Valle-Levinson, A., Gutierrez-de-Velasco G., Trasviña A., Souza A.J., Durazo R. y Mehta A.J. 2009. Residual exchange flows in subtropical estuaries. *Estuaries and coasts* 32 54-67.

Vidal-Juárez, T. (2014) Influencia de remolinos y procesos de mezcla en el intercambio de agua entre una laguna y el mar abierto, Bahía San Quintín, Baja California, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México. 59 pp

Ward, D.H., T.L. Tibbitts, A. Morton, E. Carrera-González y R. Kempka. (2004) Uso de videografía multiespectral digital para evaluar la distribución de pasto marino en Bahía San Quintín, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 30(1A): 47-60 pp.

Zentara, S.J. y D. Kamykowski, (1977). Latitudinal relationships among temperatura and selectes plant nutrients along the west coast of North and South America. *J. Mar. Res.*, 35: 321-336 pp.

Zertuche-González y S. Alvarez-Borrego, 1978. Series de tiempo de variables físico-químicas en las bocas de anti-estuarios de Baja California. *Ciencias Marinas*, 5(1): 91-103 pp.

Zertuche-González, J.A., V. F. Camacho-Ibar, I. Pacheco-Ruíz, A. Cabello-Pasini, L.A. Galindo-Bect, J.M. Guzmán-Calderón, V. Macias-Carranza y J. Espinoza-Avalos (2009) The role of *Ulva* spp. as a temporary nutrient sink in a coastal lagoon with oyster cultivation and upwelling influence. *J. Appl Phycol* 21: 729-736 pp. doi: 10.1007/s10811-009-9408-y