

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ecología Marina**

**Aplicación de un modelo físico-biológico para las
trayectorias de parcelas de agua asociadas a florecimientos
algales en la Bahía de Todos Santos.**

Tesis

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

Presenta:

Iván Eduardo Vivas Téllez

Ensenada, Baja California, México

2015

Tesis defendida por

Iván Eduardo Vivas Téllez

y aprobada por el siguiente comité

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director de Tesis

Dr. Ernesto García Mendoza

Dr. Silvio Guido Lorenzo Marinone Moschetto

Dr. Helmut Maske Rubach

Dra. Mary Carmen Ruiz De La Torre



Dr. David Alberto Rivas Camargo
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Iván Eduardo Vivas Téllez © 2015

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor.

Resumen de la tesis que presenta Iván Eduardo Vivas Téllez como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Aplicación de un modelo físico-biológico para las trayectorias de parcelas de agua asociadas a florecimientos algales en la Bahía de Todos Santos.

Resumen aprobado por:

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director de Tesis

En este trabajo se estudia numéricamente la circulación oceánica Lagrangiana y la dinámica biológica en la Bahía de Todos Santos durante la primavera de 2007. Este periodo es particularmente interesante debido a un florecimiento intenso de algas tóxicas que se presentó en abril de 2007 asociado a las surgencias impulsadas por el viento en la región. Se llevaron a cabo simulaciones con un modelo numérico de alta resolución (3 km para el modelo regional y 300 m para el modelo de la Bahía de Todos Santos) para estudiar las características dinámicas a lo largo de la costa del sur de California, la costa del norte de Baja California y en el interior de la Bahía de Todos Santos. Estas simulaciones se usaron en un análisis Lagrangiano tridimensional que proporciona información sobre el origen y la distribución de las aguas presentes en la Bahía durante el florecimiento tóxico. Después de la selección de trayectorias con patrones que siguen una trayectoria común y con una concentración significativa de partículas, se implementó un modelo biológico para estudiar la influencia de las condiciones ambientales presentes durante la advección. Este modelo es una versión del modelo de Nitratos-Fitoplancton-Zooplancton-Detritos. Este modelo se modificó para que el crecimiento del fitoplancton fuera dependiente de la temperatura y además se añadió un fotoperiodo de 12 hrs. Se identificaron dos patrones con una concentración significativa de partículas, el primero de partículas que provienen de regiones al norte de la Bahía de Todos Santos y el segundo de regiones al oeste de la plataforma continental. El modelo biológico acoplado a las partículas del norte se asemeja cualitativamente con las características generales del florecimiento ocurrido en la primavera del 2007 en la Bahía de Todos Santos. El modelo logra capturar la respuesta biológica a las concentraciones de nutrientes, luz y temperatura; y reproduce la variabilidad asociada con las estructuras a escala fina en la que los transportes físicos están estrechamente vinculados a las funciones biológicas.

Palabras clave: Trayectorias Lagrangianas, florecimientos algales nocivos, modelo ecológico NPZD, Bahía de Todos Santos.

Abstract of the thesis presented by Iván Eduardo Vivas Téllez as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Application of a physical-biological model for water parcels pathways associated with algal blooms in Todos Santos Bay.

Abstract approved by:

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director thesis

Lagrangian ocean circulation and biological dynamics were studied numerically in Todos Santos Bay during the spring of 2007. This period is particularly interesting because of an intense toxic algal bloom that occurred in April 2007 in this area, which was associated with the wind-driven upwelling in the region. High resolution (3 km for the regional model and 300 m for the model of Todos Santos Bay), numerical model simulations were carried out to study dynamical features along of the coast of Southern California, the coast of the northern Baja California, and the interior of the Todos Santos Bay. These simulations were used in a three-dimensional Lagrangian analysis which provided information about the origin and distribution of the waters present in the Bay during the occurrence of the toxic bloom. After the selection of trajectories of particles having patterns in which follow a common path and a significant concentration of particles, a biological model was implemented to study the influence of the environmental conditions that occurred during the advection. This model is a version of a Nitrate-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus, lower trophic model. The model was also modified to include phytoplankton growth as a function of the environmental temperature and a 12-hour photo-period. Two patterns with a significant concentration of particles were identified; the first pattern consists of particles coming from regions north of the Todos Santos Bay, and the second pattern consists of particles coming from regions west of the continental shelf. The biological model coupled to the northerly particles is in qualitative agreement with the general characteristics of the bloom that occurred in the spring of 2007 in Todos Santos Bay. The model captures the biological response to nutrient concentrations, light, and temperature; and also it reproduces the variability associated with finer-scale structures in which physical transports are closely linked to biological features.

Keywords: Lagrangian trajectories, harmful algal blooms, NPZD ecological model, Todos Santos Bay.

Dedicatoria

A mi madre:

Quien ha sido un pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo.

A mis hermanos y sobrinos:

Por su inmenso apoyo.

A Verónica

Por todas sus palabras de apoyo y por estar ahí siempre.

Al resto de mi familia:

Aunque estemos lejos siempre los llevo en mi corazón.

Las únicas barreras que existen son las que uno mismo se impone.

Agradecimientos

Al Dr. David Rivas, le agradezco la confianza brindada desde el primer día. Por compartirme su conocimiento y el tiempo dedicado, Por su carácter y buena actitud, siempre dispuesto a resolver mis dudas impulsándome a pensar.

A los miembros de mi comité de tesis: Dr. Ernesto García, Dr. Guido Marinone, Dr. Helmut Maske, Dra. Mary Carmen Ruiz. Sus comentarios y sugerencias durante todo este proceso han enriquecido mi trabajo. Agradezco también sus rápidas correcciones, gracias por su apoyo.

Extiendo mi más sincero agradecimiento a M.C. Vicente Ferreira, quien siempre ha estado dispuesto a apoyarme en todas las formas que le han sido posibles, de quien he aprendido mucho y por todas las respuestas a mis interminables preguntas. Su apoyo y orientación ha sido clave en esta etapa de mi formación.

Agradezco a CONACyT por la beca otorgada para mi maestría. También agradezco al proyecto UC MEXUS #CN-14-106 por el apoyo otorgado para concluir este trabajo.

Agradezco a todos mis compañeros y amigos. Schery, Zyanya, Beatriz, Mary, Luis, Isaac, Camilo y a los que por espacio no he podido nombrar, gracias por hacer esta etapa de mi vida más amena, Ensenada sin ustedes no sería lo mismo.

Sobre todo agradezco el incondicional apoyo de mi familia.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
Capítulo 2. Metodología	4
2.1. Descripción de la zona de estudio	4
2.1.1. Dominio Regional	4
2.1.2. Dominio de la Bahía de Todos Santos	5
2.2. Configuración del modelo	6
2.3. Trayectorias Lagrangianas	7
2.3.1. Modelo de advección de partículas	7
2.3.2. Análisis Lagrangiano	8
2.4. Modelo Biológico	9
Capítulo 3. Comparación con observaciones y otras simulaciones	14
3.1. Campo de velocidad	14
3.2. Datos de crucero	17
3.3. Nivel del mar.	18
3.4. Temperatura superficial del dominio regional	19
Capítulo 4. Resultados	21
4.1. Trayectorias Lagrangianas	21
4.1.1. Transporte y esfuerzo del viento	21
4.1.2. Análisis Lagrangiano	23
4.1.2.1. Selección de trayectorias	23

	Página
4.2. Modelo Biológico	26
4.2.1. Ajuste	26
4.2.2. Variación diurna de la Irradiancia	29
4.2.3. Dependencia a la temperatura	30
4.2.4. Simulación que incorpora las adecuaciones propuestas	32
4.2.4.1. Partículas del norte vs partículas del oeste	33
4.2.4.2. Partículas a 2 m de profundidad vs partículas a 2 m de profundidad	34
Capítulo 5. Discusión	38
5.1. Trayectorias Lagrangianas	39
5.2. Modelo biológico	40
5.3. Retos de la interpretación biológica en los modelos	42
5.4. Recomendaciones	43
Capítulo 6. Conclusiones	44
Lista de referencias bibliográficas	45
Apéndice A. Configuración del modelo	50
A.1. Modelo regional	50
A.2. Modelo de la Bahía de Todos Santos	52
Apéndice B. Trayectorias seleccionadas para los experimentos del 9, 19 y 24 de abril	53

Lista de figuras

Figura		Página
1.	Dominio del modelo regional (27° a 35° N y 114° a 123° W) y su batimetría (m) en escala de color. Se muestra la localización de la BTS.	5
2.	Figura 2.- Dominio del modelo de la BTS (31° 48'N a 116° 42'W) y su batimetría (m) en escala de color.	6
3.	Posiciones iniciales de las partículas dentro de la BTS para los experimentos de advección: a) partículas liberadas a 2 m de profundidad y b) partículas liberadas a 20 m de profundidad.	7
4.	Trayectorias resultantes para el experimento del 24 de abril de 2007 a 2 m de profundidad. Las cuatros figuras corresponden a las advecciones tiempo atrás y tiempo adelante y a las etapas dentro del Dominio Bahía y dentro del Dominio Regional.	8
5.	Interacciones del modelo NPZD.	9
6.	Curva para la tasa máxima de crecimiento para la especie <i>Pseudo-nitzschia australis</i> .	13
7.	Tasa máxima de crecimiento para la especie <i>Pseudo-nitzschia australis</i> aislada de la región de la BTS (Santiago-Morales y García-Mendoza, 2011).	13
8.	Velocidad promedio a 5 m de profundidad para (a) el modelo y (b) el resultado tomado de Mateos et al. (2009). Los colores indican la magnitud de la velocidad en m s ⁻¹ . Las líneas negras en la boca norte y sur indican la posición de las secciones en las que se evalúan el flujo y el transporte.	15
9.	Velocidad promedio (marzo-abril 2007) normal a la secciones verticales en la (a) boca norte y (b) sur de la BTS (Vea Figura 8). Los valores positivos indican flujo hacia dentro de la Bahía. Se muestra el contorno del cero para mejor visualización.	16
10.	Distribución de los puntos del muestreo del crucero BTS0407 (García-Mendoza et al., 2009), indicado por los asteriscos azules. La línea roja muestra la posición de una sección hidrográfica obtenida a partir del modelo.	17
11.	Temperatura de la sección hidrográfica para (a) los datos del modelo y (b) los datos de crucero. La localización de la sección se muestra en la Figura 8.	18
12.	Evolución temporal del nivel del mar durante el año 2007. La línea roja corresponde a los datos observados y la línea azul corresponde a los datos tomados del modelo, del punto de malla más cercano a la localización del mareógrafo.	19

Figura	Página
13. Promedio para el periodo marzo-abril de la temperatura superficial en el dominio regional para (a) los datos del modelo y para (b) los datos del satélite MODIS.	20
14. (a) Esfuerzo del viento meridional y (b) transporte a través de las secciones norte y sur (el transporte de la sección sur multiplicado por -1 para mejor comparación) para el periodo del 1 de enero al 30 de junio de 2007. Las líneas verticales muestran las condiciones dominantes del esfuerzo del viento y transporte en las fechas de los experimentos de advección.	22
15. Porcentaje de partículas dentro de la BTS como función del tiempo de advección de los 4 experimentos realizados. La línea negra vertical en el tiempo cero corresponde al momento en el que se liberaron las partículas por lo que en este momento tenemos el 100% de las partículas dentro de la Bahía. La línea verde horizontal indica el momento en el que por lo menos el 10% de las partículas se encuentran dentro de la bahía.	23
16. Trayectorias de las partículas que entran a la Bahía: (a) por regiones al norte procedentes del SCB y (b) por regiones al oeste.	24
17. Profundidad promedio de las partículas que entran a la Bahía por regiones al norte y regiones al oeste. La línea vertical indica el momento en el que fueron liberadas las partículas dentro de la Bahía.	25
18. Porcentaje de partículas dentro de la BTS como función del tiempo de advección. La línea negra vertical en el tiempo cero corresponde al momento en el que se liberaron las partículas por lo que en este momento se tiene el 100% de las partículas dentro de la Bahía. La línea verde horizontal indica el momento en el que por lo menos el 10% de las partículas se encuentran dentro de la Bahía.	26
19. <i>Spin up</i> para las condiciones iniciales del modelo acoplado a las partículas del norte del experimento del 24 de abril. La línea vertical indica el momento en el que se considera que las soluciones llegan a un régimen estacionario.	27
20. Comparación del modelo con condiciones iniciales de no equilibrio (línea azul) y el modelo con condiciones iniciales tomadas después de 100 días de <i>spin up</i> (línea rosa). La figura está dividida en 5 paneles, en el primero se muestra la profundidad promedio de las partículas de este experimento, el segundo muestra la concentración de nutrientes, el tercero muestra la concentración de clorofila, el cuarto muestra la concentración de zooplancton y el quinto muestra la concentración de detritos. La línea roja vertical indica el tiempo cero en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía.	28

Figura	Página
21. Comparación del modelo con condiciones iniciales tomadas después de 100 días de <i>spin up</i> (línea magenta) y el modelo que contempla la variación diurna de la radiación solar (línea roja). La línea roja vertical indica el tiempo cero en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía.	30
22. Comparación del modelo con condiciones iniciales tomadas después de 100 días de <i>spin up</i> (línea rosa), el modelo que incluye la variación diurna de la radiación solar (línea roja) y el modelo con dependencia de la temperatura en los términos del modelo para el crecimiento del fitoplancton y absorción de nutrientes (línea verde). El sexto panel muestra la temperatura promedio a lo largo de las trayectorias de las partículas del norte para el experimento del 24 de abril. La línea roja vertical indica el tiempo cero en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía.	31
23. Comparación del modelo con variación diurna de la radiación solar (línea roja), el modelo con dependencia a la temperatura (línea verde) y el modelo con fotoperiodo y dependencia a la temperatura. La línea roja vertical indica el tiempo en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía.	32
24. Comparación entre el modelo biológico acoplado a las partículas del Norte y del Oeste. La línea roja vertical indica el tiempo en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía. El panel 4 muestra la temperatura promedio a lo largo de las trayectorias de las partículas del norte y del oeste para el experimento del 24 de abril.	33
25. Trayectoria promedio para las trayectorias seleccionadas que vienen de (a) regiones al norte y de (b) regiones al oeste. El color indica la concentración promedio de fitoplancton a lo largo de la trayectoria.	34
26. Comparación entre el modelo biológico acoplado a las partículas del norte a 2 m y 20 m de profundidad.	35
27. Comparación entre el modelo biológico acoplado a las partículas del oeste a 2 m y 20 m de profundidad.	36
28. Temperatura promedio registrada para las trayectorias del norte y del oeste del 24 de abril a 2 m y 20 m de profundidad. Las líneas verdes muestran la temperatura del punto máximo de crecimiento específico para <i>Pseudo-nitzschia australis</i>	37
A1. Trayectorias de las partículas del 9 de Abril que entran a la Bahía: (a) por regiones al norte y (b) por regiones al oeste.	53
A2. Profundidad promedio de las partículas del 9 de abril que entran a la Bahía por regiones al norte y regiones al oeste.	53

Figura	Página
A3. Trayectorias de las partículas del 19 de Abril que entran a la Bahía: (a) por regiones al norte y (b) por regiones al oeste. .	54
A4. Profundidad promedio de las partículas del 19 de abril que entran a la Bahía por regiones al norte y regiones al oeste.	54
A5. Trayectorias de las partículas del 24 de Abril a 20 m de profundidad que entran a la Bahía: (a) por regiones al norte y (b) por regiones al oeste.	55
A6. Profundidad promedio de las partículas del 24 de abril a 20 m de profundidad que entran a la Bahía por regiones al norte y regiones al oeste.	55

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Parámetros del modelo biológico.	11

Capítulo 1. Introducción

Los ecosistemas de frontera oriental representan una fracción pequeña de la superficie total de los océanos, pero son las regiones más productivas del mundo (Durazo, 2009; Gaxiola-Castro y Durazo, 2010). La Bahía de Todos Santos (BTS), ubicada en la costa nororiental de la península Baja California (BC), forma parte del Sistema de la Corriente de California (SCC). La BTS se encuentra bajo la influencia de importantes procesos oceánicos de mesoescala como meandros, remolinos, filamentos y eventos de surgencia a lo largo de la costa y de la plataforma continental (Calva Chávez, 2014; Miranda Bojórquez, 2012; Durazo *et al.*, 2010; Mateos, 2010; Mateos *et al.*, 2009). Estas características oceanográficas se han asociado a florecimientos algales nocivos (FAN) en las regiones al sur de la Columbia Británica en Canadá, en las zonas costeras del Norte del estado de Washington y en las costas del centro de California en los Estados Unidos (Horner *et al.*, 1997; Anderson *et al.*, 2006; Lewitus *et al.*, 2012).

Algunos florecimientos algales se forman después de un evento de surgencia y durante la relajación del viento, cuando las células son transportados a las zonas costeras (Trainer *et al.*, 2000). La fertilización por nutrientes durante estos eventos son una condición clave que promueve el desarrollo de los florecimientos (Kudela *et al.*, 2010; Lanerolle *et al.*, 2006; Anderson *et al.*, 2006; Trainer *et al.*, 2000). Los FAN son eventos biológicos extremos que dañan el medio ambiente, ponen en peligro la vida marina, alteran la biodiversidad y suponen un grave riesgo para la salud humana (Anderson *et al.*, 2012).

Durante la primavera de 2007 se registró la presencia de una alta concentración de microalgas tóxicas en la BTS. Este florecimiento es el registro más al sur de la presencia de ácido domoico en el SCC y también es el primer reporte de la distribución de especies tóxicas de *Pseudo-nitzschia* y ácido domoico en la costa oeste de BC. La acumulación de células tóxicas durante este evento probablemente fue causado por las condiciones ambientales en la región, asociadas con las surgencias impulsadas por el viento (García-Mendoza *et al.*, 2009).

Los avances tecnológicos han ampliado la capacidad para la investigación y seguimiento de los FAN, pero los organismos que causan eventos de FAN siempre

serán sub-muestreados debido a las grandes escalas espaciales y temporales sobre las que se producen. Por lo tanto la utilización de modelos ayuda a complementar e interpretar observaciones esporádicas (He *et al.*, 2008). Un enfoque común en los modelos es el estudio de trayectorias Lagrangianas, es decir, el seguimiento de partículas y la identificación de estructuras oceánicas coherentes mediante partículas que siguen el movimiento (Rivas y Samelson, 2011), lo que ayuda a analizar la dispersión de los FAN entre regiones costeras (Watson *et al.*, 2010; Trembl *et al.*, 2008; Cowen *et al.*, 2006) o para identificar posibles vías de transporte de los FAN para llegar a la costa desde alta mar (Giddings *et al.*, 2014).

Existen modelos sofisticados y complejos que acoplan un sub-modelo biológico a un modelo hidrodinámico (Anderson *et al.*, 2012). La forma más natural es un enfoque basado en el individuo, siguiendo el organismo en el tiempo a través del flujo (advección) y a través de las diferentes etapas de su desarrollo. En otras palabras, los organismos son tratados como individuos discretos (o colecciones de individuos) con ciertas propiedades (Hense, 2010).

La conexión entre los FAN, los procesos costeros, el enriquecimiento de nutrientes y el forzamiento climático en la interfaz tierra-mar es fundamental para comprender las causas y los impactos de los FAN para los ecosistemas costeros (Anderson *et al.*, 2012). La caracterización de la distribución biogeográfica de las especies tóxicas es uno de los elementos clave para comprender los FAN (GEOHAB, 2005). Una comprensión predictiva de la duración, la evolución, y el movimiento de los florecimientos en el sur del SCC ayudaría significativamente en la capacidad para mitigar los efectos nocivos de estos fenómenos y proteger los recursos naturales. Por esto es de gran importancia conocer los patrones de circulación de las aguas asociadas a estos florecimientos algales.

1.1. Objetivos

- Caracterizar los aspectos más relevantes de la circulación Lagrangiana en la región del sur de California hasta el norte de Baja California.
- Identificar las trayectorias comunes y con una concentración significativa de las partículas de los experimentos numéricos para diferentes masas de agua.
- Con ayuda de un modelo biológico acoplado a los resultados Lagrangianos, reproducir la evolución de los florecimientos algales a lo largo de las regiones costeras de la zona de estudio.

Capítulo 2. Metodología

Para este trabajo se contó con una base de datos de velocidad tridimensional para el año 2007 calculada con el modelo ROMS (*Regional Ocean Modeling System*; Haidvogel *et al.*, 2008). Para calcular las trayectorias de partículas se utilizó un modelo Lagrangiano “*offline*”, es decir, la posición de cada partícula se calcula a partir de un campo Euleriano de velocidad tridimensional calculado previamente por el modelo ROMS. Se analizaron las trayectorias de las partículas y se seleccionaron aquellos patrones en los que las partículas siguen una trayectoria común y con una concentración significativa de partículas. En cada una de las partículas seleccionadas se resolvió un modelo biológico con las condiciones ambientales presentes durante la advección, estas condiciones ambientales son derivadas del modelo Euleriano calculado previamente.

2.1. Descripción de la zona de estudio

2.1.1. Dominio Regional

La zona de estudio comprende entre 27° a 35° N y 114° a 123° W, este dominio abarca desde Punta Concepción en el sur de California, hasta Bahía Asunción en Baja California Sur (Figura 1). En esta región oceánica frente a la costa occidental de la Península de BC se encuentra parte del límite sureño del SCC. El SCC presenta muchas de las características principales típicas de un sistema de circulación de frontera oriental; esto es, surgencias costeras en respuesta a vientos a lo largo de la costa, un flujo superficial predominante hacia el ecuador como respuesta al mecanismo forzante y una contracorriente subsuperficial dirigida hacia el polo que fluye a lo largo del talud continental (~200–400 m; Durazo, 2009; Durazo *et al.*, 2010). A mayor profundidad (> 500 m) se encuentra agua que se hunde en el Pacífico Norte, conocida como Agua Intermedia del Pacífico (Mateos, 2010; Durazo *et al.*, 2010; Durazo, 2009). Las fronteras entre estas masas de agua cambian de posición en escalas temporales muy diversas, desde semanales hasta decadales. Los cambios en las fronteras y la mezcla resultante de su interacción establecen muchas de las condiciones que modulan la diversidad biológica y la variabilidad química en la región (Durazo *et al.*, 2010).

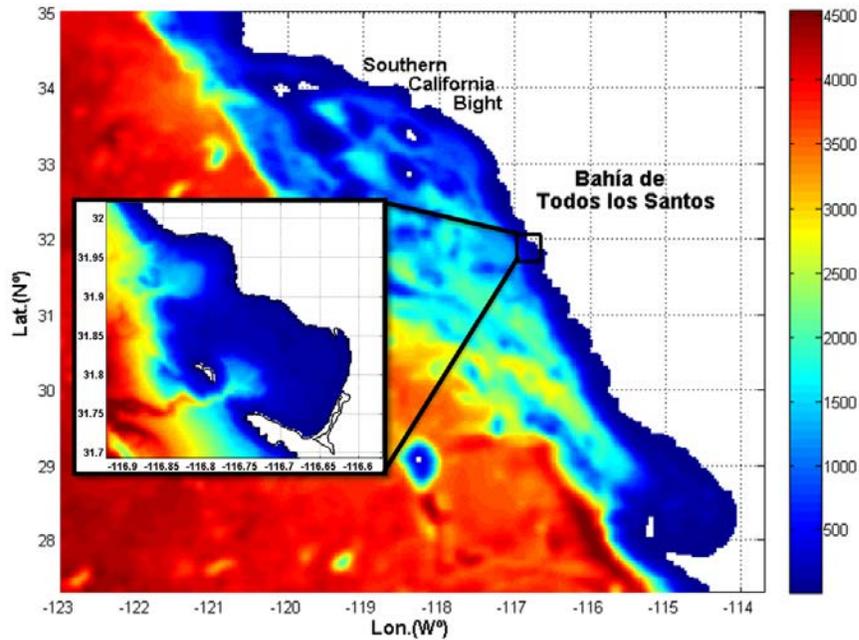


Figura 1.- Dominio del modelo regional (27° a 35° N y 114° a 123° W) y su batimetría (m) en escala de color. Se muestra la localización de la BTS.

2.1.2. Dominio de la Bahía de Todos Santos

La BTS ubicada en la costa occidental de BC, centrada alrededor de los 31° 48'N y 116° 42'W, es un cuerpo de agua semicerrado con una superficie aproximada de 230 km² y una profundidad media de aproximadamente 50 m. La Bahía tiene dos entradas a mar abierto que están separadas por las Islas de Todos Santos (ITS). La entrada norte está delimitada por las ITS y Punta San Miguel (PSM) y tiene aproximadamente 11 km de ancho y una profundidad máxima de 50 m. La entrada sur de la Bahía está delimitada por las ITS y la península de Punta Banda (PB). Esta entrada tiene un ancho aproximado de 5 km y en ella se localiza un cañón submarino, el cual llega a los 400 m de profundidad (Figura 2) (Miranda Bojórquez, 2012; Calva Chávez, 2014).

Existe una predominancia de los vientos del noreste al interior de la Bahía, con intensidad de 4 m s⁻¹ durante los meses cálidos, mientras que en los meses fríos se presentan principalmente días de calma. Fuera de la costa los vientos soplan también del noreste ligeramente más intensos en abril y con un mínimo en invierno, lo cual resulta en condiciones favorables para las surgencias costeras casi todo el año. Por lo tanto, la BTS se encuentra en una región caracterizada por vientos favorables a surgencias durante todo el año (Calva Chávez, 2014). Además, la Bahía se encuentra

dentro del SCC, por ello su dinámica e hidrografía están influenciadas por la Corriente de California, la Contracorriente Subsuperficial y un chorro costero (Durazo *et al.* 2010; Mateos *et al.*, 2009).

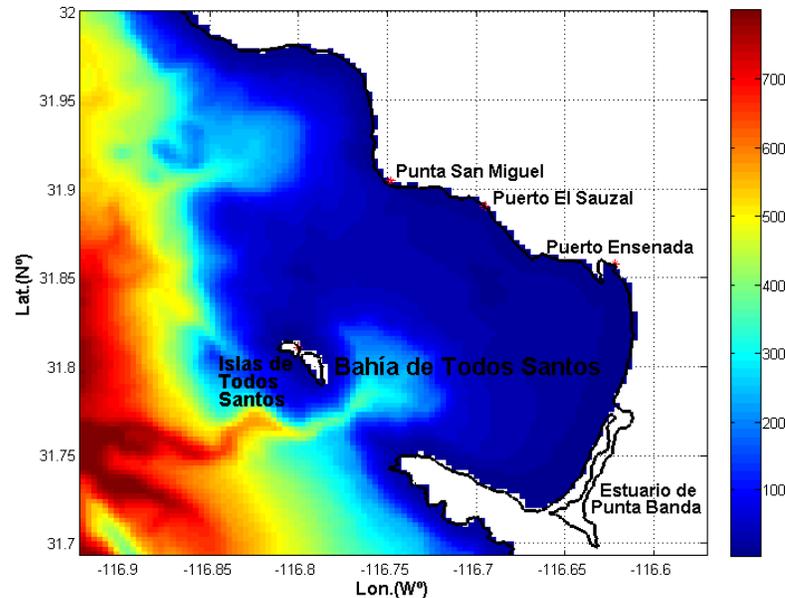


Figura 2.- Dominio del modelo de la BTS (31° 48'N a 116° 42'W) y su batimetría (m) en escala de color.

La circulación en el interior de la Bahía está modulada por el esfuerzo del viento, los flujos de calor, el transporte por las bocas de la BTS y la interacción de éstos con la geometría de la Bahía. Se reconocen dos regiones dinámicas delimitadas por la isobata de los 30 m: una corriente intensa hacia el sur domina en la parte profunda (región externa) y remolinos de menor intensidad están en la zona somera (región interna) (Mateos *et al.*, 2009). Gavidía Medina (1988) y Argote Espinosa *et al.* (1991), usando un modelo numérico barotrópico bidimensional, coinciden en que las corrientes de marea producen una circulación residual insignificante por lo que tiene poca influencia en la circulación de la BTS.

2.2. Configuración del modelo

Para las simulaciones de los campos de velocidad tridimensional y de las condiciones ambientales se utilizó el modelo ROMS versión 3.6 (Haidvogel *et al.*, 2008) que es un modelo hidrostático de ecuaciones primitivas con coordenadas verticales que siguen la topografía del fondo. Los detalles del modelo se pueden consultar en el Apéndice A los cuales se describen en Cruz Rico (2015).

2.3. Trayectorias Lagrangianas

Se analizaron las trayectorias de las parcelas de agua presentes en la BTS durante abril 2007 mediante el cálculo de las trayectorias de las partículas que son advectadas pasivamente por los campos de velocidad tridimensional del modelo.

2.3.1. Modelo de advección de partículas

Para calcular las trayectorias de las partículas se utilizó un modelo *offline*, es decir, la posición de cada partícula se calcula a partir de un campo Euleriano de velocidad calculado previamente. Este modelo Lagrangiano se resuelve en las mismas coordenadas de la malla del modelo ROMS, con una interpolación bilineal de las velocidades tridimensionales $\mathbf{u} = (u, v, w)$ del modelo en la posición instantánea de las partículas. La integración temporal de las trayectorias de las partículas usa un esquema de Euler, con un intervalo temporal de integración de 10 minutos para las advecciones dentro del dominio de la Bahía y de 1 hora para las advecciones dentro del dominio regional. Se realizaron experimentos con 572 partículas liberadas los días 9, 19 y 24 de abril de 2007 a 2 m de profundidad y un experimento con 349 partículas para el día 24 de abril de 2007 a 20 m de profundidad; las posiciones iniciales se muestran en la Figura 3. El tiempo total de advección fue variable para los cuatro experimentos de 278, 288 y 293 días para el 9, 19 y 24 de abril, respectivamente.

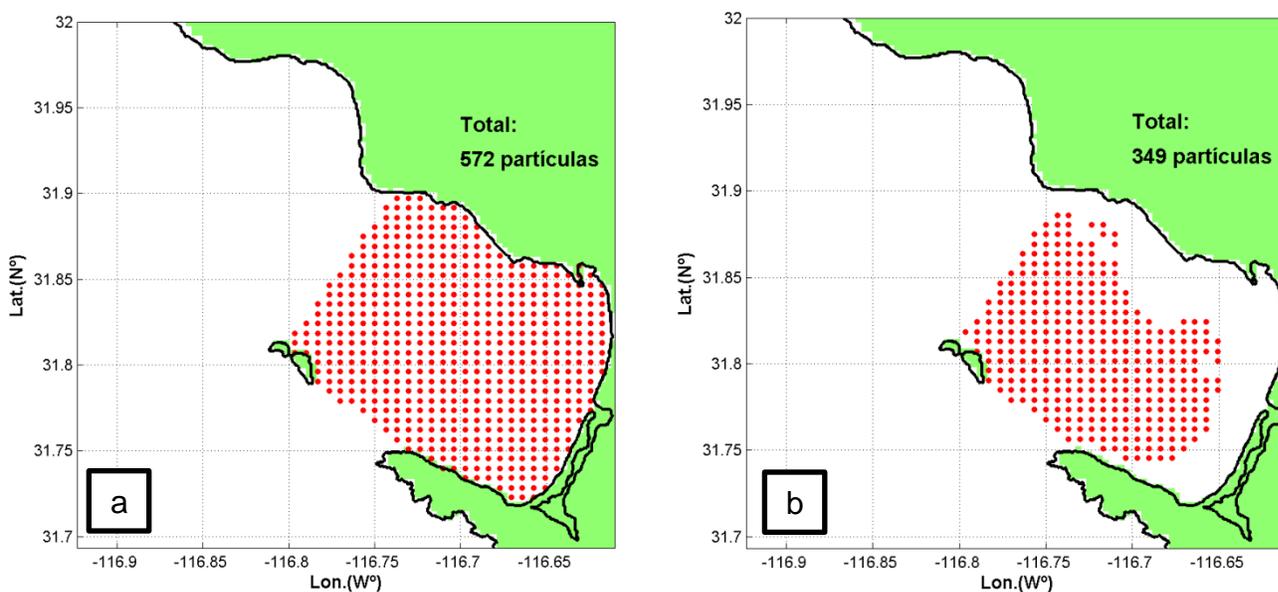


Figura 3.- Posiciones iniciales de las partículas dentro de la BTS para los experimentos de advección: a) partículas liberadas a 2 m de profundidad y b) partículas liberadas a 20 m de profundidad.

2.3.2. Análisis Lagrangiano

Para el análisis de las trayectorias, se inicializaron grupos de partículas en la BTS en las fechas mencionadas en el apartado anterior, las cuales se ubican durante el tiempo de ocurrencia del florecimiento de algas tóxicas reportado por García-Mendoza *et al.* (2009). La advección de estas partículas se hizo en dos sentidos: hacia atrás y hacia adelante en el tiempo (Figura 4). Las advecciones hacia atrás en el tiempo proporcionan información acerca de dónde vienen las parcelas de agua, mientras que las advecciones hacia adelante en el tiempo proporcionan información acerca de la dirección que toman las parcelas de agua después de ingresar en la BTS. La combinación de ambos tipos de advección también proporciona información sobre el tiempo de residencia de las aguas dentro de la BTS (Rivas *et al.*, 2010).

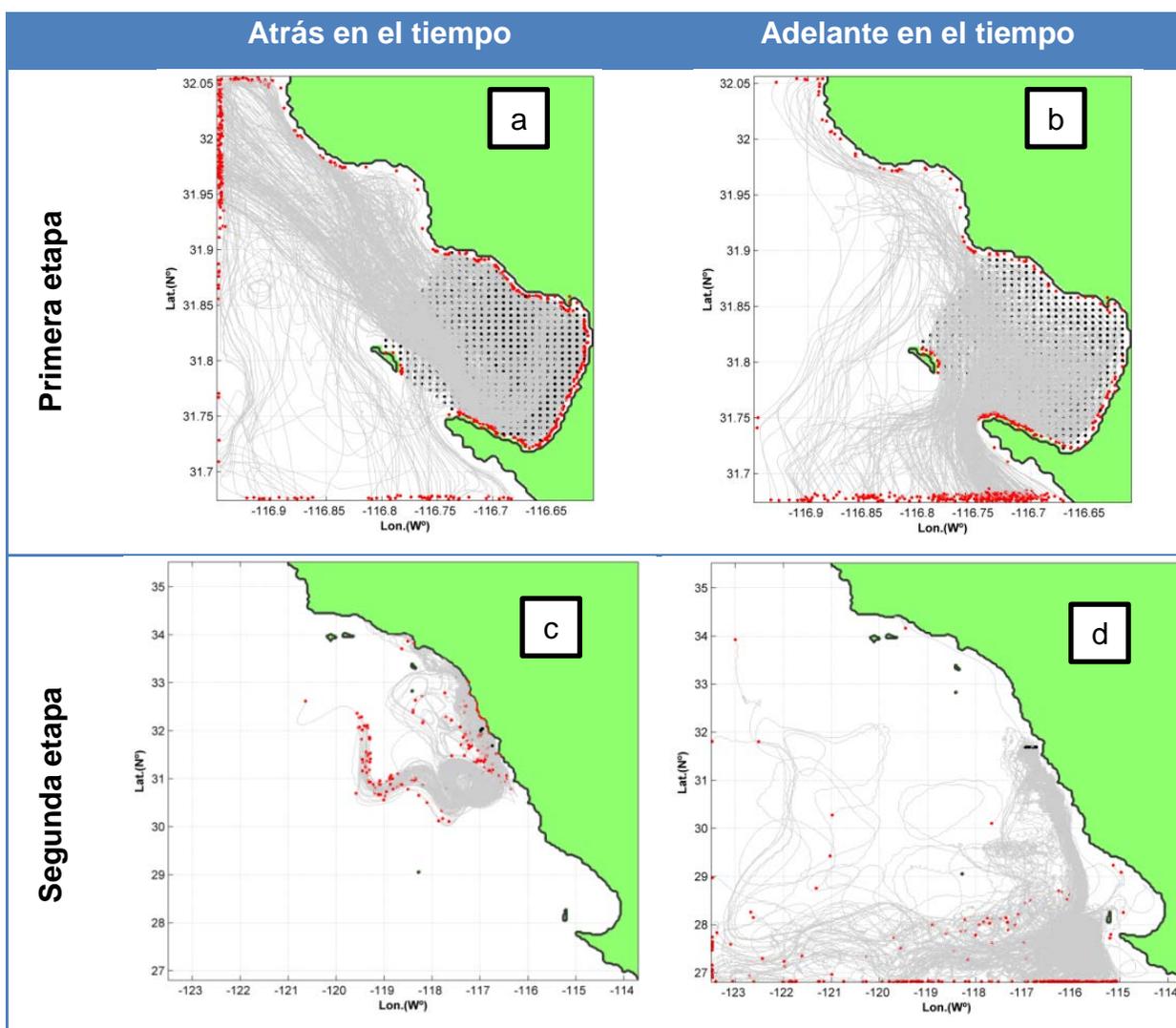


Figura 4.- Trayectorias resultantes para el experimento del 24 de abril de 2007 a 2 m de profundidad. Las cuatro figuras corresponden a las advecciones tiempo atrás y tiempo adelante y a las etapas dentro del dominio Bahía y dentro del dominio regional.

Las advecciones constan de dos etapas (Figura 4). La primera de ellas se lleva a cabo dentro del dominio de la BTS: las partículas se inicializan como se describió anteriormente y son advectadas por el flujo del interior de la BTS. La segunda etapa se lleva a cabo en el modelo regional descrito anteriormente, cuando la mayor parte de las partículas salen del dominio de la BTS a través de sus fronteras abiertas durante la advección: tan pronto como salen, éstas son advectadas por el flujo en el dominio regional. Por lo tanto, las advecciones en el dominio de la BTS proporcionarán las condiciones iniciales para las advecciones en el dominio regional (Rivas *et al.*, 2010).

2.4. Modelo Biológico

Tras el análisis de las trayectorias, se eligieron las partículas que presentaron patrones en los que las partículas siguen una trayectoria común y con una concentración significativa de éstas. En cada una de estas partículas se resuelve un modelo biológico con las condiciones ambientales a las que están expuestas dichas partículas durante la advección. El modelo biológico usado es una versión del modelo de Nitrato-Fitoplancton-Zooplancton-Detritos (NPZD; Powell *et al.*, 2006).

El modelo NPZD es un modelo trófico de cuatro elementos a base de nitrógeno. Éste es usado para modelar la dinámica biológica, el cual supone que los organismos muertos y el fitoplancton no asimilado contribuyen a un *pool* detrítico que con el tiempo se convierte en una fuente de nutrientes. Estos cuatro elementos en los que se reparte el nitrógeno total son el nitrógeno disuelto (N), el fitoplancton fotótrofo (P), el zooplancton herbívoro (Z) y el nitrógeno particulado (Detritus: D; Figura 5).

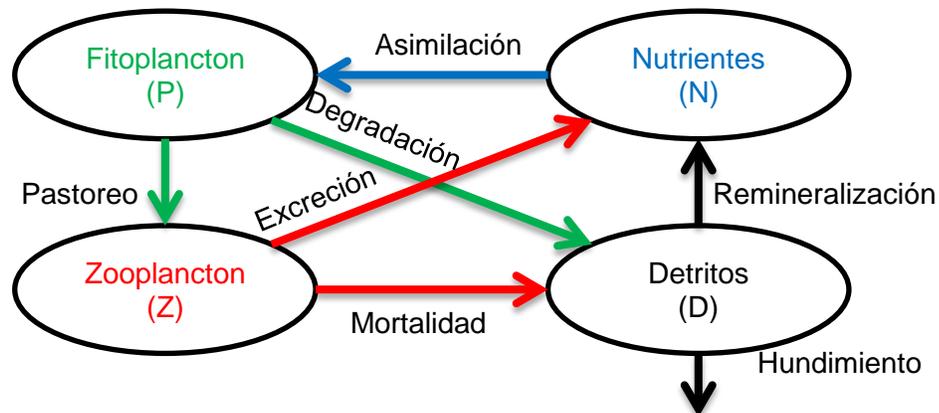


Figura 5.- Interacciones del modelo NPZD.

El modelo NPZD es similar al usado por Powell *et al.* (2006). Sin embargo, es importante mencionar que en la implementación del modelo NPZD en un sistema Lagrangiano, como en el caso del presente trabajo, los términos advectivos y difusivos deben ser modificados y resueltos de acuerdo a un marco de referencia que se mueve con las parcelas de agua. De las ecuaciones (1) a (4) de Powell *et al.* (2006) se eliminó el término advectivo ($u \cdot \nabla(N, P, Z, D)$) que se encuentra del lado izquierdo de la ecuación, ya que el cambio de la posición de la partícula está dado por el movimiento Lagrangiano, es decir, por la advección misma. Las ecuaciones resultantes, usadas en el presente análisis, son las siguientes:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \delta D + \gamma_n GZ - UP + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial N}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = UP - GZ - \sigma_d P + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial P}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = (1 - \gamma_n)GZ - \zeta_d Z + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial Z}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \sigma_d P + \zeta_d Z - \delta D + w_d \frac{\partial D}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial D}{\partial z} \right), \quad (4)$$

$$G = R_m(1 - e^{-AP}), \quad (5)$$

$$I = I_0 \exp(k_z z), \quad (6)$$

$$U = \frac{V_m N}{k_n + N} \frac{\alpha I}{\sqrt{V_m^2 + \alpha^2 I^2}}, \quad (7)$$

donde t es el tiempo y el resto de los parámetros se especifican en la Tabla 1. Las cuatro primeras ecuaciones ((1) - (4) para N , P , Z , y D) tienen la misma forma general. El lado izquierdo de cada ecuación contiene: un término de evolución local ($\partial(N, P, Z, D)/\partial t$). El lado derecho de cada ecuación tiene diversos términos, pero el último término de cada ecuación de forma $\partial/\partial z (k_v(N, P, Z, D)/\partial z)$ inherente a un proceso físico del flujo, es el término de la difusión vertical (Powell *et al.*, 2006; Spitz *et al.*, 2003). En un sistema Lagrangiano es difícil la representación de la difusión y la convección vertical (Hense, 2010), por lo que fue necesario la implementación de supuestos adicionales. Las derivadas de los términos de difusión vertical y velocidad de hundimiento fueron

evaluadas a partir de un modelo biológico acoplado al modelo Euleriano como en el descrito en la sección 2.2; los detalles de este modelo se describen en Cruz Rico (2015). En cada posición de la partícula a lo largo de la trayectoria se evalúa la difusión vertical y velocidad de hundimiento usando como referencia la estructura vertical del modelo Euleriano. Los términos restantes en el lado derecho de las ecuaciones (1) - (4) representan la dinámica biológica (incluyendo un término de hundimiento en la ecuación (4), $w_d \partial D / \partial z$ (Powell *et al.*, 2006; Spitz *et al.*, 2003).

Tabla 1.- Parámetros del modelo biológico.

Símbolo	Nombre del parámetro	Valor
k_z	Coeficiente de atenuación de la luz	0.04 m^{-1}
k_p	Coeficiente de auto-atenuación	$0.0095 \text{ m}^2 \text{ mmol-N}^{-1}$
α	Pendiente inicial de la curva de P-I	$0.025 \text{ d}^{-1} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$
I_0	Irradiancia superficial	158.075 W m^{-2}
V_m	Tasa de absorción de nitrato	1.5 d^{-1}
k_n	Absorción a media saturación	$0.5 \text{ mmol-N m}^{-3}$
σ_d	Tasa de mortalidad del fitoplancton	0.1 d^{-1}
R_m	Taza de pastoreo por zooplancton	0.6 d^{-1}
A	Constante Ivlev	$0.06 \text{ m}^3 \text{ mmol-N}^{-1}$
γ_n	Eficiencia de excreción	0.3
ζ_d	Tasa de mortalidad del zooplancton	0.1 d^{-1}
δ	Remineralización	0.5 d^{-1}

Dentro de los procesos importantes incluidos en el modelo están el crecimiento fotosintético y absorción de nitrógeno por el fitoplancton (U , ecuación (7)), el pastoreo del fitoplancton por el zooplancton (G , ecuación (5)), la mortalidad de los dos tipos de plancton (σ_d para fitoplancton y ζ_d para el zooplancton), y la remineralización (δ) de detritos. La luz disponible en la profundidad se calcula suponiendo que (1) la atenuación exponencial por agua de mar (K_z), y (2) el fitoplancton (K_p), con el coeficiente de extinción para el fitoplancton que es proporcional al promedio de la densidad del fitoplancton entre la superficie y la profundidad. Para describir el cambio en la tasa de absorción se utiliza una curva de Michaelis-Menten como una función de la concentración de nitrato de U . El pastoreo del zooplancton sobre el fitoplancton se

parametriza mediante la función I_{lev} (G), con una proporción (γ_n) del fitoplancton consumido que se pierde directamente en la mezcla de nitrato en función de la “alimentación descuidada” y los procesos metabólicos. Los términos de mortalidad y de remineralización son funciones lineales de la concentración; el plancton muerto se convierte en detritos (σ_d, ζ_d), mientras que los detritos se remineralizan para convertirse en nitrógeno disuelto (δ). La interacción de estos parámetros se puede observar en la Figura 5, las cuales representan la dinámica biológica del modelo (Powell *et al.*, 2006; Spitz *et al.*, 2003).

Además de las modificaciones mencionadas anteriormente se sugiere añadir las siguientes consideraciones. Powell *et al.* (2006) por simplicidad consideran el nivel de luz de superficie constante en el tiempo, por lo que se propone añadir al modelo la variación diurna de la radiación solar o fotoperiodo de 12 hrs., en el que durante la noche se considera una radiación solar nula. Por otro lado, en el modelo de Powell *et al.* (2006) ninguno de los procesos biológicos son dependientes de la temperatura. Por lo que se añade un término de dependencia a la temperatura (Y_{mod}) en las ecuaciones:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \delta D + \gamma_n GZ - (U * Y_{mod})P + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial N}{\partial z} \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = (U * Y_{mod})P - GZ - \sigma_d P + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial P}{\partial z} \right), \quad (9)$$

Para esto se ajustó una función de la forma

$$Y_{mod} = aT^b \exp(cT^d), \quad (10)$$

con $a=0.007$, $b=4.0591$, $c=-0.1010$, $d=1.7477$ obtenidos del ajuste de la curva y T como la temperatura a la que está expuesta la partícula a lo largo de la advección. Esto da como resultado que a cierta temperatura, dependiendo de la especie de fitoplancton, se tendrá un crecimiento máximo y éste irá disminuyendo conforme aumente o disminuya la temperatura (Figura 6). Para este caso en particular se definió una función que fuera congruente (aproximadamente) con las observaciones

de laboratorio de la temperatura de máximo crecimiento para la especie *Pseudo-nitzschia australis* (Figura 7; Santiago-Morales y García-Mendoza, 2011).

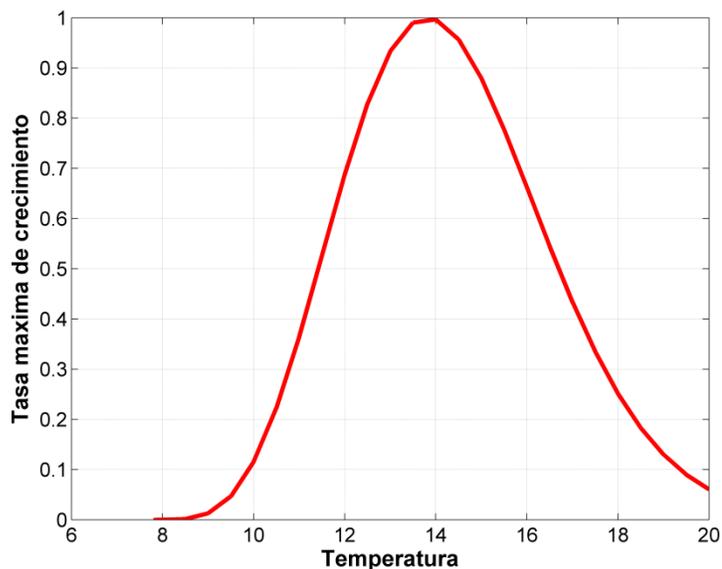


Figura 6.- Curva para la tasa máxima de crecimiento para la especie *Pseudo-nitzschia australis*.

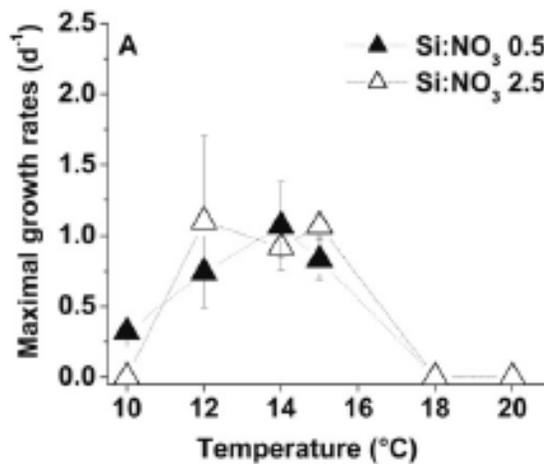


Figura 7.- Tasa máxima de crecimiento para la especie *Pseudo-nitzschia australis* aislada de la región de la BTS (Santiago-Morales y García-Mendoza, 2011).

Capítulo 3. Comparación con observaciones y otras simulaciones

En esta sección se muestra una comparación entre las salidas del modelo y observaciones y simulaciones de trabajos previos, esto con el fin de evaluar el rendimiento básico del mismo. En la primera sección se muestra el campo velocidad a 5 m de profundidad comparado con el campo velocidad tomado de Mateos *et al.* (2009). En la segunda sección se muestra una comparación con datos hidrográficos del crucero BTS0407 del B/O Francisco de Ulloa (CICESE). En la tercera sección se muestra una comparación del nivel del mar de la costa del modelo con el nivel del mar de la costa tomado de un mareógrafo en el puerto El Sauzal. En la cuarta sección se compara la temperatura superficial del mar del modelo regional con imágenes de satélite de la temperatura superficial para la misma zona.

3.1. Campo de velocidad

La Figura 8 muestra el campo velocidad promedio de los meses marzo-abril, meses en los que está centrada la advección, a 5 m de profundidad del modelo, comparado con el campo velocidad promedio del mes de julio a 5 m de profundidad tomado de Mateos *et al.* (2009). Note que el campo de julio es esencialmente similar al de primavera de ese mismo modelo mostrado en la Figura 49 de Mateos (2010), aunque para este periodo no se muestran secciones de las entradas de la Bahía, de aquí que se muestra el campo de velocidad de julio de Mateos *et al.* (2009). Dado que las advecciones se realizan en el periodo marzo-abril, se eligió este periodo como ejemplo de la circulación promedio del modelo Euleriano utilizado en esta tesis, además de que esta comparación cualitativa pretende enfocarse únicamente en los rasgos principales de la circulación presentes en la Bahía.

En los campos de velocidad del modelo y de Mateos *et al.* (2009) se puede observar dos áreas con diferente circulación: una en las proximidades de la ITS en la que presenta influencia del SCC; y la otra, una zona de recirculación al este entre PB y PSM caracterizada por la presencia de un giro ciclónico cerca de PB y dos giros anticiclónicos en la costa norte de la Bahía. El campo de velocidad de Mateos *et al.* (2009) muestra la presencia de un giro ciclónico cerca de PB y un giro anticiclónico en

la costa norte de la Bahía. También se puede observar en los dos casos una zona de “sombra” al sur de la ITS, esta zona se forma porque las islas interrumpen el flujo del SCC dejando al sur una zona que no está influenciada por este flujo. Por otro lado en el modelo se observa una zona de recirculación en la Bahía de Salsipuedes que no se observa en Mateos *et al.* (2009), debida a la forma de la costa y al flujo exterior. No obstante, hay que recordar que la resolución del modelo de Mateos *et al.* (2009) es menor que la del modelo de esta tesis, además de que sus forzamientos son climatológicos y no cada 6 horas, de manera que esto puede influir en que los resultados de esos autores no muestren estructuras dinámicas que podrían existir en la Bahía en la realidad.

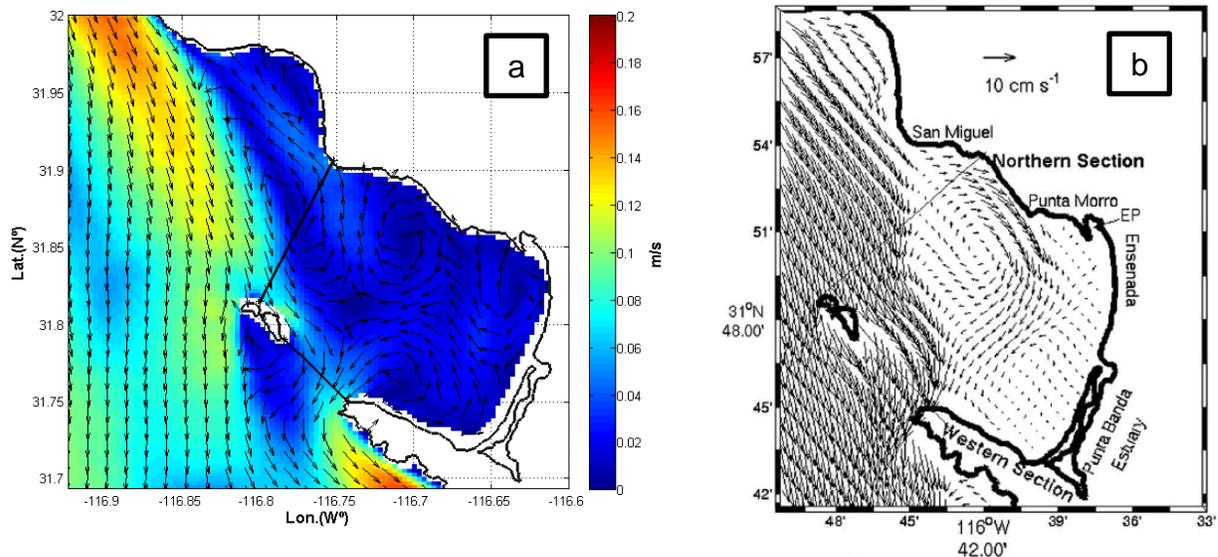


Figura 8.- Velocidad promedio a 5 m de profundidad para (a) el modelo y (b) el resultado tomado de Mateos *et al.* (2009). Los colores indican la magnitud de la velocidad en m s^{-1} . Las líneas negras en la boca norte y sur indican la posición de las secciones en las que se evalúan el flujo y el transporte.

Fuera de la BTS las corrientes se mueven con dirección hacia el sur a lo largo de la costa con estructuras cambiantes de mesoescala tales como remolinos y meandros las cuales han sido reportadas por varios autores y están bien documentadas (e. g., Durazo *et al.*, 2010; Mateos *et al.*, 2009; Checkley y Barth, 2009; Almazán-Becerril *et al.*, 2012). Estas características producen variaciones en el flujo a través de la comunicación con la boca norte de la Bahía (Mateos *et al.*, 2009). El flujo que entra a la BTS es parte de las fuertes corrientes que se producen a lo largo de la plataforma

continental fuera de la Bahía, este flujo afecta principalmente el área que está en las proximidades de la ITS (Figuras 8 y 9a).

La Figura 9 muestra la velocidad normal a las secciones verticales situadas en la boca norte y sur de la BTS, respectivamente (vea Figura 8). La sección norte presenta profundidades menores a 40 m, mientras que la sección sur es mucho más profunda (>300). La sección norte presenta un intenso flujo de salida en la franja costera al noroeste del puerto El Sauzal, seguido de un máximo flujo subsuperficial a 15 m de profundidad (Figura 9a). En contraste con la sección norte de Mateos *et al.* (2009, en su Figura 2b), se muestra un flujo de salida que viene unida a la parte inferior de la isobata a 20 m, y un flujo de entrada que se intensifica en la superficie en el lado exterior de la sección.

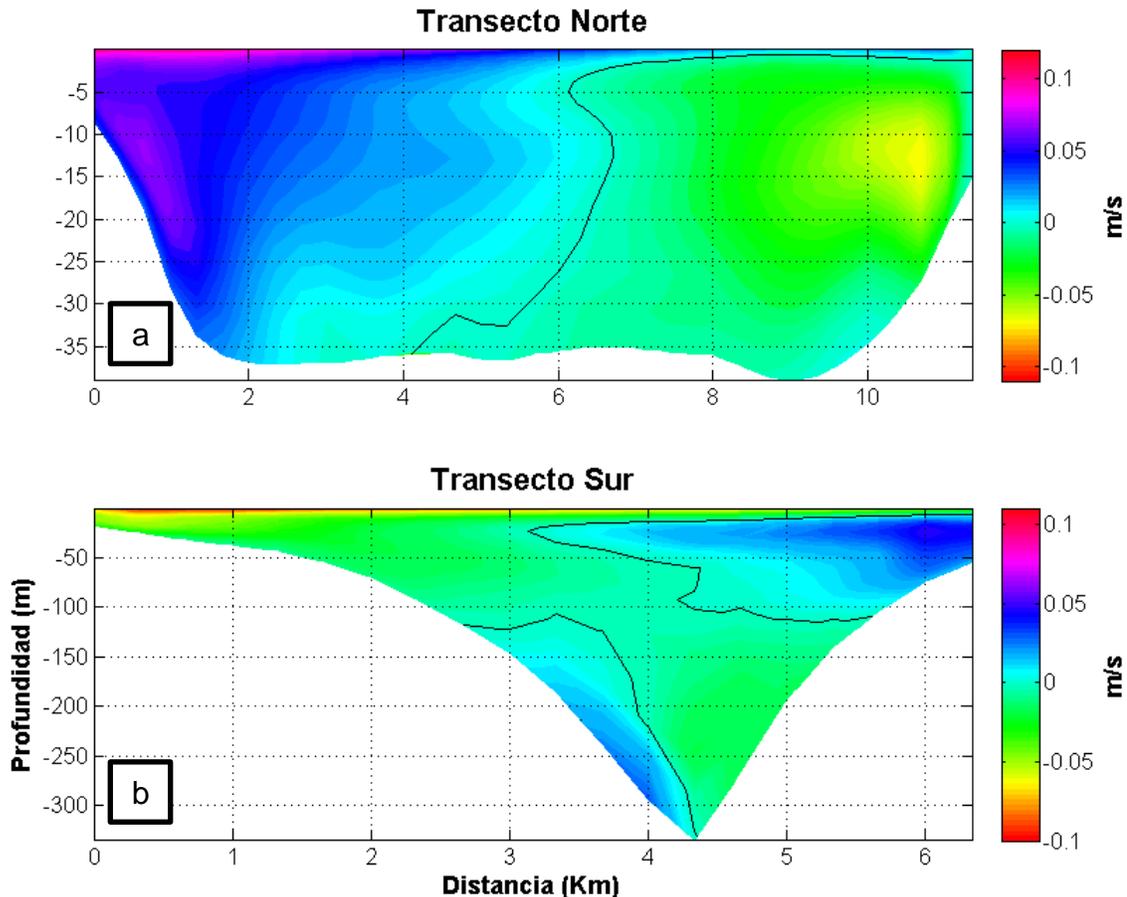


Figura 9.- Velocidad promedio (marzo-abril 2007) normal a la secciones verticales en la (a) boca norte y (b) sur de la BTS (Vea Figura 8). Los valores positivos indican flujo hacia dentro de la Bahía. Se muestra el contorno del cero para mejor visualización.

Las proximidades de la ITS de la sección norte se caracterizan por presentar un flujo fuerte superficial hacia adentro (Figura 8), el cual está limitado a ~30 m de profundidad (Figura 9a). Este flujo sale de la Bahía a través de la sección sur (Figura 9b), es decir, entre PB y la ITS. La sección sur (Figura 9b) muestra cierta similitud entre el presente modelo y el modelo de Rivas *et al.* (2010; en su Figura 4c) y el de Mateos *et al.* (2009; en su Figura 2c) en términos de flujo de salida, el cual se presenta cerca de la costa y debajo de la superficie de entrada centrada a 50-70 m en el lado hacia el exterior, pero también hay una diferencia importante que es el intenso flujo de entrada en la parte más profunda de la sección, el cual no se observa en la sección presentada por Mateos *et al.* (2009).

3.2. Datos de crucero

Los datos hidrográficos del crucero BTS0407 del B/O Francisco de Ulloa (CICESE) fueron recolectados el 23 y 24 de abril de 2007 a lo largo de 26 estaciones distribuidas en el área de la BTS (Figura 10). De éstas se tomaron las 7 estaciones más cercanas a la línea a lo largo de la Bahía que se muestra en la Figura 10 para formar una sección hidrográfica, la cual fue comparada con la sección hidrográfica tomada de los datos del modelo de la Bahía.

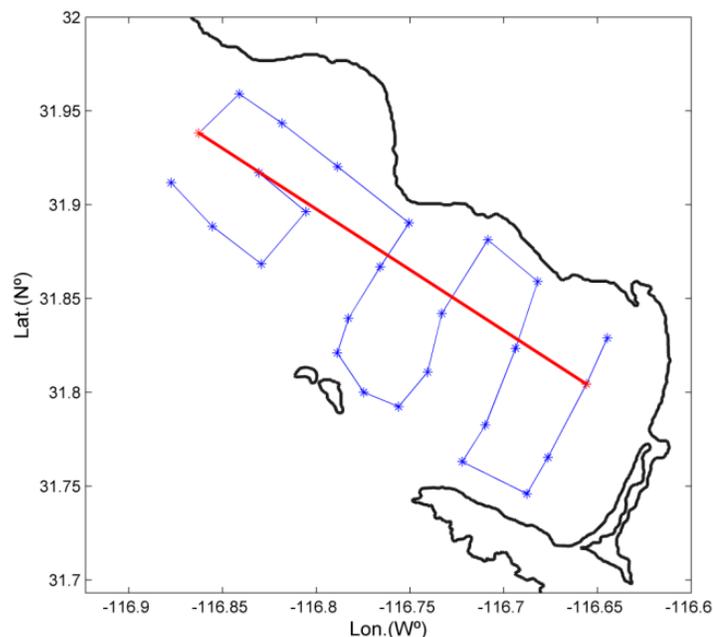


Figura 10.- Distribución de los puntos del muestreo del crucero BTS0407 (García-Mendoza *et al.*, 2009), indicado por los asteriscos azules. La línea roja muestra la posición de una sección hidrográfica obtenida a partir del modelo.

La Figura 11 muestra la temperatura de la sección hidrográfica del modelo y los datos hidrográficos del crucero. Se observan diferencias en los valores absolutos, el modelo tiende a ser más frío, sin embargo sigue las mismas características y patrones. La termoclina se encuentra entre los 10 y 20 m de profundidad, aunque no es tan marcada. Entonces, aunque el modelo tiende a ser más frío, la estructura vertical es congruente con las observaciones de manera que el desfase existente en el modelo no debería influir de manera significativa en los resultados que se presentan en esta tesis.

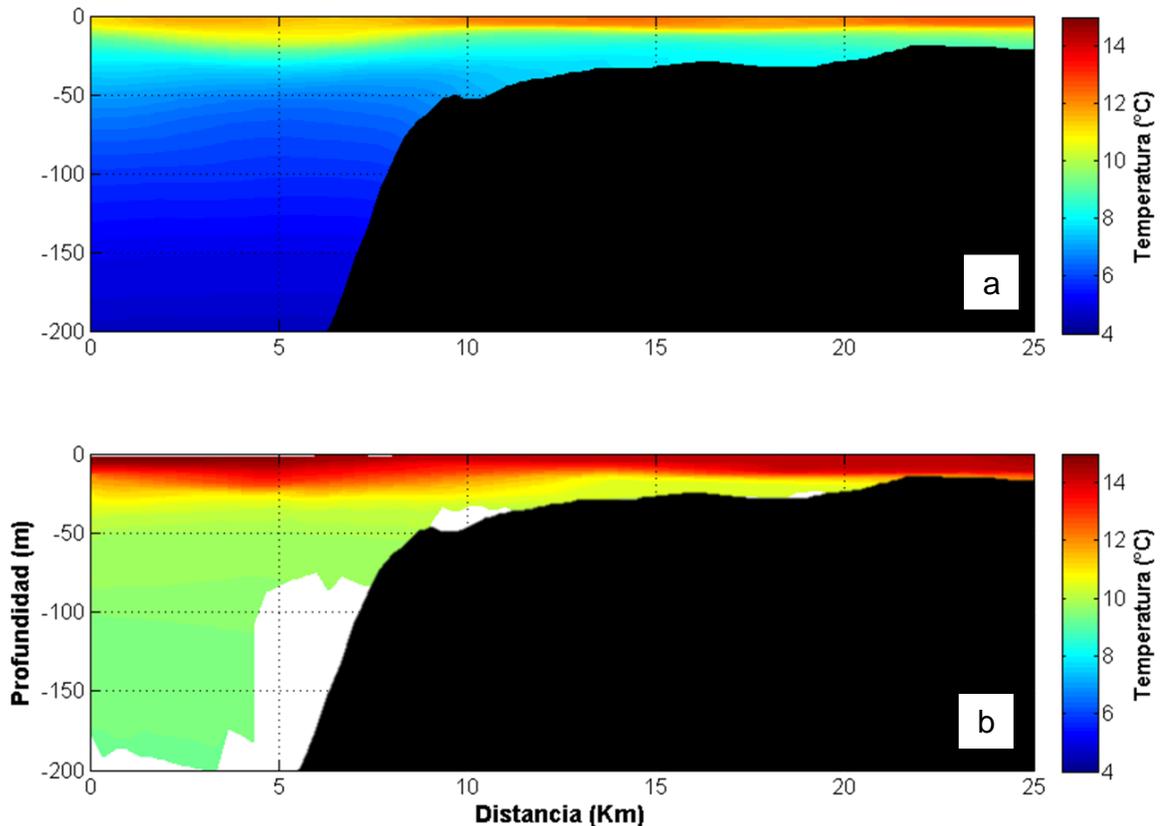


Figura 11.- Temperatura de la sección hidrográfica para (a) los datos del modelo y (b) los datos de crucero. La localización de la sección se muestra en la Figura 8.

3.3. Nivel del mar

Los datos del nivel de mar en la costa fueron tomados de un mareógrafo en el puerto El Sauzal para el año 2007, estos datos fueron obtenidos del banco de datos de CICESE (<http://oceanografia.cicese.mx/>) y se compararon con el nivel del mar del modelo. El nivel del mar diagnosticado por el modelo muestra una moderada similitud con las observaciones *in situ*, con un coeficiente de correlación de 0.59. Esto puede deberse a una señal de baja frecuencia que el modelo no reproduce, la cual viene a

través de las fronteras y tiene una temporalidad específica. No obstante, mucha de la variabilidad de alta frecuencia sí es reproducida por el modelo, lo que refuerza la confianza en el modelo Euleriano.

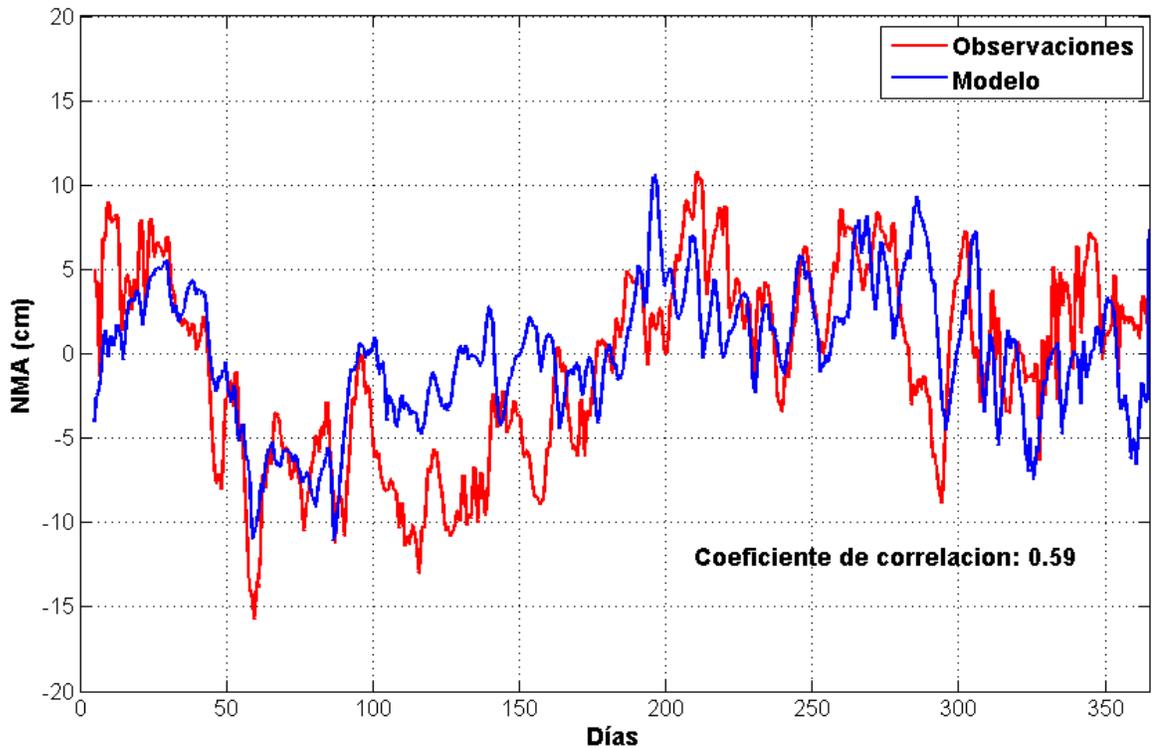


Figura 12.- Evolución temporal del nivel del mar durante el año 2007. La línea roja corresponde a los datos observados y la línea azul corresponde a los datos tomados del modelo, del punto de malla más cercano a la localización del mareógrafo.

3.4. Temperatura superficial del dominio regional

Los datos de temperatura superficial para el año 2007 del área del dominio regional fueron tomados de los sensores satelitales MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>). En la Figura 13 muestra el promedio para el periodo marzo-abril de 2007 de la temperatura superficial del modelo y de la temperatura superficial del satélite. Se observa que los patrones son similares y que concuerdan razonablemente; sin embargo, al igual que en la sección transversal de temperatura, el modelo tiende a ser más frío. No obstante, el modelo reproduce la zona de surgencia, esencial para el análisis que se presenta en este trabajo. Las comparaciones puntuales entre las imágenes del modelo y del satélite se complican por los grandes gradientes espaciales, los errores de circulación relativamente pequeños pueden conducir a grandes diferencias en la temperatura superficial (Rivas y Samelson, 2011). También, las

diferencias en los flujos de calor y la profundidad de la capa de mezcla pueden contribuir a una falta de coincidencia (Rivas y Samelson, 2011).

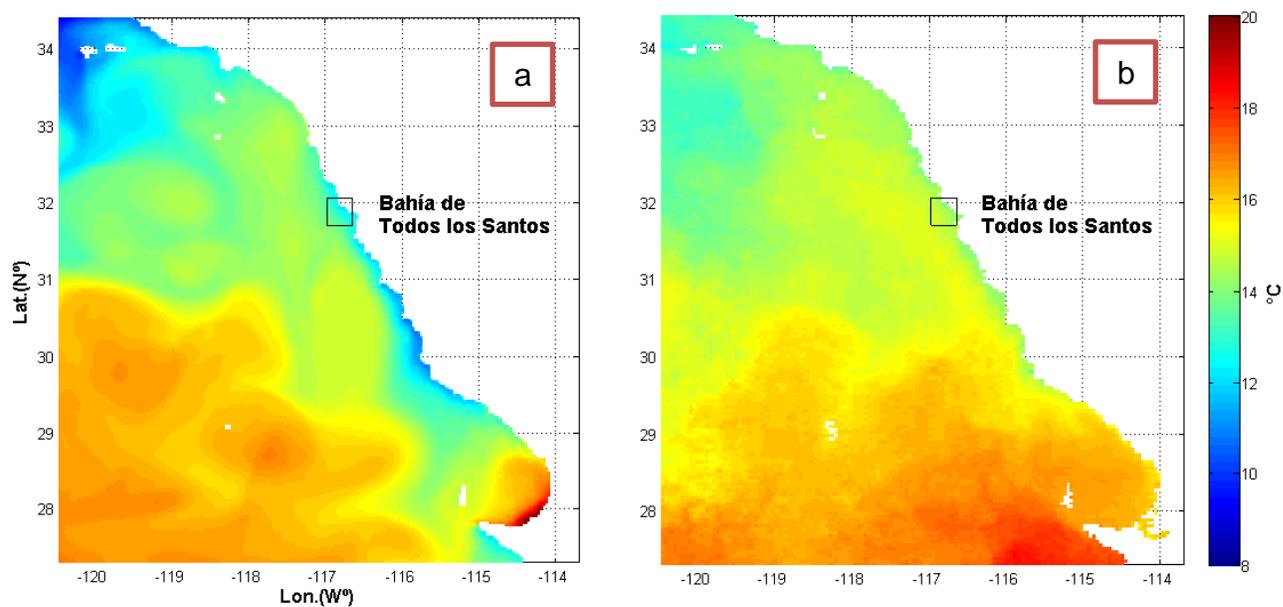


Figura 13.- Promedio para el periodo marzo-abril de la temperatura superficial en el dominio regional para (a) los datos del modelo y para (b) los datos del satélite MODIS.

Capítulo 4. Resultados

En esta sección se muestran los resultados del análisis Lagrangiano tridimensional, el cual proporciona información sobre el origen y la distribución de las aguas presentes en la Bahía durante el florecimiento tóxico reportado por García-Mendoza *et al.* (2009). Posteriormente se lleva a cabo una selección de trayectorias de las partículas, en las que se acoplo un modelo biológico para estudiar la influencia de las condiciones ambientales presentes durante la advección.

4.1. Trayectorias Lagrangianas

4.1.1. Transporte y esfuerzo del viento

La Figura 14a muestra el esfuerzo del viento meridional del 1 de enero al 30 de junio de 2007. Al inicio del año se observan vientos intensos que se van debilitando hacia el final del mes de enero, después de eso aumentan en intensidad paulatinamente hacia el mes de marzo en el que se presenta un pico importante a finales de mes. Para el día 10 de abril hay una drástica disminución de intensidad hacia el día ~92 (2 de abril) y se presenta un periodo de relajación de ~10 días de duración. Posterior a esto hay un nuevo aumento en la intensidad hacia el día ~100 (10 de abril), durante los siguiente ~20 días la intensidad fluctúa a diario de intenso a relajado y disminuyendo completamente a finales del mes de abril. A inicios del mes de mayo la intensidad aumenta con un punto máximo el día 131 (31 mayo) y disminuye hasta cambiar de signo el día 141 (10 de junio), un patrón similar de ~20 días de duración se presentó a finales del mes de mayo y durante el mes de junio. En la Figura 14b se muestra el transporte a través de la sección norte y sur para el mismo periodo que el esfuerzo del viento. Se observa un aumento drástico en la entrada y salida a principios de febrero que va disminuyendo hacia marzo, luego hay un aumento a principios de abril que es el mes del florecimiento reportado por García-Mendoza *et al.* (2009).

Estas condiciones de transporte y esfuerzo del viento resultan importantes ya que tienen un efecto en la circulación Lagrangiana predominante durante la advección en cada uno de los experimentos, lo que a su vez tiene un efecto en el tiempo de residencia de las partículas dentro de la Bahía. Con base en esto se eligieron las fechas de los experimentos. Para el 9 de abril, relajación del viento y transporte con tendencia

a aumentar. Para el 19 de abril, viento fuerte y valores altos de transporte. El 24 de abril, fecha del florecimiento reportado por García-Mendoza *et al.* (2009), que presenta condiciones de viento relativamente fuerte y valores bajos de transporte. Así, tomando estas diferentes condiciones de viento y transporte se abarcaron diferentes regímenes ambientales, lo que hace los resultados de este trabajo más sólidos.

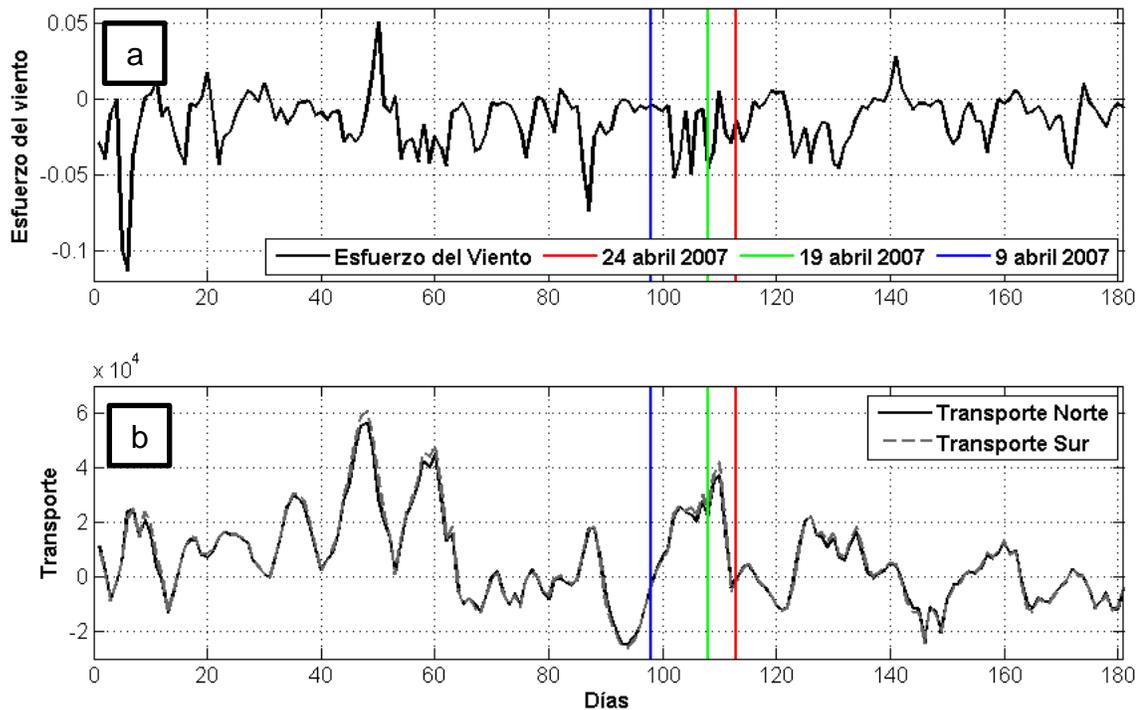


Figura 14.- (a) Esfuerzo del viento meridional y (b) transporte a través de las secciones norte y sur (el transporte de la sección sur multiplicado por -1 para mejor comparación) para el periodo del 1 de enero al 30 de junio de 2007. Las líneas verticales muestran las condiciones dominantes del esfuerzo del viento y transporte en las fechas de los experimentos de advección.

La Figura 15 muestra el tiempo de residencia para los 4 experimentos, arbitrariamente se definió el tiempo de residencia como el periodo en el que por lo menos el 10% del total de las partículas seleccionadas se encuentra dentro del área de la Bahía. El mayor tiempo de residencia corresponde con condiciones de viento fuerte y alto volumen de transporte, lo que puede indicar un efecto del esfuerzo del viento en la recirculación dentro de la BTS. Este mismo patrón debería repetirse para el experimento del 24 de abril a 2 m el cual también presentaba viento fuerte, sin embargo el tiempo de residencia del experimento del 9 de abril es mayor en comparación con este. El experimento del 9 de abril presentó condiciones de relajación de viento y un volumen de transporte casi de 0, esto podría estar promoviendo la recirculación dentro de la bahía al no estar entrando ni saliendo agua de la BTS. Esto sugiere que debe

haber algún otro factor además del esfuerzo del viento que tenga un efecto en la circulación.

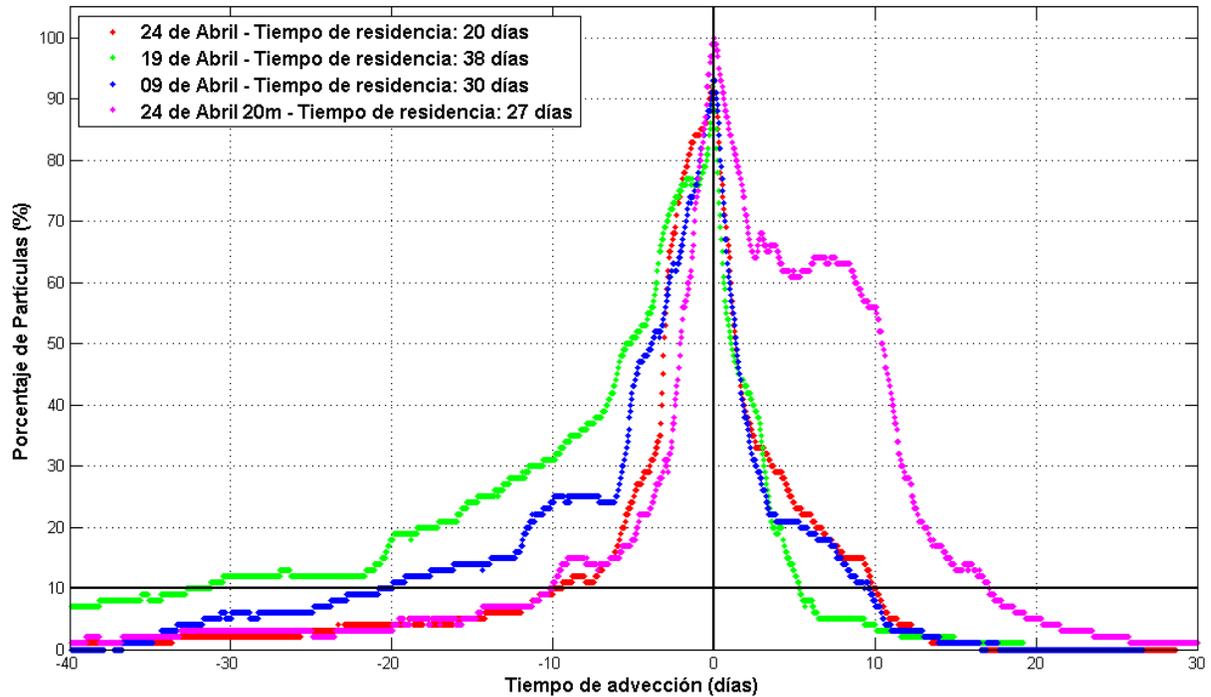


Figura 15.- Porcentaje de partículas dentro de la BTS como función del tiempo de advección de los 4 experimentos realizados. La línea negra vertical en el tiempo cero corresponde al momento en el que se liberaron las partículas por lo que en este momento tenemos el 100% de las partículas dentro de la Bahía. La línea verde horizontal indica el momento en el que por lo menos el 10% de las partículas se encuentran dentro de la bahía.

4.1.2. Análisis Lagrangiano

Como se mencionó en la sección anterior, se realizaron 4 experimentos en 3 fechas con diferentes condiciones de viento (Figura 14a) y transporte (Figura 14b). Los días 9, 19 y 24 de abril se inicializaron partículas dentro de la Bahía a 2 m de profundidad (Figura 3a), además el día 24 de abril se inicializaron partículas a 20 m de profundidad (Figura 3b). En la siguiente sección se muestra la selección de trayectorias para el experimento del 24 de abril a 2 m de profundidad. Las trayectorias para las partículas de los 3 experimentos restantes se muestran en el Apéndice B.

4.1.2.1. Selección de trayectorias

Tras el análisis de las trayectorias se eligieron las partículas que presentaron patrones con una trayectoria común. Aunque las trayectorias de las partículas presentan una alta

dispersión, se pueden distinguir patrones con una concentración significativa de partículas. Se identificaron 2 tipos de patrones. Se detectaron partículas que provienen de regiones al norte de la BTS procedentes del SCB, las cuales representan el 19% del total de las partículas liberadas (Figura 16a). La gran mayoría de estas partículas tienen su origen en zonas entre los 30° a 32° N frente a la BTS a profundidades de entre los 50 y 60 m (Figura 17). Estas partículas viajan a regiones al norte hasta llegar al SCB haciéndose cada vez más superficiales; posteriormente cambian de dirección y comienzan su viaje al sur manteniéndose cerca de la costa de California y entrando a la BTS. Después de salir de la BTS estas partículas continúan su camino hacia el sur siguiendo la misma ruta de la SCC, manteniéndose a profundidades de entre 5 y 20 m hasta salir del dominio del modelo a través de la frontera sur.

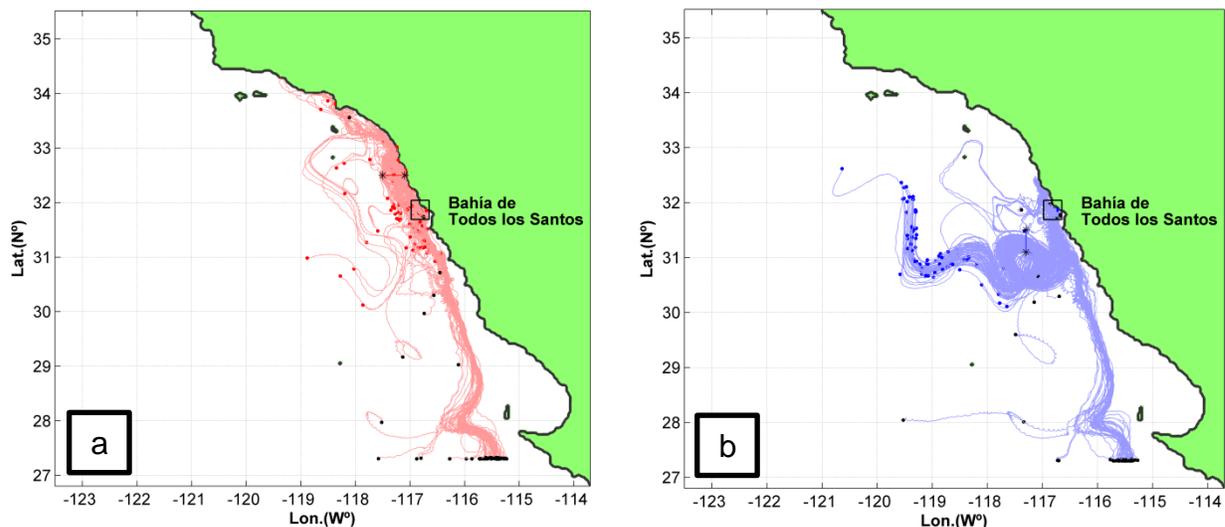


Figura 16.- Trayectorias de las partículas que entran a la Bahía: (a) por regiones al norte procedentes del SCB y (b) por regiones al oeste.

El segundo patrón identificado es el de partículas que provienen de regiones al oeste de la plataforma continental, las cuales representan el 17% del total de las partículas liberadas (Figura 16b). La gran mayoría de estas partículas tienen su origen en zonas entre los 30° a 33° N y 120° a 118° W, a profundidades de entre los 65 y 75 m (Figura 17). Estas partículas comienzan su viaje hacia el este entrando en un giro ubicado entre 30° a 32° N, al salir del giro viajan hacia al norte para pasar por la entrada norte de la BTS. Al igual que las partículas provenientes del norte, estas partículas salen de la BTS hacia el sur manteniéndose a profundidades de entre 0 y 15 m de profundidad hasta salir del dominio del modelo. Los experimentos del 9 y 19 de abril a 2

m de profundidad y las partículas del 24 de abril a 20 m de profundidad presentan patrones similares a los descritos en esta sección, las trayectorias se muestran en el Apéndice B.

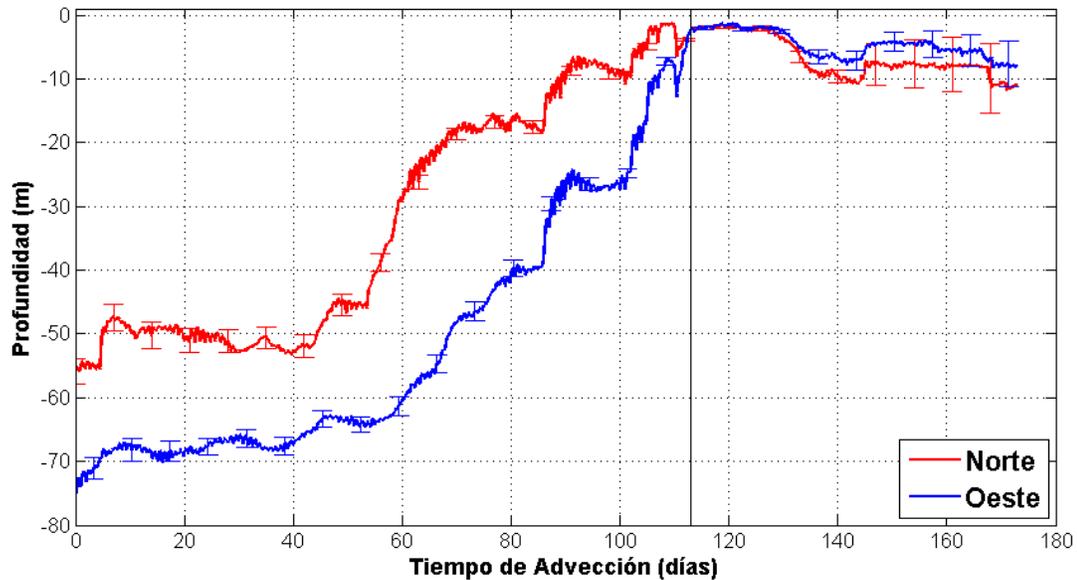


Figura 17.-Profundidad promedio de las partículas que entran a la Bahía por regiones al norte y regiones al oeste. La línea vertical indica el momento en el que fueron liberadas las partículas dentro de la Bahía.

A partir de los experimentos de advección se estimó el tiempo de residencia de las parcelas de agua presentes en la BTS para cada uno de los experimentos. En esta sección sólo se muestran el tiempo de residencia para las partículas del norte y del oeste del experimento del 24 de abril (Figura 18). El tiempo de residencia para las partículas seleccionadas del norte y del oeste es de 21 y 48 días, respectivamente. El mayor tiempo de residencia corresponde a las partículas del oeste, esto puede deberse a que las partículas tardan más tiempo en llegar a la superficie dentro de la Bahía ya que estas, como se observa en la Figura 18, vienen de zonas más profundas de entre 65 y 75 m. El porcentaje de partículas del norte tiene un pico entre los -50 y -45 días debido a que las partículas entran y salen de la Bahía, pero se quedan en áreas aledañas debido a la circulación imperante hasta volver a entrar alrededor del día -5.

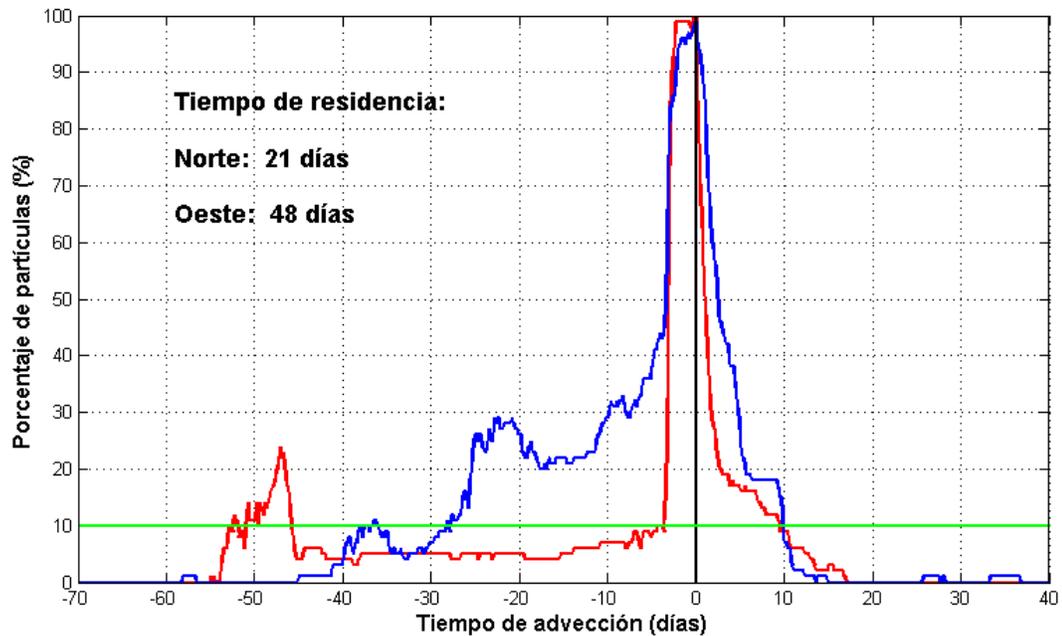


Figura 18.- Porcentaje de partículas dentro de la BTS como función del tiempo de advección. La línea negra vertical en el tiempo cero corresponde al momento en el que se liberaron las partículas por lo que en este momento se tiene el 100% de las partículas dentro de la Bahía. La línea verde horizontal indica el momento en el que por lo menos el 10% de las partículas se encuentran dentro de la Bahía.

4.2. Modelo Biológico

Como se mencionó en la sección 2.4, se acopló un modelo biológico a cada una de las partículas que fueron advectadas. En esta sección se muestra la respuesta del modelo biológico a las condiciones ambientales a lo largo de las trayectorias seleccionadas para las partículas del norte del experimento del 24 de abril. Para fines comparativos, las concentraciones de fitoplancton expresadas originalmente en concentración de nitrógeno (μM) se convirtieron a concentración de clorofila (mg/m^3) mediante la relación Chl:N, de $1.325 \text{ gChl molN}^{-1}$, es decir multiplicando la concentración de fitoplancton por 1.325 (derivada de la relación de Redfield C:N de $106:16 \text{ molC molN}^{-1}$ y de la relación C:Chl de $60:1 \text{ gC gChl}^{-1}$; Fiechter *et al.*, 2009).

4.2.1. Ajuste

Para cada experimento del modelo biológico fue necesario realizar un proceso de ajuste (“*spin up*”). Éste consistió en correr el modelo en cada una de las partículas seleccionadas y que evolucionara con condiciones ambientales fijas a lo largo del tiempo. Las concentraciones iniciales usadas para el *spin up* fueron: 17, 0.08, 0.06 y

0.04 μM para N P, Z y D, respectivamente. Observando la evolución se consideró que 100 días es tiempo suficiente para que el modelo llegue a un régimen estacionario (Figura 19) y entonces se tomaron las soluciones de ese momento como las concentraciones en equilibrio que fueron usadas como las concentraciones iniciales para cada experimento. En los experimentos que se describen en las siguientes secciones se realizó su correspondiente periodo de *spin up*.

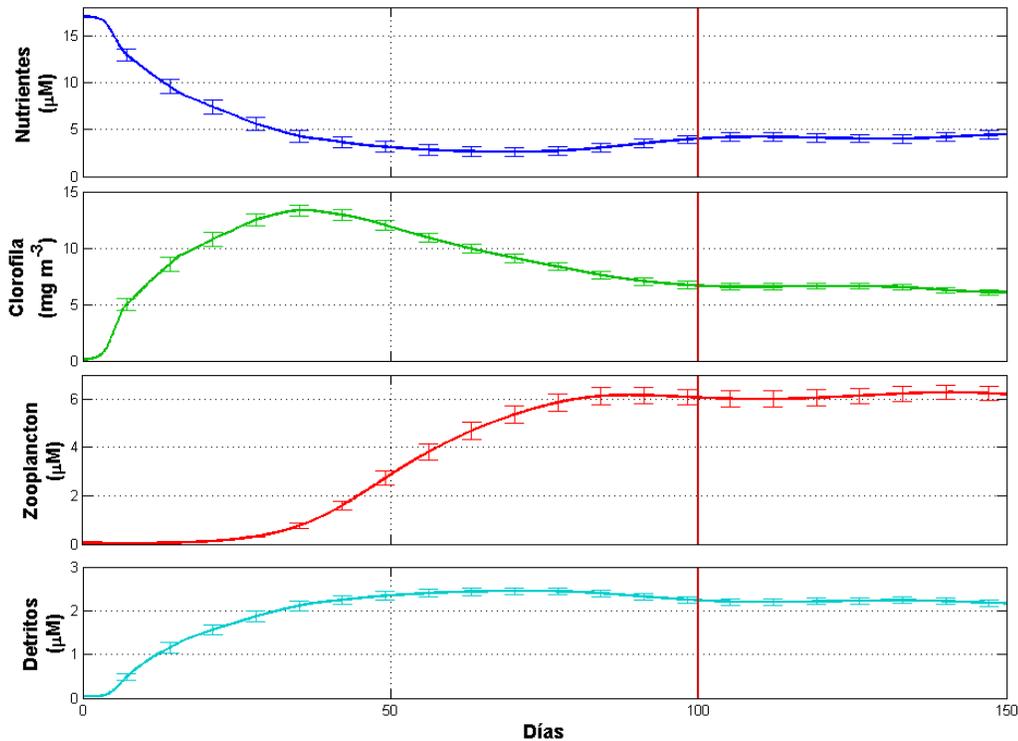


Figura 19.- *Spin up* para las condiciones iniciales del modelo acoplado a las partículas del norte del experimento del 24 de abril. La línea vertical indica el momento en el que se considera que las soluciones llegan a un régimen estacionario.

La Figura 20 muestra la comparación del modelo con condiciones iniciales de no equilibrio (17, 0.08, 0.06 y 0.04 μM para N P, Z y D, respectivamente) y el modelo con condiciones iniciales tomadas después de 100 días de *spin up*. Con respecto al modelo sin *spin up*, se puede observar un gran aumento de la concentración de clorofila durante los primeros ~60 días que va disminuyendo y haciéndose estable cuando llegan las partículas dentro de la Bahía, lo que se debe a la alta disponibilidad de nutrientes. Esto afecta directamente a la concentración de zooplancton, en el que se observa un gran aumento a partir del día -80, y a los detritos, en el que el aumento de su concentración es casi de inmediato. Estas oscilaciones son provocadas por las

concentraciones iniciales de no equilibrio. Esto mismo fue reportado por Powell *et al.* (2006), ellos mencionan que en su modelo Euleriano las concentraciones iniciales de no equilibrio usadas hacían que el modelo oscilara y se registraba un florecimiento durante los primeros 2 meses. El modelo con *spin up* muestra una mejor respuesta a las condiciones ambientales, ya no se observan oscilaciones intensas durante los primeros días de evolución. La concentración promedio de nutrientes es más alta a mayor profundidad, lo que podría sugerir un efecto indirecto de la profundidad; ya que a mayor profundidad la luz es limitante para el crecimiento fotosintético, evitando que los nutrientes sean consumidos. Al irse acercando las partículas a la superficie, disminuye la cantidad de nutrientes y aumenta la concentración del zooplancton y los detritos, como respuesta al incremento de la clorofila.

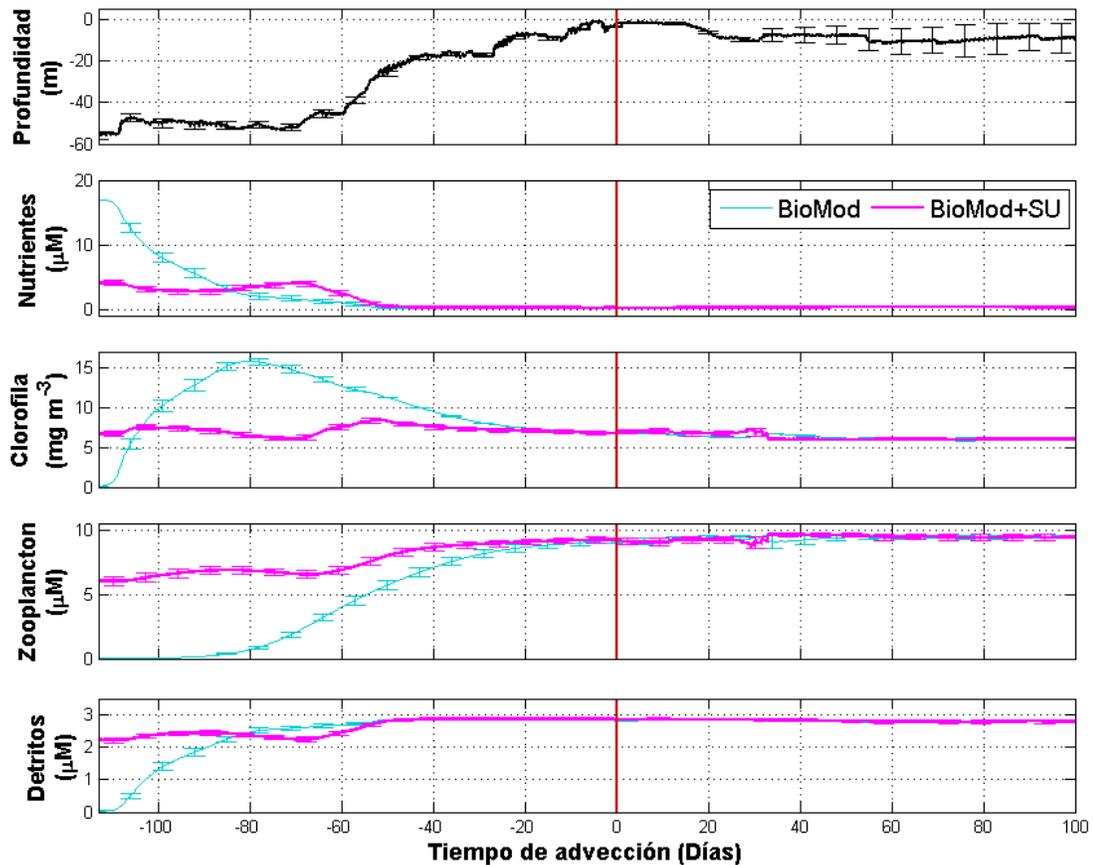


Figura 20.- Comparación del modelo con condiciones iniciales de no equilibrio (línea azul) y el modelo con condiciones iniciales tomadas después de 100 días de *spin up* (línea rosa). La figura está dividida en 5 paneles, en el primero se muestra la profundidad promedio de las partículas de este experimento, el segundo muestra la concentración de nutrientes, el tercero muestra la concentración de clorofila, el cuarto muestra la concentración de zooplancton y el quinto muestra la concentración de detritos. La línea roja vertical indica el tiempo cero en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía.

4.2.2. Variación diurna de la irradiancia

Se realizaron dos tipos de experimentos, en el primero se considera una irradiancia constante, mientras que en el segundo se impone un fotoperiodo (Irradiancia de 158 W m^{-2} durante el día y nula durante la noche) (Figura 21). En este último se observa que las concentraciones de nutrientes son mayores que en el modelo con irradiancia constante, esto se debe a que durante el *spin up* se consume menor cantidad de nutrientes ya que la concentración de clorofila no aumenta durante la noche. Entre los días -60 a -40 se observa un aumento en las concentraciones de clorofila en ambos modelos, aunque en mayor magnitud en el modelo con variación diurna, esto se debe a una mayor disponibilidad de nutrientes combinado con mejores condiciones de luz para el crecimiento del fitoplancton. Por otro lado, la concentración de nutrientes se hace casi cero alrededor del día -10, sin embargo la concentración de clorofila se mantiene relativamente estable. Esto se atribuye al proceso de remineralización presente en las interacciones del modelo, lo que hace que haya los suficientes nutrientes como para mantener la concentración de clorofila, pero no se observa este aporte de nutrientes en la gráfica debido a que son consumidos inmediatamente. El pico que se observa aproximadamente en el día -10 en la concentración de nutrientes y clorofila es atribuido a la inestabilidad del modelo en algunas partículas, esta inestabilidad tiende a provocar un crecimiento exponencial en las concentraciones de nutrientes y un decremento exponencial en las concentraciones de clorofila, pero dicha inestabilidad se pudo reducir y eliminar durante el proceso iterativo de la solución del modelo.

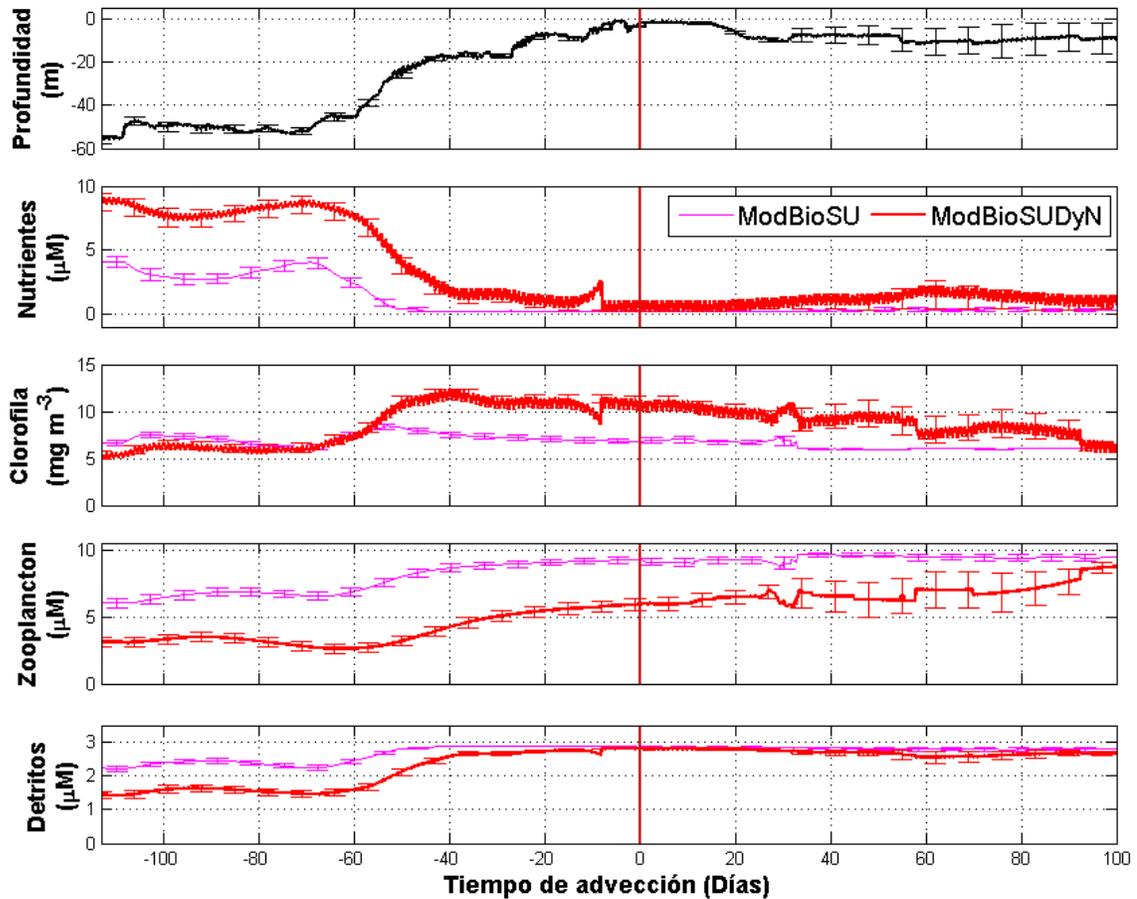


Figura 21.- Comparación del modelo con condiciones iniciales tomadas después de 100 días de *spin up* (línea rosa) y el modelo que contempla la variación diurna de la radiación solar (línea roja). La línea roja vertical indica el tiempo cero en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía.

4.2.3. Dependencia de la temperatura

Como se dijo en la Sección 2.4, se realizaron experimentos incluyendo el efecto de la temperatura en la asimilación de nutrientes y crecimiento fotosintético (Figura 22), en este experimento la irradiancia solar es constante en el tiempo. Se observa una respuesta similar al modelo con la variación diurna hasta que las partículas salen de la Bahía (día ~20), la concentración de clorofila disminuye, así como el zooplankton y los detritos; la concentración de nutrientes aumenta ya que éstos no se están consumiendo. Esto se debe a que la temperatura ambiental a la que se encuentra las partículas sobrepasa la temperatura de máximo de crecimiento específico para *Pseudo-nitzschia* y ésta ya no es ideal para su crecimiento (Figura 7).

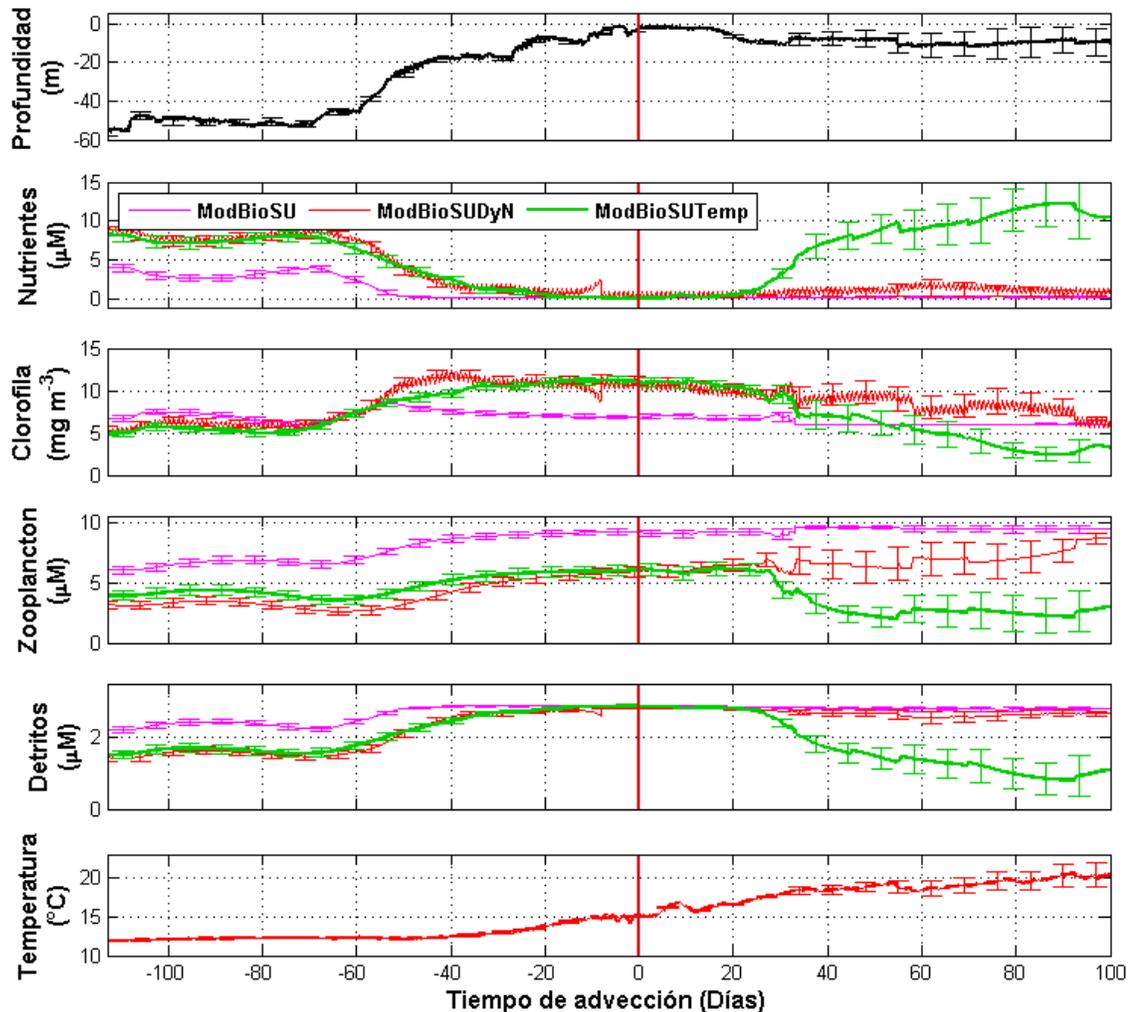


Figura 22.- Comparación del modelo con condiciones iniciales tomadas después de 100 días de *spin up* (línea rosa), el modelo que incluye la variación diaria de la radiación solar (línea roja) y el modelo con dependencia de la temperatura en los términos del modelo para el crecimiento del fitoplancton y absorción de nutrientes (línea verde). El sexto panel muestra la temperatura promedio a lo largo de las trayectorias de las partículas del norte para el experimento del 24 de abril. La línea roja vertical indica el tiempo cero en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía.

El panel 6 de la Figura 22 muestra la temperatura ambiental promedio a lo largo de las trayectorias de las partículas. La temperatura es estable durante los primeros ~70 días, después de esto se observa un aumento de la temperatura conforme las partículas se acercan a la superficie y entran a la Bahía. Después del día 30 se observa un aumento en la dispersión de los datos debido a la variación en la profundidad de las partículas. Las partículas al salir de la Bahía se mantienen cerca de la superficie y en su viaje al sur se encuentra con aguas más cálidas, por

lo que la temperatura aumenta y deja de ser favorable para el crecimiento de *Pseudo-nitzschia*, de acuerdo con Santiago-Morales y García-Mendoza (2011).

4.2.4. Simulación que incorpora las adecuaciones propuestas

El modelo biológico que ya incluye el fotoperiodo y la dependencia a la temperatura responde de manera evidente a las condiciones ambientales que presentan cada una de las partículas durante su trayectoria (Figura 23). Se observa un aumento en la concentración de clorofila cuando las partículas se están moviendo más cerca de la superficie y muestra las concentraciones más altas dentro de la Bahía. Este aumento corresponde a las partículas que llegan a zonas con condiciones más favorables para el fitoplancton, como la temperatura y la luz.

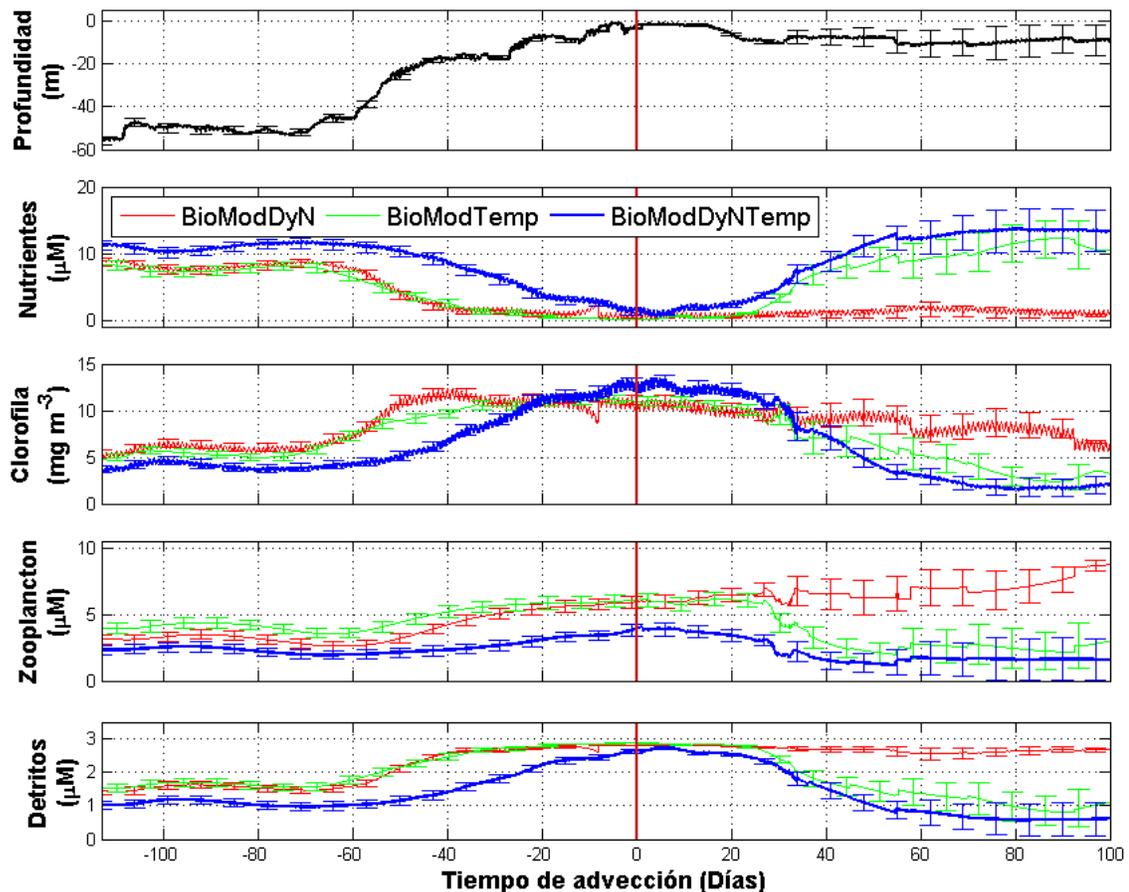


Figura 23.- Comparación del modelo con variación diurna de la radiación solar (línea roja), el modelo con dependencia a la temperatura (línea verde) y el modelo con fotoperiodo y dependencia a la temperatura. La línea roja vertical indica el tiempo en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía.

4.2.4.1. Partículas del norte vs partículas del oeste

La Figura 24 muestra la comparación entre el modelo de las partículas del norte con el modelo de las partículas del oeste. Se observan diferencias en el tiempo en el que ocurren los picos máximos de las concentraciones de clorofila. Esto se debe a que hay una diferencia en el lapso de tiempo en el que las partículas llegan a zonas más favorables, tanto de radiación solar como de temperatura, para el crecimiento del fitoplancton. Las partículas del norte llegan a la temperatura de máximo de crecimiento específico (14°C) aproximadamente el día -20 (Figura 24, panel 4) a 5 m de profundidad, en ese momento la concentración de clorofila está a punto de llegar a su punto máximo, el cual sucede justo dentro de la Bahía (Figura 25a). Por otro lado, las partículas del oeste llegan a la temperatura de máximo de crecimiento específico aproximadamente 15 días después (Figura 24, panel 4), por lo que su pico máximo de concentración de clorofila sucede cuando las partículas van saliendo de la Bahía (Figura 25b).

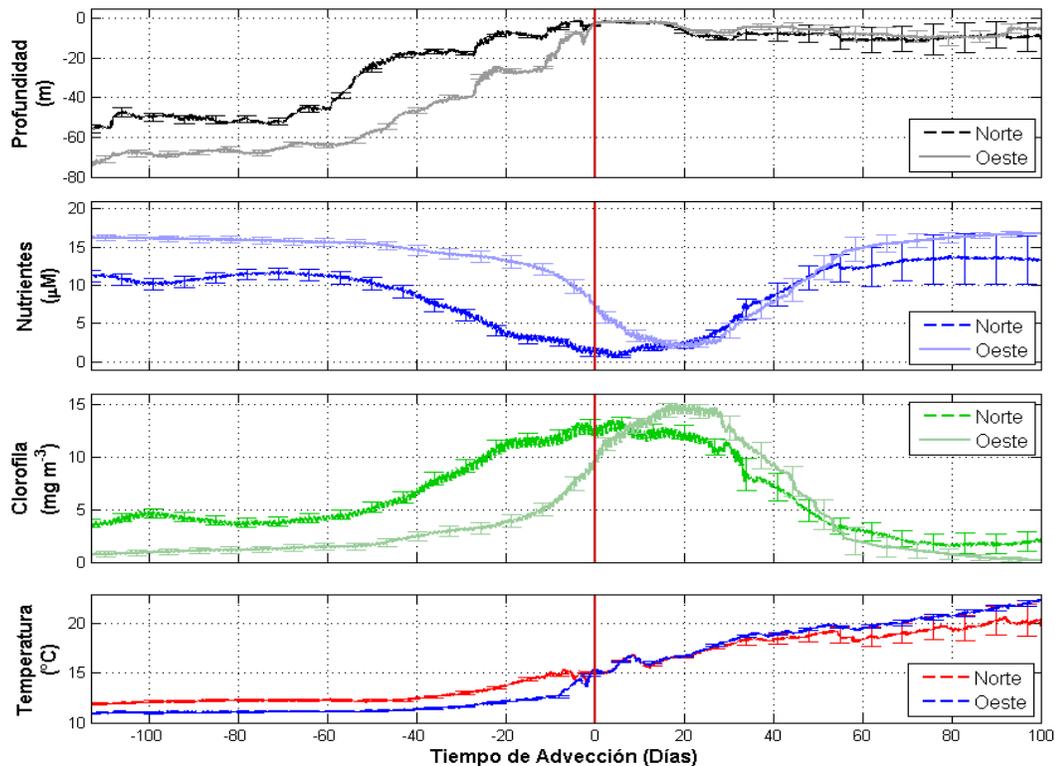


Figura 24.- Comparación entre el modelo biológico acoplado a las partículas del Norte y del Oeste. La línea roja vertical indica el tiempo en el cual se liberaron las partículas dentro de la Bahía. El panel 4 muestra la temperatura promedio a lo largo de las trayectorias de las partículas del norte y del oeste para el experimento del 24 de abril.

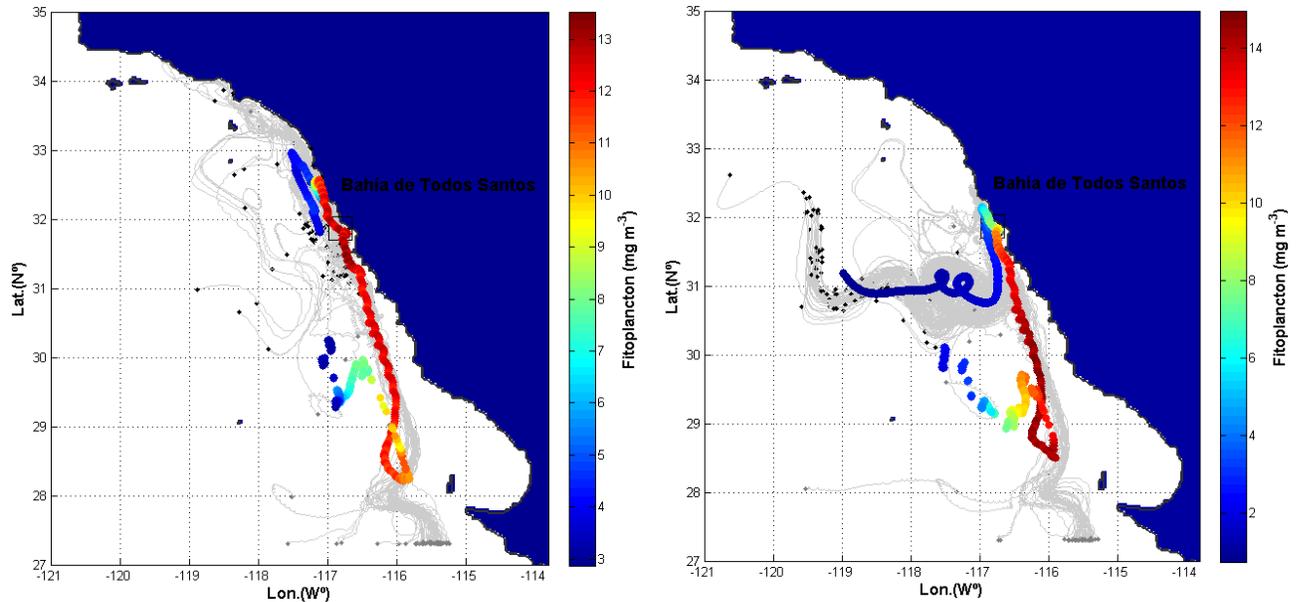


Figura 25.- Trayectoria promedio para las trayectorias seleccionadas que vienen de (a) regiones al norte y de (b) regiones al oeste. El color indica la concentración promedio de fitoplancton a lo largo de la trayectoria.

4.2.4.2. Partículas a 2 m de profundidad vs partículas a 20 m de profundidad

Es esta sección se compara las partículas del norte y oeste del 24 de abril, liberadas a 2 m y a 20 m de profundidad (Figura 26). Estas partículas se liberaron el mismo día y estuvieron influenciadas por las mismas condiciones ambientales, por lo que la única diferencia entre ellas es la profundidad a la que fueron liberadas. Se observa un desfase en el tiempo en el que sucede el florecimiento, las partículas a 2 m tienen su pico máximo dentro de la BTS y las partículas a 20 m cuando van saliendo de la Bahía, sin embargo el florecimiento de éstas es más intenso. Esto mismo se observa en las partículas del oeste (Figura 27), hay un desfase en el momento en el que ocurre el florecimiento, para las partículas a 20 m ocurre ~30 días después. Este desfase es atribuido, como en el caso de las partículas del norte contra las del oeste, al tiempo que tardan las partículas en llegar a una zona donde las partículas tienen mejores condiciones para el crecimiento del fitoplancton, como son la temperatura (Figura 28) y radiación solar.

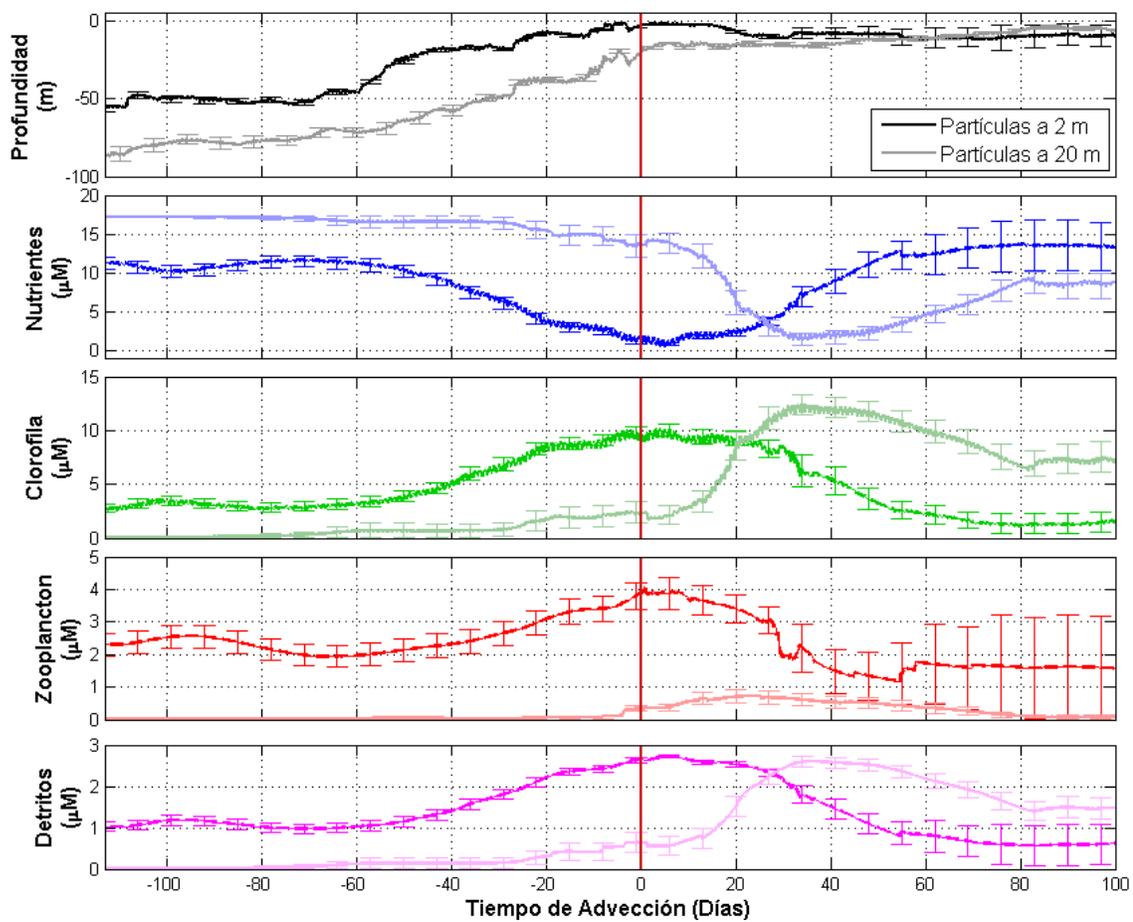


Figura 26.- Comparación entre el modelo biológico acoplado a las partículas del norte a 2 m y 20 m de profundidad liberadas el 24 de abril de 2007.

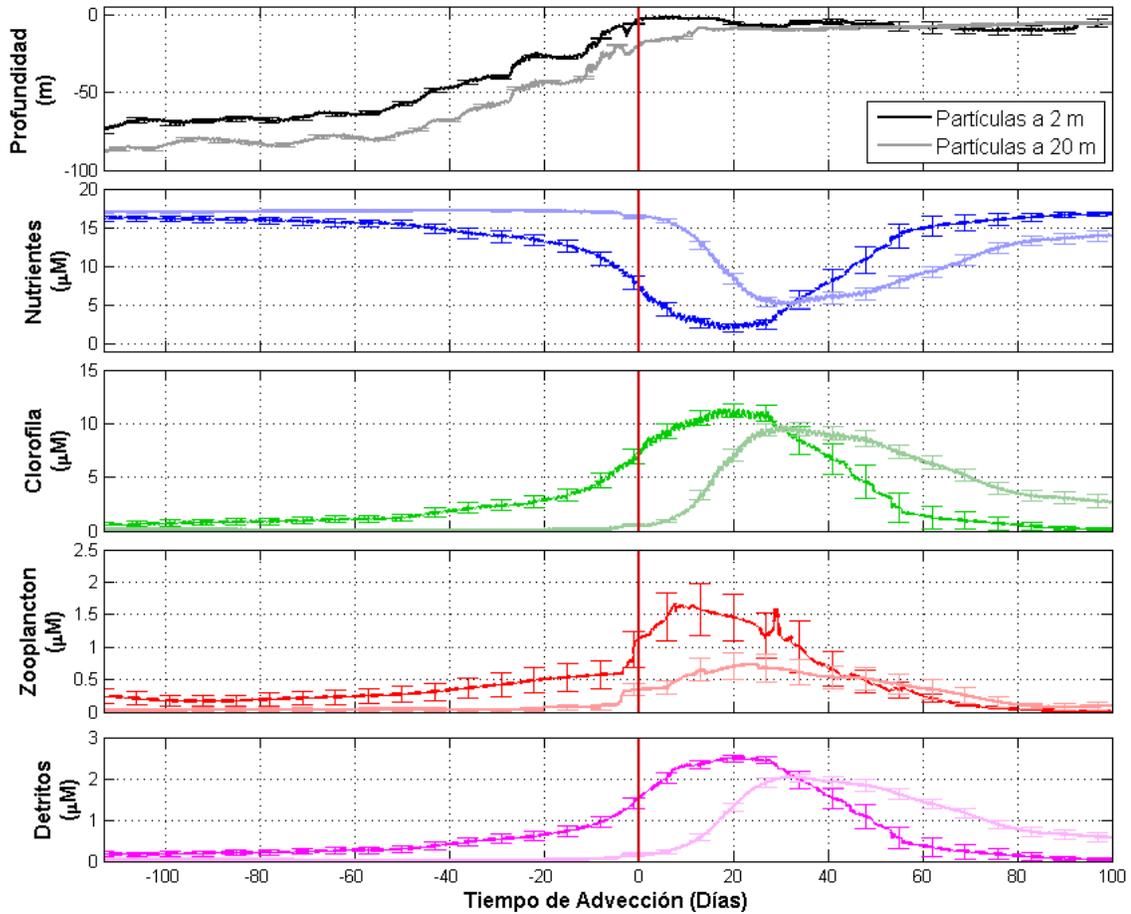


Figura 27.- Comparación entre el modelo biológico acoplado a las partículas del oeste a 2 m y 20 m de profundidad liberadas el 24 de abril de 2007.

La figura 28 muestra al temperatura promedio registrada para las trayectorias del norte y del oeste del 24 de abril a 2 m y 20 m de profundidad. En los dos casos se observa que las partículas a 2 m llegan antes a la temperatura del punto máximo de crecimiento específico, por lo que el florecimiento ocurre antes. El momento en el que las partículas llegan a esta temperatura ideal tiene un efecto directo en el momento en el que se dan las concentraciones más altas de fitoplancton.

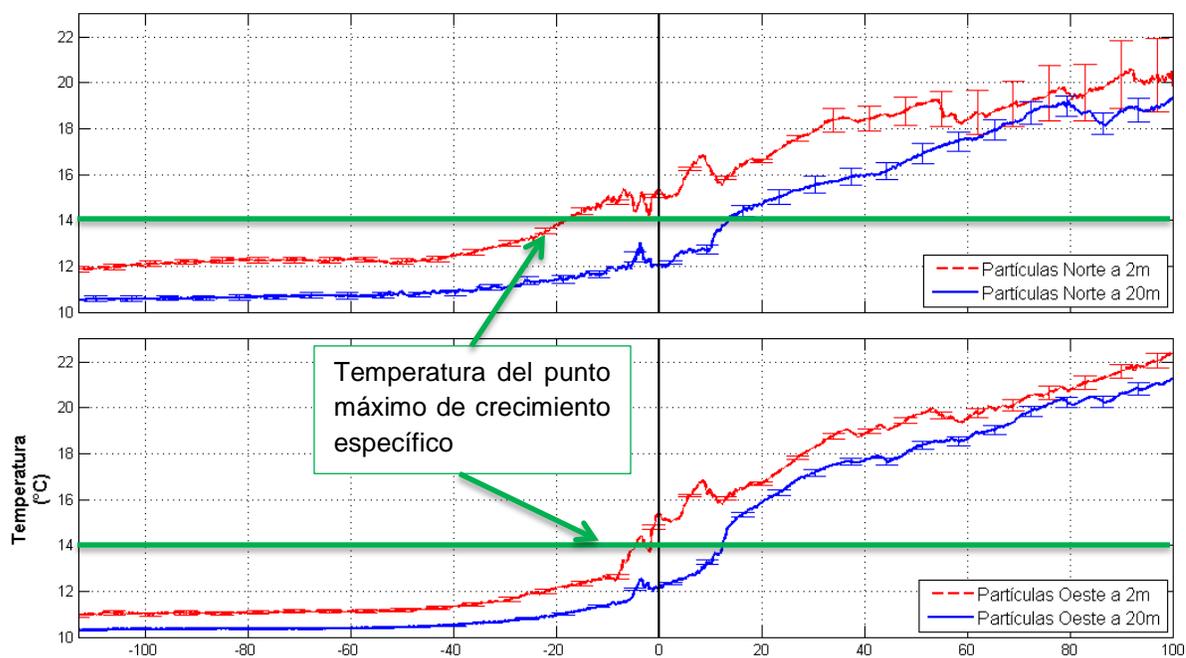


Figura 28.- Temperatura promedio registrada para las trayectorias del norte y del oeste del 24 de abril a 2 m y 20 m de profundidad. Las líneas verdes muestran la temperatura del punto máximo de crecimiento específico para *P. australis* (Santiago-Morales y García-Mendoza, 2011).

Capítulo 5. Discusión

El transporte, la circulación y la retención de propiedades físicas en el océano se han examinado con modelos numéricos utilizando técnicas tanto Eulerianas como Lagrangianas (Werner *et al.*, 2007; Curchitser *et al.*, 2013). Los Modelos Eulerianos proporcionan estimaciones tridimensionales de propiedades que dependen del tiempo en lugares fijos específicos sobre una cuadrícula espacial, mientras que el enfoque Lagrangiano sigue los puntos o partículas en movimiento a través del espacio y el tiempo (Curchitser *et al.*, 2013). Las dos técnicas, Euleriana y Lagrangiana, son fundamentalmente diferentes para evaluar la evolución temporal de las poblaciones marinas pero a la vez son útiles para la modelación del ciclo de vida de los organismos (Hense, 2010). El presente trabajo está basado en el método Lagrangiano, el cual es ideal para identificar el origen y la distribución de las aguas presentes en la BTS durante el florecimiento toxico reportado por García-Mendoza *et al.* (2009), objetivo del presente trabajo. Este método es adecuado para estudios relacionados con los acontecimientos a corto plazo si se requiere información de la hora explícita de las poblaciones individuales cuando es importante la época del año o el clima predominante y/o en los regímenes donde la advección y la motilidad son más importantes que la difusión. A diferencia del método Euleriano el cual ofrece ventajas cuando es necesario cubrir un dominio grande de manera uniforme (Hense, 2010). Sin embargo, el enfoque empleado es el del uso de una combinación de técnicas tanto Eulerianas como Lagrangianas, las partículas Lagrangianas dan respuestas conductuales apropiadas a medida que avanzan a través del océano. Mientras lo hacen obtienen la información ambiental a partir del modelo Euleriano, el cual proporciona las variables físicas como la velocidad, la temperatura y la difusión (Curchitser *et al.*, 2013).

Para describir la dinámica del fitoplancton en el océano y estudiar la influencia de las condiciones ambientales que ocurren durante la advección se optó por usar un modelo trófico de cuatro elementos a base de nitrógeno, una versión del modelo NPZD. Powell *et al.* (2006) y Spitz *et al.* (2003) han reportado resultados favorables en el uso de modelos simples como en el caso del modelo NPZD, sus resultados sugieren que los modelos ecológicos más complicados pueden no ser necesarios para la comprensión conceptual procesos tróficos simples y su relación con la circulación. Sin embargo, se

hizo un esfuerzo para que el modelo biológico del presente trabajo estuviera centrado en los florecimientos algales nocivos causados por *P. australis* en la BTS, por lo que se incluyeron procesos complejos, como es el caso de la dependencia a la temperatura del crecimiento fitoplanctónico y a la variación diurna de la radiación solar, que son parte esencial para comprender el efecto en aspectos fisiológicos básicos de las células, los cuales se discutirán más adelante.

5.1. Trayectorias Lagrangianas

Las trayectorias de las partículas presentan una alta dispersión, sin embargo se pueden distinguir patrones con una concentración significativa de partículas (Figura 16). En estos patrones es en los que se centra el presente análisis. Se identificaron 2 patrones, el primero de partículas que provienen de regiones al norte de la BTS y el segundo de regiones al oeste de la plataforma continental. Las partículas del norte (Figura 17a) inician su viaje frente a la BTS inmersas en un flujo con dirección hacia el norte, este flujo no es lo suficientemente profundo como para considerarse parte de la contracorriente de California, la cual fluye sobre el talud continental a profundidades de 200-400 m (Durazo *et al.*, 2010; Mateos, 2010; Durazo, 2009). Sin embargo, éste podría estar relacionado con la contracorriente costera que va hacia el norte y es provocado por el remolino del Sur de California reportado por Strub y James (2000; en su Figura 10), y presenta las mismas características que el reportado por Checkley y Barth (2009; en su Figura 1). Al llegar a regiones frente a la costa central de California las partículas hacen un giro en su trayectoria quedando inmersas en un chorro costero como el reportado por Checkley y Barth (2009; en su Figura 1), el cual presenta un flujo superficial con dirección hacia el ecuador (Mateos, 2010; en su Figura 1; Durazo *et al.*, 2010; Durazo, 2009). Después de entrar y salir de la BTS, este grupo de partículas sigue el mismo patrón descrito anteriormente con dirección hacia el ecuador hasta salir del dominio del modelo.

Las partículas del oeste (Figura 17a) presentan trayectorias serpenteantes durante su desplazamiento, este comportamiento ha sido reportado anteriormente por Santamaría-del-Ángel *et al.* (2002) que reportan que este tipo trayectorias son provocadas por la actividad de mesoescala prevalente en la región. Al acercarse las partículas hacia la plataforma continental entran en un giro ciclónico ubicado entre 30° a

32° N. Este tipo de giro, reportado por Almazán-Becerril *et al.* (2012) y Chenillat *et al.* (2015), es promovido probablemente por la convergencia de diferentes masas de agua y la interacción de la contracorriente costera que va hacia el norte con la costa, lo que resulta en un patrón de circulación complejo con varias estructuras de vorticidad distribuidos en toda la zona (Almazán-Becerril *et al.*, 2012). Después de salir del giro, las partículas viajan al norte probablemente inmersas en el flujo de la contracorriente costera (Almazán-Becerril *et al.*, 2012; Checkley y Barth, 2009; Strub y James, 2000), para posteriormente entrar en la BTS.

5.2. Modelo biológico

Como se mencionó al inicio del Capítulo 5, se centró el modelo biológico en la especie *P. australis* al incluir procesos más complejos y específicos como la dependencia a la temperatura del crecimiento fitoplanctónico y el fotoperiodo. Dado que la temperatura y la luz varían con la profundidad en el océano, es importante comprender como éstas variables influyen en el crecimiento, distribución y dinámica de las poblaciones de fitoplancton marino (Baek *et al.*, 2008). La variación diurna de la radiación solar es un factor importante que influye en el tiempo, la densidad y la toxicidad de un florecimiento causado por especies del género *Pseudo-nitzschia* (Fehling *et al.*, 2005). La variación diurna afecta el contenido de pigmentos en las microalgas, la tasa de crecimiento, la tasa de división celular, la tasa de respiración, la producción de toxinas y en algunas especies de *Pseudo-nitzschia*, también afecta la reproducción sexual (Fehling *et al.*, 2005; Bates y Trainer, 2006; Lelong *et al.*, 2012). El efecto de esta variable se puede observar en el modelo en el que se impone el fotoperiodo (Figura 22) ya que se observa mayor concentración de clorofila en comparación con el experimento con radiación constante. El aumento de las concentraciones de clorofila está asociado a una mayor disponibilidad de nutrientes, ya que no son consumidos durante la noche.

Es necesario realizar más estudios sobre la influencia en el crecimiento de las poblaciones de microalgas de la variación diurna de la radiación solar junto con otros factores de forzamiento ambientales como la temperatura (Fehling *et al.*, 2005). La temperatura es un factor ambiental importante que afecta el crecimiento de algas en ambientes naturales (Santiago-Morales y García-Mendoza, 2011). Se han documentado

florecimientos de *P. australis* cuando la temperatura superficial del mar es de entre 12.5 y 16 °C en regiones del centro y el sur de California y a temperaturas de entre 13.9 y 16 °C en regiones de la costa occidental de Chile. No se han reportado florecimientos a temperaturas por arriba de las temperaturas antes mencionadas (García-Mendoza *et al.*, 2009; Santiago-Morales y García-Mendoza, 2011), por lo que la temperatura del agua podría ser un factor importante para la acumulación de *P. australis* en la costa del Pacífico de la parte norte de la Península de Baja California (Santiago-Morales y García-Mendoza, 2011). En la región de Bahía de Todos Santos, la acumulación superficial de *P. australis* sólo se observa cuando la TSM está por debajo de 16 °C (Cabrales Talavera, 2010). El modelo con dependencia a la temperatura (Figura 23) logra capturar el crecimiento fotosintético de *P. australis*, mostrando las concentraciones más altas de clorofila cuando la temperatura del agua está en el punto máximo de crecimiento específico para esta especie (Santiago-Morales y García-Mendoza, 2011), lo que concuerda con lo mencionado anteriormente.

Es importante mencionar que el modelo con dependencia a la temperatura muestra cierta respuesta en función de una especie dominante, por ejemplo, cuando las partículas salen de la Bahía (Figura 23) se observa una disminución en las concentraciones de clorofila y un aumento en las concentraciones de nutrientes. En un sistema natural las concentraciones de nutrientes no aumentarían ya que continuamente estarían siendo consumidos por otras especies de fitoplancton con otra respuesta a la temperatura ambiental (Geider, 2014). La restricción en temperatura para el crecimiento fitoplanctónico impide que se presente una competencia por los nutrientes ya que esta restricción favorece únicamente a *P. australis*. Lo anterior suponiendo que dentro de la misma parcela de agua se encuentren diferentes especies de fitoplancton, ya que la distribución espacial de las especies no está controlada únicamente por la competencia, sino que resulta de la acción de otros mecanismos de control, como el ejercido por el propio medio físico o por la presencia de depredadores (Martínez, 2013). Esto podría generar un patrón de distribución en el que aparezcan zonas de dominancia exclusiva de una u otra especie y zonas donde ambas pueden coexistir (Martínez, 2013; Geider, 2014), estas últimas son en las que el modelo tendería a favorecer a la especie en la que se centra el modelo.

Los resultados de las simulaciones definitivas del modelo físico-biológico se asemeja cualitativamente con las características generales del florecimiento ocurrido en la primavera del 2007 en la BTS reportado por García-Mendoza *et al.* (2009). Un modelo simple como el NPZD, acoplado a un modelo de circulación apropiado, logra capturar la respuesta fotosintética a las concentraciones de nutrientes, la luz y a la temperatura presentes a lo largo de la advección. Powell *et al.* (2006) y Spitz *et al.* (2003) reportaron que su modelo logra capturar las transiciones estacionales y los florecimientos provocados por las surgencias a lo largo del SCC. Por otro lado, al igual que el presente modelo, también reproduce la variabilidad asociada con las estructuras a escala más fina en la que los transportes físicos están estrechamente vinculados a las funciones biológicas. Esta estrecha vinculación entre las características biológicas y físicas ha sido conocida como un aspecto esencial en el SCC (Powell *et al.*, 2006).

5.3. Retos de la interpretación biológica en los modelos

Comprender y describir cuantitativamente los ecosistemas marinos requiere una integración de la física, la química y la biología. El acoplamiento de la biología, la química y la oceanografía física en los modelos tiene muchas características atractivas: Se pueden hacer experimentos con modelos de los sistemas marinos, mientras que en el ambiente sólo puede ser observado, descrito e interpretado el estado justo en el momento de la observación. También se puede emplear el potencial predictivo de modelos para aplicaciones tales como la gestión del medio ambiente o, en una escala más grande, se puede estudiar el pasado y la evolución futura con la ayuda de simulaciones experimentales. Por otra parte, se puede lograr una síntesis global de observaciones dispersas mediante el uso de modelos tridimensionales acoplados para extrapolar los datos de una manera coherente (Fennel y Neumann, 2014).

Sin embargo, todo modelo es una representación simplificada de la realidad por lo que no todos los detalles de la misma se ven representados (Felicísimo *et al.*, 2011; Fennel y Neumann, 2014). En este trabajo, el modelo se proyecta bajo condiciones hipotéticas por lo que hay que suponer premisas que deben quedar claras para comprender tanto la potencialidad como las limitaciones de los resultados. No siempre es posible generar un modelo que se ajuste a los datos de referencia porque cuando se intenta explicar la presencia de una especie es imposible considerar todas las variables

que pueden tener un papel importante en el crecimiento y acumulación. Por lo tanto, el uso de variables climáticas no es suficiente para explicar satisfactoriamente la distribución espacial de las especies. Por otro lado, que las variables climáticas sean capaces de explicar bien la distribución de una especie no significa que sean la causa de esa distribución. Los modelos son puramente empíricos por lo que no se debe analizar las variables independientes como causas primarias de las distribuciones sino sólo como indicadores (Felicísimo *et al.*, 2011).

5.4. Recomendaciones

El método empleado en esta tesis, específicamente en el modelo biológico, resultó adecuado para cumplir con los objetivos del presente trabajo. Se sugiere realizar más estudios sobre la influencia de la radiación solar, además de incluir otros factores de forzamiento ambiental como la salinidad. Por ejemplo, Cochlan *et al.* (2008) reportan que en experimentos de laboratorio el crecimiento de las células de *P. australis* es fotoinhibido a $100 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Lelong *et al.*, 2012). De manera general en especies de micro algas, a muy baja irradiancia su tasa de crecimiento se reducen y a intensidades de luz excesivamente altas son fotoinhibidas, a causa de una serie de reacciones fisiológicas tales como la contracción y la decoloración de los cloroplastos (Baek *et al.*, 2008). Por lo tanto se podría incluir un término de límite el crecimiento fitoplanctónico que sea dependiente de la cantidad de fotones por unidad de área. Con respecto a la salinidad, diversos estudios han reportado que el crecimiento fitoplanctónico a diferentes temperaturas es dependiente de la salinidad (Lelong *et al.*, 2012; Doan-Nhu *et al.*, 2008). Por ejemplo, en experimentos de laboratorio *P. cuspidata* tolera una amplia gama de temperaturas cuando se mantienen en su salinidad óptima (30 PSU; Doan-Nhu *et al.*, 2008). Estos estudios sugieren que es importante considerar la salinidad como un factor que controla la dinámica de la población. Sin embargo esto solo será importante para zonas en las que hay cambios significativos en la salinidad, por ejemplo en zonas con aportes de agua dulce o durante la temporada de lluvias (Lelong *et al.*, 2012).

6. Conclusiones

Se realizaron simulaciones con un modelo numérico de circulación de alta resolución para estudiar las características dinámicas a lo largo de la costa Sur de California, la costa del norte de Baja California y en el interior de la Bahía de Todos Santos. Estas simulaciones se usaron en un análisis Lagrangiano tridimensional (seguimiento de partículas) que proporciona información sobre el origen y la distribución de las aguas presentes en la Bahía durante un florecimiento tóxico de *Pseudo-nitzschia* ocurrido en la primavera de 2007. Se realizaron diversos experimentos de advección de partículas, inicializados bajo diferentes condiciones de viento regional, cuyos resultados son congruentes entre sí. En general, se distinguieron 2 patrones diferentes, ambos con una concentración significativa de partículas; el primer patrón consiste en partículas que provienen de regiones al norte de la BTS, muy cerca de las costas del sur de California, y el segundo patrón consiste en partículas que provienen de regiones al oeste de la plataforma continental.

Se acopló un modelo ecológico de Nutrientes-Fitoplancton-Zooplancton-Detritos (NPZD) a las trayectorias de ambos patrones identificados. A este modelo se incorporó la dependencia de la temperatura en el crecimiento fotosintético, basándose en resultados experimentales previos sobre la tasa de crecimiento de *Pseudo-nitzschia*, además de que se agregó un fotoperiodo de 12 horas, que emula la variación diurna de la irradiancia solar. Así, el modelo NPZD diagnostica la respuesta fotosintética a las concentraciones de nutrientes, luz y temperatura a las que las partículas están expuestas a lo largo de sus trayectorias. El modelo acoplado a las partículas del norte se asemeja cualitativamente con las características generales del florecimiento ocurrido en la primavera del 2007 en la Bahía de Todos Santos. El modelo reproduce la variabilidad asociada con las estructuras de escala fina en la que los transportes físicos están estrechamente vinculados a las funciones biológicas, por lo que resulta adecuado para lograr una comprensión conceptual de los vínculos tróficos simples a la circulación y en específico la evolución de florecimientos algales nocivos en la Bahía de Todos Santos.

Lista de referencias bibliográficas

- Almazán-Becerril, A., Rivas, D., y García-Mendoza, E. (2012). The influence of mesoscale physical structures in the phytoplankton taxonomic composition of the subsurface chlorophyll maximum off western Baja California. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **70**, 91-102.
- Anderson, C. R., Brzezinski, M. A., Washburn, L., y Kudela, R. (2006). Circulation and environmental conditions during a toxigenic *Pseudo-nitzschia australis* bloom in the Santa Barbara Channel, California. *Marine Ecology Progress Series*, **327**, 119-133.
- Anderson, D. M., Cembella, A. D., y Hallegraeff, G. M. (2012). Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Annual Review of Marine Science*, **4**, 143-176.
- Argote Espinosa, M. L., Gavidia Medina, F. J., y Amador Buenrostro, A. (1991). Wind-induced circulation in Todos Santos bay, BC, Mexico. *Atmósfera*, **4**, 101-115.
- Atlas, R., Hoffman, R. N., Ardizzone, J., Leidner, S. M., Jusem, J. C., Smith, D. K., y Gombos, D. (2011). A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **92**(2), 157-174.
- Baek, S. H., Shimode, S., y Kikuchi, T. (2008). Growth of dinoflagellates, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: The role of temperature, light intensity and photoperiod. *Harmful algae*, **7**(2), 163-173.
- Barron, C. N., Kara, A. B., Martin, P. J., Rhodes, R. C., y Smedstad, L. F. (2006). Formulation, implementation and examination of vertical coordinate choices in the Global Navy Coastal Ocean Model (NCOM). *Ocean Modelling*, **11**(3), 347-375.
- Bates, S. S., y Trainer, V. L. (2006). The ecology of harmful diatoms. In *Ecology of harmful algae* (pp. 81-93). Springer Berlin Heidelberg.
- Beckmann, A., y Haidvogel, D. B. (1993). Numerical simulation of flow around a tall isolated seamount. Part I: Problem formulation and model accuracy. *Journal of Physical Oceanography*, **23**(8), 1736-1753.
- Cabrales Talavera G. (2010). Distribución espacial y temporal de diatomeas del género *Pseudo-nitzschia* spp y concentración de ácido domoico en la región de la Bahía de Todos Santos, B.C., México. Tesis de maestría, CICESE.
- Calva Chávez, M. A. (2014). Variación estacional y sinóptica de la trampa de surgencia en la Bahía de Todos Santos B. C. Tesis de maestría, CICESE.
- Chapman, D. C. (1985). Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. *Journal of Physical oceanography*, **15**(8), 1060-1075.

- Checkley, D. M., y Barth, J. A. (2009). Patterns and processes in the California Current System. *Progress in Oceanography*, **83**(1), 49-64.
- Chenillat, F., Franks, P. J., Rivière, P., Capet, X., Grima, N., y Blanke, B. (2015). Plankton dynamics in a cyclonic eddy in the Southern California Current System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **120**(8), 5566-5588.
- Cowen, R. K., Paris, C. B., y Srinivasan, A. (2006). Scaling of connectivity in marine populations. *Science*, **311**(5760), 522-527.
- Cruz Rico, J. E. (2015). Análisis de la variabilidad de la clorofila en la Bahía de Todos Santos a través de un modelo numérico físico-biológico. Tesis de maestría, CICESE.
- Curchitser, E. N., Batchelder, H. P., Haidvogel, D. B., Fiechter, J., y Runge, J. (2013). Advances in physical, biological, and coupled ocean models during the US GLOBEC program. *Oceanography*, **26**(4):52-67.
- Doan-Nhu, H., NGUYEN, T., y Nguyen-Ngoc, T. G. (2008). *Pseudo-nitzschia* in south-central coastal waters of Vietnam: growth and occurrence related to temperature and salinity. In *Proceedings of the 12th International Conference on Harmful Algae* (Ed. by Ø. Moestrup) (pp. 29-32).
- Durazo, R. (2009). Climate and upper ocean variability off Baja California, México: 1997-2008. *Progress in Oceanography*, **83**(1), 361-368.
- Durazo, R., Ramírez-Manguilar, A. M., Miranda, L. E., y Soto-Mardones, L. A. (2010). Climatología de variables hidrográficas. *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007*, 25-57.
- Fehling, J., Davidson, K., y Bates, S. S. (2005). Growth dynamics of non-toxic *Pseudo-nitzschia delicatissima* and toxic *P. seriata* (Bacillariophyceae) under simulated spring and summer photoperiods. *Harmful Algae*, **4**(4), 763-769.
- Felicísimo, A. M., Muñoz, J., Villalba, C. J., y Mateo, R. G. (2011). *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española. 2. Flora y vegetación*. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, pp (31-35).
- Fennel, W., y Neumann, T. (2014). *Introduction to the Modelling of Marine Ecosystems: (with MATLAB programs on accompanying CD-ROM)* (Vol. 72). Elsevier.
- Fiechter, J., Moore, A. M., Edwards, C. A., Bruland, K. W., Di Lorenzo, E., Lewis, C. V., ... y Hedstrom, K. (2009). Modeling iron limitation of primary production in the coastal Gulf of Alaska. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **56**(24), 2503-2519.
- García-Mendoza, E., Rivas, D., Olivos-Ortiz, A., Almazán-Becerril, A., Castañeda-Vega, C., y Peña-Manjarrez, J. L. (2009). A toxic *Pseudo-nitzschia* bloom in Todos Santos Bay, northwestern Baja California, México. *Harmful Algae*, **8**(3), 493-503.

- Gavidia Medina, F. J. (1988). Simulación numérica de la circulación barotrópica de la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de maestría, CICESE.
- Gaxiola-Castro, G., y Durazo, R. (2010). Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997–2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN, 978-607.
- Geider, R. J., Moore, C. M., y Suggett, D. J. (2014). Ecology of Marine Phytoplankton. En: *Ecology and the Environment*, 483-531. Springer Reference.
- GEOHAB, 2005. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, GEOHAB Core Research Project: HABs in Upwelling Systems. In: Pitcher, P., Moita, T., Trainer, V.L., Kudela, R., Figueiras, P., Probyn, T. (Eds.), IOC and SCOR, Paris and Baltimore. 82 pp.
- Giddings, S. N., MacCready, P., Hickey, B. M., Banas, N. S., Davis, K. A., Siedlecki, S. A., y Connolly, T. P. (2014). Hindcasts of potential harmful algal bloom transport pathways on the Pacific Northwest coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **119**(4), 2439-2461.
- Haidvogel, D. B., Arango, H., Budgell, W. P., Cornuelle, B. D., Curchitser, E., Di Lorenzo, E., y Wilkin, J. (2008). Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. *Journal of Computational Physics*, **227**(7), 3595-3624.
- He, R., McGillicuddy, D. J., Keafer, B. A., y Anderson, D. M. (2008). Historic 2005 toxic bloom of *Alexandrium fundyense* in the western Gulf of Maine: 2. Coupled biophysical numerical modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, **113**(C7).
- Hense, I. (2010). Approaches to model the life cycle of harmful algae. *Journal of Marine Systems*, **83**(3), 108-114.
- Horner, R. A., Garrison, D. L., y Plumley, F. G. (1997). Harmful algal blooms and red tide problems on the US west coast. *Limnology and Oceanography*, **42**(5part2), 1076-1088.
- Kudela, R. M., Seeyave, S., y Cochlan, W. P. (2010). The role of nutrients in regulation and promotion of harmful algal blooms in upwelling systems. *Progress in Oceanography*, **85**(1), 122-135.
- Lanerolle, L. W., Tomlinson, M. C., Gross, T. F., Aikman III, F., Stumpf, R. P., Kirkpatrick, G. J., y Pederson, B. A. (2006). Numerical investigation of the effects of upwelling on harmful algal blooms off the west Florida coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **70**(4), 599-612.
- Lelong, A., Hégaret, H., Soudant, P., y Bates, S. S. (2012). *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyceae) species, domoic acid and amnesic shellfish poisoning: revisiting previous paradigms. *Phycologia*, **51**(2), 168-216.

- Lewitus, A. J., Horner, R. A., Caron, D. A., Garcia-Mendoza, E., Hickey, B. M., Hunter, M., ... y Tweddle, J. F. (2012). Harmful algal blooms along the North American west coast region: History, trends, causes, and impacts. *Harmful Algae*, **19**, 133-159.
- Marchesiello, P., McWilliams, J. C., y Shchepetkin, A. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean modelling*, **3**(1), 1-20.
- Martínez, J. R. (2013). *Ecología* (pp. 243-260). Madrid. Ediciones Pirámide.
- Mateos, E. (2010). Modelación de la circulación costera estacional en la región norte de Baja California y Sur de California y de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Doctorado, CICESE.
- Mateos, E., Marinone, S. G., y Parés-Sierra, A. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, BC Mexico. *Ocean Modelling*, **27**(1), 107-112.
- Mellor, G. L., y Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of geophysics and space physics*, **20**(4), 851-875.
- Miranda Bojórquez, L. E. (2012). Caracterización de las corrientes en las entradas y alrededores de la Bahía de Todos Santos. Tesis de maestría, CICESE.
- Penven, P., Marchesiello, P., Debreu, L., y Lefèvre, J. (2008). Software tools for pre-and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling y Software*, **23**(5), 660-662.
- Powell, T. M., Lewis, C. V., Curchitser, E. N., Haidvogel, D. B., Hermann, A. J., y Dobbins, E. L. (2006). Results from a three-dimensional, nested biological-physical model of the California Current System and comparisons with statistics from satellite imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, **111**(C7), 1-14.
- Rivas D., Mancilla-Rojas, R., García-Mendoza, E., y Almazán-Becerril, A. (2010). Lagrangian Circulation in Todos Santos Bay and off Baja California During Spring 2007: Exploratory Experiments*♦. *The Ocean, The Wine, and The Valley: The Lives of Antoine Badan*, 173-201.
- Rivas, D., y Samelson, R. M. (2011). A numerical modeling study of the upwelling source waters along the Oregon coast during 2005. *Journal of Physical Oceanography*, **41**(1), 88-112.
- Santamaría-del-Ángel, E., Millan-Nunez, R., González-Silvera, A., y Muller-Karger, F. (2002). The color signature of the Ensenada Front and its seasonal and interannual variability. *CalCOFI Report*, 155-161.
- Santiago-Morales, I. S., y García-Mendoza, E. (2011). Growth and domoic acid content of *Pseudo-nitzschia australis* isolated from northwestern Baja California, Mexico, cultured under batch conditions at different temperatures and two Si: NO₃ ratios. *Harmful algae*, **12**, 82-94.

- Shchepetkin, A. F., y McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, **9**(4), 347-404.
- Smith, S. D. (1988). Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, **93**, 15467-15472.
- Smith, W. H., y Sandwell, D. T. (1997). Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, **277**(5334), 1956-1962.
- Spitz, Y. H., Newberger, P. A., y Allen, J. S. (2003). Ecosystem response to upwelling off the Oregon coast: Behavior of three nitrogen-based models. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, **108**(C3), 1-22.
- Strub, P. T., y James, C. (2000). Altimeter-derived variability of surface velocities in the California Current System: 2. Seasonal circulation and eddy statistics. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **47**(5), 831-870.
- Trainer, V. L., Adams, N. G., Bill, B. D., Stehr, C. M., Wekell, J. C., Moeller, P., y Woodruff, D. (2000). Domoic acid production near California coastal upwelling zones, June 1998. *Limnology and Oceanography*, **45**(8), 1818-1833.
- Treml, E. A., Halpin, P. N., Urban, D. L., y Pratson, L. F. (2008). Modeling population connectivity by ocean currents, a graph-theoretic approach for marine conservation. *Landscape Ecology*, **23**(1), 19-36.
- Watson, J. R., Mitarai, S., Siegel, D. A., Caselle, J. E., Dong, C., y McWilliams, J. C. (2010). Realized and potential larval connectivity in the Southern California Bight. *Marine Ecology Progress Series*, **401**, 31-48.
- Werner, F. E., Cowen, R. K., y Paris, C. B. (2007). Coupled biological and physical models present capabilities and necessary developments for future studies of population connectivity. *Oceanography*, **20**(3), 54-69.

Apéndice A. Configuración del modelo

A.1. Modelo regional

El modelo se configuró en un dominio de coordenadas esféricas que se extiende desde 26.8° N a 35.5° N y desde 113.7° W a 123.5° W (Figura 1), con el parámetro de Coriolis que varía con la latitud. La resolución horizontal es de $\sim 1/30^\circ$; (~ 3 km), lo que resulta en una malla horizontal de 307 \times 295 puntos. La resolución vertical está definida por 31 niveles, con una mayor resolución cerca de los límites inferior (fondo) y superior (superficie) es decir, la distancia entre los niveles se hace menor cerca de los límites y esto está especificado por los parámetros de estiramiento $\theta_s = 4.0$ y $\theta_b = 0.9$. La malla del modelo se preparó mediante el uso del *software* descrito por Penven *et al.* (2008), con topografía del producto de malla del ETOPO2 (Smith y Sandwell, 1997) con datos cuadrículados a 2' de resolución. A lo largo de la costa, la profundidad mínima del agua se fijó en 10 m. El fondo fue suavizado a modo de satisfacer el criterio de un factor-*r* de 0.20 para evitar errores del gradiente de presión horizontal (Rivas *et al.*, 2010; Beckmann y Haidvogel, 1993).

Este modelo incluye un esquema Jacobiano de suavizado de la densidad para el cálculo del gradiente de presión (Shchepetkin y McWilliams, 2003), un esquema de tercer orden para la advección horizontal de momentum y trazadores (temperatura y salinidad), y un esquema de cuarto orden para la advección vertical de los trazadores. La mezcla de pequeña escala está parametrizada mediante un modelo Mellor-Yamada de nivel 2.5 (Mellor y Yamada, 1982) con valores base de $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en la dirección vertical, y mediante difusividad y la viscosidad armónica con coeficientes de $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en dirección horizontal. La difusión lateral se limita a superficies geopotenciales (profundidad constante; Rivas *et al.*, 2010).

El límite oriental del modelo corresponde a la costa, donde se aplica una condición antideslizante y de impenetrabilidad; se utilizó un esquema logarítmico de fricción con el fondo. Las fronteras norte, sur y occidental están abiertas. La implementación de las condiciones de frontera abierta corresponden a una condición de Chapman para el nivel del mar (Chapman, 1985), condición de radiación más relajación “escalada” (*nudging*) para la velocidad tridimensional y los trazadores (salinidad y

temperatura); se utiliza la condición de Flather para el momentum bidimensional. Las escalas temporales de relajación son de 6 días para el flujo entrante, en el cual se introduce información al modelo y de 360 días para el flujo saliente, en el que sale la información del modelo. Este escalamiento de los datos también fue necesario en el interior del dominio del modelo con el fin de prevenir las señales espurias relacionadas con las fronteras; este escalamiento disminuyó de su valor en las fronteras (mencionado anteriormente) a cero en los primeros 20 puntos interiores de la malla de cada frontera abierta. Además, el modelo incluye una capa de esponja que se extiende a lo largo de 20 puntos hacia el interior, dentro de la cual la viscosidad y la difusividad aumentó linealmente a partir de sus valores interiores (mencionado anteriormente) a $100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en los límites. Para obtener más información acerca de las condiciones de contorno de fronteras abiertas para los modelos oceánicos regionales, vea Rivas *et al.* (2010) y Marchesiello *et al.* (2001).

El modelo se integró para los años 2002 a 2011; los dos primeros años fueron considerados como período de “ajuste” (*spin up*) del modelo (Rivas *et al.*, 2010), el año 2002 se realizó con forzamientos climatológicos y datos de frontera obtenidos por el software descrito por Penven *et al.* (2008). Se utilizó el año 2007 para el presente análisis.

Para el forzamiento en las fronteras abiertas del modelo se usaron campos diarios de velocidad, nivel del mar, temperatura y salinidad de la versión de $1/8^\circ$ del *Navy Coastal Ocean Model* (NCOM), un modelo de escala global (Barron *et al.*, 2006). En la superficie del modelo, los forzamientos por esfuerzo del viento para cada 6 horas se obtuvieron de la *Cross-Calibrated Multi-Platform* (CCMP) *Ocean Surface Wind Vector Analysis* (Atlas *et al.*, 2011), proporcionada por la *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PODAAC) a través de su página web: <http://podaac.jpl.nasa.gov/>, aplicando parametrizaciones para los coeficientes de arrastre propuestas por Smith (1988). No se utilizaron forzamientos por mareas. Al igual que en la simulación climatológica, se utilizaron los valores climatológicos de flujos de calor de la superficie, pero se aplicó un esquema de corrección para las desviaciones con respecto al estado de la media climatológica.

A.2. Modelo de la Bahía de Todos Santos

Se implementó un modelo también basado en el ROMS a escala más pequeña para la BTS, para esto se usó una malla anidada de una vía en el que el modelo de regional fuerza al modelo de la BTS. Muchos de los detalles utilizados en esta configuración del modelo son los mismos que los descritos anteriormente, a menos que se indique lo contrario. El dominio del modelo se extiende desde los 31.6° N a 32.1° N y desde los 116.6° W a 117.0° W (Figura 2). La resolución horizontal es de ~ 300 m y la resolución vertical está dada por 20 niveles (Rivas *et al.*, 2010).

Como se ha hecho para el modelo regional, el modelo BTS se integró para el período 2003-2011, pero sólo el año 2007 se utilizó para el presente análisis. De hecho, el modelo regional proporciona las condiciones iniciales y los datos de frontera para el modelo BTS; se utilizaron los promedios diarios de los productos regionales en los límites del modelo de la BTS. Como en el modelo regional, se utilizaron una capa de *nudging* y una capa de esponja, ambos con una anchura de 6 puntos de la malla; dentro de este nivel los coeficientes de viscosidad y difusividad disminuyeron linealmente de $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en el límite con el valor interior de $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Rivas *et al.*, 2010).

Apéndice B. Trayectorias seleccionadas para los experimentos del 9, 19 y 24 de abril

En este apéndice se muestran las trayectorias seleccionadas para las partículas liberadas los días 9 y 19 de abril a 2 m de profundidad y las partículas del 24 de abril a 20 m de profundidad, así como la profundidad promedio para cada caso.

Experimento del día 9 de abril de 2007 a 2 m de profundidad:

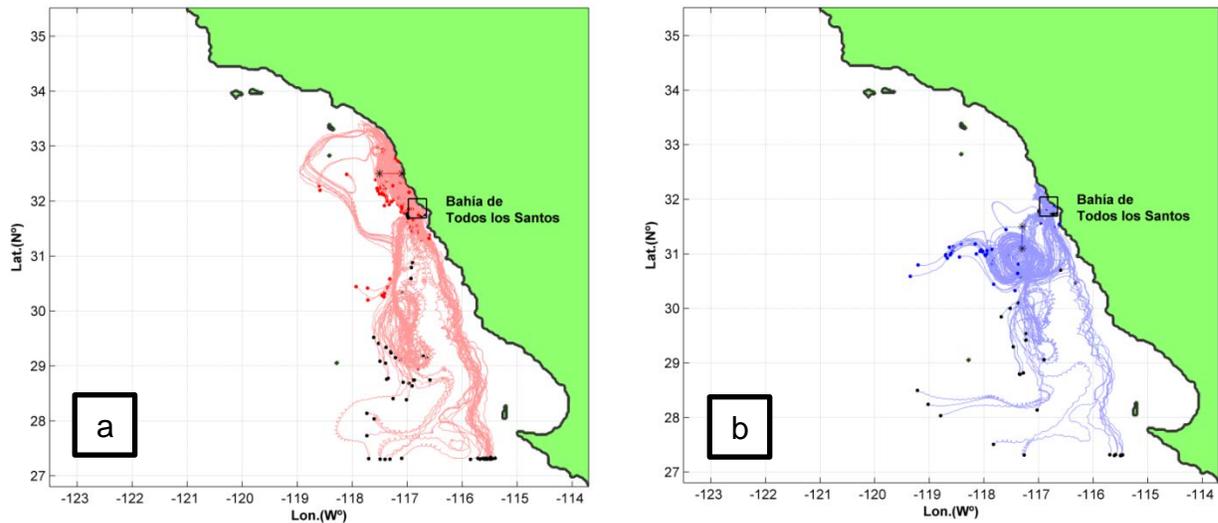


Figura A1.- Trayectorias de las partículas del 9 de Abril que entran a la Bahía: (a) por regiones al norte y (b) por regiones al oeste.

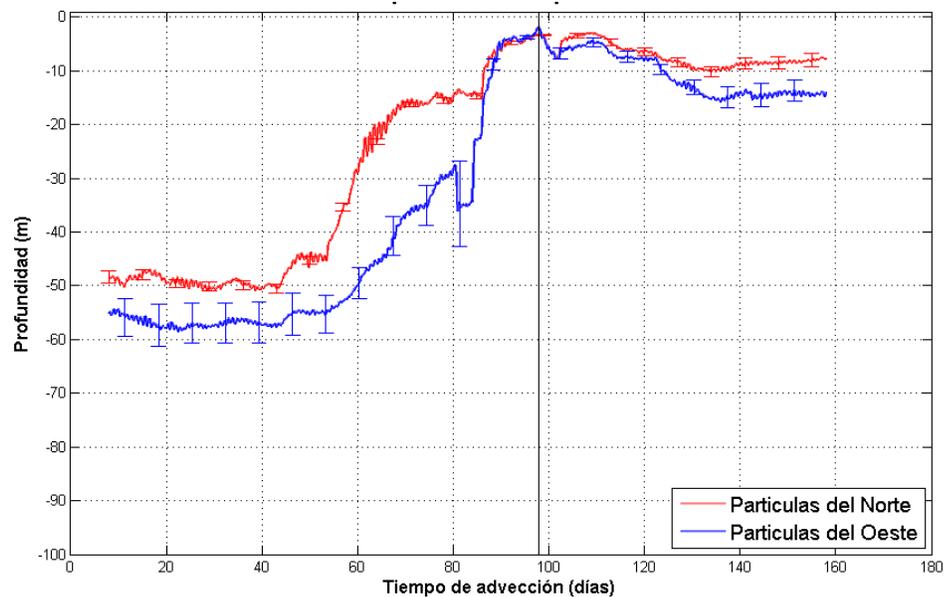


Figura A2.-Profundidad promedio de las partículas del 9 de abril que entran a la Bahía por regiones al norte y regiones al oeste.

Experimento del día 19 de abril de 2007 a 2 m de profundidad:

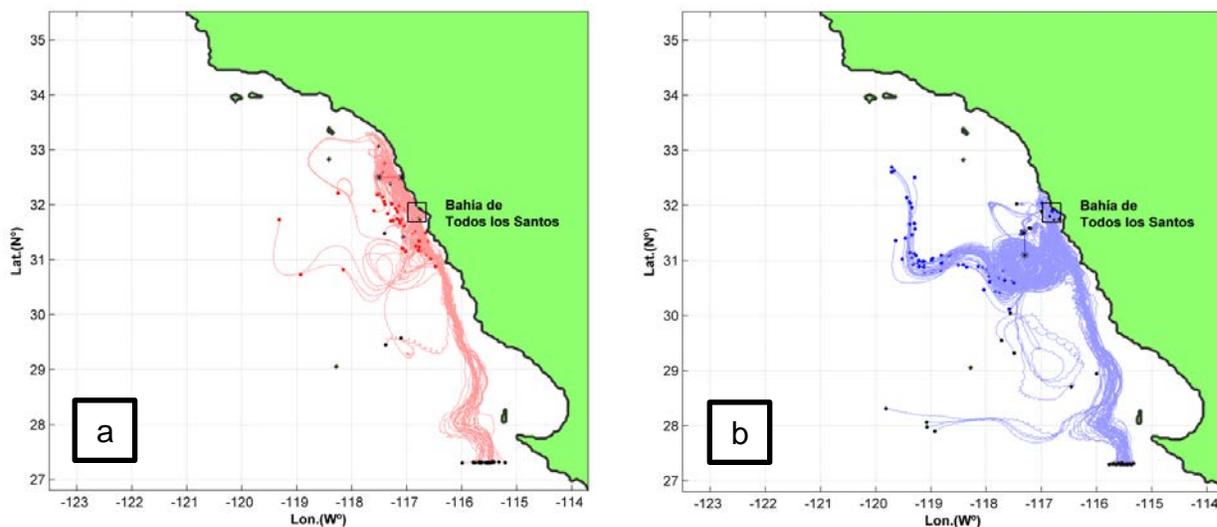


Figura A3.- Trayectorias de las partículas del 19 de Abril que entran a la Bahía: (a) por regiones al norte y (b) por regiones al oeste.

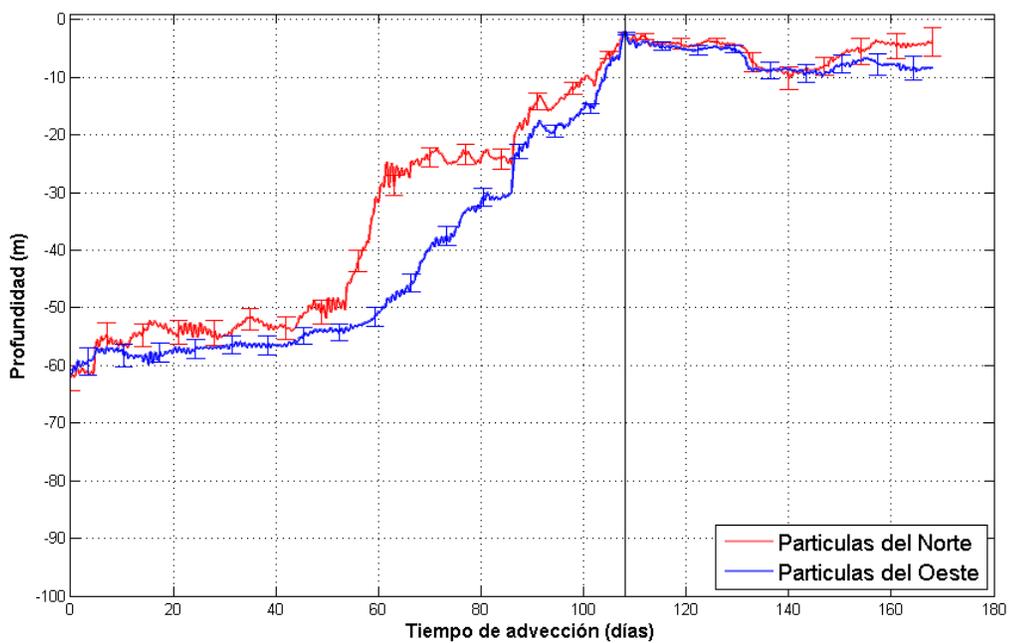


Figura A4.-Profundidad promedio de las partículas del 19 de abril que entran a la Bahía por regiones al norte y regiones al oeste.

Experimento del día 24 de abril de 2007 a 20 m de profundidad:

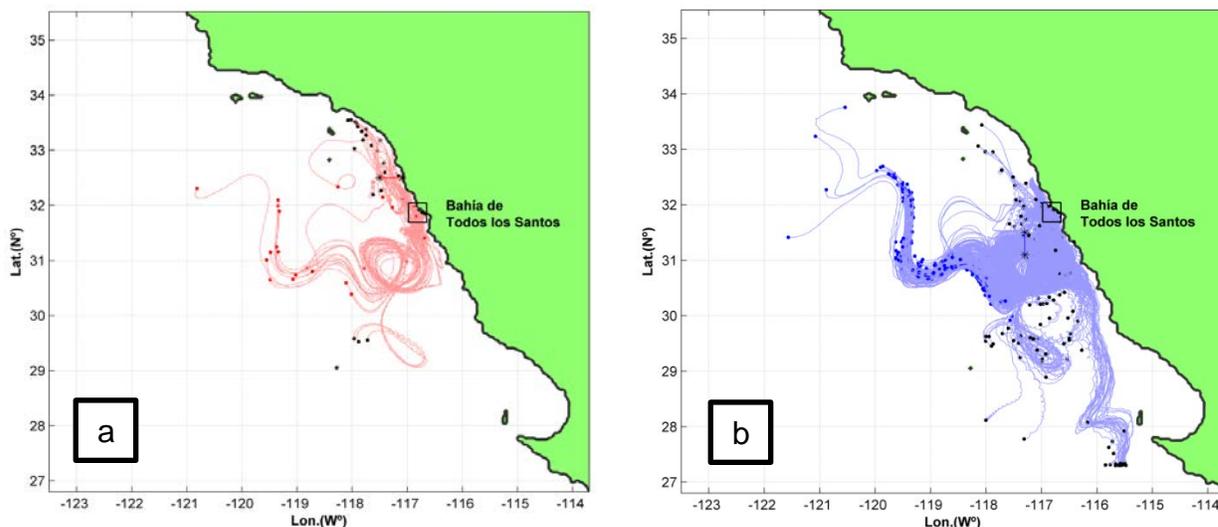


Figura A5.- Trayectorias de las partículas del 24 de Abril a 20 m de profundidad que entran a la Bahía: (a) por regiones al norte y (b) por regiones al oeste.

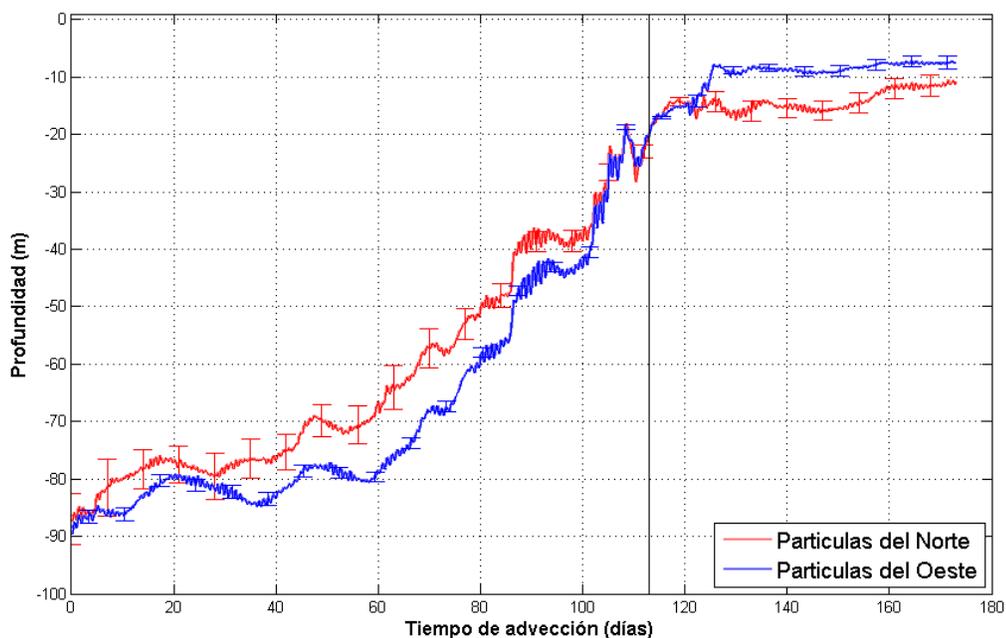


Figura A6.-Profundidad promedio de las partículas del 24 de abril a 20 m de profundidad que entran a la Bahía por regiones al norte y regiones al oeste.