

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

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



**Maestría en Ciencias
en Ecología Marina**

**Modelación físico-biogeoquímica de la Bahía de Todos Santos:
escenarios de aporte y limitación de hierro.**

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

Presenta:

Jesús Jordán Domínguez Sevilla

Ensenada, Baja California, México
2022

Tesis defendida por
Jesús Jordán Domínguez Sevilla

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director de tesis

Miembros del comité

Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson

Dr. Ernesto García Mendoza

Dr. Ricardo Cruz López



Dr. Rafael Andrés Cabral-Tena
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Jesús Jordán Domínguez Sevilla** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina

Modelación físico-biogeoquímica de la Bahía de Todos Santos: escenarios de aporte y limitación de hierro.

Resumen aprobado por:

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director de tesis

La modelación de los ecosistemas marinos es una herramienta que sirve para entender y describir los procesos físicos y biogeoquímicos, con el fin de responder las preguntas de investigación sobre la dinámica de los ecosistemas. En este trabajo se implementa un modelo numérico oceánico físico-biogeoquímico, el cual consta del acoplamiento de un modelo hidrostático de circulación oceánica y de un modelo biológico de nutrientes-fitoplancton-zooplancton-detrito (NPZD) con limitación de hierro, para la Bahía de Todos Santos (BTS). En un trabajo previo se observaron diferencias importantes entre las simulaciones numéricas y los datos satelitales de clorofila: picos más pronunciados de biomasa fitoplanctónica en el modelo o incluso anomalías de signo opuesto durante ciertos periodos. Por esta razón en este trabajo se implementa una metodología más compleja para explicar mejor los procesos fitoplanctónicos en la BTS. Investigaciones previas mencionan la limitación de hierro a lo largo del centro y sur del Sistema de la corriente de California, donde la biodisponibilidad de hierro disuelto influye en la productividad, composición de las especies y estructura trófica de las comunidades fitoplanctónicas. Con base en esta idea, se proponen diferentes escenarios de aportes y limitación de hierro en la BTS, asociados con la surgencia costera, el aporte de la corriente de California y los Vientos de Santa Ana. Para evaluar la veracidad de las simulaciones se realiza una comparación con datos *in situ*, datos satelitales y trabajos previos. Además, se incluye un análisis de los datos modelados: evaluando los transportes de nutrientes, series de tiempo y las relaciones de nutrientes. Las simulaciones sugieren que los aportes de hierro más relevantes son por la surgencia costera y los vientos de Santa Ana, mientras que el aporte de hierro proveniente de la corriente de California no es tan importante en comparación con otros aportes dentro de la Bahía. En la primera mitad del año 2011, periodo de análisis en este trabajo, se presentaron cuatro periodos de limitación de hierro en el interior de la BTS, dependiendo de la presencia e intensidad de los aportes de nutrientes, no obstante se necesita un análisis de la variabilidad de largo plazo para entender mejor los procesos biogeoquímicos en la BTS.

Palabras clave: Modelación Biogeoquímica, limitación de hierro, Bahía de Todos Santos, aportes de hierro, sur de la corriente de California

Abstract of the thesis presented by **Jesús Jordán Domínguez Sevilla** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology

Physical-biogeochemical modeling of Todos Santos Bay: scenarios of input and iron limitation.

Abstract approved by:

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Thesis Director

Modeling of marine systems is a tool by which we analyze, synthesize, and test our understanding of the dynamics of the ecosystems, with the purpose of solving the questions about of the processes involved. In this research a physical-biogeochemical numerical model is implemented, which consists of the coupling of a hydrostatic ocean-circulation model and a biological model of nutrients-phytoplankton-zooplankton-detritus (NPZD), with iron limitation, for the Todos Santos Bay (TSB). In a previous work important differences were observed between the model simulations and the satellite derived chlorophyll: stronger peaks of phytoplankton biomass in the model or even anomalies of opposite sign during certain periods. For this reason, a more complex methodology is implemented to better explain the phytoplankton processes in the TSB. Previous works mention an iron limitation in central and southern California current system, where iron bioavailability has a profound influence on the productivity, composition, and trophic structure of phytoplankton communities. Based on this notion, different scenarios of iron input and limitation are proposed for the TSB, associated with upwelling, Santa Ana winds, and input by the California current. To evaluate the simulations, a comparison with satellite data, *in situ* data, and previous investigations are carried out. Also, an analysis of the model simulations is included: nutrients transports, time series, and nutrients ratios are evaluated. The simulations suggest that the most relevant iron inputs are those driven by the upwelling and the Santa Ana winds, while the input by the California current is not as important as other inputs into the bay. In the first half of 2011, focus of this work, four periods of iron limitation occurred in the TSB, depending on the presence and intensity of the nutrient inputs, but an analysis of the long term variability is necessary to better understand the biogeochemical processes in the TSB.

Keywords: Biogeochemical modeling, iron limitation, Todos Santos Bay, iron inputs, southern California current

Dedicatoria

A mi Familia.

Agradecimientos

Al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE)**, y sobre todo al posgrado de **Ecología Marina** por darme la oportunidad de estudiar un posgrado.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría, con número de becario 1063122.

A mi director de tesis, **Dr. David Rivas**, por su asesoría, paciencia y apoyo a lo largo de todo este proceso. Gracias por el tiempo dedicado a mi educación.

A mis sinodales: **Dr. Ernesto García Mendoza**, al **Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson** y al **Dr. Ricardo Cruz López**, por sus comentarios, conocimiento y tiempo brindado.

A todos los miembros del posgrado de Ecología Marina que han sido parte de mi formación académica.

A mis padres, que han sido parte fundamental de mi vida. Lo único que necesito decirles es que los amo y darles las gracias por su apoyo durante todos estos años.

A mi prima Té y a mi tía Tere, que fueron parte fundamental en mi vida académica y sin su apoyo no estaría en este camino.

Gracias a todos aquellos que han influido en mi desarrollo académico y personal. Han sido muchas las personas que han estado a mi lado a lo largo de este camino, me han brindado experiencias y conocimiento. No hace falta mencionarlas, siempre estarán en mi memoria.

Gracias

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Hipótesis.....	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
Capítulo 2. Metodología.....	7
2.1 Área de estudio	7
2.1.1 Características Físicas de la Bahía de Todos Santos.....	8
2.1.2 Características biogeoquímicas de la Bahía de Todos Santos.....	9
2.2 Modelo numérico Acoplado.....	10
2.2.1 Modelo de circulación oceánica (ROMS)	10
2.2.2 Modelo de la Bahía de Todos Santos	11
2.2.3 Modelo biogeoquímico	12
2.2.3.1 Modelo NPZD	12
2.2.3.2 Modelo NPZD con limitación de hierro	14
2.3 Descripción del proceso de análisis	16
2.3.1 Análisis de simulaciones previas	17

2.3.2	Adaptaciones de modelo Físico-biológico NPZD (“Control”)	17
2.3.3	Implementación del modelo Físico-biológico NPZD con limitación de hierro (“Limit”) ...	18
2.3.4	Experimento de aporte de hierro asociado a la corriente de California (“North-current”)	20
2.3.5	Experimento de aporte de hierro asociado a la surgencia costera (“Upwelling”)	21
2.3.6	Experimento de aporte de hierro asociado a los vientos de Santa Ana (“SAW”)	21
2.3.7	Experimento de los aportes de hierro en la BTS (“Inputs_BTS”)	22
2.3.8	Análisis de los transportes de nutrientes	22
2.4	Validación del modelo	23
Capítulo 3.	Resultados	25
3.1	Datos de simulaciones previas	25
3.2	Adaptaciones experimentales	27
3.3	Modelación Físico-biogeoquímica con limitación de hierro	29
3.4	Transportes de nutrientes	35
Capítulo 4.	Discusión	38
Capítulo 5.	Conclusiones	46
Literatura citada	47
Anexos	53

Lista de figuras

Figura	Página
1. Procesos físicos en el CCS que aportan nutrientes a la BTS (Modificado de: Hickey y Banas, 2015).	2
2. (a) Promedios mensuales de anomalías de chl-a (mg m⁻³) de datos satelitales (línea roja) y del modelo regional (línea negra) de Dorantes-Gilardi y Rivas (2019), promediados espacialmente en la BTS y su región adyacente. (b) Similar al panel (a) pero de datos satelitales (línea negra), datos del modelo regional (línea azul) y datos del modelo de la BTS (línea roja) de Cruz-Rico y Rivas (2018). Los recuadros indican los periodos de discrepancia entre el modelo y datos satelitales.....	3
3. Dominio del modelo numérico de la BTS. La estación meteorológica del CICESE se encuentra en Punta Morro, mientras que la estación Emilio López Zamora se encuentra en el punto PELZ. Las líneas negras punteadas demarcan la zona de acoplamiento con el modelo regional a lo largo de las fronteras abiertas. Las líneas negras continuas corresponden a la sección norte y la sección sur en las entradas de la BTS.	7
4. Modelo conceptual de la modelación físico-biogeoquímica implementada en la BTS.	10
5. Condiciones iniciales del hierro a nivel superficial para el proceso de spin-up, basadas en Fietcher et al. (2009), adaptando concentraciones para la BTS.	18
6. Frontera norte del modelo, adaptación para el experimento “North-current”: (a) distribución exponencial con máximo superficial; (b) concentraciones de dFe para el día 2 de la simulación.	20
7. Aporte superficial de hierro para el experimento de “SWA”: distribución tipo exponencial con máximo en Punta Morro.	22
8. Series de tiempo de promedios de ocho días de índices físico-biogeoquímicos. (a) Promedios espaciales dentro del dominio del modelo numérico: producto satelital de chl-a de nivel 3 (línea verde) y nivel 4 (línea negra); y datos del modelo regional (línea azul) y datos del modelo de la BTS (línea roja) de simulaciones previas (Cruz-Rico y Rivas, 2018). (b) Suma de los transportes de NO₃ de las fronteras abiertas del modelo. (c) Índices de surgencia. Los rectángulos delimitan los periodos de interés: (P1) primer periodo (rectángulo azul), (P2) segundo periodo (rectángulo amarillo), (P3) tercer periodo y (P4) cuarto periodo (rectángulo rojo).....	27
9. Series de tiempo de promedios superficiales dentro de la BTS de las concentraciones de (a) fitoplancton (mmol N m⁻³) y (b) zooplancton (mmol N m ⁻³).	28
10. Series de tiempo de promedios espaciales de las concentraciones de biomasa fitoplanctónica para el dominio del modelo de la BTS: producto satelital de chl-a de nivel 4 (línea negra), simulación del modelo biológico NPZD con las adaptaciones experimentales (línea azul), simulación del modelo biológico NPZD (línea roja) con la configuración descrita por Cruz-Rico y Rivas (2018).	29

11. Experimento “North-current”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (**mmol N m – 3**) dentro de la BTS para los primeros 30 m..... 30
12. Adaptaciones experimentales para el experimento “Upwelling”: (a) serie de tiempo del promedio especial del **WE** para el dominio de la BTS y (b) periodos de aporte de dFe a través de las fronteras abiertas a partir de la relación 16.5 **nmolFe mmolN**..... 30
13. Experimento “Upwelling”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (**mmol N m – 3**) dentro de la BTS para los primeros 30 m..... 31
14. Condiciones meteorológicas en la BTS para el periodo simulado. Datos de la estación meteorológica de PELZ: (a) humedad relativa (%) y (b) temperatura (°C). Datos de la estación meteorológica del CICESE, (d) humedad relativa (%), (d) temperatura (°C) y (e) componentes del viento (**m s – 1**). Las líneas rojas corresponden a los eventos de los SAW. 33
15. Experimento “SAW”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (**mmol N m – 3**) dentro de la BTS para los primeros 30 m..... 34
16. Experimento “Inputs-BTS”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (**mmol N m – 3**) dentro de la BTS para los primeros 30 m..... 34
17. Series de tiempo de los transportes verticales en los primeros 30 m de profundidad dentro de la BTS: (a) transporte de volumen (**m³ s – 1**), (b) transporte de **NO₃** (**mmol s – 1**) y (c) transporte de dFe (**mmol s – 1**)..... 35
18. Series de tiempo de la suma entre los transportes de las secciones verticales: (a) transporte de **NO₃** (**mmol s – 1**) y (b) transporte de dFe (**mmol s – 1**)..... 36
19. Series de tiempo de los experimentos de limitación de hierro. (a) Promedios espaciales del fitoplancton (**mmol N m – 3**) dentro de la BTS para los primeros 30 metros. (b) Promedios espaciales superficiales correspondientes al dominio del modelo de la BTS de la biomasa fitoplanctónica (**mg m – 3**): producto satelital chl-a nivel 4 (línea verde continua con asteriscos), producto satelital chl-a nivel 3 (línea verde discontinua), simulación control con el módulo NPZD (línea negra), simulación control con el módulo de limitación por hierro (línea azul), experimento “North-current” (línea verde), experimento “Upwelling” (línea roja), experimento “SAW” (línea amarilla) y experimento “Inputs-BTS” (línea morada). Los rectángulos delimitan los periodos: P1, P2, P3 y P4. 41
20. Series de tiempo de las señales de los aportes de dFe en la BTS: (a) señal de **NO₃** (**mmol N m – 3**) asociado a cada experimento; (b) señal de fitoplancton (**mmol N m – 3**) asociado a cada experimento; (c) diferencia entre las series de **NO₃** del experimento de “Upwelling” y “SAW”. 43
21. Series de tiempo de las relaciones de **dFe: NO₃** de los experimentos: (a) “Upwelling”, (b) “North-current”, (c) “SAW” y (d) “Inputs-BTS” 44
22. Series de tiempo de la biomasa fitoplanctónica de productos satelitales (Figuras superiores) y datos modelados (Figuras inferiores): (a-b) semana 12, (c-d) semana 13, (e-f) semana 15 y (g-h) semana 17. (I) Promedios espaciales: producto satelital de nivel 4 (línea verde continua) y nivel 3 (línea verde discontinua); datos del modelo regional (línea azul) y datos del modelo de la BTS (línea roja), de simulaciones previas (Cruz-Rico y Rivas, 2018)..... 53

23. Series de tiempo de los promedios espaciales superficiales de los experimentos de sensibilidad de la constante de saturación del hierro (**KFe**) descrito en la sección 2.3.3. 56
24. Series de tiempo de los promedios espaciales dentro (línea azul) y fuera (línea negra) de la plataforma continental: (a) concentraciones de **NO₃** (**mmol N m⁻³**), (b) concentraciones de dFe (**mol N m⁻³**) y (c) concentraciones de fitoplancton (**mmol N m⁻³**).Fitoplancton (**mmol N m⁻³**)..... 57
25. Series de tiempo de los promedios espaciales dentro (línea azul) y fuera (línea negra) de la plataforma continental: (a) concentraciones de NO₃ (mmol N m⁻³) (b) concentraciones de dFe (mmol N m⁻³) y (c) concentraciones de fitoplancton (mmol N m⁻³). 57
26. Experimentos “Relax”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (mmol N m⁻³) dentro de la BTS para los primeros 30 m. 57

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Parámetros para el modelo biológico NPZD.	14
2. Parámetros para el modelo de limitación de hierro.	16
3. Valores de la constante de saturación de hierro (K_{Fe}).	19
4. Experimentos de relajación del dFe en el interior del dominio.	20
5. Promedios de la suma entre los transportes entre las secciones.	37

Capítulo 1. Introducción

La modelación de los ecosistemas marinos es una herramienta que sirve para entender y describir los procesos físicos y biogeoquímicos en términos de ecuaciones, y que explican la dinámica de diferentes regiones. Los procesos ecológicos son sumamente complejos, por lo que en la construcción de modelos se consideran variables de estado para caracterizarlos. Para entender la dinámica de los ecosistemas es necesario ir paso a paso, partir de problemas simples a otros de mayor complejidad, por lo que se va integrando un mayor número de variables y parámetros, conforme se van respondiendo las preguntas de investigación (Fennel y Neumann, 2015; Powell et al., 2006). Los modelos físico-biológicos son experimentos en los que se pueden simular diferentes escenarios teóricos, que parten de la observación de los procesos, y son una herramienta complementaria para el entendimiento y la implementación de soluciones basadas en los ecosistemas, para un mejor manejo de los océanos (Kumar et al., 2021).

Los modelos permiten evaluar los efectos de patrones a diferentes escalas de tiempo y espacio, con acercamientos sistemáticos, sobre las diferentes regiones del sistema de la Corriente de California (CCS, por sus siglas en inglés) (Powell et al., 2006). Actualmente los datos satelitales y los modelos numéricos proporcionan un gran cúmulo de información que facilitan la comprensión de la dinámica regional, ayudando a describir procesos de mesoescala con gran importancia como las surgencias, los remolinos de mesoescala y los vientos de Santa Ana (SAW, por sus siglas en inglés), que juegan un rol importante para los procesos ecológicos en el sur del CCS (Gomez-Ocampo et al., 2018; Navarro-Olache et al., 2021).

El ecosistema marino se caracteriza por tener una gran diversidad de nutrientes que se comportan de diferente forma según la región, por lo que es importante realizar simulaciones que incluyan un mayor número de nutrientes y parámetros adecuados según el área de estudio (Fennel y Neumann, 2015). El paradigma de la productividad está co-limitada por varios factores de manera simultánea dependiendo de cada ecosistema, por ejemplo, el nitrógeno, el fósforo y el hierro pueden limitar el crecimiento de las diatomeas, debido a su participación en la fotosíntesis y la respiración (King y Barbeau, 2007; Turner y Hunter, 2001; Watson, 2001). Existen micronutrientes limitantes esenciales para el crecimiento del fitoplancton, como el hierro, debido a su participación en procesos metabólicos como: el transporte de electrones llevado a cabo en la fotosíntesis y la respiración; la reducción de nitratos (NO_3) y nitritos (NO_2); en la fijación de nitrógeno; y en la reducción de sulfato (King y Barbeau, 2007; King y Barbeau, 2011; Sunda y Huntsman, 1997). Además, es importante recalcar que dependiendo de la disponibilidad de hierro se incrementa la utilización de nitrato y la eficiencia fotosintética (Green et al., 1994; Price et al., 1991).

La productividad en el CCS es atribuida principalmente a la surgencia costera, como en otros sistemas de frontera oriental. Sin embargo, a lo largo de las diferentes regiones del CCS existen otros factores que modifican las características fisicoquímicas, con gran impacto en las concentraciones de nutrientes (Figura 1). Uno de los factores es la influencia de agua continental, proveniente de zonas estuarinas o aporte fluvial (Hickey y Banas, 2015). Por otro lado, la morfología de la costa y la topografía también juegan un papel importante, ya que las bahías funcionan como trampas de nutrientes, o en el caso de cabos, suelen ser zonas de pérdida de nutrientes además de modificar la circulación oceánica, y en ocasiones forman meandros o remolinos de mesoescala que a su vez modifican la biogeoquímica (Bruland et al. 2001; Chenillat et al., 2015; Jhonson et al., 2001). En el caso del sur del CCS existen los SAW los cuales son responsables de modificar la circulación oceánica y de aportar micronutrientes como el hierro y el Manganeso sobre las aguas superficiales, incrementando la productividad del ecosistema (Félix-Bermúdez et al., 2017; Navarro-Olache et al., 2021).



Figura 1. Procesos físicos en el CCS que aportan nutrientes a la BTS (Modificado de: Hickey y Banas, 2015).

En trabajos previos se han modelado las variables biogeoquímicas para el sur del CCS y para la Bahía de Todos Santos (BTS), en los que se reportan diferencias importantes entre las simulaciones numéricas y los datos satelitales de clorofila a (chl-a): picos más pronunciados de biomasa fitoplanctónica en las series de tiempo del modelo o incluso anomalías de signo opuesto durante ciertos periodos (Figura 2). Por esta razón en este trabajo se implementa una metodología más compleja para explicar de mejor forma los procesos biogeoquímicos en la BTS.

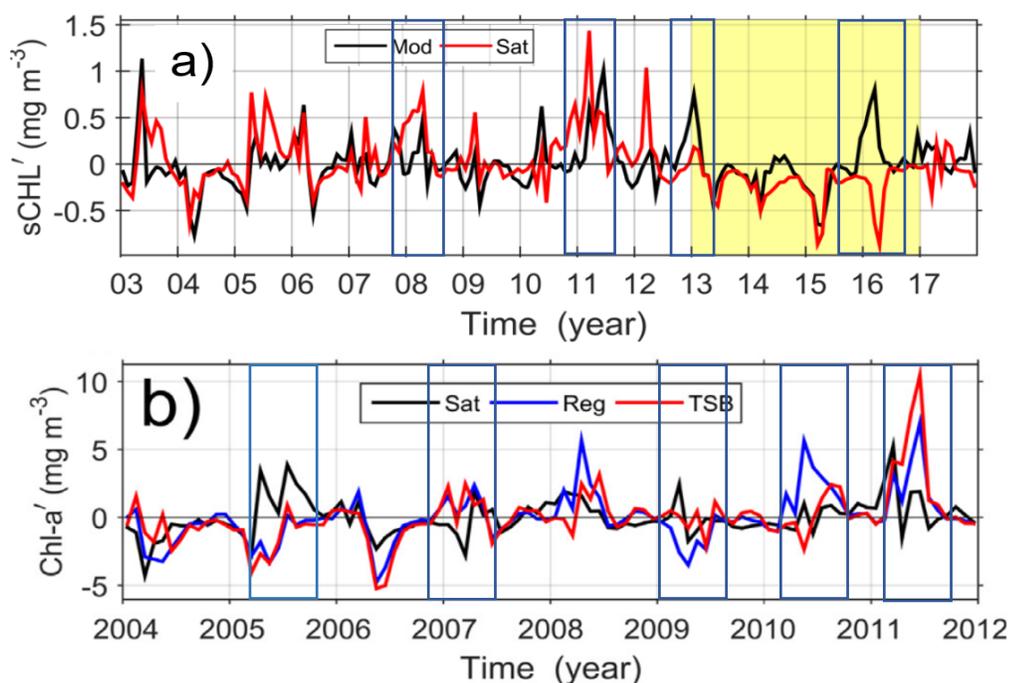


Figura 2. (a) Promedios mensuales de anomalías de chl-a (mg m^{-3}) de datos satelitales (línea roja) y del modelo regional (línea negra) de Dorantes-Gilardi y Rivas (2019), promediados espacialmente en la BTS y su región adyacente. (b) Similar al panel (a) pero de datos satelitales (línea negra), datos del modelo regional (línea azul) y datos del modelo de la BTS (línea roja) de Cruz-Rico y Rivas (2018). Los recuadros indican los periodos de discrepancia entre el modelo y datos satelitales.

Investigaciones previas mencionan la limitación de hierro a lo largo del centro y sur del CCS, donde la biodisponibilidad de hierro disuelto (dFe) influye en la productividad, composición de las especies y estructura trófica de las comunidades (Bruland et al., 2001; Hutchins et al., 1998; King y Barbeau, 2007; Sunda and Hunstman, 1995); además, este micronutriente tiene un impacto en la evolución de las especies (Watson, 2001). Con base a esta idea, se proponen diferentes escenarios de aportes y limitación de hierro en la BTS, asociados a diferentes factores como el aporte de la corriente de California (CC), la surgencia costera y los SAW. Para evaluar la veracidad de las simulaciones se realiza una comparación con datos satelitales, datos *in situ* y trabajos previos (Cruz-Rico y Rivas, 2018; Delgadillo-Hinojosa et al., 2020; Dorantes-Gilardi y Rivas, 2019; Félix-Bermúdez et al., 2017; Yarimizu et al., 2018).

1.1 Antecedentes

La BTS se encuentra en el sur del CCS caracterizado por ser un sistema altamente productivo debido al levantamiento de las isopícnas producidas por la surgencia costera y gran influencia de procesos de mesoescala, ya que es una zona con alta actividad energética (Capet et al., 2008; Gómez-Ocampo et al., 2018). Sin embargo, al norte de la BTS se ha demostrado la existencia de limitación de hierro, más en específico en la Ensenada del Sur de California (SCB, por sus siglas en inglés), donde a partir de diferentes estudios se muestran implicaciones significativas de este micronutriente a la biogeoquímica y a los procesos ecológicos (Hogle et al., 2018; King y Barbeau, 2007; King y Barbeau, 2011; White et al., 2022). No obstante, a lo largo del CCS la limitación de hierro es menos dramática en comparación a los regímenes de altas concentraciones de nutrientes y bajas concentraciones de clorofila (HNLC, por sus siglas en inglés) (King y Barbeau, 2007). En la zona de transición costera existen diferentes fuentes de hierro; experimentos de crecimiento de fitoplancton sugieren que el hierro probablemente juega un papel en la discrepancia entre el NO_3 no utilizado y la baja biomasa de fitoplancton (King y Barbeau, 2007; King y Barbeau, 2011). Sin embargo, no se descartan otras alternativas de factores que pueden estar impidiendo que el fitoplancton utilice NO_3 , por separado o junto con la limitación del hierro, como el control del pastoreo o la limitación de la luz (King y Barbeau, 2011; Yarimizu et al., 2018). En esta zona de transición costera los estudios indican que el nitrógeno es el nutriente limitante principal, pero existen co-limitaciones de nitrógeno y hierro para que se presenten mayores abundancias celulares para diversos grupos de fitoplancton (Hogle et al., 2018; Shilova et al., 2020).

Es importante resaltar que las concentraciones de dFe son controladas en gran medida por la comunidad microbiana, debido a que las bacterias participan en la remineralización. Éstas fungen como control en escalas de tiempo largas y dominan la materia orgánica disuelta, pero los efectos fotoquímicos parecen tener un mayor impacto cerca de las aguas superficiales (Bundy et al., 2016). Dentro y fuera de la BTS se ha reportado que las bacterias contribuyen significativamente a la biodisponibilidad del dFe y considerándose especies clave en el ecosistema (Yarimizu et al., 2018). Por otro lado, experimentos fotoquímicos sugieren que aumentos de biomasa de fitoplancton en aguas superficiales asociados a altas concentraciones de dFe tienen poco impacto en escalas de tiempo largo, excepto por algunos grupos que tienen mejores capacidades de asimilación (King y Barbeau, 2011).

A lo largo del CCS se ha evaluado la limitación de hierro en el fitoplancton a través de diferentes indicadores biogeoquímicos como son: la comparación de las concentraciones de dFe con la biomasa de fitoplancton (Bruland et al., 2001; Firme et al., 2003; Hutchins et al., 1998; Jhonson et al., 2001); las

relaciones de dFe: NO₃ (Biller y Bruland, 2014; Hogle et al., 2018; King y Barbeau 2011; Till et al., 2019); la utilización del NO₃ a través del exceso de ácido silícico (Si_{ex}), el cual se ha demostrado que cuando hay estrés por hierro se reduce la utilización de NO₃ en diatomeas, tendiendo a acumular ácido silícico mucho más rápido que el NO₃ (Hogle et al., 2018; Hutchins y Bruland, 1998; White et al., 2022); y experimentos de incubación *in situ* (King y Barbeau, 2011; King et al., 2012).

Las comunidades de fitoplancton experimentan periodos de co-limitación de dFe/luz tanto en el océano abierto como en zonas de surgencia. Las observaciones regionales en la zona de transición indican que el gradiente decreciente costero de dFe es mayor con relación al del NO₃. Las máximas concentraciones de dFe están asociadas a la surgencia costera, mientras que en algunos casos el aporte fluvial provee episodios de suministro de dFe, pero estos eventos ocurren esporádicamente durante invierno y fuera de fase de las surgencias costeras, lo que resulta en casos de limitación de fitoplancton (Hogle et al., 2018; King y Barbeau, 2011). Cuando ocurren nuevas producciones de fitoplancton se presentan tasas más bajas de concentración, pero durante periodos más largos, lo que es más relevante para niveles tróficos mayores (King y Barbeau, 2011). Durante estudios cuasi-Lagrangianos se observaron diferentes procesos: el dFe permanecía en altas concentraciones y no limitaba al fitoplancton; se presentaron escenarios donde la disminución de dFe generaba una limitación en días posteriores al aporte; mientras que esto no sucedía en el caso de los NO₃, ya que las aguas seguían aportando suficiente NO₃, por lo que se reafirma que el dFe tiene un rol crítico, con variaciones a lo largo de diferentes periodos (King et al., 2012).

Fuentes adicionales de dFe en aguas superficiales en el sur del CCS, como el polvo atmosférico, pueden representar un suministro significativo de micronutrientes, en especial durante vientos continentales como los SAW; estos son vientos relativamente secos y cálidos provenientes del noreste, con una generación asociada a una alta presión en el área de la Gran cuenca y altas presiones en el sistema de California (Félix-Bermúdez et al., 2017). Se caracterizan por el calentamiento adiabático seco que se produce cuando los vientos fluyen ladera abajo desde las montañas hacia la costa. El viento se intensifica, hasta 30 m s⁻¹, incrementando la temperatura hasta 35°C y reduciendo drásticamente la humedad relativa, por lo que son relativamente fáciles de identificar. Tienen un gran impacto en la circulación costera, ya que modifican la dirección de las corrientes y con efectos de fertilización (Navarro-Olache et al., 2021).

Existen diferencias entre el aporte de partículas de polvo durante la temporada fría, que son 50% más altos que los registrados en la temporada cálida; inducen un transporte significativo, proveniente del desierto, para el sur del CCS (Félix-Bermúdez et al., 2017). Además, se han asociado altas concentraciones

de fitoplancton a los eventos de SAW, ya que se han observado picos de chl-a a lo largo de la costa a través de imágenes satelitales durante la presencia de estos eventos, frente a las costas de Ensenada (Navarro-Olache et al., 2021). El transporte desde el desierto es significativo para el sur del CCS, como lo muestran los cálculos realizados por Félix-Bermúdez et al. (2017), que indican un menor aporte que las surgencias, pero representando un aporte de dFe de 11% (estación cálida) y un 35% (estación fría) de la contribución de surgencia. En términos de relevancia biológica, estos autores estiman que el dFe explica entre 4.5-8.2% (temporada cálida) y 9-15.3% (temporada fría) de la producción primaria.

1.2 Hipótesis

H1: La inclusión de la limitación de hierro en las simulaciones representa mejor los patrones espacio-temporales de la biomasa fitoplanctónica para la BTS.

H2: En la BTS el hierro es un elemento que limita el crecimiento del fitoplancton, bajo ciertos escenarios.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Modelar la dinámica del ecosistema en la BTS, aplicando un modelo de circulación oceánica acoplado a un modelo de nutrientes-fitoplancton-zooplancton-detrito (NPZD) con limitación por hierro, para describir los patrones de la biomasa fitoplanctónica y su variación espacio-temporal.

1.3.2 Objetivos específicos

- I. Validar el modelo numérico mediante la comparación con datos satelitales, índices de surgencia, datos meteorológicos y trabajos previos.
- II. Describir las implicaciones de la inclusión del hierro en la modelación de la biomasa fitoplanctónica, para la BTS.
- III. Comparar el modelo NPZD contra un modelo de limitación de hierro bajo diferentes escenarios.
- IV. Identificar periodos en los que el hierro puede ser limitante en la BTS y sus alrededores.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Área de estudio

La BTS es una bahía semicerrada localizada al noroeste de las costas de Baja California entre los 31.7° y 31.9° N y entre los 116.6° y los 116.8° O dentro de la región sur del CCS. Tiene un área de aproximadamente 190 km² con un 80% de profundidades menores a 50 m, el resto corresponde a un cañón submarino localizado entre Punta Banda (PB) y la Isla de Todos Santos (ITS) (Flores-Vidal et al., 2018; Mateos et al., 2009). Está conectada al océano Pacífico a través de dos entradas separadas por la ITS: la entrada norte está delimitada por punta San Miguel (PSM) y la ITS con una longitud de 10 km con profundidades menores a 50 m; y la entrada sur está delimitada por PB y la ITS con una longitud de 5 km, pero con profundidades que llegan hasta los 400 m debido al cañón submarino. La plataforma continental fuera de la bahía es muy angosta y el talud continental desciende muy abruptamente, por lo que después de los primeros 5 km corresponde a aguas oceánicas (Delgadillo-Hinojosa et al., 2015).

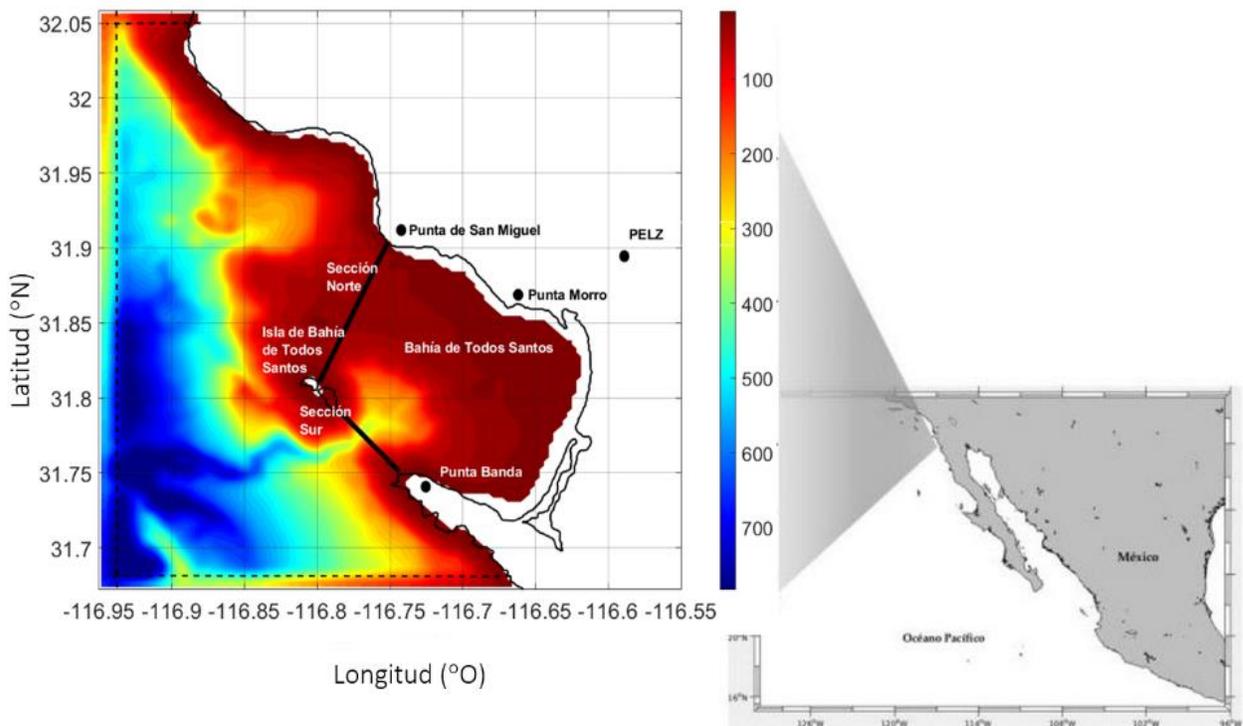


Figura 3. Dominio del modelo numérico de la BTS. La estación meteorológica del CICESE se encuentra en Punta Morro, mientras que la estación Emilio López Zamora se encuentra en el punto PELZ. Las líneas negras punteadas demarcan la zona de acoplamiento con el modelo regional a lo largo de las fronteras abiertas. Las líneas negras continuas corresponden a la sección norte y la sección sur en las entradas de la BTS.

2.1.1 Características Físicas de la Bahía de Todos Santos

Las condiciones hidrográficas de la BTS son influenciadas por la circulación fuera de la bahía (Delgadillo-Hinojosa et al., 2015; Mateos et al., 2009), en particular el CCS, el cual se caracteriza por ser uno de los sistemas más productivos y dinámicos en el mundo. Entre los factores dinámicos más relevantes destaca la CC, la contracorriente subsuperficial de California y la contracorriente costera (Durazo et al., 2010; Lynn y Simpson, 1987). El CCS es un sistema de surgencia de límite oriental que se caracteriza por ser un flujo amplio y lento, con dirección al ecuador y con una termoclina superficial que es rica en nutrientes, lo que propician la alta producción biológica a lo largo de la costa (Capet et al., 2008). La surgencia cerca de la costa se debe al transporte de Ekman y lejos de la costa al bombeo de Ekman (Checkley y Barth, 2009).

La circulación superficial dentro de la BTS está asociada a la intensidad y dirección de los vientos, los cuales tienen una predominancia noroeste con un promedio anual de 4.8 m s^{-1} , presentes principalmente durante la primavera y verano (Castro y Martínez, 2010). La mayor variación de los vientos se presenta durante el otoño y el invierno, atribuyéndolo a la ausencia de la baja presión al noreste de Baja California (Álvarez-Sánchez, 1977). A su vez, la BTS presenta una marcada influencia de brisas marinas con predominancia al amanecer y atardecer, las montañas alrededor de la bahía forzan el viento de manera paralela a la costa durante el día, mientras que en la noche el flujo de aire frío de las montañas se dirige hacia el mar (Flores-Vidal et al., 2015). En condiciones de los SAW se alcanzan vientos de 18 m s^{-1} que se presentan generalmente entre otoño e invierno, con duraciones aproximadas de 1.5 días por evento (Álvarez-Sánchez, 1977). Por otro lado, Navarro-Olache et al. (2021) mencionan que estos vientos se pueden identificar cuando los vientos son $> 10 \text{ m s}^{-1}$, además reportan eventos de SAW con duración de 3-5 días.

Flores Vidal et al. (2018) reportaron en la BTS, por medio de boyas de deriva, correntímetros y modelación, que los flujos de intercambio entre la bahía y el mar abierto no están necesariamente influidos por flujos externos como la CC. En el canal norte se reportó un flujo de entrada por encima de los 10 m de profundidad influido por el viento predominante con dirección noroeste, mientras que por debajo de esta profundidad reportan un flujo de salida forzado principalmente por la marea. En el canal sur se reportó un flujo de entrada y salida de manera simultánea principalmente forzado por la marea. Mateos et al. (2009) describen dos patrones espaciales: un gran remolino anticiclónico que cubre casi toda la bahía; y dos remolinos de rotación contraria de menor tamaño, mientras que Flores-Vidal et al. (2018) dice no haber encontrado evidencia de giros persistentes dentro de la bahía.

2.1.2 Características biogeoquímicas de la Bahía de Todos Santos

Los procesos físicos descritos en el CCS (Figura 1) son los responsables de la variabilidad biogeoquímica dentro de la BTS, ya que dependiendo de la magnitud y la frecuencia de los eventos se presentan condiciones oligotróficas o ricas en nutrientes. A su vez esta variabilidad es influenciada por la morfología de la línea de costa y su topografía, ya que la bahía actúa como una trampa de nutrientes (Calva-Chavez, 2014). La región es caracterizada por la presencia de vientos fuera de la costa que inducen las surgencias costeras a lo largo de todo el año, sin embargo, son más intensas durante la primavera y el verano (Pérez-Brunius et al., 2007). Durante estos periodos entran a de la BTS aguas frías, salinas y ricas en nutrientes desde aguas subsuperficiales hacia la zona fótica, lo cual eventualmente se traduce en producción primaria (Espinosa-Carreón et al., 2001; Gaxiola-Castro et al., 2010).

En la BTS, Delgadillo-Hinojosa et al. (2015) reportaron un claro patrón estacional en la temperatura superficial durante el 2008, con bajas temperaturas (11-15 °C) en el invierno y primavera, y altas temperaturas en el verano (19-22 °C). Delgadillo-Hinojosa et al. (2020) reportaron diferencias entre aguas superficiales dentro y fuera de la bahía en presencia de surgencia costera durante el 2014-2015, mostrando diferencias en la temperatura (2-4 °C) y la salinidad (0.1-0.2). Por otro lado, Espinosa-Carreón et al. (2001) reportaron máximos en otoño-invierno (~17°C) y mínimos en primavera-verano (~11°C), salinidades con máximos en junio (33.65) y con un mínimo de salinidad en septiembre-octubre (33.33).

Juárez-Colunga et al. (2010) mencionan incrementos entre enero-marzo para los NO_3 (~ 6.0 μmol) y enero-junio para fosfatos (~0.8 μmol), con concentraciones más bajas en septiembre (<0.2 μmol) para ambos nutrientes. Durante el periodo estudiado por Delgadillo-Hinojosa et al. (2020), 2014-2015, reporta condiciones oligotróficas dentro y fuera de la bahía, con concentraciones de NO_3 de 0.31 μmol y 0.23 μmol respectivamente. También mencionan un claro patrón estacional en la chl-a con altas concentraciones promedio durante el verano de 2.21 mg m^{-3} asociado a surgencia costera, bajas concentraciones promedio de 0.56 mg m^{-3} durante la temporada cálida y 0.77 mg m^{-3} durante condiciones Niño. García-Mendoza et al. (2009) durante un crucero llevado a cabo en el mes de abril de 2007 reporta concentraciones superficiales de NO_3 en un rango de 2.4-14.8 μmol , para silicatos 7-8.5 μmol , para fosfatos de 0.7-3.9 μmol y concentraciones de chl-a de 2.21 mg m^{-3} en la mayor parte del área de estudio con máximas concentraciones de 16 mg m^{-3} en PSM. En el caso del dFe Delgadillo-Hinojosa et al. (2020), reportan un promedio de 4.9 nmol dentro de la bahía y un promedio de 3.5 nmol fuera de la bahía, mientras que Yarimizu et al. (2018) reportan un promedio de 2.7 nmol con un rango entre 0.1 y 6 nmol.

2.2 Modelo numérico Acoplado

En este trabajo se busca implementar el acoplamiento de un modelo numérico físico-biológico, que parte de un modelo de circulación oceánica y un modelo biológico NPZD con limitación de hierro. Se muestra un esquema general de la modelación de las variables físicas y de la modelación biogeoquímica, construido a partir de la literatura citada (Figura 4). Como lo describe el esquema, se parte de observaciones físicas para generar las condiciones iniciales del modelo, el forzamiento y las condiciones de frontera, que van a servir como base de la dinámica dentro de la BTS, influyendo en las variables biogeoquímicas a través de la advección y la difusión. De igual forma, se recurre a observaciones biológicas para generar las condiciones iniciales del modelo biogeoquímico, por ejemplo, el nitrógeno se genera a partir del promedio climatológico del NO_3 . En este esquema se muestra el modelo biogeoquímico implementado en este estudio, que será explicado a fondo en la sección 2.2.3 (Fennel y Neumann, 2015; Kishi et al., 2007; Song et al., 2016).

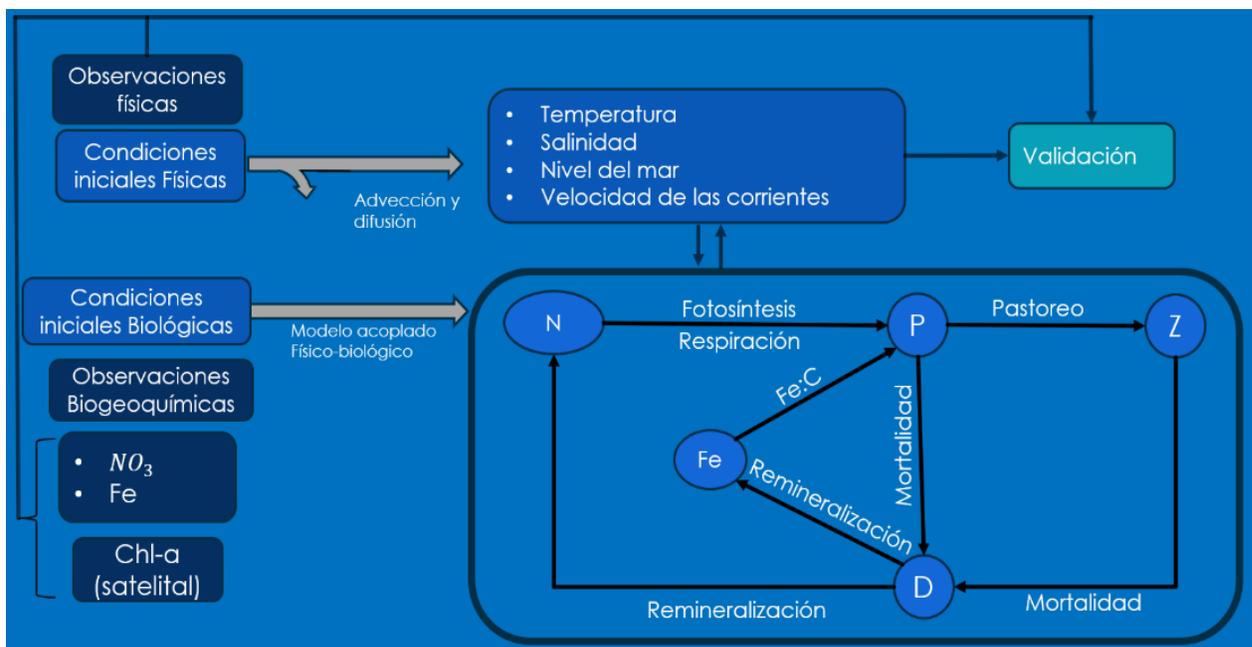


Figura 4. Modelo conceptual de la modelación físico-biogeoquímica implementada en la BTS.

2.2.1 Modelo de circulación oceánica (ROMS)

El modelo de circulación oceánica implementado en este trabajo está basado en las ecuaciones primitivas de movimiento, utilizando el Sistema Regional de Modelación Oceánica (ROMS, por sus siglas en inglés, <https://www.myroms.org/>) [e.g., Budgell, 2005; Di Lorenzo, 2003; Dinniman et al., 2003; Haidvogel et al., 2000; Marchesiello et al., 2003; Peliz et al., 2003] versión 3.8. ROMS es un modelo tridimensional y de

superficie libre, implementado para un dominio de escala fina para la BTS, que está anidado a un modelo regional de menor resolución y mayor escala para Baja California.

La configuración del modelo regional está descrita en el trabajo de Cruz-Rico y Rivas (2018), a grandes rasgos: tiene una resolución de $\sim 1/3^\circ$ (3 km) y con 31 niveles en la vertical; el dominio del modelo comprende desde los 26.8 a los 35.5 °N y de los 113.7 a los 123.5 °W, con el parámetro de Coriolis variando con la latitud; es forzado en superficie por el esfuerzo del viento cada 6 horas tomando de un producto de análisis de viento (Multi-plataforma inter-calibrado, CCMP; Atlas et al., 2011) y promedios mensuales climatológicos de flujos de calor y radiativos obtenidos de Penven et al (2008); en las fronteras abiertas se impusieron datos diarios tomados del modelo regional ya mencionado y se integró el modelo para el año 20011.

2.2.2 Modelo de la Bahía de Todos Santos

El dominio de la malla para la BTS también está basado en el ROMS con una resolución fina, el cual se extiende desde los 31.5 a los 32.2 °N y desde los 117.2 a los 116.52 °W (Figura 3), con una resolución horizontal de ~ 300 m, y una resolución vertical dada por 20 niveles sigma con una resolución mejorada cerca de los límites inferior y superior (especificado por los parámetros de estiramiento $\theta_s = 4.0$ y $\theta_b = 0.9$). Para este estudio se llevó a cabo un periodo de simulación de 213 días con un forzamiento del viento cada 6 horas, con inicio en el primer día del 2011 y el último día del mes de julio.

El modelo regional (Cruz-Rico y Rivas, 2018) proporciona las condiciones iniciales y los datos de las fronteras abiertas (oeste, noreste y suroeste), para esto se utilizaron los promedios diarios de las salidas regionales en las fronteras del modelo de la BTS y así se resuelve el sistema de corrientes costeras en la región cercana a la BTS. La frontera oriental del modelo corresponde a la costa, donde se aplican condiciones de impenetrabilidad y no deslizamiento; se utilizó un esquema logarítmico de fricción de fondo. En este dominio se utilizó una capa de *nudging* (relajación newtoniana) y una capa de esponja, con un ancho de 6 puntos de malla (Figura 3, líneas negras discontinuas); dentro de esta capa la viscosidad y los coeficientes de difusividad disminuyeron linealmente desde los $10 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1}$ en las fronteras con el valor interior de $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1}$.

2.2.3 Modelo biogeoquímico

La modelación del ecosistema marino en este trabajo se construye a partir de dos modelos biogeoquímicos. El primero es un modelo simple de cuatros componentes nutrientes-fitoplancton-zooplancton-detrito (NPZD), donde el crecimiento del fitoplancton es limitado por la tasa de absorción del nitrógeno a partir de la formulación de Michaelis-Menten. Mientras que el segundo es limitado por dos nutrientes, nitrógeno y hierro, pero la tasa de absorción del hierro no está en función de la disponibilidad de las concentraciones de dFe , sino que la cinética de Michaelis-Menten para la limitación está basada en la relación de Fe:C del fitoplancton. Posteriormente se realizan diferentes adaptaciones para las condiciones iniciales y las fronteras abiertas, con el fin de crear diferentes escenarios que aporten mejoras en la construcción de la modelación biogeoquímica en la BTS.

2.2.3.1 Modelo NPZD

El primer modelo biogeoquímico es un modelo trófico que está basado en el nitrógeno (Powell et al., 2006), el cual es una representación relativamente simple: el nitrógeno total es el punto de partida (N), nitrógeno particulado (Detritus: D), fitoplancton trófico (P) y el zooplancton herbívoro (Z). Los procesos incorporan un crecimiento autótrofo de fitoplancton controlado por la limitación de luz. El sistema de ecuaciones es el siguiente:

Nitrato:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla N = \delta D + \gamma_n GZ - UP + k_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial N}{\partial z} \right), \quad (1)$$

Fitoplancton:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla P = UP - GZ - \sigma_d P + k_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial P}{\partial z} \right), \quad (1)$$

Zooplancton:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla Z = (1 - \gamma_n)GZ - \varsigma_d Z + k_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial Z}{\partial z} \right), \quad (3)$$

Detrito:

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla D = \sigma_d P + \zeta_d Z - \delta D + w_d \frac{\partial D}{\partial z} + k_h \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial D}{\partial z} \right), \quad (4)$$

Tasa de crecimiento del zooplancton:

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

Disponibilidad de luz en la profundidad:

$$I = I_0 \exp \left(k_z Z + k_p \int_0^Z P(z') dz' \right), \quad (6)$$

Tasa de asimilación del nitrógeno por el fitoplancton:

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

donde t es el tiempo, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$, (x, y, z) las coordenadas, \vec{u} es el vector de la velocidad, k_h la difusión horizontal, k_v la difusión vertical, δD es la remineralización de detritus, γ_n la excreción de zooplancton, UP la asimilación de nitrógeno por el fitoplancton, GZ el pastoreo, σ_d la senescencia del fitoplancton, $\zeta_d Z$ la mortalidad del zooplancton y $w_d \frac{\partial D}{\partial z}$ el hundimiento de detritus.

La irradiancia en superficie (I_0) varía en el tiempo, como la climatología mensual (tomada de Penven et al., 2008) en Cruz-Rico y Rivas (2018). La disponibilidad de luz (irradiancia) en la profundidad (z) se calcula suponiendo que la atenuación del agua decae de manera exponencial con la profundidad, mediante un coeficiente de extinción k_z , y es proporcional al fitoplancton integrado en la columna de agua por arriba de la profundidad (z), usando un coeficiente de sombreado (k_p) (Powell et al., 2006).

Las ecuaciones (1-7) del modelo trófico de Powell et al. (2006) son idénticas a las del trabajo realizado por Spitz et al. (2003), con diferencias mínimas para la saturación en la respuesta fotosintética a la luz (1) y la respuesta del pastoreo por el zooplancton (2) usado por Denman y Pena (1999); que a su vez está basado en el modelo de Franks et al., 1986, incluyendo una modificación a la componente detrítica y una tasa variable de fitoplancton a nitrógeno. Los principales parámetros para cada proceso están incluidos en la

tabla 1 con la misma configuración que describe Cruz Rico y Rivas (2018), con mínimas diferencias descritas a continuación (sección 2.3.2).

Las condiciones iniciales biogeoquímicas son obtenidas por un *spin-up* de un año, utilizando el último día de datos como los datos iniciales para la simulación de la primera mitad del 2011. Los datos de las fronteras abiertas para el nitrógeno, el fitoplancton y el detrito, son obtenidas a partir de los promedios diarios de las salidas del modelo regional, descrito por Cruz-Rico y Rivas (2018). Para el zooplancton se realiza una modificación, en la cual esta variable se estima a partir de una relación Z:P (Chenilliat et al., 2021), descrito a detalle en la sección 2.3.2.

Tabla 1. Parámetros para el modelo biológico NPZD.

Nombre del parámetro	Símbolo	Valor	Dimensión
Coeficiente de extinción de luz	k_z	0.067	m^{-1}
Coeficiente de auto-sombreado	k_p	0.0095	$m^2 mmolN^{-2}$
Pendiente inicial de la curva P-I	α	0.025	$m^2 W^{-1}$
Tasa de asimilación del nitrato	V_m	1.5	d^{-1}
Tasa media de saturación	k_N	1.6	$mmolN m^{-3}$
Senescencia de fitoplancton	σ_d	0.1	d^{-1}
Tasa de crecimiento de Zooplancton	R_m	0.6	d^{-1}
Constante de Ivlev	Λ	0.06	-
Eficiencia de excreción	γ_n	0.3	-
Mortalidad de Zooplancton	ζ_d	0.058	d^{-1}
Remineralización	δ	0.05	d^{-1}
Tasa de hundimiento del detrito	w_d	5.0	$m d^{-1}$

2.2.3.2 Modelo NPZD con limitación de hierro

La modelación de la limitación del hierro fue implementada por Fiechter et al. (2009), donde el nutriente no es una simple función de la tasa de asimilación del fitoplancton a través de las concentraciones de hierro, ni ocurre en proporción a la absorción de macronutrientes y de la pérdida. La limitación de hierro es incluida mediante la cinética de Michaelis-Menten a través de la relación de Fe:C del fitoplancton, en contraposición de las concentraciones de dFe. Esta técnica tiene la ventaja de tener una variación espacial

y temporal, la cual se calcula directamente del dFe local y la concentración de fitoplancton, en lugar de implementarla como constante o parametrizarla, lo que es comparable con otros modelos de ecosistemas con limitación de hierro desarrollados para el océano global. El sistema de ecuaciones es el siguiente:

Fitoplancton asociado al Fe:

$$\frac{\partial F_p}{\partial t} = F_p \left(f_{rem} \left(\frac{GZ}{P} - \sigma_d \right) - U \right) + L_{Fe}, \quad (8)$$

Fe disuelto:

$$\frac{\partial F_d}{\partial t} = F_p \left(f_{rem} \left(\frac{GZ}{P} - \sigma_d \right) - U \right) - L_{Fe}, \quad (9)$$

Tasa de asimilación de Fe por el fitoplancton:

$$L_{Fe} = \frac{R_0 - R}{t_{Fe}} P[C:N], \quad (10)$$

Relaciones Fe:C determinadas empíricamente:

$$R_0 = bF_d^a, \quad R = \frac{F_p}{P[C:N]}, \quad (11)$$

Limitación de crecimiento de fitoplancton:

$$U = \min \left(\frac{R^2}{(R^2 + k^2)}, U_N \right), \quad (12)$$

U_N : nitrato limitado para la tasa de crecimiento del fitoplancton

$[C:N] = 106:16 \text{ molC mmolN}^{-1}$: Redfield

Climatología de dFe:

$$F_{d,clim} = F_{d,max} + C_{Fe} (F_{d,min} - F_{d,max}), \quad C_{Fe} = \max \left(0, \min \left(1, \frac{h - h_{min}}{h_{max} - h_{min}} \right) \right), \quad (13)$$

Los parámetros utilizados en este modelo están listados en la tabla 2, los cuales fueron utilizados por Fiechter et al. (2009), con las diferencias descritas a continuación (sección 2.3.3).

Tabla 2. Parámetros para el modelo de limitación de hierro.

Nombre del parámetro	Símbolo	Valor	Dimensión
Tasa de tiempo del Fe	t_{Fe}	1	d^{-1}
Poder empírico [Fe:C]	a	0.6	-
Coefficiente empírico [Fe:C]	b	50	$(molC\ m^{-3})^{-1}$
Saturación media [Fe:C]	k_{Fe}	4.44	$mmolFe(molC)^{-1}$
Fracción de Fe remineralizado	f_{rem}	0.5	-
Mínimo de Fe disuelto	$F_{d, min}$	0.05	$\mu molFe\ m^{-3}$
Máximo de Fe disuelto	$F_{d, max}$	4.9×10^{-3}	$\mu molFe\ m^{-3}$
Profundidad de transición costera	H_{min}	120	m
Profundidad de transición fuera de la costa	H_{max}	1500	m

2.3 Descripción del proceso de análisis

La modelación se implementó con el fin de mejorar las simulaciones de biomasa fitoplanctónica con respecto a datos observacionales en la BTS. El trabajo se divide en cuatro secciones, con el fin de ir paso a paso con la implementación de las nuevas simulaciones. Primero se analizan las simulaciones de trabajos previos, para identificar los periodos con mayor incongruencia entre los datos satelitales y los modelados. En la segunda parte se realizan adaptaciones al modelo NPZD (Powell et al., 2006) y al modelo de limitación por hierro (Fiechter et al., 2009), con el objetivo de actualizar los parámetros y adecuarlos al área de estudio. En la tercera parte se plantean diferentes escenarios de limitación de hierro para la BTS. Por último, se realiza un análisis de los resultados a través de series de tiempo, transportes de nutrientes y relaciones de nutrientes, y una validación con datos satelitales, datos *in situ* y trabajos previos.

2.3.1 Análisis de simulaciones previas

A partir de los trabajos realizados por Dorantes-Gilardi y Rivas (2019) y Cruz-Rico y Rivas (2018), se identifican las diferencias más notorias entre las series de tiempo de los modelos numéricos y los datos modelados (Figura 2). De éstos se definen periodos con picos más pronunciados de biomasa fitoplanctónica en comparación con los datos satelitales o incluso anomalías de signo opuesto. En un primer acercamiento se plantea el análisis de series de tiempo mensuales de los años 2007, 2009, 2011 y 2016, de los promedios espaciales de las simulaciones previas y de dos productos satelitales con diferentes características, L3 y L4 (<https://www.oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>; https://www.resources.marine.copernicus.eu/productdownload/OCEANCOLOUR_GLO_CHL_L4_OSERVATIONS_009_082).

Posteriormente se comparan los periodos de surgencia costera del modelo numérico con series de tiempo de índices de surgencia (<https://oceanview.pfeg.noaa.gov/products/upwelling/dnld>; Jacox et al., 2018) y series de los campos de viento a partir de boyas ancladas (<https://www.ndbc.noaa.gov/>), para validar los principales picos de biomasa fitoplanctónica que son atribuidos al aporte vertical de nitrógeno. Finalmente, se determina el periodo que mejor explica la hipótesis de limitación por hierro y se realiza un análisis con mayor resolución en el tiempo.

2.3.2 Adaptaciones de modelo Físico-biológico NPZD (“Control”)

A partir de la configuración descrita por Cruz-Rico y Rivas (2018), se genera una simulación de “Control” para la primera mitad del año 2011 (213 días). Posteriormente se genera una nueva configuración, modificando el parámetro ζ_d (Kishi et al., 2007) para tener valores acordes al área de estudio de esta tesis y el k_N (Sarhou et al., 2005) que corresponde al grupo fitoplanctónico de las diatomeas (tabla 1). A partir del trabajo realizado por Chenillat et al. (2021), se implementa una modificación a los datos iniciales y de frontera del zooplancton, con el fin de mejorar las simulaciones. Se generan diferentes experimentos, en los cuales se calcula el zooplancton a través de diferentes relaciones [Z:P], a partir de los datos de fitoplancton dados por el modelo regional. Para ello se genera el experimento “A7”, en el cual se obtienen las concentraciones de zooplancton para las fronteras abiertas a partir de una relación [Z:P] = 1.5 y se lleva a cabo un segundo experimento “A8”, a partir de la relación [Z:P] = 1.1.

2.3.3 Implementación del modelo Físico-biológico NPZD con limitación de hierro (“Limit”)

En la implementación del modelo de hierro se realiza un *spin-up* de un año para obtener los datos iniciales de las concentraciones de hierro. Para este proceso se imponen unas condiciones iniciales de manera similar al trabajo realizado por Fiechter et al. (2009), pero modificando las concentraciones de dFe a 4.9 nmol para zonas con profundidades menores a los 200 m, mientras que para zonas con profundidades mayores se establece una concentración de 0.5 nmol, con una transición lineal (Figura 5), esto de acuerdo con las concentraciones promedio reportadas en la BTS (Delgadillo-Hinojosa et al., 2020; Yarimizu et al., 2018).

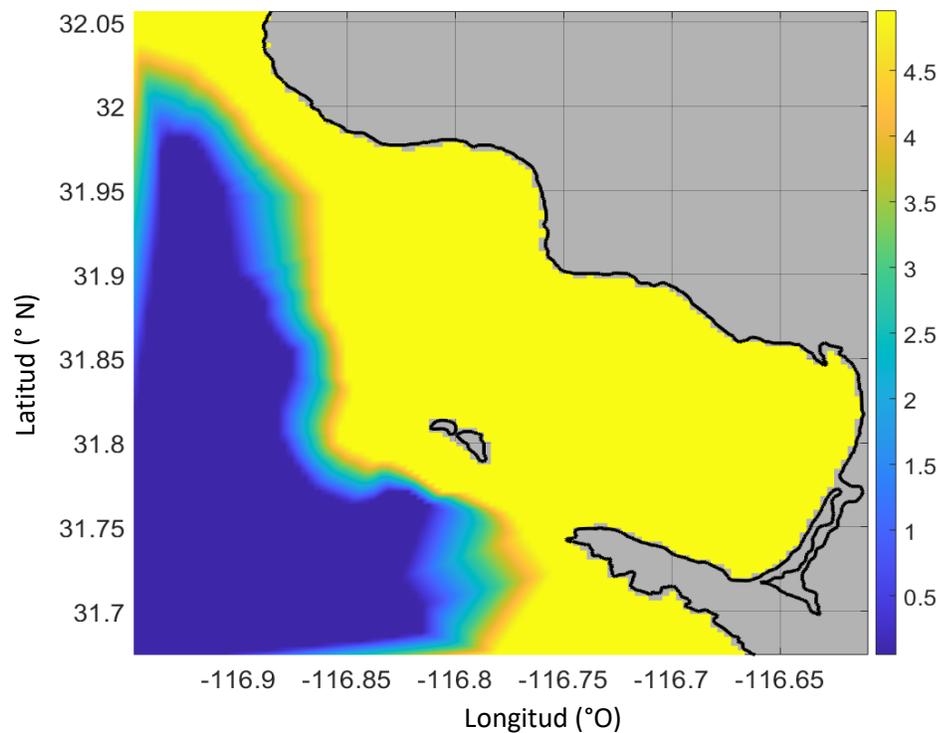


Figura 5. Condiciones iniciales del hierro a nivel superficial para el proceso de spin-up, basadas en Fiechter et al. (2009), adaptando concentraciones para la BTS.

En el caso de las fronteras se calculan las concentraciones de dFe usando una relación de $[dFe: NO_3]: < 0.2$ nmmolFe μmolN^{-1} para aguas oceánicas (King y Barbeau, 2007) a partir de los datos de NO_3 del modelo regional. Esto se realizó tanto para el *spin-up* como para las demás simulaciones, ya que esta relación da concentraciones muy bajas de hierro, buscando simular un escenario de limitación, como ocurre fuera de la costa.

En el caso de los parámetros para el modelo de hierro (tabla 2) se modifica el coeficiente empírico de la relación Fe:C (b), utilizando un valor identificado por Bruland et al. (1991) para el centro de la CCS a partir de mediciones *in situ*, cuya zona de estudio tiene mayor cercanía con el área de estudio de esta tesis. En el caso de la constante de saturación de hierro (K_{Fe}) se realizan cálculos hipotéticos de acuerdo al área de estudio y valores de diferentes referencias como se menciona en la tabla 3. A esto se le suman experimentos de sensibilidad con una duración de 72 días (Anexo B), para evaluar los valores de los experimentos y elegir un solo valor para los parámetros antes mencionados en la tabla 2.

Tabla 3. Valores de la constante de saturación de hierro (K_{Fe}).

Experimento	K_{Fe} $\text{mmolFe}(\text{mol C})^{-1}$	Referencia
"B"	16.90	Fletcher et al. (2009)
"C"	4.40	Anexos
"D"	4.20	Sarthou et al., (2005)
"E"	2.05	Hutchins et al, (2002)
"F"	1.45	Fitzwater et al., (1996)

A partir de las adaptaciones experimentales al modelo NPZD y del modelo de limitación por hierro, se genera la primera simulación control con limitación de hierro ("Limit"). Cabe mencionar que todos los experimentos descritos a continuación tienen esta configuración. Ésta tiene un mínimo aporte de dFe a partir de la relación de dFe: NO_3 para aguas oceánicas como se mencionó anteriormente, por lo que se implementa una segunda configuración con un mayor aporte de hierro en el interior de la BTS de manera constante ("RelaxA"), mediante una relajación de la solución a dichos valores inferiores como lo propone Fiechter et al. (2009). Esta relajación tiene una escala temporal de 5 días. En esta simulación ("Relax") se eligieron los parámetros mencionados en la tabla 2, teniendo en cuenta los valores promedios que reportan Delgadillo et al. (2020) de 4.9 nmol y Yarimizu et al. (2018) de 2.7 nmol para la BTS. Después se realizó una comparación entre los experimentos "Limit" y "RelaxA", realizando series de tiempo de cada 8 días durante todo el periodo simulado, así como series de tiempo de los promedios de concentraciones de NO_3 , dFe y fitoplancton, para zonas con profundidades del fondo menores a 120 m y zonas con profundidades mayores, con el fin de comparar la relajación propuesta (Anexo C). Por último, se realiza una comparación entre diferentes simulaciones con relajación del dFe, con diferentes valores (Tabla 4).

Tabla 4. Experimentos de relajación del dFe en el interior del dominio.

Experimento	Modificación
“RelaxA”	$F_{d, \max}=4.9 \times 10^{-3} \text{ (}\mu\text{molFe m}^{-3}\text{)}$
“RelaxB”	$F_{d, \max}=4.9 \text{ (}\mu\text{molFe m}^{-3}\text{)}$
“RelaxC”	$F_{d, \max}=2 \text{ (}\mu\text{molFe m}^{-3}\text{)}$
“RelaxD”	$F_{d, \max}=2 \text{ (}\mu\text{molFe m}^{-3}\text{)}$, cada 15 días.

2.3.4 Experimento de aporte de hierro asociado a la corriente de California (“North-current”)

En este experimento se busca representar el aporte de nutrientes de la CC, por lo que se impone un aporte mayor de dFe en la frontera norte. Los aportes de hierro en las demás fronteras son de acuerdo con lo descrito en el experimento “Limit”. En este experimento se suma un mayor aporte de dFe para cada periodo a la frontera norte, a partir de una relación $[\text{dFe}:\text{NO}_3]$ de $37.7 \text{ nmol } \mu\text{mol}^{-1}$ de acuerdo con Delgadillo-Hinojosa et al. (2020) para un periodo de surgencia costera sobre la plataforma continental. Las concentraciones de dFe son máximas en la superficie adyacente en la costa y disminuyen exponencialmente con la distancia (Figura 6a), lo que resulta en un mayor aporte en la plataforma continental y a nivel superficial (Figura 6b) en cada paso de tiempo.

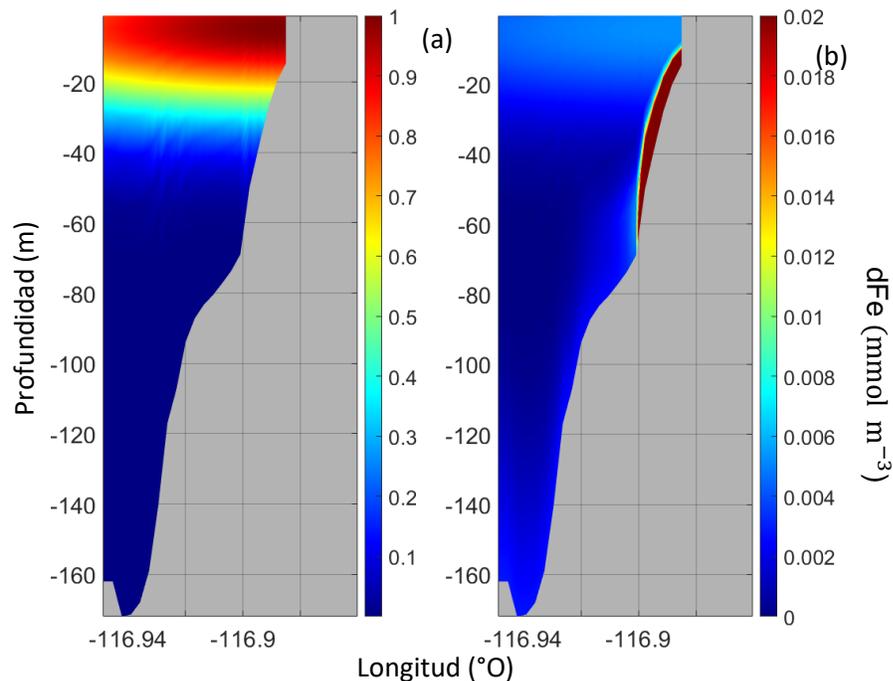


Figura 6. Frontera norte del modelo, adaptación para el experimento “North-current”: (a) distribución exponencial con máximo superficial; (b) concentraciones de dFe para el día 2 de la simulación.

2.3.5 Experimento de aporte de hierro asociado a la surgencia costera (“Upwelling”)

En este experimento se busca simular el aporte de hierro por eventos de surgencia costera, por lo que se incrementan las concentraciones de dFe de acuerdo con los periodos de surgencia dentro del modelo. Se identifican los periodos con base en una serie de tiempo de promedios espaciales para todo el dominio del bombeo de Ekman (W_E), el cual es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$W_E = \frac{1}{\rho_w f} \nabla \times \vec{\tau}, \quad (14)$$

donde, $\rho_w = 1025 \text{ kg m}^{-3}$ es la densidad del agua de mar, f es el parámetro de Coriolis y $\vec{\tau}$ es el vector del esfuerzo del viento.

A continuación, se genera una segunda serie de tiempo a partir de los valores de W_E donde se determinan los periodos de surgencia. Para simplificar el experimento se decidió que cuando $W_E > 0$ hay surgencia y cuando $W_E < 0$ no hay surgencia. En los periodos que hay surgencia en lugar de calcular las concentraciones de hierro a partir de una relación oceánica, como en el experimento de “Limit”, se calcula la concentración a partir de relación $16.5 \text{ nmol } \mu\text{mol}^{-1}$ para fuera de la bahía en periodos de surgencia (Delgadillo-Hinojosa et al., 2020).

2.3.6 Experimento de aporte de hierro asociado a los vientos de Santa Ana (“SAW”)

En este experimento se busca simular el aporte de hierro por el viento durante eventos de SAW, por lo que se impone un aporte superficial en el dominio del modelo. Los aportes de hierro en las fronteras son de acuerdo con lo descrito en el experimento de “Limit”. En este experimento se imponen flujos superficiales de hierro de $0.44 \text{ } \mu\text{mol Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ durante los eventos de SAW (Félix-Bermúdez et al., 2017). Primero se realiza un análisis para determinar los periodos, para esto se obtienen datos de dos estaciones meteorológicas, una ubicada en la presa Enrique López Zamora (PELZ) y la segunda en el CICESE, en Ensenada Navarro-Olache et al. (2021) describe que los SAW presentan las siguientes condiciones: humedades relativas menores a 50%; aumentos drásticos de temperatura y velocidad del viento con

dirección suroeste. Después de elegir los eventos, se impone el flujo superficial de hierro de forma exponencial, con la mayor concentración en Punta Morro (Figura 7).

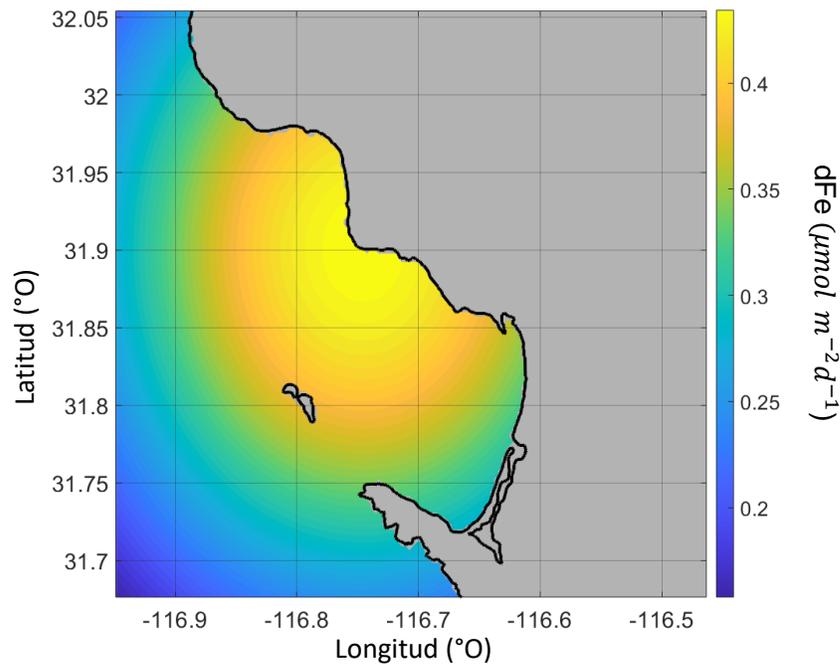


Figura 7. Aporte superficial de hierro para el experimento de “SWA”: distribución tipo exponencial con máximo en Punta Morro.

2.3.7 Experimento de los aportes de hierro en la BTS (“Inputs_BTS”)

En este experimento se busca simular todos los aportes de dFe dentro de la BTS y la limitación por hierro, por lo que en este experimento se incluyen todos los aportes antes mencionados y la configuración del experimento “Limit”. En el caso de las fronteras se suma el aporte del experimento “North-current” y “Upwelling”, mientras que a nivel superficial se incluye el flujo de hierro por los eventos de los SAW.

2.3.8 Análisis de los transportes de nutrientes

Un importante factor en la BTS es el flujo de nutrientes, por lo que para entender el comportamiento de los aportes se calculan los transportes de nutrientes. En un principio se calcula el flujo de NO_3 en las fronteras y el transporte vertical dentro de la bahía, con el fin de entender los aportes por surgencia costera. Por otro lado, se calcula el transporte vertical a lo largo de dos secciones, que corresponden a la entrada y salida del flujo de la bahía (Figura 3), para analizar el balance de nutrientes.

El transporte de volumen se calcula para cada paso de tiempo de la siguiente manera:

$$T_V = \int_A V \, dA, \quad (15)$$

donde A es el área a lo largo del transecto o capa de profundidad, y V es la velocidad del flujo a través de dicha área.

El transporte de la variable biogeoquímica es:

$$T_V = \int_A VB \, dA, \quad (16)$$

donde B puede ser N, P o dFe.

En el primer análisis de las simulaciones previas se calcula el transporte de NO_3 para las fronteras abiertas del modelo. Para ello se crean tres transectos verticales paralelos a las fronteras abiertas del dominio del modelo (líneas negras discontinuas en la Figura 3), con una distancia de seis puntos de malla para evitar incongruencias numéricas. Se calcula el flujo de nutrientes de manera independiente para cada sección, luego se suman los flujos y se crea una serie de tiempo del transporte de NO_3 . En el caso del transporte vertical se calculó el flujo de nutrientes a través del área horizontal a 30 m de profundidad, para el interior de la BTS. Por otro lado, se establecieron dos secciones verticales, las cuales corresponden a la entrada y salida de la bahía (Figura 3). Esto se llevó a cabo para observar el balance de nutrientes dentro de la bahía. A partir de los transportes a través de ambas secciones se calculó el balance de nutrientes a lo largo del periodo.

2.4 Validación del modelo

Para evaluar la veracidad de las simulaciones se realiza una comparación con datos satelitales y trabajos previos que reportan la presencia de la limitación y la fertilización del dFe, ya sea a partir de observaciones *in situ*, hidrografía, satélite o de simulaciones numéricas. Los modelos NPZD expresan las concentraciones

de las variables en concentraciones de N, lo que no es necesariamente conveniente cuando se compara con los datos satelitales (chl-a), por lo que las concentraciones del fitoplancton se traducen a unidades de chl-a (mg m^{-3}), a lo que se refiere en este escrito como biomasa fitoplanctónica. Estos valores se obtienen multiplicando la abundancia de nitrógeno-fitoplancton por una relación de chl-a:N de $1.325 \text{ gchl-a molN}^{-1}$ (derivada de la relación de Redfield C:N de $6.625 \text{ molC molN}^{-1}$ y una relación C: chl-a de $60 \text{ gC gchl-a}^{-1}$) [e.g. Fiechter et al., 2009; Cruz-Rico y Rivas, 2018].

Por otro lado, se realizan mapeos horizontales de los datos satelitales y datos modelados para comparar la biomasa fitoplanctónica (Anexo A). Para la validación de los periodos de limitación y fertilización se lleva a cabo una revisión de eventos de aportes de dFe a través de índices de surgencia y trabajos que reporten el aporte de los SAW. Además, se incluye un análisis de los datos modelados: cálculo de los transportes de nutrientes, mencionados en la sección anterior; descripción de las diferencias entre las series de tiempo, buscando un patrón de similitud con los datos satelitales; obtención de señales asociadas a cada experimento del NO_3 y del fitoplancton, buscando analizar la utilización de NO_3 y compararla con Si_{ex} ; y cálculo de la relación dFe: NO_3 de los datos modelados. Cabe mencionar que las series de tiempo del fitoplancton para cada experimento son generadas a partir de los promedios dentro de los primeros 30 m, utilizando datos correspondientes al interior de la BTS (Figura 3). En el caso de la comparación entre los datos satelitales y los modelados, se calcula el promedio espacial de los datos satelitales para una región similar al dominio del modelo de la bahía, mientras que para los datos del modelo se realiza un promedio espacial de los datos superficiales. En el caso de las series de las señales asociadas a cada experimento, se le resta el experimento control de limitación ("Limit"). Además, se genera una serie con la diferencia entre las concentraciones de NO_3 del experimento "SAW" y el experimento "Upwelling". En el caso de las series de la relación dFe: NO_3 , las series se generan a partir de los promedios espaciales de los nutrientes superficiales dentro de la BTS.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Datos de simulaciones previas

En los trabajos realizados por Dorantes-Gilardi y Rivas (2019) y Cruz-Rico y Rivas (2018), se observan varios periodos con diferencias importantes entre los datos satelitales y los modelados, como se ha mencionado anteriormente (Figura 2). En este trabajo se realiza una revisión más exhaustiva de las series de tiempo mensuales de las concentraciones de biomasa fitoplanctónica: picos más pronunciados en los datos modelados que no se observan así en los datos satelitales, a pesar de la presencia de surgencia; en ocasiones sucede lo opuesto, los datos satelitales muestran picos de biomasa fitoplanctónica aun sin la presencia de surgencia. En el inicio de esta investigación se buscó mejorar la variabilidad de la biomasa fitoplanctónica en diferentes periodos para la BTS (Figura 2), pero debido al alcance de este estudio se decidió enfocarse en la primera mitad del 2011 debido que presentaba las diferencias antes mencionadas. Cabe recalcar que se identificaron cuatro años con diferencias muy notorias: 2007, 2009, 2011 y 2016, principalmente en verano, que corresponden a periodos con presencia de surgencia costera y ausencia de SAW; de forma inversa se identificaron periodos similares en primavera y otoño, que son los periodos en los cuales se presentan los SAW, además de ser picos muy dramáticos con duración de apenas unos cuantos días.

A lo largo de las tres simulaciones se pudo observar que la serie con mayor correlación era la del modelo regional de Cruz-Rico y Rivas (2018) con $r=0.53$ respecto a los datos satelitales de la primera mitad del 2011, mientras que para la simulación del modelo de la BTS ésta es de $r=0.43$ y en el caso de las simulaciones del modelo regional de Dorantes-Gilardi y Rivas (2019) es de $r=0.26$. Estos trabajos utilizaron diferentes forzamientos de viento y comprenden diferentes periodos. Así mismo, al realizar una comparación de los datos de viento del modelo con respecto a datos de boyas se obtuvo que el modelo que mejor representaba el 2011 era el modelo regional de Cruz-Rico y Rivas (2018), esto con el fin de validar la surgencia costera. Cabe recalcar que el modelo regional de Dorantes-Gilardi y Rivas (2019) representa mejor la surgencia costera a largo plazo, durante 15 años de datos. Debido a estos resultados se eligió el modelo de Cruz-Rico y Rivas (2018) para este periodo de estudio, no obstante, es importante mencionar que el modelo en esta tesis no representa de la mejor manera la surgencia costera y se puede mejorar el aporte de nutrientes asociado a este proceso mediante un mejor forzamiento del viento, tanto para el modelo de la BTS y el modelo regional., pero está fuera del alcance de esta tesis.

En el análisis de simulaciones previas se identificaron diferencias entre los datos satelitales y los modelados (Figura 2) pero no con tanta claridad. Por ello, se realiza un análisis con una mayor resolución espacio-temporal (Figura 8a). Por otra parte, los eventos de los SAW son de menor escala, con duración menor a una semana (Navarro-Olache et al., 2021), razón por la cual no se podrían evaluar estos eventos en un análisis mensual, a su vez los eventos de surgencia costera también suelen tener periodos menores. Por esto se decidió realizar un primer análisis de las series de tiempo con una resolución temporal de 8 días (Figura 8a) con base en los productos satelitales, ya que en muchas ocasiones debido a la nubosidad no hay datos, y algunos productos satelitales son generados a partir de un promedio de ocho días. Además, se incluyen series de la suma de los transportes de NO_3 en las fronteras abiertas (Figura 3, líneas negras discontinuas) para comparar el aporte de nutrientes que se relaciona con la surgencia costera. Los transportes de NO_3 con valores positivos significan un flujo de entrada al dominio del modelo de la BTS, y un flujo de salida para los valores negativos (Figura 8b). También incluimos series de dos índices de surgencia costera, para realizar una comparación con los datos simulados.

Las principales diferencias se presentan en la primera mitad del 2011, en el que se identifican cuatro periodos: el primer periodo (P1) corresponde al periodo sin surgencia costera en el modelo; el segundo (P2) y tercer periodo (P3) corresponden a periodos con baja limitación; y el cuarto periodo (P4) corresponde al periodo con máxima limitación (Figura 8).

El primer paso fue validar los picos de abundancia de fitoplancton por medio de los aportes de nutrientes atribuidos a las surgencias costeras, ya que el forzamiento del modelo no siempre corresponde a los vientos presentes en los datos observacionales (boyas e índices de surgencia). En la serie de los productos satelitales se observa un pico de chl-a en el P1, mientras que en las simulaciones este pico no se observa con tanta intensidad (Figura 8a). En este evento los transportes de NO_3 indican un flujo de entrada de nitrógeno que se presenta en días posteriores (Figura 8b), y en los índices de surgencia se observa un aporte previo a los transportes (Figura 8c). En el P2 y P3 se observa el mismo comportamiento en los índices de surgencia, en el transporte de nitrógeno en las fronteras y en los productos satelitales, mostrando incrementos y decrementos. En los datos modelados solo se observan picos de fitoplancton sin un decremento, lo cual sugiere que el modelo no responde con la misma rapidez a la falta de nutrientes, o tal vez se podría atribuir a una limitación del hierro. En el caso del P4, en los datos modelados se presenta un gran pico de fitoplancton que corresponde al flujo positivo de nutrientes de las fronteras; esto se corrobora en los índices de surgencia, pero los productos satelitales indican concentraciones muy bajas de chl-a, por lo que se atribuye a una limitación por hierro.

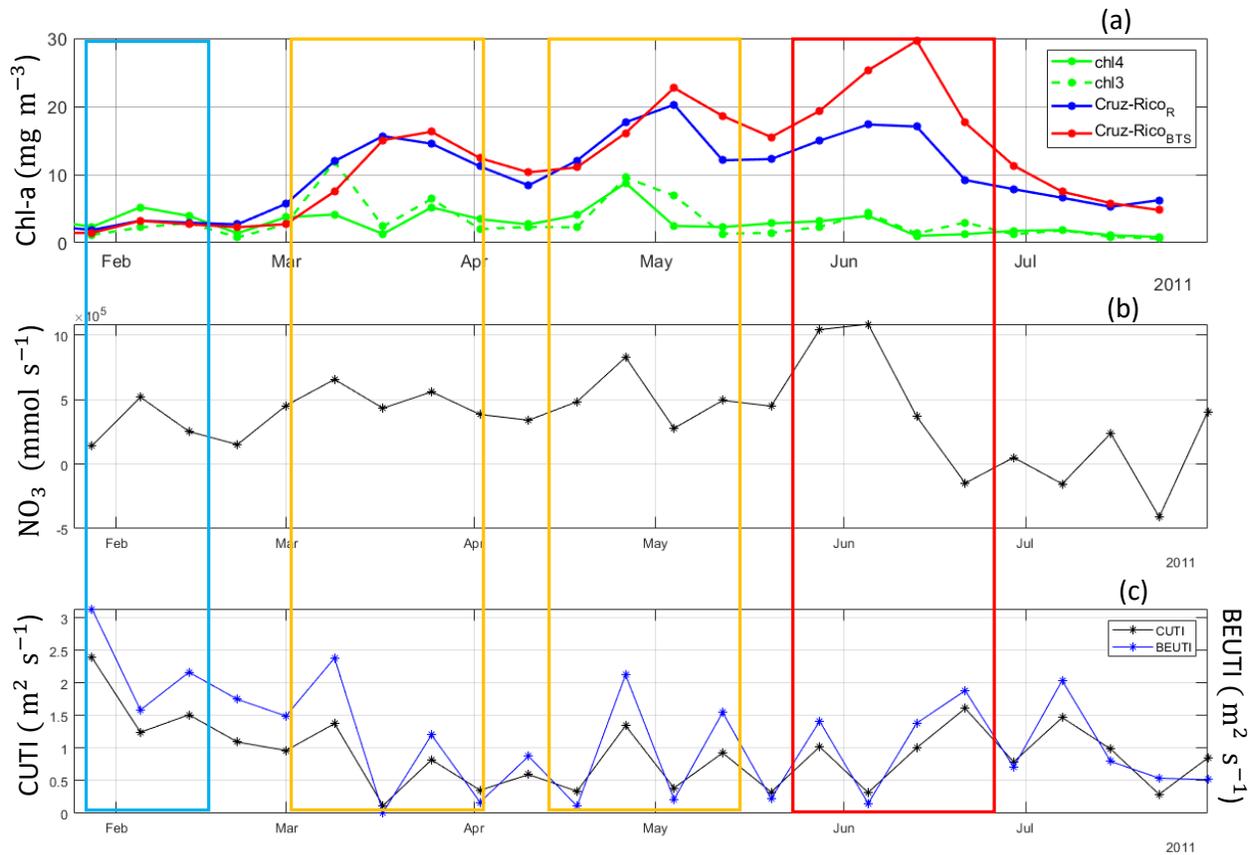


Figura 8. Series de tiempo de promedios de ocho días de índices físico-biogeoquímicos. (a) Promedios espaciales dentro del dominio del modelo numérico: producto satelital de chl-a de nivel 3 (línea verde) y nivel 4 (línea negra); y datos del modelo regional (línea azul) y datos del modelo de la BTS (línea roja) de simulaciones previas (Cruz-Rico y Rivas, 2018). (b) Suma de los transportes de NO_3 de las fronteras abiertas del modelo. (c) Índices de surgencia. Los rectángulos delimitan los periodos de interés: (P1) primer periodo (rectángulo azul), (P2) segundo periodo (rectángulo amarillo), (P3) tercer periodo y (P4) cuarto periodo (rectángulo rojo).

3.2 Adaptaciones experimentales

En las simulaciones de la BTS realizadas por Cruz-Rico y Rivas (2018) se observan concentraciones de biomasa de zooplancton muy bajas, prácticamente nulas, lo cual es una incongruencia ya que el zooplancton no está aportando significativamente al pastoreo (Figura 9b, línea negra). Cabe recalcar que validar las biomásas de zooplancton no es una tarea fácil, puesto que calcular y comparar las concentraciones de biomasa del zooplancton de concentraciones *in situ* es complicado metodológicamente, debido a que las unidades del zooplancton en el modelo numérico son mmol N m^{-3} , y en las observaciones *in situ* se reportan de diferente forma según cada trabajo de investigación. Se puede observar a lo largo de varias investigaciones de modelación que las concentraciones de zooplancton casi nunca son validadas, debido a esto y otras dificultades técnicas. Sin embargo, en este trabajo se busca mejorar las simulaciones aumentando el pastoreo, debido a su existencia casi nula.

El primer paso que se realizó fue actualizar los parámetros del modelo NPZD a unos más congruentes al área de estudio. El segundo fue hacer una revisión bibliográfica de las concentraciones de zooplancton que correspondieran al sur del CCS. Chenilliat et al. (2021) por medio de un análisis de simulaciones numéricas en la SCB propuso diferentes relaciones de [Z:P], de acuerdo con estas relaciones se generaron diferentes experimentos. En los resultados de esta tesis los experimentos que muestran tener más congruencia con el área de estudio son el “A7” y el “A8”, descritos en la sección 2.3.2. La relación [Z:P] utilizada para el experimento “A7” es propuesta por dichos autores a partir del cálculo de concentraciones de biomasa de carbono (mmol C m^{-3}) de datos *in situ* colectados en el programa de monitoreo de CalCOFI, línea 90, perteneciente a la SCB. Por otro lado, el experimento “A8” es realizado con una relación [Z:P] obtenida a partir de diferentes análisis de datos de salida de un modelo numérico de pastoreo, descrito por los mismos autores, donde sugieren que es la relación más adecuada para la SCB. En los experimentos “A7” y “A8” se puede observar la contribución del pastoreo, al tener más zooplancton se reduce la biomasa de fitoplancton (Figura 9). De acuerdo con la sugerencia de Chenilliat et al. (2021), se decide elegir la relación del experimento “A8”, además de mostrar mínimas diferencias entre ambos experimentos.

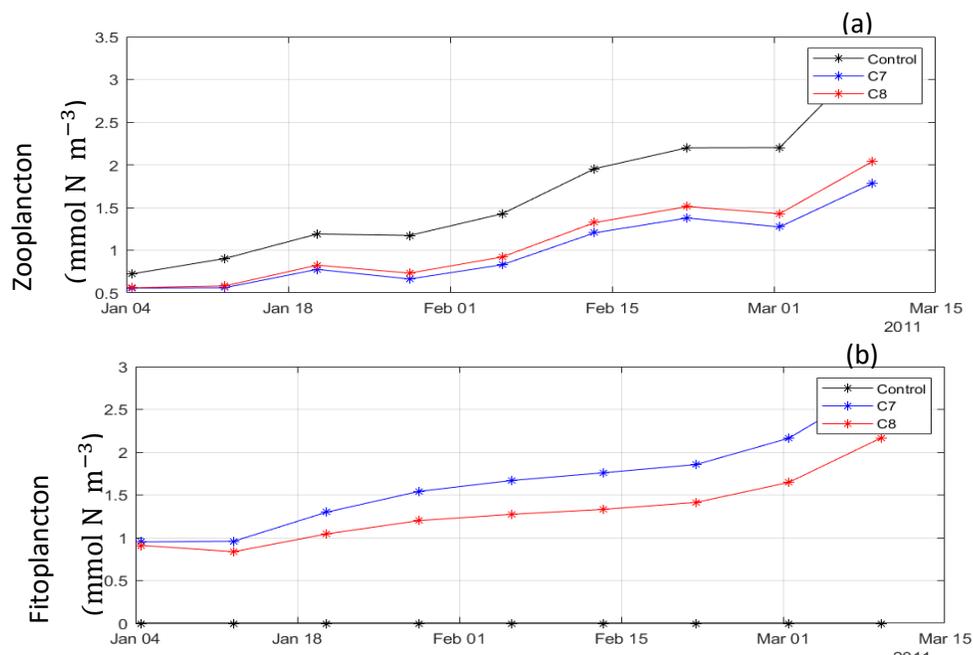


Figura 9. Series de tiempo de promedios superficiales dentro de la BTS de las concentraciones de (a) fitoplancton (mmol N m^{-3}) y (b) zooplancton (mmol N m^{-3}).

De acuerdo con los resultados previos, se realizó una nueva simulación de “Control” para el modelo NPZD donde aumenta el pastoreo (descrita en la sección 2.3.2). Por consiguiente, se puede observar que la biomasa fitoplanctónica es mucho menor y con mayor similitud al producto satelital (Figura 10), además

de ser más congruente con un modelo NPZD en el que el zooplancton contribuye a la variabilidad del fitoplancton. A partir de estos resultados, se usa esta nueva configuración para las siguientes simulaciones.

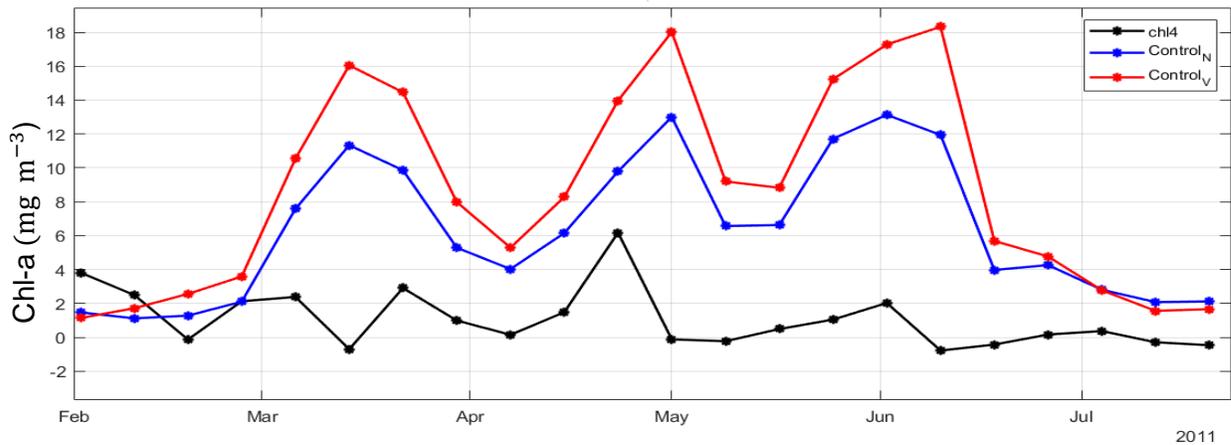


Figura 10. Series de tiempo de promedios espaciales de las concentraciones de biomasa fitoplanctónica para el dominio del modelo de la BTS: producto satelital de chl-a de nivel 4 (línea negra), simulación del modelo biológico NPZD con las adaptaciones experimentales (línea azul), simulación del modelo biológico NPZD (línea roja) con la configuración descrita por Cruz-Rico y Rivas (2018).

3.3 Modelación Físico-biogeoquímica con limitación de hierro

En la simulación con el modelo de limitación de hierro se observa que las concentraciones de fitoplancton son muy bajas, como lo mencionan Fiechter et al. (2009). Debido a que el hierro inicial es consumido en los primeros días de la simulación y sin ningún aporte adicional de dFe se obtiene una simulación con una excesiva limitación por hierro (descrita en la sección 2.3.3), como se puede ver en las series de tiempo del experimento “Limit” (Figura 11, línea azul). Es importante mencionar que las concentraciones de fitoplancton posterior al primer mes empiezan a aumentar debido a la remineralización del hierro, ya que por medio de la surgencia vuelve a haber disponibilidad de dFe a nivel superficial aunque no existan otros aportes de hierro.

La BTS tiene influencia de la CC en la circulación y en el aporte de nutrientes de acuerdo a diferentes autores (Calva-Chavez, 2014; Delgadillo-Hinojosa et al., 2015; Mateos et al., 2009), aunque Flores-Vidal et al. (2018) mencionan lo contrario, por lo que se propone el experimento “North-current” (descrito en la sección 2.3.4). En la serie del fitoplancton se observa un aumento mínimo a las concentraciones (Figura 11, línea verde), lo cual sugiere que el aporte de dFe atribuido a la CC; según estos resultados, este aporte es mínimo excepto en ciertos periodos de intensificación de la corriente, pero aun así el aumento es muy bajo.

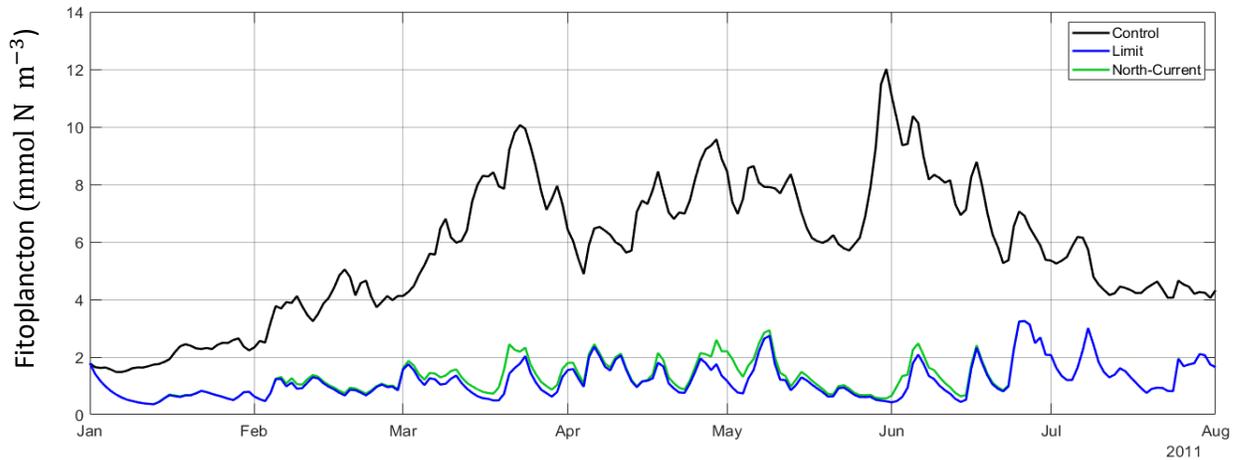


Figura 11. Experimento “North-current”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (mmol N m^{-3}) dentro de la BTS para los primeros 30 m.

En el experimento de “Upwelling” se obtuvieron los periodos de aporte de $d\text{Fe}$ para las fronteras abiertas a partir del W_E (descrito en la sección 2.3.5). A lo largo del periodo de estudio el W_E es positivo durante 178 días (Figura 12), que corresponden a los transportes de NO_3 en las fronteras (Figura 8b). El W_E tiene diferente intensidad en cada periodo, pero para simplificar el experimento aquí se limita a imponer en las fronteras un aporte constante que no depende de la intensidad del W_E . Por lo que en la serie si el $W_E > 0$ entonces el $d\text{Fe}$ se obtiene a partir de la relación $16.5 \text{ nmolFe mmolN}$ y si el $W_E < 0$ entonces el valor se obtiene a partir de una relación para aguas oceánicas (Figura 12b).

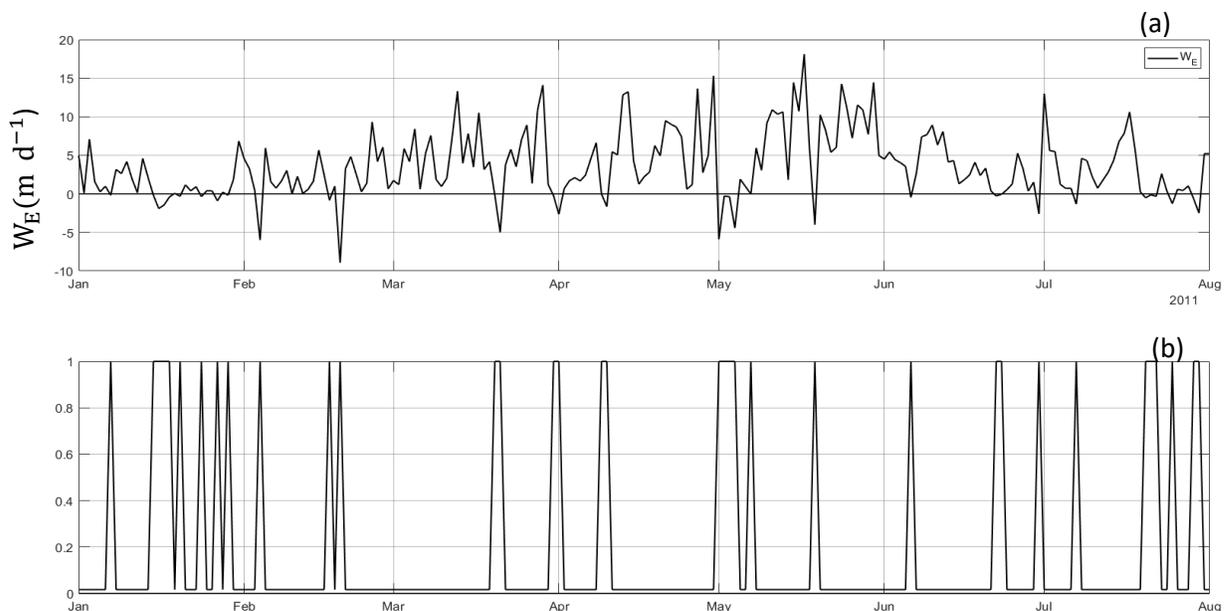


Figura 12. Adaptaciones experimentales para el experimento “Upwelling”: (a) serie de tiempo del promedio espacial del W_E para el dominio de la BTS y (b) periodos de aporte de $d\text{Fe}$ a través de las fronteras abiertas a partir de la relación $16.5 \text{ nmolFe mmolN}$.

La surgencia costera es una importante fuente de nutrientes en este experimento, tanto para el nitrato como para el dFe. Este experimento tiene una gran similitud con el de “Control” pero con concentraciones más bajas de fitoplancton, ya que las concentraciones de dFe aportadas por la surgencia no son suficientes como para que solo el NO_3 module la limitación (Figura 13). Los aportes de dFe por surgencia costera tienen diferente impacto en los periodos de interés, si bien los aportes no cambian debido a la intensidad del W_E , varían de acuerdo con las concentraciones del NO_3 . En el P1 se observan concentraciones bajas de fitoplancton, ya que el periodo de aporte del dFe corresponde al mismo periodo del NO_3 , y como se mencionó anteriormente en las simulaciones se observa la surgencia con un retraso y con menor intensidad. En el P4 se muestran las concentraciones más altas de fitoplancton, lo que no concuerda con la hipótesis planteada en la cual se menciona que para este periodo se observaba una limitación por hierro. Cabe recalcar que este experimento solo tiene aportes de dFe por surgencia costera, que además son calculados a partir del NO_3 y no se consideran otros aportes. Ciertamente este experimento muestra concentraciones mucho mayores al experimento “Limit”, lo cual indica que el aporte de dFe asociados a la surgencia costera es elevado.

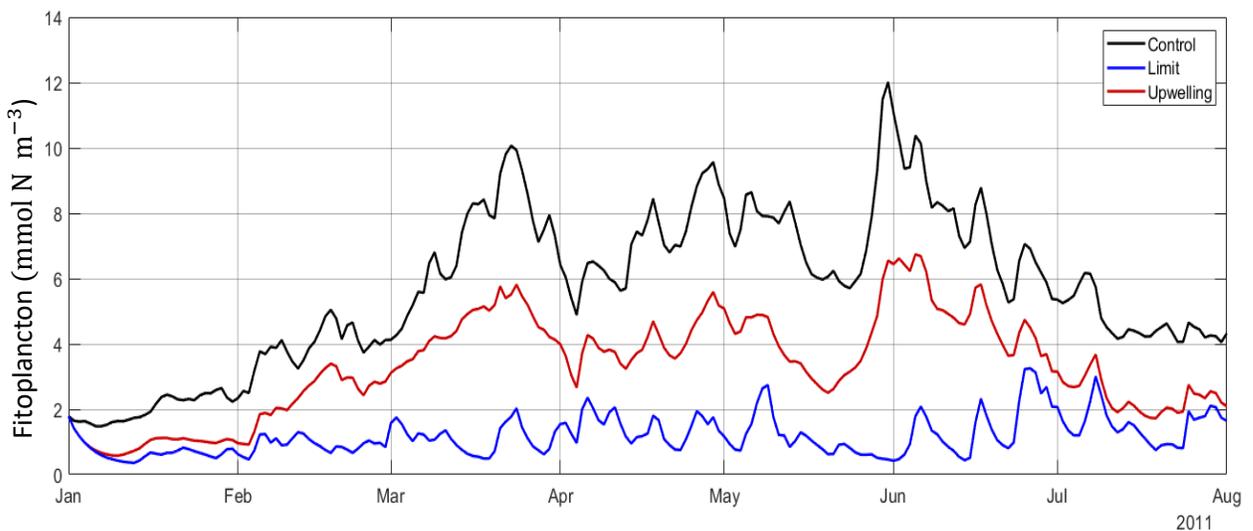


Figura 13. Experimento “Upwelling”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (mmol N m^{-3}) dentro de la BTS para los primeros 30 m.

En el experimento “SAW” se definen tres eventos representativos, tanto por su intensidad observada en las series de tiempo como por su duración (descrito en la sección 2.3.6). En el mes de enero también se muestran algunos eventos, pero debido a que se definieron los principales periodos antes mencionados, éstos no se incluyeron en el análisis. El primer evento observado se dio durante los primeros días de

febrero, cuando la humedad relativa (Figura 14b-c) es menor a 50% en ambas estaciones, incluso es el menor porcentaje durante toda la serie de los datos de la estación del CICESE. La temperatura tiene un aumento (Figura 14b-d) pero es más notorio en la estación PELZ, además de que el viento se intensifica hacia el suroeste. El segundo evento se presenta en los primeros días de marzo, en el caso de la humedad relativa de la estación PELZ los valores disminuyen pero no llegan a ser menores al 50% (Figura 14a), mientras que para la estación del CICESE los valores alcanzan aproximadamente el 20% (Figura 14c). La temperatura tiene un incremento marcado en ambas series (Figura 14b-d) y el viento presenta una ligera intensificación hacia el suroeste. Para el tercer evento solo se tienen datos de la estación PELZ; en el caso de la humedad relativa se presenta un decremento muy marcado (Figura 14a), además de observarse un aumento muy drástico de la temperatura de casi 10 °C, incluso mayor que los otros dos eventos (Figura 14b). A su vez se realizó una comparación con series de tiempo de la depositación de hierro y el factor de enriquecimiento por hierro atmosférico en la BTS, generadas en el trabajo de Felix-Bermúdez et al. (2017), donde el mayor enriquecimiento corresponde a los periodos de los SAW antes mencionados.

En los resultados del experimento “SAW” se refleja el aporte dramático de dFe en el aumento de las concentraciones de fitoplancton, disminuyendo la limitación no solo durante esos periodos, sino que tienen impacto durante varias semanas, pero comportándose de diferente forma según el evento a pesar de que las concentraciones que aportan los SAW en los experimentos es la misma, descrito en la sección 2.3.6. En el P1 no hay un incremento tan alto de fitoplancton, lo cual se atribuye a la limitación por NO_3 , debido a que la surgencia modelada no corresponde al evento observado en los datos satelitales, como se mencionó en la sección 3.1. En el P2 el aporte de dFe por “SAW” incrementa bruscamente las concentraciones de fitoplancton, éstas llegan a ser casi iguales que las del “Control”. Asimismo, es interesante que a pesar de que el aporte de dFe es durante la primera semana del P2, las concentraciones de fitoplancton se mantienen elevadas durante todo el mes, disminuyendo por la limitación de NO_3 , ya que incluso durante los primeros días de abril se presenta un pequeño aumento debido al aporte de NO_3 y del dFe que no se ha consumido. En el P3 la respuesta del fitoplancton se presenta de forma diferente, ya que aumenta drásticamente en comparación a los picos anteriores, inclusive llega a superar al experimento “Control”. Sin embargo, este pico tiene una menor duración, lo que se puede atribuir a la limitación de NO_3 ya que el experimento “Control” también decae en estos días. Por último, en el cuarto pico no se tiene ningún aporte de hierro por lo que las concentraciones son excesivamente bajas, similares al experimento “Limit”.

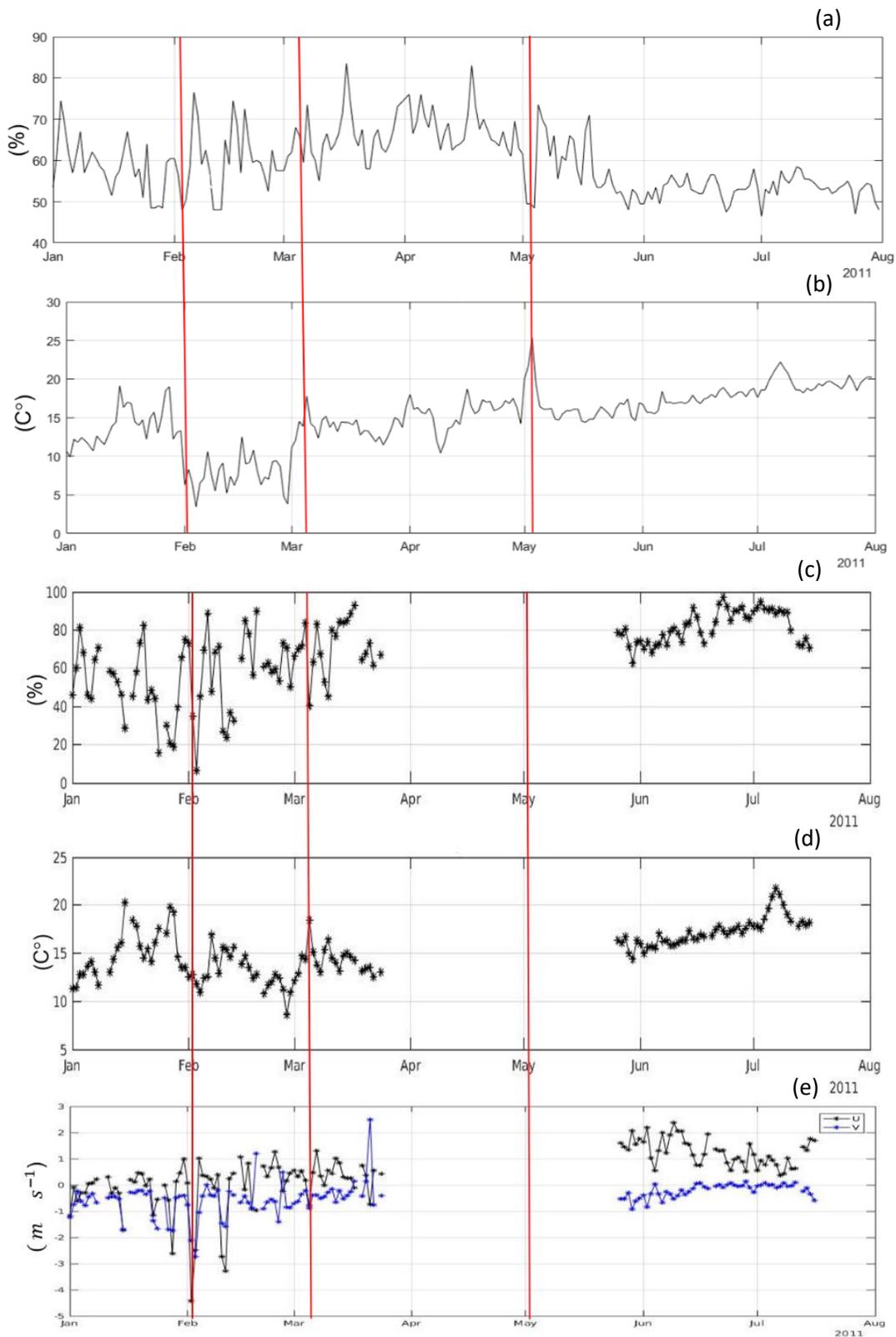


Figura 14. Condiciones meteorológicas en la BTS para el periodo simulado. Datos de la estación meteorológica de PELZ: (a) humedad relativa (%) y (b) temperatura (°C). Datos de la estación meteorológica del CICESE, (d) humedad relativa (%), (d) temperatura (°C) y (e) componentes del viento ($m s^{-1}$). Las líneas rojas corresponden a los eventos de los SAW.

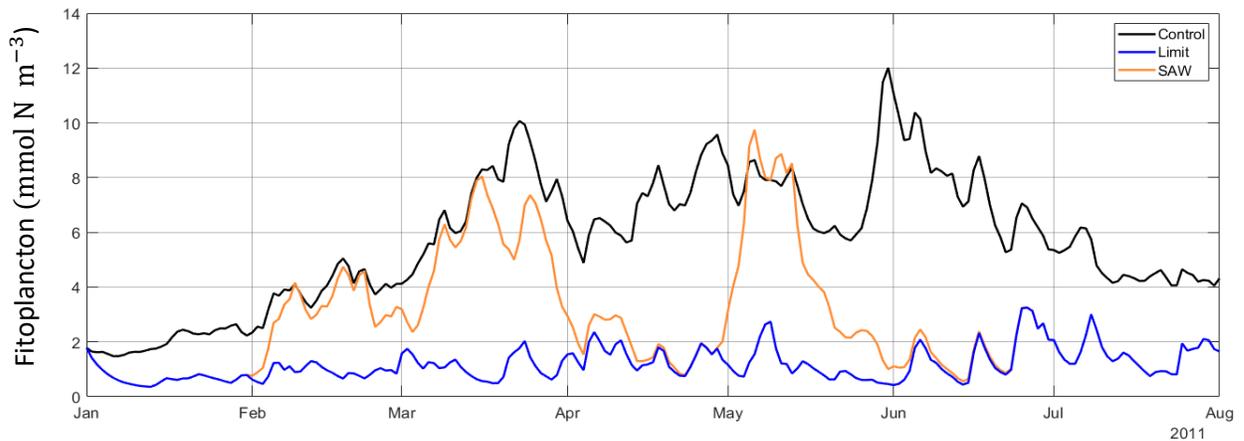


Figura 15. Experimento “SAW”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (mmol N m^{-3}) dentro de la BTS para los primeros 30 m.

En el experimento “Inputs-BTS” se observa que el fitoplancton tiene una limitación moderada (descrito en la sección 2.3.7), no tan excesiva como el caso del experimento “Limit” (Figura 16). Las concentraciones de fitoplancton son principalmente debidas a los aportes de dFe por los SWA y por surgencia costera, ya que el aporte por la CC es mínimo. En el experimento “Inputs-BTS” se observan los picos de fitoplancton identificados en la simulación previa (Figura 8a) pero con aumentos más dramáticos. Estas diferencias son debidas a todas las modificaciones realizadas, desde los cambios realizados al modelo NPZD como al modelo de limitación por hierro. En el P4 no se observa una limitación excesiva, a pesar de no tener un aporte por los SAW, pero hay aporte de dFe debido a la surgencia costera y a la CC. En comparación con el experimento “Control” y de “Upwelling” este pico de fitoplancton es mucho menor al P2 y el P3. Es importante mencionar que este experimento es la propuesta de este trabajo para la modelación

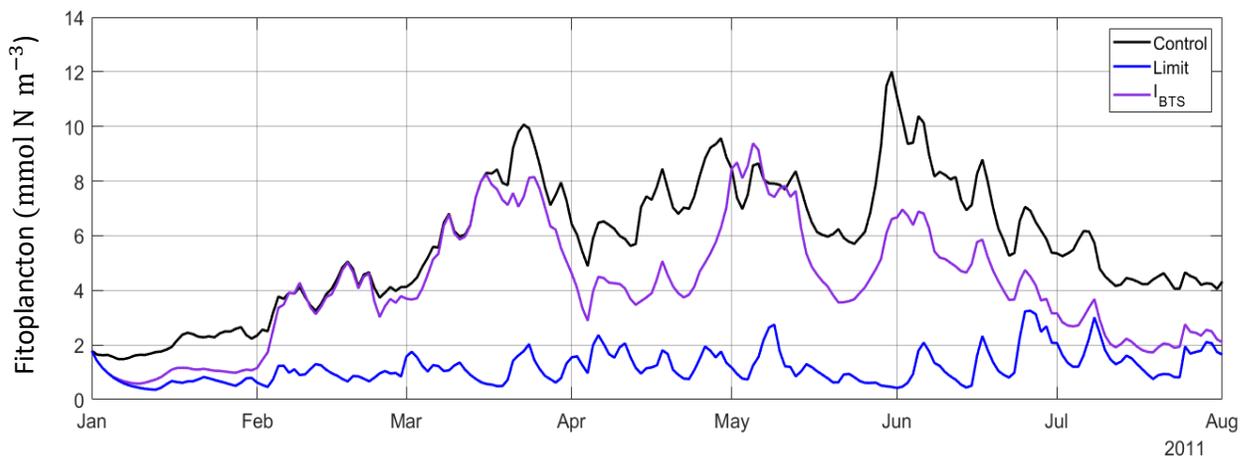


Figura 16. Experimento “Inputs-BTS”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (mmol N m^{-3}) dentro de la BTS para los primeros 30 m.

biogeoquímica de la BTS, debido a que como ya se mencionó, existe una limitación por hierro pero bajo ciertas condiciones, dado que un modelo con limitación de nitrógeno mantiene concentraciones muy altas de fitoplancton y los experimentos de limitación por hierro de manera individual no describen las concentraciones de fitoplancton, sino que es el conjunto de todos los aportes de dFe.

3.4 Transportes de nutrientes

Las series de los transportes verticales de NO_3 en los primeros 30 m no muestran diferencias significativas, mostrando que entre los experimentos no hay diferencias en el aporte de nitrógeno ascendente dentro de la bahía. Pero en el caso de los transportes del dFe sí se observan diferencias en algunos periodos. En el experimento “Upwelling” se observan varias diferencias a lo largo de las series, sobre todo cuando el flujo es ascendente, el cual tiene mayor flujo positivo de dFe. En el caso del “North-current” son mínimas las diferencias. En el experimento de “SAW” ocurre lo inverso que en el experimento de “Upwelling”, la mayor diferencia se observa cuando el flujo es descendente, esto es debido a las altas concentraciones de dFe impuestas en la superficie, dada las altas concentraciones se exporta dFe a capas más profundas.

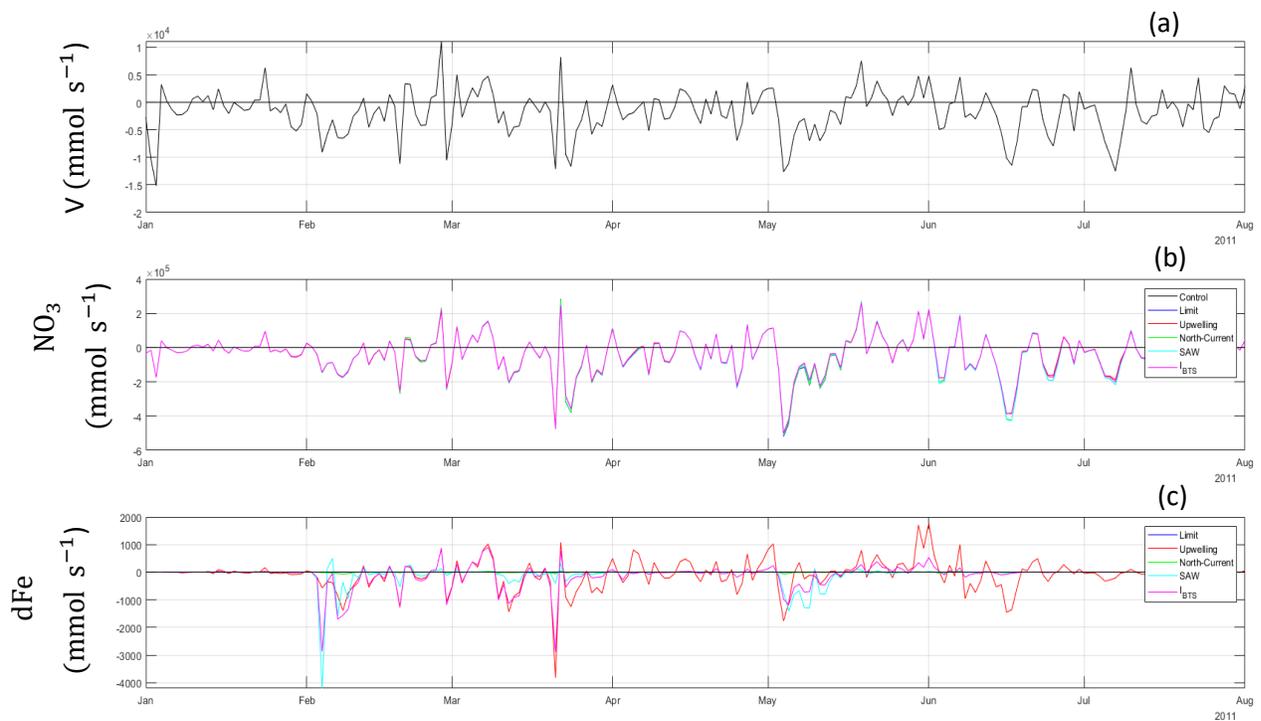


Figura 17. Series de tiempo de los transportes verticales en los primeros 30 m de profundidad dentro de la BTS: (a) transporte de volumen ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), (b) transporte de NO_3 (mmol s^{-1}) y (c) transporte de dFe (mmol s^{-1}).

En los transportes calculados en las secciones verticales se busca entender el balance de nutrientes para la BTS, por lo que se generaron series de las sumas entre ambas secciones. Los valores positivos significan mayor cantidad de concentraciones de nutrientes que entran a la bahía de los que salen y de manera inversa sucede con los valores negativos. En el caso del flujo de NO_3 se observa que las mayores diferencias se dan en el transcurso de los picos analizados (Figura 18a) pero con el mismo signo, por lo que se les atribuye a las concentraciones de NO_3 ya que dependiendo de la simulación hay mayor o menor limitación por hierro y cuando hay una mayor limitación de hierro aumentan las concentraciones de NO_3 porque no es consumido por el fitoplancton. En el caso de la serie del dFe se tienen mayores diferencias dependiendo del experimento: entre los experimentos “North-current” y “Limit” no hay diferencias; en el experimento “Upwelling” se tienen diferencias a lo largo de toda la serie de tiempo; mientras que en el experimento “SAW” las diferencias son muy dramáticas en los días que se tiene el aporte de dFe y va decayendo a lo largo del tiempo, 15 días aproximadamente.

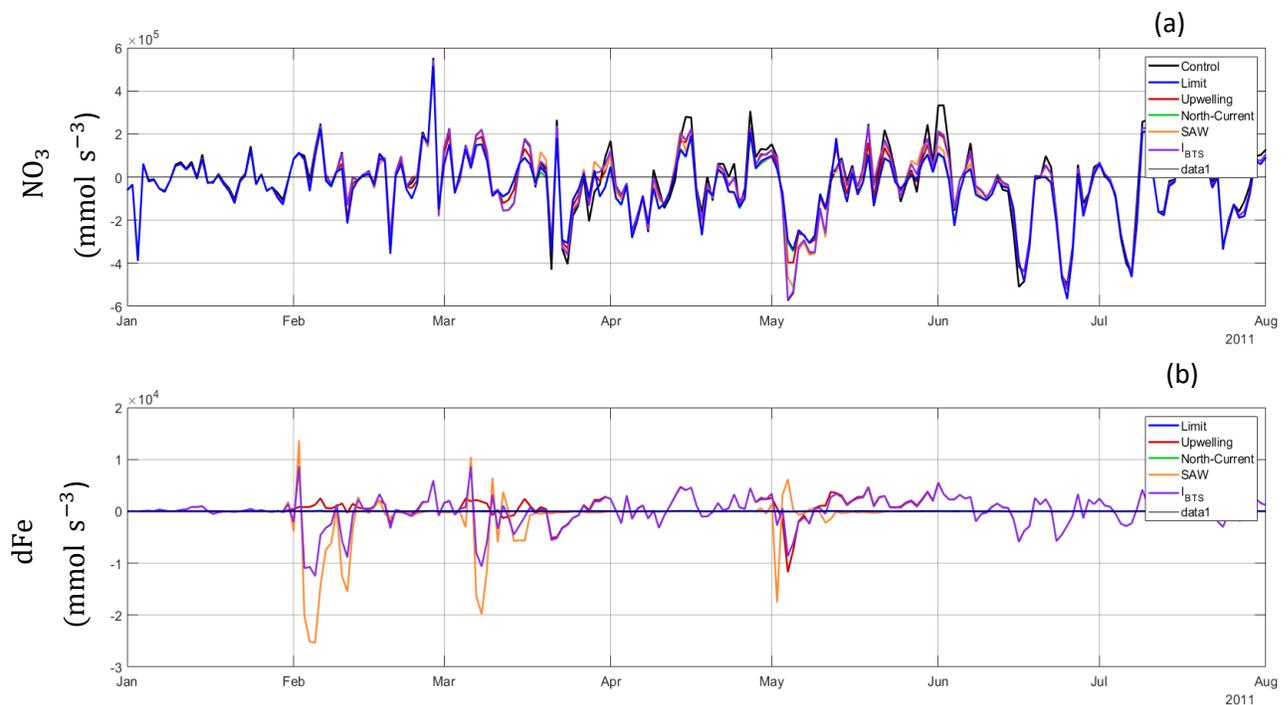


Figura 18. Series de tiempo de la suma entre los transportes de las secciones verticales: (a) transporte de NO_3 (mmol s^{-1}) y (b) transporte de dFe (mmol s^{-1}).

A partir de las series de sumas del flujo de nutrientes se calcula un promedio para cada experimento (tabla 5). En promedio hay mayor flujo de salida de NO_3 que de entrada para todos los experimentos dentro de la bahía, pero en los experimentos donde hay mayor limitación de dFe la magnitud es mayor; como se

menciona anteriormente, esto es debido a que hay mayores concentraciones de NO_3 . En los experimentos "Limit" y "North-current" hay un balance entre el dFe que entra con respecto al que sale. En el experimento de "Upwelling" hay un mayor flujo de entrada de dFe del que sale, esto puede indicar que los aportes de dFe no son suficientes como para que exista un exceso. De manera contraria sucede con los experimentos "SAW" e "Inputs-BTS", donde hay un mayor flujo de salida de dFe que el de entrada, lo que dice que hay demasiado dFe y no está siendo consumido. En el caso del "SAW", como se ve en las series, esto sucede de manera dramática en periodos cortos y esto dice que un evento es suficiente como para crear condiciones donde las concentraciones de dFe son tan altas que no hay una limitación por dFe. En el caso del experimento "Inputs-BTS" es interesante cómo el valor promedio es menor que el de "SAW", esto podría indicar que a lo largo de todo periodo el dFe es suficiente como para que no exista limitación.

Tabla 5. Promedios de la suma entre los transportes entre las secciones.

Experimento	Transporte de NO_3 (mmol s^{-1})	Transporte de dFe (mmol s^{-1})
"Control"	-25,239	
"Limit"	-44,300	4.48
"North-Current"	-44,120	2.13
"Upwelling"	-38,826	168.78
"SAW"	-36,808	-879.63
"Inputs-BTS"	-35,404	-326.44

Capítulo 4. Discusión

El modelo físico-biológico implementado permitió evaluar diferentes escenarios de aportes y limitación de hierro, ya que en trabajos previos se ha reportado co-limitación de nitrógeno y hierro para diferentes regiones del CCS. Los aportes de dFe se presentan de diferente forma a lo largo de este sistema, ya que dependiendo de la región varía la presencia e intensidad de los procesos que aportan dFe a la columna de agua (Figura 1). Incluso en diferentes partes del mundo se ha observado limitación por hierro a lo largo de la zona costera modificando uno de los paradigmas del siglo pasado, el cual planteaba que la limitación por hierro dentro de la costa no debería de ser importante debido al aporte continental. Las especies de fitoplancton se adaptan de diferente forma según la biodisponibilidad del dFe y en la actualidad se sabe que los paradigmas de co-limitación son mucho más complejos y que dependen de diversos factores de manera simultánea (Sunda y Huntsman, 1995; Watson, 2001).

En el centro de la CCS se han realizado varios estudios que explican gran parte del rol biogeoquímico del hierro dentro del ecosistema, tanto para aguas costeras como para aguas oceánicas. En estos ejemplos se mencionan diferentes aportes de dFe, principalmente asociados a grandes desembocaduras de ríos, resuspensión de sedimentos y surgencia costera (Bruland et al., 2001; Firme et al., 2003; Hutchins et al., 1998; Jhonson et al., 2001; Till et al., 2019). En el caso de la SCB se han reportado estudios de limitación por hierro a través de diferentes indicadores de limitación, la cual tiene gran cercanía al área de estudio de esta tesis compartiendo los mismos procesos físicos y aportes de las mismas masas de agua, lo que resulta en características fisicoquímicas similares (Bundy et al., 2016; King y Barbeau, 2011; King et al., 2012; Hogle et al., 2018; Shilova et al., 2020; White et al., 2022). En estos trabajos mencionan que no siempre se da la limitación por hierro y la intensidad es menor que en otras regiones donde sí hay una clara evidencia de esto, como las zonas HNLC (King y Barbeau, 2007). También existe un gran aporte de hierro atmosférico debido a los SAW perteneciente a los desiertos continentales (Félix-Bermúdez et al., 2017). En un mapa realizado por Pye (1987) se pueden ver los principales aportes de hierro atribuidos a los desiertos, en el cual se observa que solo se aporta hierro atmosférico al sur del CCS y no a las demás regiones. De acuerdo con este mapa, la zona de estudio analizada no debería de ser limitada por hierro debido a las altas concentraciones que esto genera.

Existen experimentos numéricos que muestran ejemplos de limitación, que dan otra perspectiva de los procesos dentro del CCS, como es el trabajo realizado por Fiechter et al. (2009) en el Golfo de Alaska, perteneciente al norte del CCS. Esta región es altamente productiva pero a su vez limitada por el bajo

aporte de dFe, sobre todo en aguas oceánicas. Por otro lado, en el norte de la CCS en la zona costera existen aportes provenientes de agua continental de manera constate. Otro ejemplo, es el trabajo realizado por Deutsch et al. (2020) donde muestran un mapa de limitación de hierro a lo largo de todo el CCS, que indica que la mayor limitación de hierro ocurre en el giro de Alaska, en aguas oceánicas, lo que coincide con los autores anteriores. A su vez muestran que en la zona costera a lo largo del centro del CCS y en la SCB existe limitación por hierro, pero en la zona de la BTS hay una mínima limitación. Es importante mencionar que implementan una fuente de dFe proveniente del sedimento basado en el flujo bentónico para todo su dominio, que incluso es mayor al aporte atmosférico que implementan, lo que es contrario a lo que aquí se propone. Sin embargo, es un modelo regional con un dominio mucho mayor al nuestro, por lo que es difícil comparar las propuestas de relajación de dFe realizadas por dichos autores con las implementadas en esta tesis.

A partir de los procesos identificados en la literatura para determinar las co-limitaciones de fitoplancton en la zona costera y a las simulaciones previas realizadas en la BTS, no queda claro si en la bahía existe una limitación por hierro ya que hay diferentes procesos que dificultan el entendimiento del rol de este micronutriente en la biogeoquímica de la bahía. Sin embargo, en este trabajo se demuestra que sí existe una co-limitación por hierro a través de experimentos numéricos basados en las observaciones del ecosistema dentro de la BTS, justificándolo más adelante.

El modelo de limitación propuesto por Fiechter et al. (2009) no describe la biomasa fitoplanctónica dentro de la bahía. En el caso del modelo de limitación sin relajación, se muestra una limitación excesiva (Figura 11, línea azul). Esto ya lo habían descrito los autores antes mencionados por lo que proponen una relajación constante sobre la plataforma continental. En la implementación de este modelo se tuvieron dificultades al elegir los parámetros adecuados al área de estudio, por lo que se hicieron suposiciones para obtener una estimación del K_{Fe} correspondiente a la BTS y posteriormente se hizo un análisis de sensibilidad de acuerdo con otros valores mencionados en la literatura con el fin de elegir la mejor configuración para la región de estudio (Anexo B). Al implementar el modelo de relajación en la bahía no queda claro cuál es la mejor configuración para la BTS (Anexo C), dado que hay una posible incongruencia en las unidades de la relajación del dFe en la descripción del módulo computacional del modelo. Esto sumado a que los aportes de dFe no son constantes en la zona de estudio, como lo menciona la literatura y lo que se ha visto en los resultados aquí mostrados. Por lo tanto, se descarta la implementación de esta relajación como factible para la modelación biogeoquímica en la BTS.

Los análisis realizados a nuestros experimentos se abordaron principalmente de dos formas: el primero con el fin de describir los procesos biogeoquímicos dentro de la BTS, a partir de la dinámica del dFe en los diferentes experimentos (Figura 19a); mientras que en el segundo busca validar el modelo de la BTS propuesto en esta tesis, en función de los valores superficiales de todo el dominio del modelo, para poder comparar con los datos satelitales e índices de surgencia (Figura 19b).

En la descripción de los procesos biogeoquímicos se observa que en el P1, como se ha mencionado, no se presenta surgencia costera en nuestro modelo, pero es importante analizarlo ya que en los productos satelitales se observa un pico de chl-a, que corresponde al primer aporte por los SAW. Debido a que el aporte de NO_3 no es suficiente en este periodo, la limitación es por el nitrógeno (Figura 19, recuadro azul). En el caso del P2 y del P3 se muestra una baja limitación debido al aporte por los SAW y surgencia costera, pero en el P2 se presenta el pico con mayor duración, ya que el aporte de surgencia es posterior al aporte de los SAW y el aumento se genera en días posteriores (Figura 19a). En comparación, en el caso del P3 los SAW se presentan cuando ya hay una surgencia costera, por lo que se genera un crecimiento más dramático y un pico inclusive mayor a la simulación "Control", que solo se observa en este periodo (Figura 19, línea amarilla). También se observa que en el experimento "Inputs-BTS" se da un aumento de biomasa fitoplanctónica antes del aporte por los SAW, sin embargo, existe un pequeño aporte por la CC que sumado con el aporte por surgencia costera explican este incremento, el cual es el uno de los pocos ejemplos donde el aporte de la corriente es relevante (Figura 19a, línea morada). En el P4 se presenta un claro ejemplo de escenario de limitación de hierro mencionado en la literatura (Figura 19, recuadro rojo), donde en presencia de surgencia costera no se observa un crecimiento tan elevado de biomasa fitoplanctónica, que coincide con los meses de verano en los cuales suele haber ausencia de los SAW o disminución de lluvias, con ello el aporte por ríos o escorrentías (Felix-Bermúdez et al., 2020; Bruland et al., 2001; King y Barbeau, 2011; Till et al., 2019).

En la validación del modelo de la BTS se calculó la biomasa fitoplanctónica de los experimentos, como se menciona en la sección 2.4, para compararlo con datos satelitales. Las simulaciones se comparan con dos productos satelitales, debido a que cada producto aporta información y ayuda a explicar las diferencias mencionadas. El producto satelital de nivel 3 explica correlaciones significativas para los experimentos, caso contrario del nivel 4, esto es debido a la metodología implementada para cada producto. De acuerdo con las comparaciones de índices de surgencia y campos de viento, el producto de nivel 4 explica de mejor forma el aporte por surgencia costera. Otra característica del nivel 4 es que tienen datos diarios para la región, lo cual no es posible por la presencia de nubosidad, por lo que utilizan varios métodos de interpolación para obtener estos datos. Este producto se utilizó en la primera parte del estudio, en la cual

se identifican las discrepancias entre los datos satelitales y los modelados por Cruz-Rico y Rivas (2018), lo que ayuda a generar las primeras explicaciones acerca de las altas concentraciones de fitoplancton en los datos modelados, debido a la necesidad de un producto con toda la información espacial y una mayor resolución en el tiempo (Anexo A).

El producto satelital de nivel 3 promedia los datos cada 8 días, utilizando menos métodos estadísticos. En este producto se pueden observar de mejor forma los cambios dramáticos de la chl-a, lo que beneficia la observación de la fertilización de los SAW los cuales, como se ha visto, afectan de manera dramática al fitoplancton. Con base en este producto se obtiene que el experimento “Control” tiene una correlación de $r=0.45$ con respecto al producto satelital, mientras que se tienen peores correlaciones en el experimento “Limit” con un $r=0.43$ y “North-current” con una correlación de $r=0.45$. En los experimentos “Upwelling” y “SAW” sí se obtienen mejores correlaciones, $r=0.48$ y $r=0.55$ respectivamente. En el caso del experimento

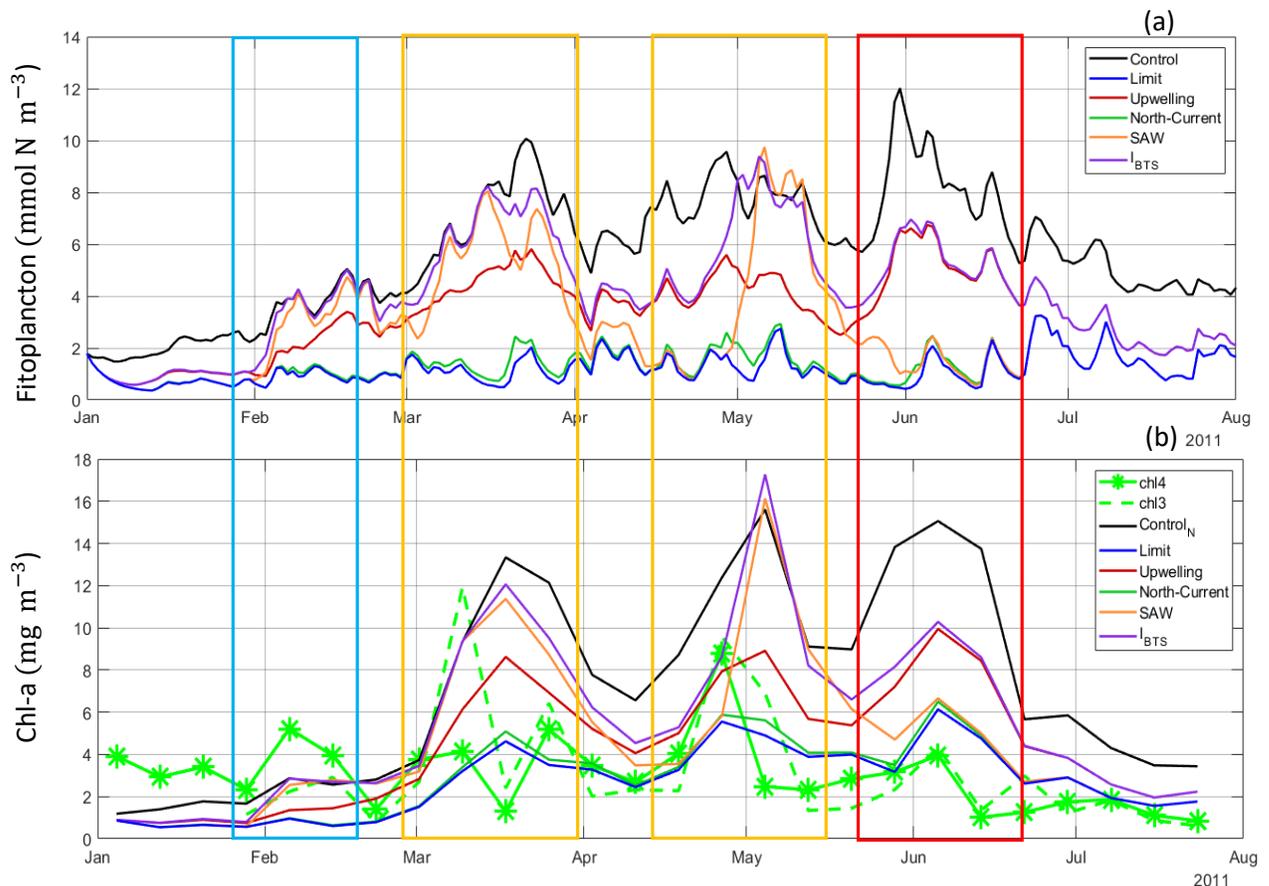


Figura 19. Series de tiempo de los experimentos de limitación de hierro. (a) Promedios espaciales del fitoplancton (mmol N m^{-3}) dentro de la BTS para los primeros 30 metros. (b) Promedios espaciales superficiales correspondientes al dominio del modelo de la BTS de la biomasa fitoplanctónica (mg m^{-3}): producto satelital chl-a nivel 4 (línea verde continua con asteriscos), producto satelital chl-a nivel 3 (línea verde discontinua), simulación control con el módulo NPZD (línea negra), simulación control con el módulo de limitación por hierro (línea azul), experimento “North-current” (línea verde), experimento “Upwelling” (línea roja), experimento “SAW” (línea amarilla) y experimento “Inputs-BTS” (línea morada). Los rectángulos delimitan los periodos: P1, P2, P3 y P4.

“Inputs-BTS”, el cual es la propuesta de una modelación biogeoquímica más completa para la BTS, se tiene la mayor correlación con un $r=0.56$. También al comparar las series de la biomasa fitoplanctónica con los demás experimentos, este experimento representa mejor los picos en los periodos (Figura 19b). En el P1 se observa que los datos modelados son similares al producto de nivel 3, pero no corresponde a la surgencia costera ni a los campos de viento, pero el producto de nivel 4 explica de mejor forma este periodo de acuerdo con los datos observacionales. En el P2 se tiene un decremento de la chl-a a la mitad del periodo, según los productos satelitales, pero realizando una revisión de los datos diarios del producto satelital de nivel 3, se encontró que en esos días no hay información debido a la nubosidad, por lo que posiblemente sí hay un pico explicando el aumento de biomasa. En el P3 los datos satelitales no muestran un pico tan dramático en comparación a los modelados, pero como se mencionó antes, la resolución del satélite y la falta de datos dificulta observar eventos dramáticos de fertilización como lo son los SAW. Por último, en el P4 se tienen bajas concentraciones de chl-a en los datos satelitales, validando la propuesta de limitación para este periodo cuando se presenta la mayor limitación por hierro.

Para identificar los patrones del dFe atribuidos a los aportes de surgencia, los SAW y la CC, se restaron a cada serie las concentraciones del experimento “Limit”, ya que estos experimentos tienen en común la configuración de este experimento. En estudios realizados en la SCB se ha utilizado el Si_{ex} como indicador de limitación de hierro, como se mencionó en la sección 1.1, por lo que en este análisis se propone una forma equivalente de explicar la baja utilización de NO_3 a través de las series de las señales de cada experimento. Cuando hay una mayor limitación de hierro aumentan las concentraciones de NO_3 , ya que no es utilizado por el fitoplancton (Figura 21a-b). El experimento que tiene mayores concentraciones de NO_3 es el experimento “North-current”, que de forma contraria tiene las menores concentraciones de fitoplancton, y como ya se había mencionado anteriormente, es el experimento con menor limitación por hierro. En los experimentos “Upwelling” y “SAW” se mantienen bajas concentraciones de NO_3 y concentraciones mayores de fitoplancton, teniéndose una menor limitación de hierro, que dependiendo del periodo domina un experimento o el otro. Ambos experimentos son los principales procesos de fertilización y limitación, por lo que buscando entender en qué periodo domina cada aporte, se realizó una serie a partir de la resta de las concentraciones de NO_3 del experimento “Upwelling” al “SAW”. Cuando los valores son positivos la surgencia costera es la principal fuente de limitación de hierro y cuando es negativo los SAW son los principales limitadores de hierro (Figura 20c). Se puede apreciar qué en el P1, P2 y P3 el proceso que mayormente limita es la surgencia costera, además de que en el P3 esta limitación asociada a la surgencia es mucho mayor que en los otros dos periodos, lo que sugiere que los aportes de dFe provenientes del hierro de los SAW son bastante intensos y son un gran fertilizante para la BTS. Por otro lado, se tiene un periodo de limitación por la deficiencia de hierro proveniente de los SAW al principio

del P3, ya que el último aporte se presentó con más de un mes de anterioridad. En el P4 se presenta la mayor limitación por hierro atribuyéndola a la ausencia de los SAW, que corresponde a los datos satelitales. Es interesante que la duración de los SAW es de unos cuantos días, lo que es suficiente para impactar al fitoplancton a lo largo de un mes. Esto se puede explicar debido a la resuspensión, la remineralización y al tiempo de residencia del hierro dentro de la BTS.

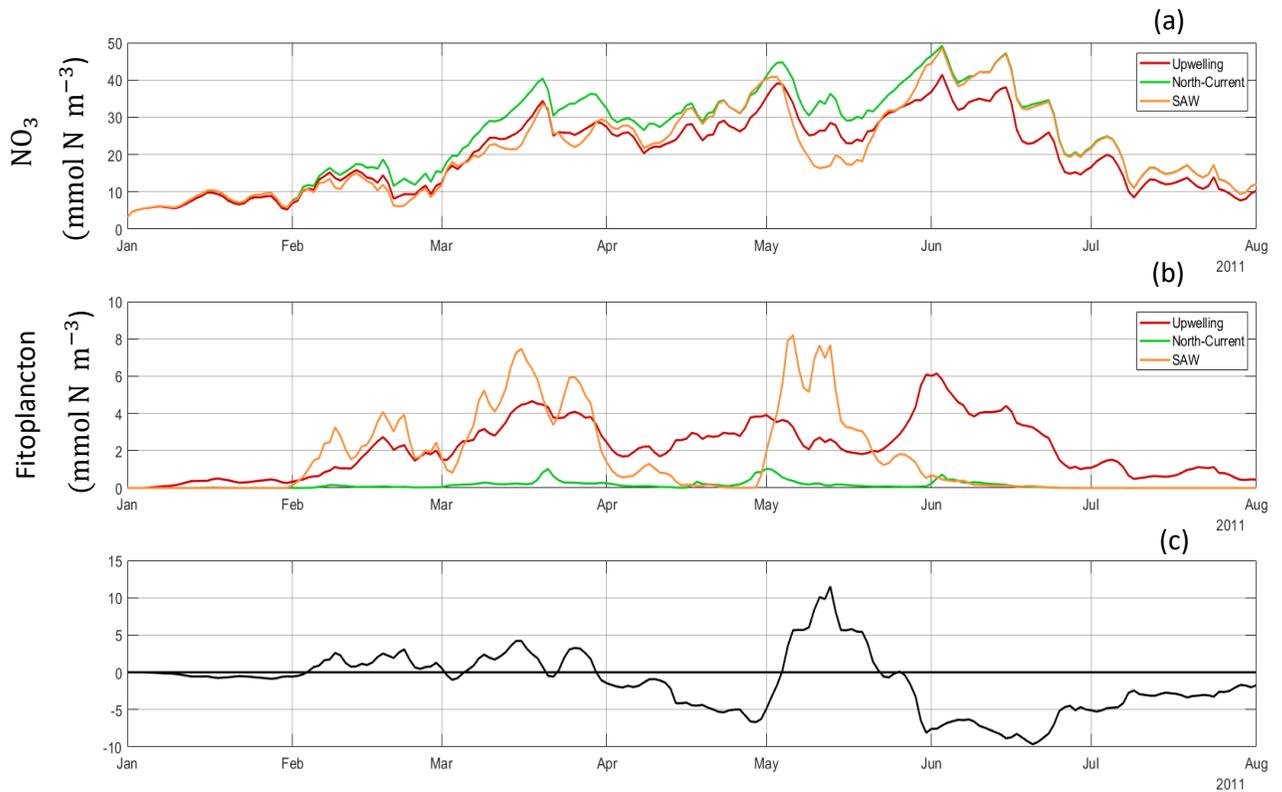


Figura 20. Series de tiempo de las señales de los aportes de dFe en la BTS: (a) señal de NO_3 (mmol N m^{-3}) asociado a cada experimento; (b) señal de fitoplancton (mmol N m^{-3}) asociado a cada experimento; (c) diferencia entre las series de NO_3 del experimento de “Upwelling” y “SAW”.

Otro de los indicadores utilizado para determinar limitación por hierro en el centro de la CCS y en la SCB es la relación $\text{dFe}:\text{NO}_3$. Cuando las relaciones son menores a $0.2 \text{ nmol } \mu\text{mol}^{-1}$ hay limitación por hierro para aguas costeras (Biller y Bruland, 2014; Hogle et al., 2018; King y Barbeau 2011; Till et al., 2019). A partir de los promedios espaciales de los nutrientes se generaron series de la relación $\text{dFe}:\text{NO}_3$ para el interior de la BTS. En éstas se observaron pocos periodos de limitación en los experimentos, según lo que propone la literatura, pero como se ha mencionado antes: la biodisponibilidad de hierro tiene gran influencia en la productividad, composición y la estructura de las comunidades de fitoplancton (Hutchins et al., 1998; Sunda y Hunstman, 1995; Watson, 2001); los requerimientos celulares de hierro podrían ser

mayores en comparación a los ecosistemas más al norte de la BTS ya que se tienen más aportes de hierro en comparación al centro del CCS que aumentan dramáticamente las concentraciones de dFe. Aun así, las relaciones del experimento “Upwelling” están muy cerca del límite a partir del mes de abril. En el caso del experimento “North-current” en todo el periodo simulado las relaciones son menores a $0.2 \text{ nmol } \mu\text{mol}^{-1}$. En el experimento “SAW” la relación está por encima en los periodos de aportes de los SAW, observándose un cambio muy dramático, incluso en los primeros días se observa un aumento excesivo, pero a partir de junio se encuentra por debajo del límite. Por último, se puede ver en el experimento “Inputs-BTS” que la relación nunca es menor a $0.2 \text{ nmol } \mu\text{mol}^{-1}$, pero sí está muy cerca en la segunda mitad de abril y a partir de junio. En el área de estudio la relación indicadora como limitante es posiblemente mayor ya que las relaciones de $\text{dFe}:\text{NO}_3$ mencionadas en el trabajo de Delgadillo-Hinojosa et al. (2020) son mucho mayores a las del centro del CCS. También otro estudio realizado por Yarimizu et al. (2018) reportó que las concentraciones de dFe en la zona norte de la BTS son menores que en el interior de la BTS a partir de mediciones a lo largo de un crucero llevado a cabo en marzo del 2017. De tal manera que si se interpretan los resultados con un límite mayor a $0.2 \text{ nmol } \mu\text{mol}^{-1}$ en la relación $\text{dFe}:\text{NO}_3$, se tendría que la limitación de hierro se presenta cuando no hay un traslape de procesos, o sea, cuando no hay presencia de los SAW o un gran aporte de la CC. También hay que tomar en cuenta que existen otros procesos de aporte de dFe que no se incluyen en esta investigación, como lo son los remolinos de mesoescala y las aguas continentales. En este análisis el aporte de aguas continentales no se considera importante debido a que

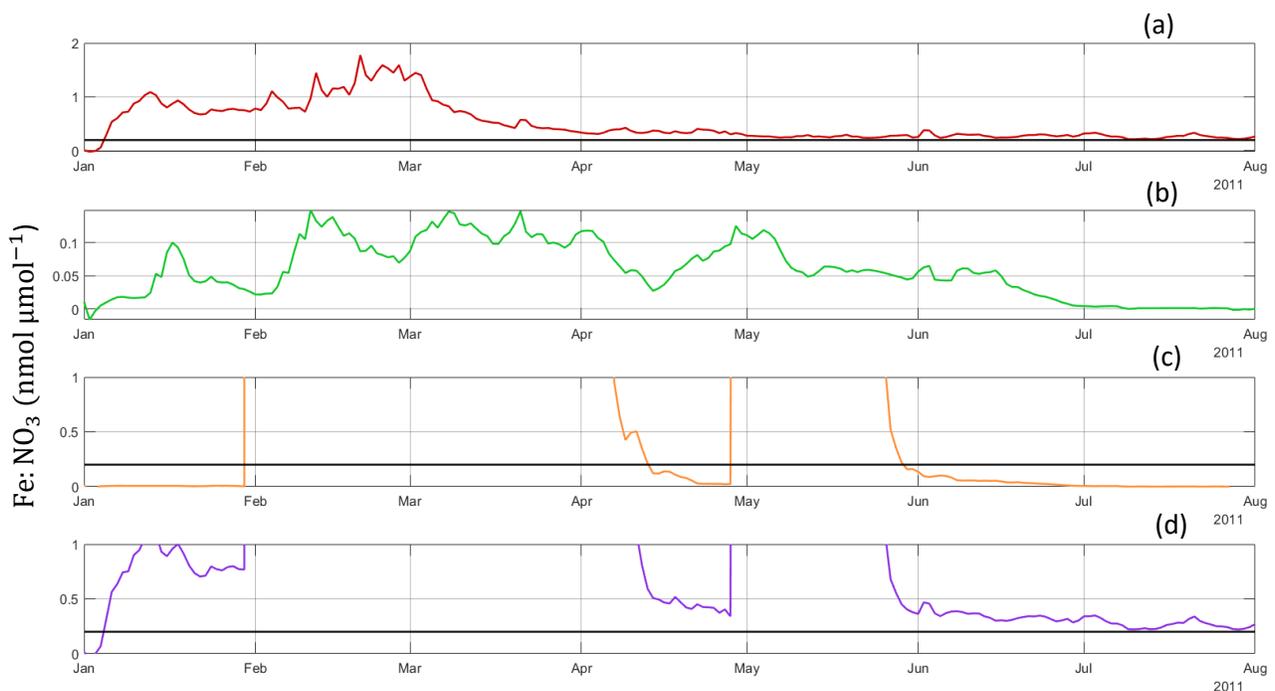


Figura 21. Series de tiempo de las relaciones de $\text{dFe}:\text{NO}_3$ de los experimentos: (a) “Upwelling”, (b) “North-current”, (c) “SAW” y (d) “Inputs-BTS”.

la temporada de lluvias es principalmente en invierno traslapándose con las surgencias costeras, además de que hay escasa información del aporte de dFe y metodológicamente hay que especificar estos aportes en la implementación. Si estos otros aportes coinciden con la surgencia costera posiblemente tampoco habría limitación por hierro.

Felix-Bermúdez et al. (2017) mencionan que la surgencia costera es el principal aporte de dFe en la BTS, pero según los resultados de esta tesis a partir de experimentos numéricos observamos que la principal biodisponibilidad de dFe y la baja limitación es cuando hay un traslape de dos o más aportes dentro de la BTS. Es cierto que los SAW aportan menos concentraciones de dFe en comparación de la surgencia costera a lo largo del año, como lo mencionan los autores, pero en los resultados numéricos se observa que los SAW son muy relevantes en ciertos periodos, debido a que el aporte es de manera superficial, son eventos dramáticos y mantienen altas concentraciones de dFe por varias semanas.

Las series de tiempo muestran claras diferencias entre los experimentos lo que indica que los aportes de dFe atribuidos a los procesos no describen las concentraciones de biomasa fitoplanctónica de manera individual, sino que la explican en conjunto. En congruencia con lo mencionado por diferentes autores, la co-limitación depende de diversos factores de manera simultánea; cada especie está adaptada a diferentes concentraciones de nutrientes; el hierro está bajo un control biológico indirecta o directamente, creando una importante retroalimentación entre la química del hierro y la utilización biológica (Hutchins et al., 1998; Sunda y Hunstman, 1995; Turner y Hunter, 2001; Watson, 2001). En el caso de la BTS la comunidad de fitoplancton está principalmente dominada por diatomeas y dinoflagelados (García-Mendoza et al., 2008). En los estudios en la SCB se reportan que las principales especies de fitoplancton limitadas por hierro son las diatomeas, tanto en aguas oceánicas como en aguas costeras (Hogle et al., 2018; King y Barbeau, 2011; Till et al., 2019; White et al., 2022), así mismo, no se ha reportado una limitación de hierro en los dinoflagelados (Hogle et al., 2018). De acuerdo con los experimentos de esta tesis cuyos parámetros de la configuración del modelo corresponden a las diatomeas, en estos experimentos se está simulando solo una parte de la comunidad de fitoplancton y cuando se refiere a la co-limitación nitrógeno-hierro no se está incluyendo a toda la comunidad fitoplanctónica.

Capítulo 5. Conclusiones

En investigaciones previas ha surgido la interrogante del impacto del hierro sobre el ecosistema dentro de la BTS, por lo que en este trabajo se implementó un modelo numérico que sirvió como herramienta para entender y describir los procesos biogeoquímicos en la bahía. Debido a la falta de información de datos *in situ* en el área de estudio, se generaron simulaciones que parten de la descripción de los procesos de limitación de hierro descritos a lo largo del CCS, incorporando adaptaciones de acuerdo con la BTS, a partir de la escasa información de investigaciones previas. Por consiguiente, se generaron diferentes experimentos que simulan los diferentes escenarios de aporte y limitación de hierro, de acuerdo con los principales procesos de mesoescala descritos en la región. Diferentes autores mencionan que el paradigma de la productividad del océano es sumamente complejo, debido a que existe una co-limitación por diferentes factores de manera simultánea. Esto es importante ya que la modelación biogeoquímica planteada en este modelo no toma en cuenta la composición y la estructura de las comunidades, ya que dependiendo a la biodisponibilidad del dFe cada grupo fitoplanctónico tiene diferentes requerimientos.

En los resultados obtenidos en este trabajo tomando en consideración la configuración del modelo biogeoquímico, se concluye una co-limitación en la biomasa fitoplanctónica por nitrógeno y hierro en la BTS, observándose diferentes escenarios de acuerdo con los aportes de nutrientes dentro de la bahía. Las simulaciones sugieren que los aportes de hierro más relevantes son atribuidos a la surgencia costera y los SAW, mientras que el aporte de hierro proveniente de la CC no es relevante en comparación a otros aportes en la Bahía. Además, se observó en la primera mitad del 2011 cómo el hierro jugó un papel importante en el comportamiento del fitoplancton dentro de la BTS. En este periodo se presentaron tres picos de biomasa fitoplanctónica, mientras que en verano se presentó una limitación de hierro, en presencia de una surgencia costera.

En estos últimos años se ha demostrado que el paradigma de la co-limitación es de gran importancia en la ecología del plancton, que con más investigaciones y técnicas innovadoras se irán modificando estos paradigmas. Para futuras investigaciones se sugiere incluir otros aportes que podrían ser importantes, como el aporte de aguas continentales y remolinos de mesoescala, que se ha demostrado en la SCB son altamente importantes para la biogeoquímica. Además, se sugiere un análisis de la variabilidad a largo plazo de los procesos de mesoescala, principalmente la surgencia costera y los SAW, para poder comparar diferentes escenarios en los que ambos factores influyan en la productividad, debido al traslape o la ausencia de los aportes, con el fin de tener un panorama general de la dinámica biogeoquímica en la BTS.

Literatura citada

- Álvarez-Sánchez, L. G., 1977. Vientos en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, 4(1), 81-88. <https://doi.org/10.7773/cm.v4i1.301>
- 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. *American Meteorological Society*, 92, 157-174. Recuperado el 2 de Octubre de 2022 de: <https://www.jstor.org/stable/26226836>
- Biller, D. V., y Bruland, K. K. 2014. The central California current transition zone: a broad region exhibiting evidence for iron limitation. *Progress in Oceanography*, 120, 370-382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2013.11.002>
- Bruland, K. W., Donat, J. R., y Hutchins, D. A. 1991. Interactive influences of bioactive trace metals on biological production in oceanic waters. *Limnology and Oceanography*, 36(8), 1555-1577. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.8.1555>
- Bruland, K. W., Rue E. L., y Smith G. J. 2001. Iron and macronutrients in California coastal upwelling regimes: implications for diatom blooms. *Limnology and Oceanography*, 46(7), 1661-1674. [doi:10.4319/lo.2001.46.7.1661](https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.7.1661)
- Budgell, W.P., 2005. Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region, *Ocean Dynamics*, 55, 370-387. [doi: 10.1007/s10236-005-0008-3](https://doi.org/10.1007/s10236-005-0008-3)
- Bundy, M.R., Jiang, M., Carter, M., y Barbeau, K.A. 2016. Iron-binding ligands in the southern California Current System: mechanistic studies. *Frontier in Marine Science*, 3 (27), 1-17. [doi: 10.3389/fmars.2016.00027](https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00027)
- 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. Ensenada, B.C.
- Capet, X., Colas, F., McWilliams, J.C., y Penven, P., 2008. Eddies in eastern boundary subtropical upwelling systems. *Ocean Modeling in an Eddy Regime*, 117, 131–147. [doi: 10.1029/177GM10](https://doi.org/10.1029/177GM10)
- Checkley, D.M., Y Barth, J.A., 2009. Patterns and processes in the California current system. *Progress in Oceanography*. 83, 49–64. [doi: 10.1016/j.pocean.2009.07.028](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.028)
- Chenillat, F., Franks, P. J. S., Rivière, P., Capet, X., Grima, N., y Blanke, B. 2015. Mesoscale activity in the southern California current system. Biological dynamics of a coastal eddy. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 5566–5588, [doi: 10.1002/2015JC010826](https://doi.org/10.1002/2015JC010826).
- Chenillat, F., Ohman, M. D., y Rivière, P. 2021. On the sensitivity of plankton ecosystem models to the formulation of zooplankton grazing. *PLoS ONE*, 16(5), 1-27. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252033>
- Cruz-Rico, J., y Rivas, D., 2018. Physical and biogeochemical variability in Todos Santos Bay, northwestern Baja California, derived from a numerical NPZD model. *Journal of Marine System*, 183, 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.04.001>

- Delgadillo-Hinojosa, F., Camacho-Ibar, V., Huerta-Díaz, M. A., Torres-Delgado, V., Pérez-Brunius, P., Lares, L., Marinone, S. G., Segovia, J. A., Peña-Manjarrez, J. L., García-Mendoza, E., y Castro, R. 2015. Seasonal behavior of dissolved cadmium and Cd/PO₄ ratio in Todos Santos Bay: A retention site of upwelled waters in the Baja California peninsula, Mexico. *Marine Chemistry*, 168, 37-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marchem.2014.10.010>
- Delgadillo-Hinojosa, F., Félix-Bermúdez, A., Torres-Delgado, E.V., Durazo, R., Camacho-Ibar, V., Mejía, A., Ruiz, M. C., y Linacre, L. 2020. Impacts of the 2014-2015 warm-water anomalies on nutrients, chlorophyll-a and hydrographic conditions in the coastal zone of northern Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, 1-20. <https://doi.org/10.1029/2020JC016473>
- Deutsch, C., Frenzel, H., McWilliams, J. C., Renault, L., Kessouri, F., Howard, E., Liang, J., Bianchi, D., y Yang, S. 2020. Biogeochemical variability in the California current system. *Progress in Oceanography*, 196, pp. 1-66. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102565>
- Di Lorenzo, E., 2003. Seasonal dynamics of the surface circulation in the southern California Current System, *Deep-Sea Res. Part II*, 50, 2371-2388. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(03\)00125-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(03)00125-5)
- Dinniman, M. S., Klinck, J. M., y Smith Jr., W. O., 2003. Cross shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry, *Deep-Sea Res. Part II*, 50, 3103-3120. doi: 10.1016/j.dsr2.2003.07.011
- Dorantes-Gilardi, M., y Rivas, D., 2019. Effects of the 2013–2016 Northeast Pacific warm anomaly on physical and biogeochemical variables off northwestern Baja California, derived from a numerical NPZD ocean model. *Deep-Sea Research II*, 169-170. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104668>
- Durazo, R., Ramírez-Manguilar, A.M., Miranda, L.E., y Soto-Mardones L.A., 2010. Climatología de variables hidrográficas. En: Gaxiola-Castro, G. y R. Durazo (Eds.) *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007*, 25-57. Instituto Nacional de Ecología-CICESE. México.
- Espinosa-Carreón, T.L., Gaxiola-Castro, G., Robles-Pacheco, J. M., y Nájera-Martínez, S. 2001. Temperatura, salinidad, nutrientes y clorofila a en aguas costeras de la Ensenada Sur de California. *Ciencias Marinas*, 27(3), 397-442. Recuperado en agosto del 2022, de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48027305>
- Félix-Bermúdez, A., Delgadillo-Hinojosa, F., Huerta-Díaz, M.A., Camacho-Ibar, V., y Torres-Delgado, E.V., 2017. Atmospheric inputs of iron and manganese to coastal Waters of the southern California Current System: seasonality, Santa Ana winds, and biogeochemical implications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 9230-9254. <https://doi.org/10.1002/2017JC013224>
- Fennel, W., y Neumann, T. 2015. *Introduction to the Modelling of Marine Ecosystems*, Elsevier, Second edition, Oxford, UK, ISBN: 978-0-444-63363-7
- Firme G. F., Rue, E. L., Weeks, D. A., y Bruland, K. W. 2003. Spatial and temporal variability in phytoplankton iron limitation along the California coastal and consequences for Si, N, and C biogeochemistry. *Global biogeochemical cycles*, 17(1), 1016-1028. doi: 10.1029/2001GB001824
- Fiechter J., Moore, A. M., Edwards, C. A., Bruland, K.W., Di Lorenzo, E., Craig, V.W. Lewis, Powell, T.M., Curchitser, E.N., y Hedstrom, K., 2009. Modeling iron limitation of primary production in the coastal Gulf of Alaska. *Deep-Sea Research II*, 56, 2503–2519. doi: 10.1016/j.dsr2.2009.02.010

- Fitzwater, S. E., Coale, K. H., Gordon, M., Johnson, K. S., y Ondrusek, M. E. 1996. Iron deficiency and phytoplankton growth in the equatorial Pacific. *Deep-Sea Research Part II*, 43, 995-1015. [https://doi.org/10.1016/0967-0645\(96\)00033-1](https://doi.org/10.1016/0967-0645(96)00033-1)
- Flores-Vidal, X., González-Montes, S., Zertuche-Chanes, R., Rodríguez-Padilla, I., Marti, C. L., Imberger, J., y Navarro-Olache, L. 2018. Three-dimensional exchange flows in a semi-enclosed bay: Numerical simulations and high frequency radar observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, (210), 26-35. doi: 10.1016/j.ecss.2018.05.027
- 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, Mexico. *Harmful Algae*, 8, 493-503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hal.2008.10.002>
- Gaxiola-Castro, G., Cepeda-Morales, J., Nájera-Martínez, S., Espinosa-Carreón, T. L., De La Cruz-Orozco, M. E., y Sosa-Avalos, R. 2010. Biomasa y producción del fitoplancton. En: Gaxiola-Castro, G. y R. Durazo (Eds.) *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007*, 59-86. Instituto Nacional de Ecología-CICESE. México.
- Green, R. M., Kolber, Z. S., Swift, D. G., Tindale, N. W., y Falkowski, P. G. 1994. Physiological limitation of phytoplankton photosynthesis in the Eastern equatorial Pacific determined from variability in the quantum yield of fluorescence. *Limnology and Oceanography*, 39, 1061-1074. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.5.1061>
- Gómez-Ocampo, E., Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., y Beier, E. 2018. Effects of the 2013-2016 warm anomalies on the California Current phytoplankton. *Deep-Sea Research, Part II*, 151, 64-76. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.01.005>
- Haidvogel, D. B., Arango, H. G., Hedstrom, K., Beckmann, A., Malanotte-Rizzoli, P., y Shchepetkin, A. F., 2000. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in nonlinear terrain-following coordinates, *Dyn. Atmos. Oceans*, 32, 239-281. [https://doi.org/10.1016/S0377-0265\(00\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0265(00)00049-X)
- Hickey B. M., y Banas N. S. 2015. Why is the northern end of the California Current System so productive? *Oceanography*, 21 (4), 90-107. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2008.07>
- Hogle, S.L., Dupont, C.L., Hopkinson, B.M., King, A.L., Buck, K.N., Roe, K.L., Stuart, R.K., Allen, A.E., Mann, E.L., Johnson, Z.I., y Barbeau, K.A., 2018. Pervasive iron limitation at subsurface chlorophyll maxima of the California Current. *PNAS*, 115(52), 13300-13305. <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1813192115>
- Hutchins, D. A., y Bruland, K. W. 1998. Iron-limited diatom growth and Si:N uptake ratios in a coastal upwelling regime. *Nature*, 393, 561-564. <https://doi.org/10.1038/31203>
- Hutchins, D. A., DiTullio, G. R., Zhang, Y., y Bruland, K. W. 1998. Iron limitation Mosaic in the California upwelling regime. *Limnology and Oceanography*, 43, 1037-1054. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.6.1037>
- Juárez-Colunga, M.C., Hernández-Ayón, J.M., Durazo, R., Lara-Lara, R., Gaxiola-Castro, G., Siqueiros-Valencia, A., y Salmerón-García, O., 2010. Variación espacial y temporal del pH. En: Gaxiola-Castro,

- G. y R. Durazo (Eds.) *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007*. Instituto Nacional de Ecología-CICESE. México.
- Johnson, K. S., Chavez, F. P., Elrod, V. A., Fitzwater, S. E., Pennington, J. T., Buck, K. R., y Walz, P. M. 2001. The annual cycle of iron and the biological response in central California coastal waters. *Geophysical research letters*, 28(7), 1247-1250. <https://doi.org/10.1029/2000GL012433>
- King, A. L., y Barbeau, K. 2007. Evidence for phytoplankton iron limitation in the southern California Current System. *Marine Ecology Progress Series*, 342, 91-103. doi: 10.1029/2010JC006324
- King A. L., y Barbeau K., 2011. Dissolved iron and macronutrient distributions in the southern California Current System. *Journal of Geophysical Research*, 116, pp. 1-18. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JC006324>
- King A. L., Buck, K.N., Barbeau K., 2012. Quasi-Lagrangian drifter studies of iron speciation and cycling off Point Conception, California. *Marine Chemistry*, 128, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marchem.2011.11.001>
- Kishi, M.J., Kashiwai, M., Ware, D.M., Megrey, B.A., Eslinger, M.J., Werner, F.E., Noguchi-Aita, M., Azumaya, T., Fujii, M., Hashimoto, S., Huang, D., Izumi, H., Ishida, Y., Kang, S., Kantakov, G.A., Hyuncheol Kim, Komatsu, K., Navrotsky, V.V., Smith, S.L., Tadokoro, K., Tsuda, A., Yamamura, O., Yamanakai, Y., Yokouchi, K., Yoshiei, N., Zhang, J., Zuenko, Y. I., y Zvalinsky, V.I., 2007. NEMURO—a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecological Modelling*, 202, 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.08.021>
- Kumar, P., Debele, S.E., Sahani, J., Rawat, N., Marti-Cardona, B., Alfieri, M., Basub, B., Basu, A.S., Bowyer, P., Charizopoulos, N., Gallotti, G., Jaakko, J., Leo, L.S., Loupis, M., Menenti, M., Mickovski, S.B., Seung-Jae Mun, Gonzalez-Ollauri, A., Pfeiffer, J., Pilla, F., Pröll, J., Rutzinger, M., Santo, M.A., Sannigrahi, S., Spyrou, C., Tuomenvirta, H., y Zieher, T. 2021. Nature-based solution efficiency evaluation against natural hazards: Modelling methods, advantages and limitations. *Science of Total Environment*, 784, 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147058>
- Lynn, R. J., y Simpson, J. J. 1987. The California Current System: the seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92, 12947-12966. <https://doi.org/10.1029/JC092iC12p1294>
- Marchesiello, P., McWilliams, J.C., y Shchepetkin, A., 2003. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 753-783. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)33<753:ESADOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)33<753:ESADOT>2.0.CO;2)
- Mateos, E., Marinone, S.G., y Parés-Sierra, A. 2009. Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B.C. Mexico. *Ocean Modelling*, 27, 107-112. doi: 10.1016/j.ocemod.2008.11.002
- Navarro-Olache, L.F., Castro, R., Durazo, R., Hernández-Walls, R., Mejía-Trejo, A., Flores-Vidal, X., y Flores-Morales, A.L. 2020. Influence of Santa Ana winds on the surface circulation of Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Atmósfera*, 34(1), 97-109. <https://doi.org/10.20937/ATM.52719>
- Sarthou, G., Timmermans, K.R., Blain, S., y Treguer, P. 2005. Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review. *Journal Sea Research*, 53, 25-42. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2004.01.007>

- Shilova, I.N., Magasin, J.D., Mills, M.M., Robidart, J.C., Turk-Kubo, K.A., y Zehr, J.P., 2020. Phytoplankton transcriptomic and physiological responses to fixed nitrogen in the Californian Current System. *PLoS ONE*, 15(4), 1-24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231771>
- Song, H., Edwards, C.A., Moore, A.M., y Fiechter, J., 2016. Data assimilation in a coupled physical-biogeochemical model of the California Current System using an incremental lognormal 4-dimensional variational approach: Part 2—Joint physical and biological data assimilation twin experiments. *Ocean Modelling*, 106,146-158. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.04.001>
- Sunda, W. G., y Huntsman, S. A. 1995. Iron uptake and growth limitation in oceanica and coastal phytoplankton. *Marine chemistry*, 50, 189-206. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(95\)00035-P](https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00035-P)
- Sunda, W. G., y Huntsman, S. A. 1997. Interrelated influence of iron, light and cell size on marine phytoplankton growth. *Nature*, 390, 389-392. <https://doi.org/10.1038/37093>
- Peliz, A., Dubert, J. , Haidvogel, D. B., y Le Cann, B., 2003. Generation and unstable evolution of a density-driven Eastern Poleward Current: The Iberian Poleward Current, *J. Geophys. Res.*, 108, 32-68. doi: 10.1029/2002JC001443
- Penven, P., Marchesiello, P., Debreu, L., y Lefèvre, J., 2008. Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling and Software*, 22, 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.07.004>
- Pérez-Brunius, P., López, M., Páres-Sierra, A., y Pineda, J. 2007. Comparison of upwelling índices off Baja California derived from three different wind data sources, *CalCOFI Reports*, 48, 204-214. Recuperado en agosto del 2022, de: https://calcofi.com/publications/calcofireports/v48/Vol_48_Perez_Brunius.pdf
- Price, N. M., Andersen, L. F., y More, F. M. M. 1991. Iron and nitrogen nutrition of equatorial Pacific plankton. *Deep-Sea Research*, 38, pp. 1361-1378. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(91\)90011-4](https://doi.org/10.1016/0198-0149(91)90011-4)
- Pye, K. 1987. *Aeolian dust and dust deposits*. Academic Press, New York, 334. <https://doi.org/10.1017/S0016756800013121>
- Powell, T. M., Lewis, C. V. W., Curchister, 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*, 111, 1-14. doi: 10.1029/2004JC002506
- Till, C. P., Solomon, J. R., Cohen, N. R., Lampe, R. H., Marchetti, A., Coale, T. H., y Bruland, K. W. 2019. The iron limitation mosaic in the California current system: factors governing Fe availability in the shelf-near-shelf region. *Limnology and Oceanography*, 64, 109-123. doi: 10.1002/lno.11022
- Turner, D. R., y Hunter, K. A. 2001. *The biogeochemistry of iron in seawater*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England.
- Watson, A. J. 2001. Iron limitation in the ocean. En Turner D.R., y Hunter K. A. (Comp.), *The biogeochemistry of iron in seawater*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England.

- White, M. E., Rafter, P. A., Stephens, B. M., Mazloff, M. R., Wankel, S. D., y Aluwihare, L. I. 2022. Stable isotopes of nitrate record effects of the 2015-2016 El Niño and diatom limitation on nitrogen cycling in the eastern North Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 9999. doi: 10.1002/lno.12194
- Yarimizu, K., Cruz-López, R., García-Mendoza, E., Edwards, M., Carter, M.L., y Carrano, C.J., 2018. Distribution of dissolved iron and bacteria producing the photoactive siderophore, vibrioferrin, in waters off Southern California and Northern Baja. *Springer Nature*, 32. <https://doi.org/10.1007/s10534-018-00163-3>

Anexo A

En el análisis de las simulaciones previas (Figura 8a) no se analiza el comportamiento espacial del fitoplancton. Por esto, en la comparación espacial entre los datos modelados por Cruz-Rico y Rivas (2018) y los productos satelitales nivel 4 se identifican discrepancias entre ambos datos y se generan las primeras explicaciones acerca de las altas concentraciones de fitoplancton en los datos modelados. De acuerdo con el P3 y el P4, se observa que en los datos modelados se muestran concentraciones mucho mayores en todo el dominio (Figuras inferiores) en comparación con los satelitales (Figuras superiores). En la semana 12 se presenta aumento del fitoplancton tanto en los datos satelitales como en los modelados, que corresponde a los aportes de NO_3 atribuidos a la surgencia costera (Figura 8b-c). En la semana 13 en los datos satelitales hay un decremento muy marcado (Figura 22c), a diferencia de los datos modelados (Figura 22d). En la semana 15 empiezan a aumentar de nuevo las concentraciones de NO_3 , por lo que se incrementan las concentraciones de fitoplancton para ambos tipos de datos, pero los datos satelitales y en los índices de surgencia indican que hubo un decremento previo de nutrientes por lo que las concentraciones no son tan altas, mientras que en el modelo no disminuyen (Figura 8b-c). Esto explica por qué en la semana 17 en el modelo se presenten concentraciones tan altas de biomasa fitoplanctónica (Figura 22h), que no se muestran en el satélite (Figura 22g).

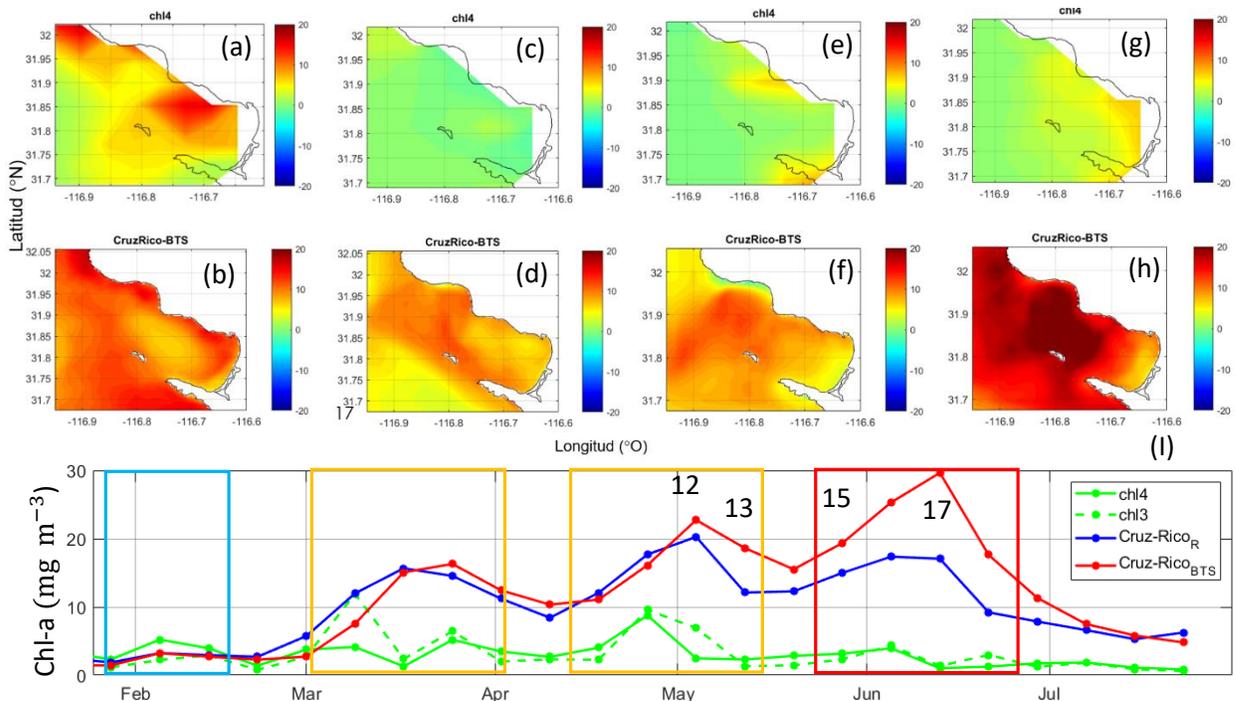


Figura 22. Series de tiempo de la biomasa fitoplanctónica de productos satelitales (Figuras superiores) y datos modelados (Figuras inferiores): (a-b) semana 12, (c-d) semana 13, (e-f) semana 15 y (g-h) semana 17. (I) Promedios espaciales: producto satelital de nivel 4 (línea verde continua) y nivel 3 (línea verde discontinua); datos del modelo regional (línea azul) y datos del modelo de la BTS (línea roja), de simulaciones previas (Cruz-Rico y Rivas, 2018).

Anexo B

En el sur del CCS no se han realizado simulaciones biogeoquímicas que incluyan limitación por hierro, por lo que es necesario adaptar los parámetros con base en zonas de estudio más cercanas. En este trabajo se realiza un cálculo hipotético para el K_{Fe} correspondiente a la BTS y se compara con valores de otros autores. Para calcular el K_{Fe} en la BTS se realiza la siguiente suposición:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad (14)$$

Si el fitoplancton (P) no cambia en el tiempo (t) y no hay advección y ni difusión, entonces la ecuación 2 queda de la siguiente manera:

$$0 = UP - GZ - \sigma_d P, \quad (15)$$

Después se despeja U:

$$U = \frac{\sigma_d P + GZ}{P}, \quad (16)$$

A partir de la ecuación se calcula U, la cual se sustituirá posteriormente para calcular el K_{Fe} . En el caso de σ_d y G se sustituyen los valores, mientras que para el P (fitoplancton) se toma un valor promedio representativo, calculado a partir del producto satelital de nivel 4 correspondiente al dominio del modelo de la BTS el cual es 2.2 mg m^{-3} . El zooplancton (Z) se obtiene a partir de la relación antes mencionada de $[Z:P]=1.1$, el cual es 2.42 mg m^{-3} . Sustituyendo:

$$U = \frac{(0.1)(2.2) + (0.64)(2.42)}{2.2} = 0.8 \text{ d}^{-1},$$

Posteriormente, a partir de la ecuación 12 se obtiene la ecuación de limitación para el hierro:

$$U = \frac{R^2}{(R^2 + K_{Fe}^2)}, \quad (17)$$

Sustituyendo R de la ecuación 11 y despejando el K_{Fe} :

$$K_{Fe} = \frac{Fp}{P[C:N]} \sqrt{\frac{1}{u} - 1}, \quad (18)$$

donde se considera que el Fp (fitoplancton asociado al hierro) es igual a P[Fe:C], debido a las consideraciones previas del modelo, donde el fitoplancton se calcula a través de la relación Fe:C. Esto es:

$$K_{Fe} = \frac{P[Fe:C]}{P[C:N]} \sqrt{\frac{1}{u} - 1}, \quad (19)$$

Al sustituir U, P[C:N] que es igual a $6.62 \text{ mmolC mmolN}^{-1}$ debido a la relación [C:N] y P[Fe:C] que es igual a $50 \text{ } \mu\text{molFe molC}^{-1}$ debido a la relación [Fe:C] (descrita por la literatura y de acuerdo al centro del CCS; Bruland et al., 2001), lo que resulta en:

$$K_{Fe} = \frac{50}{6.62} \sqrt{\frac{1}{0.8} - 1} = 3.77 \left[\frac{\mu\text{mol Fe mol N}}{\text{mol C mol C d}} \right],$$

Posteriormente se realizan los cálculos pertinentes para obtener los valores en las unidades que el modelo tiene establecidas.

$$3.77 \left[\frac{\mu\text{mol Fe mol N}}{\text{mol C mol C d}} \right] = \left[\frac{\text{mol C}}{12 \text{ U}} \right] \left[\frac{14 \text{ u}}{\text{mol N}} \right] = 4.4 \left[\frac{\mu\text{mol Fe}}{\text{mol C d}} \right],$$

También se realizan cálculos para modificar las unidades de las referencias mencionadas en la tabla 3 y que correspondan a las unidades del modelo.

Sarthou et al. (2005):

$$0.35 \left[\frac{\text{nmol Fe}}{\text{Kg}} \right] = \left[\frac{0.001 \mu\text{mol Fe}}{\text{nmol Fe}} \right] \left[\frac{\text{Kg}}{1000\text{g}} \right] \left[\frac{12 \text{ g}}{\text{mol C}} \right] = 4.2 \left[\frac{\mu\text{mol Fe}}{\text{mol C}} \right],$$

Hutchins et al. (2002):

$$0.26 \left[\frac{\text{nmol Fe}}{\text{Kg}} \right] = \left[\frac{0.001 \mu\text{mol Fe}}{\text{nmol Fe}} \right] \left[\frac{\text{Kg}}{1000\text{g}} \right] \left[\frac{12 \text{ g}}{\text{mol C}} \right] = 3.12 \left[\frac{\mu\text{mol Fe}}{\text{mol C}} \right],$$

Fitzwater et al. (1996):

$$0.12 \left[\frac{\text{nmol Fe}}{\text{Kg}} \right] = \left[\frac{0.001 \mu\text{mol Fe}}{\text{nmol Fe}} \right] \left[\frac{\text{Kg}}{1000\text{g}} \right] \left[\frac{12 \text{ g}}{\text{mol C}} \right] = 1.45 \left[\frac{\mu\text{mol Fe}}{\text{mol C}} \right],$$

A partir del K_{Fe} calculado de las referencias y el estimado para el área de estudio se realiza un análisis de sensibilidad de 72 días. En el cual se observa que las series del zooplancton son idénticas, mientras que las concentraciones de fitoplancton empiezan a converger después del primer mes, con mínimas diferencias. Para observar mayores diferencias es necesario un tiempo de simulación significativamente mayor. En el caso del parámetro propuesto por el Fiechter et al. (2009), éste es muy alto en comparación con los valores del centro de la CCS, ya que esto corresponde a regiones más cercanas al área de estudio de esta tesis y por esto se supone que son más adecuados. En el caso del cálculo hipotético se obtiene una diferencia similar en comparación con los artículos mencionados, por lo que se utiliza este valor para la configuración de todas las simulaciones con limitación con hierro.

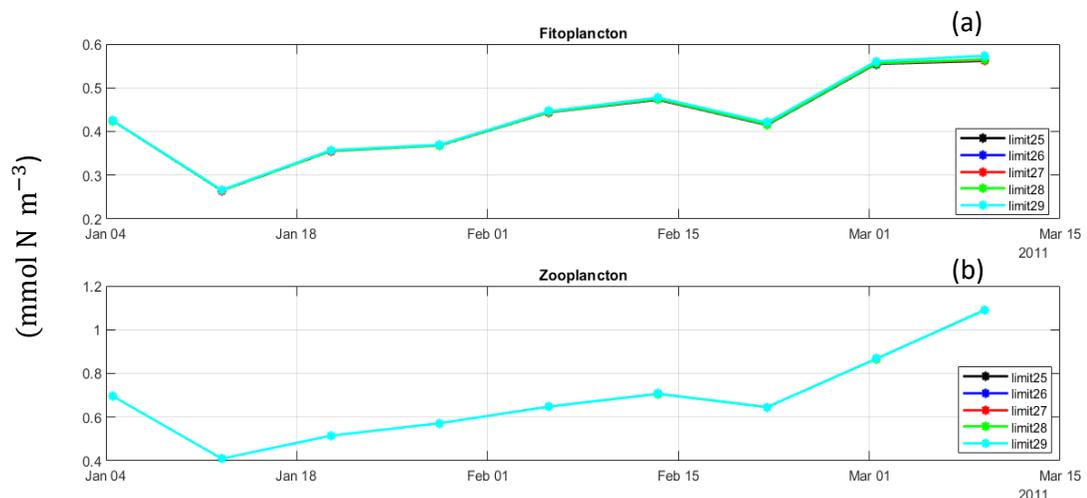


Figura 23. Series de tiempo de los promedios espaciales superficiales de los experimentos de sensibilidad de la constante de saturación del hierro (K_{Fe}) descrito en la sección 2.3.3.

Anexo C

Las simulaciones con los modelos propuesto por Fiechter et al. (2009) y de sus parámetros se obtiene una limitación excesiva para el fitoplancton. Los autores en su trabajo lo describen de manera similar, por lo que proponen un relajamiento en la plataforma continental de forma constante, con una escala temporal de 5 días. En el caso de su zona de estudio el aporte de dFe es principalmente asociado a los ríos, pero el del área de estudio de esta tesis los aportes no son constantes y tienen alta variabilidad. En un principio se realiza la simulación con el modelo de relajación planteado por esos autores, experimento “RelaxA”, con la diferencia de un aporte de dFe correspondientes a la BTS de acuerdo con Delgadillo-Hinojosa et al. (2020) de 4.9 nmol. En las series de tiempo se observa que hay mínimas diferencias entre las concentraciones de fitoplancton (Figura 23).

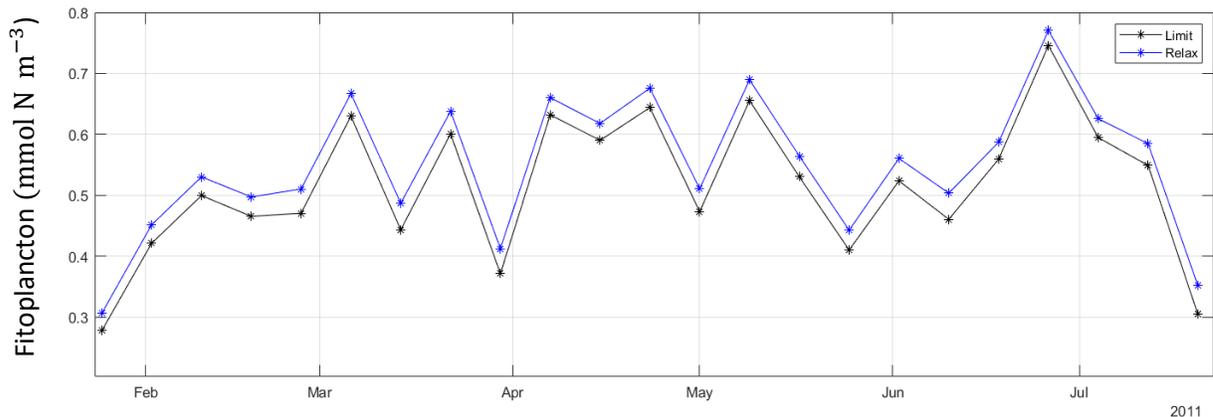


Figura 24. Series de tiempo de los promedios espaciales superficiales de fitoplancton (mmol N m^{-3}) para el dominio del modelo de la BTS: (a) modelo de limitación y (b) modelo de limitación con relajamiento sobre la plataforma continental.

Por esto que se propone analizar las concentraciones de dFe entre la plataforma continental y aguas profundas, ya que se está realizando un aporte de dFe en la zona somera. En las series de tiempo se observa que hay un aumento de fitoplancton y dFe dentro de la plataforma continental, mientras que fuera las concentraciones son muy bajas. Las concentraciones de dFe fuera de la plataforma son muy parecidas a las concentraciones de aguas oceánicas (King y Barbeau, 2011). Por lo que se puede decir que el modelo de limitación con relajamiento es una buena propuesta para zonas de estudio con aportes constantes continentales. Respecto al área de estudio de esta tesis la limitación sigue siendo excesiva, incluso con el relajamiento propuesto anteriormente, ya que en la BTS los aportes no son constantes y tienen gran variabilidad en el tiempo, debido a la surgencia costera y los SAW.

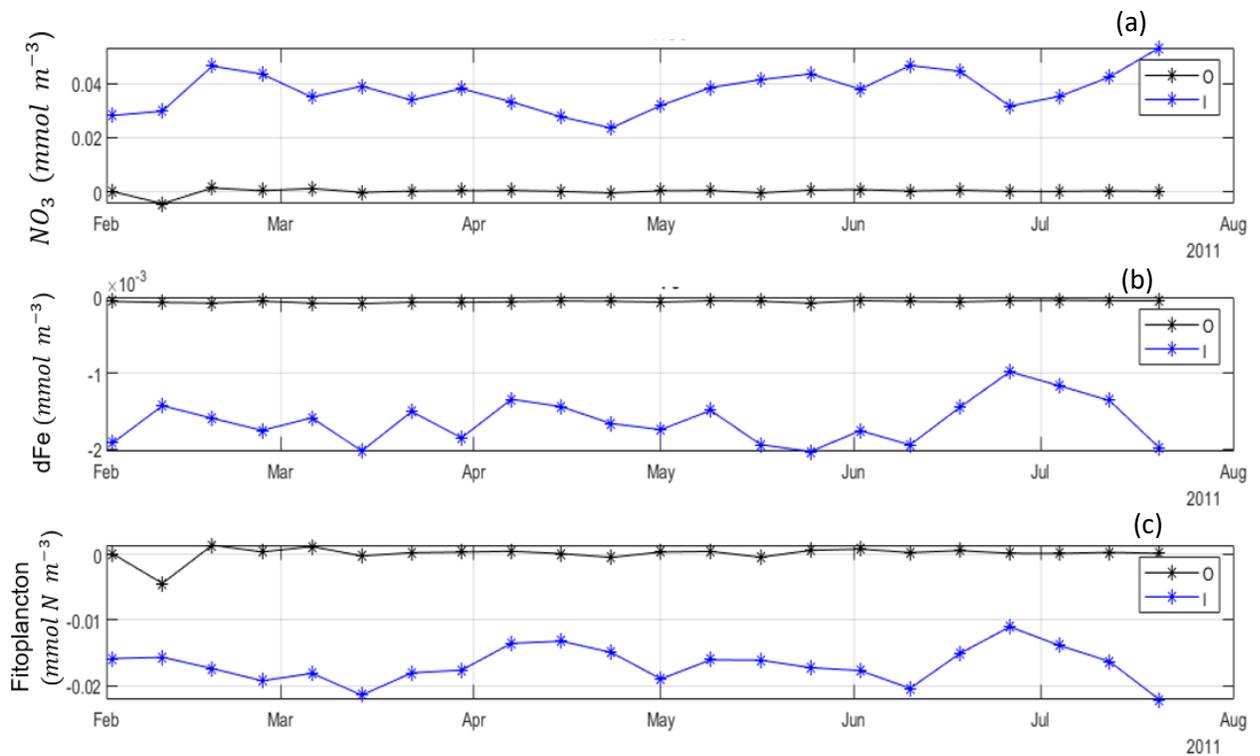


Figura 25. Series de tiempo de los promedios espaciales dentro (línea azul) y fuera (línea negra) de la plataforma continental: (a) concentraciones de NO_3 ($mmol\ N\ m^{-3}$) (b) concentraciones de dFe ($mmol\ N\ m^{-3}$) y (c) concentraciones de fitoplancton ($mmol\ N\ m^{-3}$).

En el transcurso de las simulaciones se observa que hay una incongruencia entre lo descrito en el artículo Fiechter et al. (2009) y el módulo computacional de relajación, respecto a los parámetros que se imponen en el momento de realizar las simulaciones. Dicha incongruencia está relacionada con las unidades de las concentraciones de relajación del dFe , por lo que no queda claro si las concentraciones dFe implementadas son las adecuadas, ya que podrían ser de tres órdenes magnitud menores. Por esto se comparan cuatro experimentos con el modelo de relajación, con los parámetros mencionados en la tabla 4 el experimento "RelaxA" corresponde a la misma serie de la figura anterior (Figura 24). Se genera una simulación con las mismas concentraciones ("RelaxB") pero con tres órdenes de magnitud mayor, esto es debido a la duda generada por la incongruencia antes mencionada y otra con las concentraciones propuestas por los autores ("RelaxC"). En ambas simulaciones las concentraciones de fitoplancton son muy similares a las del "Control", lo que quiere que hay una mínima limitación por hierro. En el caso de las concentraciones de dFe de los experimentos "RelaxB", "RelaxC" y "RelaxD" son muy altas, que en comparación con las concentraciones promedio de la BTS son tres órdenes de magnitud mayor (Delgadillo-Hinojosa et al., 2020; Yarimizu et al., 2018). Por último, se generó un experimento con una escala cada 15 días en la relajación ("RelaxD"), en el que se presenta una limitación por hierro, observándose una disminución de las

concentraciones de fitoplancton, pero aun así las concentraciones no son tan bajas como en los demás experimentos. Cabe mencionar que las concentraciones de dFe dentro de la bahía en los experimentos “RelaxB”, “RelaxC” y “RelaxD”, incluso son similares a los aportes atmosféricos del experimento “SAW” siendo muy elevadas, por lo que posiblemente la configuración con relajación no sean la correcta y la del experimento “RelaxA” si lo sea.

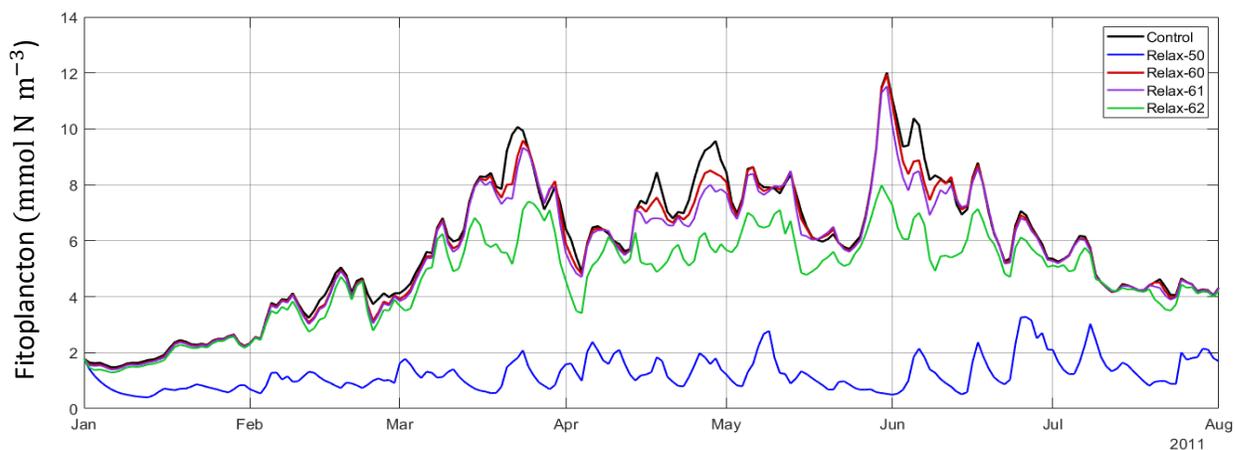


Figura 26. Experimentos “Relax”: series de tiempo de los promedios espaciales del fitoplancton (mmol N m^{-3}) dentro de la BTS para los primeros 30 m.