

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



**Maestría en Ciencias
en Ecología Marina**

**Modelación numérica de los efectos de aportes de nutrientes
costeros en la abundancia del fitoplancton en el Golfo de
California**

Tesis

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

Presenta:

Anahí Bermúdez Romero

Ensenada, Baja California, México

2017

Tesis defendida por

Anahí Bermúdez Romero

y aprobada por el siguiente comité

Firma

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director de tesis

Dr. Saúl Álvarez Borrego

Dr. Ernesto García Mendoza

Dr. Silvio Guido Lorenzo Marinone Moschetto



Dra. María Lucila del Carmen Lares Reyes
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Anahí Bermúdez Romero © 2017

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

Resumen de la tesis que presenta **Anahí Bermúdez Romero** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Modelación numérica de los efectos de aportes de nutrientes costeros en la abundancia del fitoplancton en el Golfo de California

Resumen aprobado por:

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director de tesis

En la mayoría de los ecosistemas costeros el crecimiento del fitoplancton está limitado por la disponibilidad de N, por lo que las fuentes exógenas de este elemento pueden aumentar la vulnerabilidad de la zona. Durante las últimas décadas la actividad humana ha producido N provocando una acumulación en el ambiente, esta contaminación por N se ha relacionado a muchos de los problemas ambientales actuales. En este trabajo se evalúa la respuesta del fitoplancton en el Golfo de California ante un aporte de N costero en diferentes regímenes estacionales mediante la descarga del Río Yaqui localizado en el estado de Sonora. Se utilizó un modelo numérico hidrodinámico de alta resolución (~3 km) acoplado a un modelo biogeoquímico de Nutrientes-Fitoplancton- Zooplancton-Detritos (denominado NPZD, por sus siglas en inglés). En verano (agosto-septiembre) se observó una lengüeta de agua dulce proveniente del río desplazándose por la costa continental hacia el norte, sin embargo el crecimiento del fitoplancton ante el aporte de nutrientes fue mínimo ($<0.1 \text{ mM m}^{-3}$). Por otra parte, en invierno (marzo-abril) la lengüeta de agua dulce se desplazó hacia fuera de la costa, al centro del Golfo, y se observó un aumento mayor a 0.6 mM m^{-3} . Se evaluó una situación extrema de aporte de nutrientes en otoño (noviembre-diciembre) y se observó que el fitoplancton no respondió inmediatamente aun con una cantidad alta de nutrientes. El incremento en la biomasa fitoplanctónica se detectó hasta 20 días del inicio de la descarga. En total si se considera el aporte más alto de nutrientes ($7.9 \times 10^{10} \text{ mM}$) provenientes del río comprendería únicamente el 0.3% de la cantidad aportada mensualmente por el Océano Pacífico y que es requerida para mantener la producción nueva. Estos resultados indican que el aporte de nutrientes tiene consecuencias importantes únicamente cerca de la desembocadura del río, sin embargo los florecimientos observados a 100 km de distancia, sugieren que otras zonas están siendo fertilizadas. Se encontró que las características físicas de la zona adyacente al río son muy importantes en el control de los parámetros biológicos.

Palabras clave: Valle del Yaqui, modelo físico-biológico, NPZD, ROMS.

Abstract of the thesis presented by **Anahi Bermudez Romero** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Numerical modeling of the effects of nutrient-rich coastal-water input on the Gulf of California

Abstract approved by:

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Thesis Director

In most of the coastal and estuarine environments phytoplankton growth is limited by the availability of N, increasing vulnerability of exogenous inputs of this element in the area. During the last decades human activity has produced additional N, leading to an accumulation in the environment, this pollution of N has been associated to many of the current environmental problems. In this study we evaluate the response of phytoplankton in the Gulf of California to an input of anthropogenic N, through the simulation of the Yaqui River located in the state of Sonora during different seasonal regimes. A high resolution (~ 3 km) numerical model coupled to a Nitrogen-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus (NPZD) model is used to evaluate these scenarios. In summer (August-September) a fresh water river plume is observed moving north and next to the coast, however the phytoplankton response to the input of nutrients was minimum ($< 0.1 \text{ mM m}^{-3}$). On the other hand, in winter (March-April) the river plume moved towards the Gulf's center, off the coast, and a mayor phytoplankton growth was observed ($> 0.6 \text{ mM m}^{-3}$). An extreme scenario was evaluated in fall (November-December), however the response of the phytoplankton was not immediate but until 20 days after initiated the river discharge. Over all, if we consider the highest nutrient input ($7.9 \times 10^{10} \text{ mM}$) and compare it with a natural source, the river input comprehends only 0.3% of the amount of nutrients that is monthly contributed by the Pacific Ocean and required to sustain new production. These results suggest that the input of anthropogenic nutrients enhance phytoplankton growth and had only local effects, however the blooms observed 100 km far from the river mouth suggest the fertilization of other zones. It was found that the physical conditions of the adjacent area are very important in controlling the biological parameters.

Keywords: Yaqui Valley, physical-biological model, NPZD, ROMS.

Dedicatoria

*A mi madre, Rosa María
y a mis hermanos Arely y Raúl,
con amor incondicional.*

Agradecimientos

Al CICESE y al posgrado en Ecología Marina por admitirme en el programa de maestría y permitirme continuar en el camino de la investigación. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada, un gran apoyo para continuar mi carrera. A la Red Temática sobre Florecimientos Algales Nocivos (RedFAN) por el apoyo económico para asistir a un congreso, y la invitación a un crucero, lo cual enriqueció mi formación académica y personal.

A mi director David Rivas por la excelente asesoría en la realización de este trabajo, dándome absoluta libertad de tomar decisiones pero siempre guiándome y aconsejándome. Por su interés y preocupación en mi carrera, apoyándome en todo momento. Mi respeto y admiración.

A los miembros del comité Guido, Ernesto y Saúl, a los cuales elegí por admiración a su trabajo, agradezco sus sugerencias y comentarios, fueron de gran utilidad tanto en las reuniones de avances como en la escritura de la tesis.

Agradezco a mi familia por el apoyo y amor incondicional, siempre han estado ahí para alegrar mis días y darme la seguridad de que puedo lograr todo lo que me proponga.

A mis amigas y compañeras de generación Laura y Manet gracias por siempre decir que sí :D a lo que sea, pasamos momentos increíbles dentro y fuera del CICESE. A Lubi, Mónica, Marianne, Gonzalo, Nur, Aldo y Jorge por siempre poder contar con ustedes en las buenas y en las malas, porque los amigos no solo están en las fiestas sino en todo momento. Gracias por ser una parte muy importante de estos dos años de trabajo.

A mis amigos y colegas Oceanólogos Arturo, Erika, Ale y Cristi que hemos crecido juntos personal y académicamente, dicen que si una amistad dura tres años seguramente durará toda la vida, y espero que así sea <3

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	x
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Justificación.....	6
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
Capítulo 2. Metodología	
2.1 Zona de estudio.....	8
2.1.1 Golfo de California.....	8
2.1.2 Valle del Yaqui.....	8
2.2 Modelo hidrodinámico.....	9
2.3 Modelo biológico.....	11
2.4 Simulaciones.....	13
2.5 Advección de partículas.....	14
Capítulo 3. Resultados	
3.1 Comparación del modelo con observaciones.....	15
3.1.1 Datos de satélite.....	15

3.1.2 Estructuras de mesoescala.....	17
3.2 Descargas costeras.....	19
3.2.1 Invierno.....	19
3.2.2 Verano.....	23
3.2.3 Otoño.....	27
3.2.4 Evento extremo.....	31
3.2.5 Comparación entre meses.....	32
Capítulo 4. Discusión.....	34
Capítulo 5. Conclusiones.....	39
Literatura citada.....	40

Lista de figuras

Figura		Página
1	Zona de estudio.....	9
2	Dominio del modelo numérico y su batimetría. Zona de interés marcada con un recuadro adyacente a la desembocadura del Río Yaqui (triángulo). La línea punteada representa la sección para las figuras de secciones verticales.....	10
3	Esquema de las interacciones entre los cuatro elementos que componen el modelo biológico, N (Nutrientes), P (Fitoplancton), Z (Zooplancton) y D (Detritos).....	11
4	Serie de tiempo de la TSM para todo el Golfo con datos del modelo y del MODIS, y esfuerzo del viento a lo largo del Golfo (forzamiento en el modelo).....	16
5	TSM promedio para el mes de (a) marzo y (b) noviembre, los números corresponden a los datos de satélite (1) y a los resultados del modelo (2).....	17
6	Vectores de velocidad promedio superficial ($m s^{-1}$) para (a) marzo y (b) agosto. En color se presenta el nivel del mar (cm).....	19
7	Esfuerzo y dirección del viento y sus elipses de variación (desviación estándar) para el mes de marzo.....	20
8	Distribución vertical de (a) Fitoplancton ($mM m^{-3}$), (b) Nutrientes ($mM m^{-3}$) y (c) Temperatura ($^{\circ}C$) promedio para el mes de marzo, se muestra la isoterma de los $18^{\circ}C$. Series temporales de (1) bombeo de Ekman ($m s^{-1}$) y (2) esfuerzo del viento ($N m^{-2}$) a lo largo de la sección. El lado izquierdo de las figuras representa la costa peninsular y el lado derecho la costa continental.....	21
9	(a) Trayectoria de 40 partículas (de las 150 partículas advectadas) durante 30 días, iniciando el 1 ^o de marzo, en color se muestra el nivel del mar promedio para ese mes, y (b) su trayectoria en la columna de agua durante 10 días.....	22
10	Diferencias espaciales de salinidad, nutrientes ($mM m^{-3}$) y fitoplancton ($mM m^{-3}$), promedios para diferentes periodos, durante el mes de descarga (marzo) y 30 días después (abril). Los vectores muestran la velocidad promedio a cada periodo.....	23
11	Esfuerzo y dirección del viento y sus elipses de variación (desviación estándar) para el mes de agosto.....	24

12	Distribución vertical de (a) Fitoplancton (mM m^{-3}), (b) Nutrientes (mM m^{-3}) y (c) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) promedio para el mes de agosto, se muestra la isoterma de los 18°C . Series temporales de (1) bombeo de Ekman (m s^{-1}) y (2) esfuerzo del viento (N m^{-2}) a lo largo de la sección. El lado izquierdo de las figuras representa la costa peninsular y el lado derecho la costa continental.....	25
13	(a) Trayectoria de 40 partículas (de las 150 partículas advectadas) durante 30 días, iniciando el 1 ^o de agosto, en color se muestra el nivel del mar promedio para ese mes, y (b) su trayectoria en la columna de agua durante 10 días.....	26
14	Diferencias espaciales de salinidad, nutrientes (mM m^{-3}) y fitoplancton (mM m^{-3}), promedios para diferentes periodos, durante el mes de descarga (agosto) y 30 días después (septiembre). Los vectores muestran la velocidad promedio a cada periodo.....	27
15	Esfuerzo y dirección del viento y sus elipses de variación (desviación estándar) para el mes de noviembre.....	28
16	Distribución vertical de (a) Fitoplancton (mM m^{-3}), (b) Nutrientes (mM m^{-3}) y (c) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) promedio para el mes de agosto, se muestra la isoterma de los 18°C . Series temporales de (1) bombeo de Ekman (m s^{-1}) y (2) esfuerzo del viento (N m^{-2}) a lo largo de la sección. El lado izquierdo de las figuras representa la costa peninsular y el lado derecho la costa continental.....	29
17	(a) Trayectoria de 40 partículas (de las 150 partículas advectadas) durante 30 días, iniciando el 1 ^o de noviembre, en color se muestra el nivel del mar promedio para ese mes, y (b) su trayectoria en la columna de agua durante 10 días.....	30
18	Diferencias espaciales de salinidad, nutrientes (mM m^{-3}) y fitoplancton (mM m^{-3}), promedios para diferentes periodos, durante el mes de descarga (noviembre) y 30 días después (diciembre). Los vectores muestran la velocidad promedio a cada periodo.....	31
19	Diferencias espaciales de salinidad, nutrientes (mM m^{-3}) y fitoplancton (mM m^{-3}), promedios para diferentes periodos, durante el mes de descarga (noviembre) y 30 días después (diciembre). Los vectores muestran la velocidad promedio a cada periodo.....	32
20	Serie temporal del fitoplancton y nutrientes integrados a 100 m, los primeros 30 días corresponden a la descarga del río, y los siguientes 30 días posteriores a la descarga. Se evaluaron únicamente los datos dentro de la zona adyacente al río (ver Figura 2)....	33

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Parámetros utilizados para el modelo NPZ.....	13

Capítulo 1. Introducción

La distribución y abundancia del fitoplancton en los ecosistemas marinos está controlada principalmente por la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno, fósforo, sílice y elementos traza. El Nitrógeno (N) es el elemento más abundante en la Tierra, pero se encuentra mayormente en su forma no reactiva (N_2) y sólo puede ser transformado mediante procesos que requieren de una gran cantidad de energía o mediante organismos especializados, como en el caso de las bacterias fijadoras de nitrógeno (Galloway et al., 2003; Vitousek et al., 1997). Debido a que es un elemento esencial para la vida y difícilmente se encuentra biológicamente disponible, el N limita la productividad primaria en la mayoría de los ecosistemas marinos del mundo (Vitousek y Howarth, 1991).

Durante las últimas décadas las actividades humanas, mediante la quema de combustibles fósiles y la producción de fertilizantes, han producido cantidades adicionales de N biológicamente disponible, a una velocidad mucho mayor que los procesos naturales. Esto ha provocado una acumulación en el ambiente a escalas locales, regionales y globales, lo cual contribuye a muchos de los problemas ambientales contemporáneos (Galloway et al., 1995; Howarth, 2008).

El N llega a los ecosistemas costeros mediante aguas subterráneas y aportes fluviales, gran parte de este nutriente es removido mediante el proceso de desnitrificación en humedales y en la plataforma continental. Sin embargo, la destrucción de humedales y el aumento en el aporte de N antropogénico pueden alterar este proceso, teniendo consecuencias significativas en varios componentes del ecosistema y en la salud humana, por ejemplo: provocando el crecimiento algal excesivo o eutrofización, anoxia o hipoxia, y un aumento en la incidencia y duración de florecimientos algales nocivos, entre otras (Galloway et al., 2003; Vitousek y Howarth, 1991).

Dado el aumento en el aporte de N por actividades humanas y otros cambios en el ciclo de N, es de esperarse que las concentraciones en la superficie del agua se hayan incrementado en las últimas décadas. Los flujos de N y su concentración en los grandes ríos del mundo muestran una correlación con la densidad de la población humana. Una de las consecuencias mejor conocidas y estudiadas de la alteración de N por humanos es la eutrofización, y representa una de las mayores amenazas en los ecosistemas costeros (Galloway et al., 1995). Otra consecuencia de la alteración del ciclo del N es que muchos de los ecosistemas limitados por este nutriente ahora están recibiendo grandes cantidades del mismo, provocando que otro nutriente se convierta en limitante (Beman et al., 2005).

Globalmente la mayoría del aumento en la fijación de N está relacionado a actividades humanas asociadas con la producción de alimento. Los sistemas de agricultura intensivos requieren grandes cantidades de N para sustentar la creciente población, la cual está por duplicarse a finales de este siglo. Debido que la fertilización con N es la opción más económica y efectiva para incrementar la producción en los campos agrícolas, la aplicación de N ha aumentado exponencialmente, y las tasas más altas de aplicación se encuentran en países en desarrollo con altas tasas de crecimiento poblacional (Matthews, 1994; Vitousek et al., 1997).

El Valle del Yaqui es una región que se caracteriza por un acelerado crecimiento poblacional, urbanización, y cambios en el uso de suelo. Este valle es una de las principales regiones agrícolas de México, y se utiliza para la siembra de diversas oleaginosas, algodón y hortalizas, pero el principal cultivo de la región es el trigo, el cual comprende el 50% de la producción nacional. Además de la agricultura, otros sectores han crecido rápidamente durante las últimas décadas, tales como la ganadería y la acuicultura, pero sin duda la producción de trigo es la mayor fuente de N en el Valle, ya que contribuye un 75% del total de N aportado al valle para la agricultura (54,900 Mg N) (Ahrens et al., 2009; Naylor et al., 2001). En diferentes regiones del mundo se ha tratado de determinar el flujo y la cantidad de N que es transportado desde los campos agrícolas, a través de canales de drenaje y ríos, hacia los ecosistemas costeros y marinos, pero aún existe incertidumbre de las implicaciones de este aporte de N sobre la abundancia y distribución del fitoplancton.

Con el propósito de determinar la respuesta del fitoplancton ante un aporte de nutrientes costeros se utilizó el Sistema de Modelación Oceánica Regional (ROMS, por sus siglas en inglés) acoplado al modelo trófico de Nutrientes-Fitoplancton-Zooplancton-Detritos (NPZD, por sus siglas en inglés) configurado para el Golfo de California. Se simuló el aporte costero de nutrientes provenientes del Río Yaqui en diferentes regímenes estacionales para evaluar su influencia en el fitoplancton.

1.1 Antecedentes

El Golfo de California se caracteriza por ser una zona altamente productiva, presentando tasas de productividad primaria elevadas. Álvarez-Borrego et al. (1978) encontraron que la distribución vertical de nutrientes presenta gradientes muy intensos en los 100 m superficiales. La concentración máxima de nitrato presenta entre los 30 a 80 m con valores de entre 0.2 y 0.6 μM hasta más de 1 μM en el Canal de Ballenas. Estas altas concentraciones de nutrientes en la superficie se deben al transporte por mezcla vertical y a una nutriclina somera, por lo que se requiere de poca energía para transportar los nutrientes a la zona eutrófica.

Se ha definido un patrón promedio estacional de fitoplancton influenciado por surgencias costeras de agua subsuperficial, las cuales ocurren con mayor intensidad en invierno y primavera a lo largo de las costas de Sonora y Sinaloa (Roden, 1958; Álvarez-Borrego et al., 1978). Además de estas surgencias la mezcla por viento en la columna de agua promueve el incremento del fitoplancton, lo cual se refleja en tasas de productividad primaria altas, especialmente en el Canal de Ballenas que se encuentra entre Baja California y la Isla Ángel de la Guarda (Zeitzschel, 1969).

Las concentraciones de N en el Golfo son bajas comparadas con otros macronutrientes, particularmente el fósforo (Álvarez-Borrego et al., 1978), lo cual sugiere un déficit de N, especialmente en las aguas superficiales. Este déficit puede incrementar los efectos de fuentes exógenas de N, pero existe poca información sobre la respuesta del Golfo de California ante la contaminación de N antropogénico (Beman et al., 2005).

El Valle del Yaqui ha sido una zona de estudio importante para evaluar los efectos de las tasas de fertilización elevadas en los campos agrícolas. Se ha observado que la aplicación de fertilizantes es ineficiente, lo cual lleva a pérdidas tanto en la atmósfera como en los ecosistemas acuáticos y terrestres (Harrison y Matson, 2003; Riley et al., 2001), por lo que el interés de determinar el destino de este N antropogénico (cómo es transportado y transformado en los diferentes sistemas) es cada vez mayor.

Beman et al. (2005) analizaron 5 años de imágenes satelitales (1998-2002) del sensor SeaWiFS de un transecto de 100 km a través del Golfo de California a partir de la Bahía del Tóbari, un estuario que se encuentra al sur del Valle del Yaqui. Estos autores encontraron una relación significativa entre el aumento en la concentración de clorofila, indicativo de florecimientos algales en el Golfo de California, y eventos de irrigación/fertilización. Los autores concluyeron que el 70% de los florecimientos algales son causados por eventos de irrigación. Asimismo, que el N asociado a estos procesos representa una fuente significativa e influencia fuertemente a los procesos en el ecosistema marino debido a que el Golfo se considera una zona vulnerable.

Ahrens et al. (2008) realizaron una estimación de los flujos de N en el Valle del Yaqui a partir de la cantidad de N que se aplica a los campos agrícolas. Concluyeron que únicamente el 50% del N aplicado en los campos es aprovechado, el resto es transportado por procesos como lixiviación, escorrentía, erosión y emisiones gaseosas. Este transporte además presenta variaciones anuales, las cuales se relacionan a los eventos de irrigación y fertilización, presentando un aumento en la temporada de otoño en el mes de noviembre, coincidiendo con los eventos de fertilización. El N resultante de las pérdidas en los campos es

transportado hacia los estuarios y las aguas costeras del Golfo de California. Estos autores encontraron elevadas concentraciones de N en la Bahía del Tóbari, lo cual sugiere que grandes cantidades de N son descargadas hacia el estuario. Las mediciones realizadas en la Bahía del Tóbari por Cruz-Colin et al. (manuscrito en preparación) indicaron que el tiempo de residencia del agua es relativamente corto (5 a 10 días). Esto está relacionado con el N que es desnitrificado dentro del estuario, es decir, periodos más largos de residencia del agua equivale a mayor cantidad de N removido, por lo que estimaron que el 70-85% de N que entra a los estuarios es transportado directamente hacia el Golfo de California. Ahrens et al. (2008) compararon los aportes de N del Valle de Yaqui hacia las aguas costeras con estimaciones de modelos globales y otros estudios publicados, y obtuvieron que del total de N que entra al Valle, 64 000 Mg, alrededor del 4% es exportado a las aguas costeras. Este valor bajo se debe a la alta retención del suelo, como resultado de las tasas de lluvia bajas, y a la elevada pérdida por evaporación. No obstante, estos autores consideran que existen limitaciones en sus muestreos, lo cual puede explicar el valor bajo de N exportado.

Flores et al. (2011) utilizaron datos del sensor MODIS-Aqua y boyas de deriva para detectar lengüetas de material suspendido asociadas con las desembocaduras de los principales ríos del margen continental en el Golfo de California. Las propiedades ópticas de estas lengüetas dependen del fitoplancton y sus productos de degradación, así como del material particulado de origen terrígeno y material orgánico disuelto, y tienen implicaciones importantes en términos de aportes de nutrientes hacia la zona eufótica. Estos autores observaron que el transporte del material suspendido, identificado por las lengüetas, está fuertemente influenciado por las estructuras de mesoescala adyacentes. Éste es el caso de la lengüeta identificada en la desembocadura del Río Yaqui, en donde se presenta un giro ciclónico al norte de la Cuenca de Guaymas seguido de un giro anticiclónico, ambos provocan una corriente hacia el oeste, transportando el material suspendido hacia el centro del Golfo a una distancia de aproximadamente 100 km.

Los modelos numéricos han sido de gran utilidad para describir las características físicas del Golfo de California. Ripa (1997) utilizó un modelo lineal de dos capas en el cual comparó diferentes forzamientos que actúan en el Golfo, y concluyó que el principal forzamiento es el Océano Pacífico, el cual domina la circulación y la termodinámica estacional. Beier (1999) utilizó un modelo bidimensional, lineal y de dos capas, en el cual la capa superficial presentó un patrón de circulación ciclónico en verano y anticiclónico en invierno, además de velocidades altas en comparación a la capa profunda, la cual presentó una circulación débil y en sentido opuesto. Marinone (2003) utilizó un modelo no-lineal tridimensional el cual reproduce la variabilidad anual y semianual del nivel del mar, los balances de calor y sal, y la climatología

de la temperatura superficial del mar, y encontró que las mareas y los flujos de calor son indispensables para la simulación de la estructura espacial y evolución temporal de la temperatura superficial del mar.

A partir de los campos Eulerianos de velocidad de un modelo tridimensional, Marinone (2012) calculó la trayectoria de partículas para los 12 meses de un año, utilizando un esquema de advección/difusión. Esto se puede relacionar al transporte de propiedades inertes y a organismos planctónicos pasivos, como huevos y larvas en etapas tempranas. Este autor encontró que la región norte del Golfo presenta gran retención de partículas debido a los remolinos que caracterizan la circulación estacional, lo cual implicaría mayor potencial de reclutamiento en larvas. Por otro lado, la región central y sur del Golfo presentaron mayor dispersión de partículas como resultado de las fuertes corrientes estacionales, lo que resulta en una mayor conectividad entre especies. Existen otros autores que utilizan modelos numéricos para la interpretación de procesos biológicos en el Golfo de California, pero éstos se limitan a la advección de partículas pasivas asociándolas al transporte de larvas y huevos.

El acoplamiento de los parámetros físicos y biológicos se ha realizado en otras zonas de estudio. Gan et al. (2010) utilizaron el ROMS acoplado al modelo NPZD para estudiar la respuesta del ecosistema en el mar del Sur de China, ante la intensa surgencia costera sobre la plataforma y la lengüeta del Río Pearl. Encontraron que la lengüeta del río es controlada por la circulación de surgencia sobre la plataforma al salir del estuario. Esta lengüeta rica en nutrientes se extiende hacia el mar y se propaga hacia el este. En la temporada de verano, con una tasa de descarga de $\sim 16,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, los nutrientes en la lengüeta contribuyen cerca del 70% del aporte de nutrientes y un 80% de la biomasa total, por lo que la productividad biológica es mayor en la lengüeta que las aguas de surgencia. También concluyeron que la respuesta biogeoquímica en la lengüeta y en las aguas de surgencia presenta variaciones espacial y temporal, controladas por la circulación de surgencia y las diferencias en las tasas de crecimiento del fitoplancton y del zooplancton. Este estudio demuestra la importancia de la física en el control de la respuesta biológica.

Spitz et al. (2005) utilizaron un modelo biológico de cinco componentes basado en el nitrógeno, acoplado a un modelo de circulación de alta resolución, en la costa de Oregón, Estados Unidos. Estos autores analizaron los balances entre los forzamientos físicos y biológicos, y encontraron un claro efecto de la variabilidad del viento y de las características topográficas en la evolución temporal de fitoplancton y zooplancton.

Powell et al. (2006) utilizaron el ROMS acoplado al modelo NPZD en el Sistema de la Corriente de California. Lograron reproducir características como estructuras de mesoescala superficiales y surgencia costera por viento, y más importante aún, la variabilidad a escalas temporales y espaciales de la distribución de temperatura y fitoplancton, las cuales fueron congruentes con las observaciones directas de imágenes satelitales en la región. Concluyeron que un modelo ecológico simple, como lo es el NPZD, es suficiente para reproducir y entender los procesos tróficos.

1.2 Justificación

En el Valle del Yaqui la aplicación de fertilizantes es extremadamente alta. Junto con su acelerado crecimiento poblacional y actividades como la ganadería y acuicultura, se generan grandes cantidades de N antropogénico, el cual está pronosticado a aumentar en las siguientes décadas (Galloway et al., 1995). La implementación de un modelo físico-biológico para el Golfo de California, simulando este aporte de N en las aguas costeras, proveerá un mejor entendimiento sobre sus efectos en la abundancia y distribución del fitoplancton. La modelación numérica es una herramienta con una demanda creciente debido a que su uso permite analizar procesos en diferentes escalas de tiempo y espacio, lo cual es una gran limitante en las mediciones *in-situ* (además de su elevado costo y el tiempo que requiere llevarlas a cabo). Los modelos numéricos tridimensionales permiten reproducir la variabilidad en la columna de agua, que resulta imposible para otras herramientas como imágenes satelitales, en donde sólo se puede observar la superficie del océano.

1.3 Hipótesis

El aporte de agua rica en nutrientes proveniente del Río Yaqui tiene efectos en el fitoplancton en la región adyacente, su crecimiento y distribución dependerán de las características físicas que se presenten.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Reproducir la respuesta del fitoplancton ante un aumento en la concentración de nutrientes simulando una descarga del Río Yaqui hacia el Golfo de California en diferentes estaciones del año.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar los procesos y características que el modelo reproduce adecuadamente, comparando las salidas de éste con observaciones directas.
- Simular la advección de partículas adyacentes al Río Yaqui para determinar la distribución de diferentes compuestos (p. ej., nutrientes, fitoplancton, contaminantes) que pudieran ser transportados por el río.
- Evaluar la influencia de los procesos físicos (p. ej., corrientes, circulación y las estructuras de mesoescala) en la respuesta del fitoplancton, en invierno, verano y otoño.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Zona de estudio

2.1.1 Golfo de California

El Golfo de California (también llamado Mar de Cortés) se encuentra entre la Península de Baja California y los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit, hasta Cabo Corrientes en Jalisco, México (Figura 1). Es un mar marginal cuya única abertura hacia el sur lo comunica con el Océano Pacífico, el cual influye fuertemente en sus características físicas. Sus dimensiones son de aproximadamente 1400 km de largo y 150 km de ancho en promedio. El Golfo se divide en una serie de cuencas y llega a profundidades mayores a 3 000 m en la región sur. Se encuentra rodeado por una serie de montañas que disminuyen la influencia del Océano Pacífico en el clima, por lo que el clima es más continental que oceánico (Álvarez-Borrego et al., 1978). El régimen de viento es monzónico, en invierno dominan los vientos del norte, mientras que en verano dominan los vientos del sur, este cambio en la dirección del viento es de gran importancia ya que controla los eventos de surgencia costera (Álvarez-Borrego et al., 1978; Roden, 1958).

2.1.2 Valle del Yaqui

Se localiza en el estado de Sonora, limita al este con la Sierra Madre Occidental y al oeste con el Golfo de California. Con una extensión de 450 000 hectáreas es uno de los mayores productores agrícolas de todo el estado. El clima de la región es semiárido con un promedio anual de precipitación de ~300 mm, con máximos en verano (de junio a septiembre). El Valle depende para su funcionamiento de la presencia del Río Yaqui, el cual cruza por la zona oeste del Valle y desemboca en el Golfo. La cuenca del Río Yaqui comprende 71 452 km², aunque la mayor superficie se ubica dentro del estado de Sonora (74%), una parte se localiza en el estado de Chihuahua y otra en el estado de Arizona, Estados Unidos. A lo largo del cauce del Río se han construido las presas La Angostura, El Novillo y El Oviáchi. Su escurrimiento medio anual en 70 años de observaciones es de 2 944 Mm³.

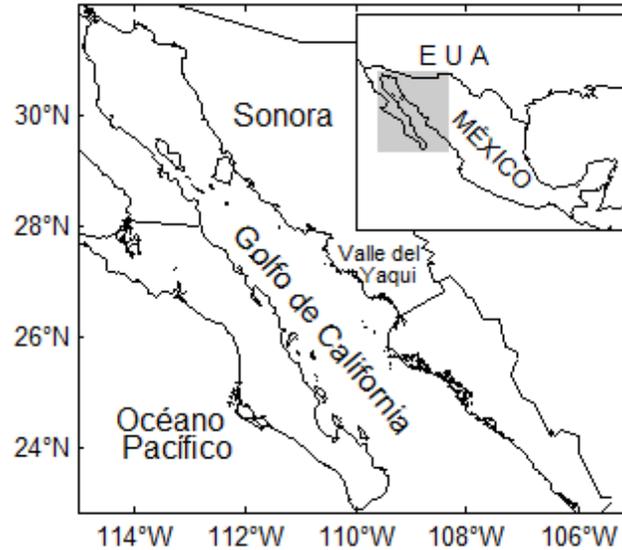


Figura 1. Zona de estudio

2.2 Modelo hidrodinámico

Este trabajo está basado en un modelo hidrostático de las ecuaciones primitivas con coordenadas verticales que siguen la topografía del fondo: el Sistema de Modelación Oceánica Regional (ROMS, por sus siglas en inglés; p. ej., Haidvogel et al., 2008) versión 3.6. El modelo fue configurado para un dominio de coordenadas esféricas que se extiende de 22.75°N a 31.74°N y de 114.9°O a 106°O (Figura 1), con el parámetro de Coriolis variando con la latitud. La resolución horizontal es de 1/30° (aproximadamente 3 km), lo que resulta en una malla horizontal de 268x305 nodos. La resolución vertical consiste en 23 niveles con mayor resolución hacia la superficie y hacia el fondo. La batimetría del modelo se preparó a partir del producto en malla del ETOPO2 (Smith, 1997), el cual tiene una resolución de 2' (aproximadamente 3 km).

En la superficie el modelo es forzado con los flujos de calor climatológicos de Penven et al. (2008), incluyendo una corrección en el flujo el flujo de calor q de la forma $(T-T_{ref}) dq/dT$, donde dq/dT es el cambio de q con respecto a la temperatura superficial T (del modelo), y T_{ref} es la temperatura a la cual se calculó q . En el forzamiento superficial del modelo también se usó el esfuerzo del viento para el periodo 2012-2015, calculado a partir del vector de viento tomado del Reanálisis Regional de Norte América (NARR, por sus siglas en inglés; Mesinger et al., 2006) utilizando parametrizaciones propuestas por Smith (1988). La resolución espacial del NARR es de 32 km y su resolución temporal es de 3 horas.

La frontera lateral sur del modelo es abierta (Figura 2). En esta frontera se utilizaron los campos de temperatura, salinidad, nivel del mar y velocidad de la corriente provenientes del Sistema de Asimilación de Datos Oceánicos Globales (GODAS, por sus siglas en inglés; p. ej., Huang et al., 2008; Ravichandran et al., 2013). GODAS es un reanálisis oceánico a tiempo real. Este producto tiene una resolución horizontal de $1/3^\circ$, una resolución vertical de 40 niveles. La resolución temporal es mensual. Para detalles sobre el GODAS, vea la documentación técnica disponible en el sitio de Internet de la División de Ciencias Físicas (PSD) del Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre (ESRL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA): <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>. El modelo incluyó forzamiento por mareas en las velocidades y en el nivel del mar. Para esto se utilizaron las 10 componentes de marea tomadas de Egbert y Erofeeva (2002).

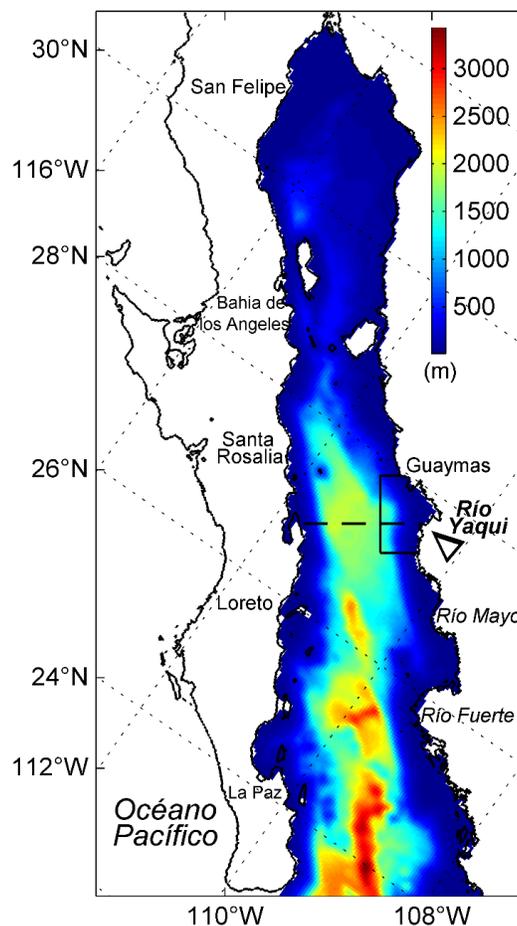


Figura 2. Dominio del modelo numérico y su batimetría. Zona de interés marcada con un recuadro adyacente a la desembocadura del Río Yaqui (triángulo). La línea punteada representa la sección para las figuras de secciones verticales.

2.3 Modelo biológico

Para describir los procesos biológicos se utilizó un modelo simple de cuatro elementos, Nutrientes-Fitoplancton-Zooplancton-Detritos (NPZD, por sus siglas en inglés), con el nitrógeno como base trófica. En este modelo la biomasa del fitoplancton está controlada principalmente por la disponibilidad de nutrientes (nitrógeno disuelto y particulado), la transferencia de biomasa al siguiente nivel trófico se realiza por medio del pastoreo realizado por el zooplancton. Parte de esta biomasa es excretada como detrito y la otra es remineralizada, cerrando así el ciclo y garantizando un balance de materia (Figura 3) (Fasham et al., 1990).

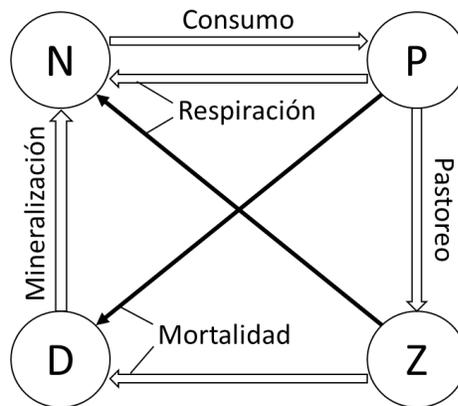


Figura 3. Esquema de las interacciones entre los cuatro elementos que componen el modelo biológico: N (Nutrientes), P (Fitoplancton), Z (Zooplancton) y D (Detritos).

Los cuatro elementos (NPZD) se resuelven mediante las ecuaciones descritas por Powell et al. (2006), para las cuales se utilizaron parámetros como el transporte o mezcla vertical, hundimiento, luz, pastoreo, mortalidad, remineralización, etc. Estas ecuaciones son:

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

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

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

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

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

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

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

Las ecuaciones (1) a (4) corresponden a la dinámica de los cuatro componentes N, P, Z y D, los términos de lado izquierdo corresponden a la derivada o cambio en un determinado tiempo (p. ej., $\partial N/\partial t$, $\partial P/\partial t$) y a la advección (p. ej., $\mathbf{u} \cdot \nabla N$, $\mathbf{u} \cdot \nabla P$). De lado derecho se resuelve la difusión o mezcla vertical, que corresponde a los términos que se encuentran al final de cada ecuación [p. ej., $k_h(\partial^2 N/\partial x^2 + \partial^2 N/\partial y^2) + \partial/\partial z(k_v \partial N/\partial z)$], y el resto de los términos corresponden a la dinámica biológica, los cuales varían de acuerdo al componente, para esto considerando parámetros como la mortalidad del fitoplancton (σ_d) y el zooplancton (ζ_d), y la tasa de hundimiento (w_d) y remineralización (δ) de los detritos. Estos términos son funciones lineales, es decir la muerte tanto del fitoplancton como del zooplancton se convierten en detritos, mientras que los detritos se remineraliza para convertirse en nitrógeno.

La ecuación (5) representa el pastoreo del zooplancton en el fitoplancton utilizando la función de Ivlev, considerando que una porción del fitoplancton que consume se pierde (γ_n) y se va directamente a la cantidad de nutrientes. La asimilación de nutrientes por el fitoplancton (ecuación (7)) se describe mediante una curva de Michaelis-Menten, en donde la tasa de asimilación está en función de la concentración de nutrientes. La cantidad de luz disponible (ecuación (6)) a una profundidad (z) se calcula suponiendo una atenuación exponencial por el agua de mar (k_z) y el fitoplancton (k_p), con el coeficiente de extinción de luz por el fitoplancton proporcional al promedio de la densidad de fitoplancton entre la superficie y la profundidad. Por último cabe mencionar que en el modelo ninguno de los procesos biológicos depende de la temperatura o la salinidad.

Los parámetros utilizados en el modelo biológico se enlistan en la Tabla 1, y son los mismos utilizados por Cruz Rico (2015), quien realizó una revisión bibliográfica para aplicar el modelo a Baja California y la Bahía

de Todos Santos. Tanto para la frontera abierta del dominio como para la condición inicial se utilizaron los valores constantes y uniformes de 0.08, 0.06 y 0.04 mM m⁻³ para el fitoplancton, el zooplancton y detritos, respectivamente. Para el caso del nitrato se utilizó el producto climatológico del Centro Nacional de Datos Oceanográficos (NODC, por sus siglas en inglés): www.nodc.noaa.gov.

Tabla 1. Parámetros utilizados para el modelo NPZD.

Nombre del parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Coefficiente de extinción de luz	k_z	0.067	m ⁻¹
Coefficiente de auto-sombreado	k_p	0.0095	m ² mmol-N ⁻¹
Pendiente inicial de la curva P-I	α	0.025	m ² W ⁻¹ d ⁻¹
Tasa de asimilación de nitrato	V_m	1.5	d ⁻¹
Media de saturación de asimilación	K_N	0.5	mmol-N m ⁻³
Mortalidad del fitoplancton	σ_d	0.1	d ⁻¹
Tasa de pastoreo del zooplancton	R_m	0.6	d ⁻¹
Constante de l _{vlev}	Λ	0.06	m ³ mmol-n ⁻¹
Eficiencia de excreción	γ_n	0.3 (30%)	
Mortalidad del zooplancton	ζ_d	0.1	d ⁻¹
Remineralización	δ	0.05	d ⁻¹
Tasa de hundimiento	w_d	5	m d ⁻¹

El acoplamiento del modelo físico y biológico es simple, el tiempo utilizado para el modelo físico es suficiente para resolver los procesos biológicos, por lo que los dos modelos se corren como uno solo. Los elementos N, P, Z y D experimentan advección y difusión simultáneamente con los campos de temperatura y salinidad mediante algoritmos idénticos.

2.4 Simulaciones

Las simulaciones del modelo físico-biológico se realizaron por 3 años para finalidad de ajuste de las variables diagnosticadas (proceso de *spin-up*), y posteriormente para los años 2012, 2013 y 2014 sin incluir la descarga ribereña del Río Yaqui. En este estudio se analizaron las salidas del 2013, refiriéndose a éste como el escenario “No río”. Posteriormente se realizaron cuatro simulaciones de 60 días de duración incluyendo la descarga ribereña únicamente durante los primeros 30 días, como escenarios “Con río”, para los meses de (1) marzo-abril y (2) agosto-septiembre, que corresponden a las temporadas de invierno y verano respectivamente; para el mes de (3) noviembre-diciembre, que corresponde a la temporada de otoño, el cual se seleccionó debido a las tasas de fertilización máximas registradas en el Valle del Yaqui, razón por la cual se generó una última simulación con un (4) aporte extremo de nutrientes provenientes del río. El Río Yaqui se ubicó en las coordenadas 27.73°N y 110.5°O (Figura 2). Se configuró con un gasto

constante (Q) de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un aporte de nutrientes constante de 100 mM N m^{-3} , la salinidad y la temperatura se mantuvieron constantes con un valor de 0 y 24°C , respectivamente. Para la simulación del aporte extremo de nutrientes se cambió únicamente el Q a $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Las salidas del modelo físico-biológico aplicado al dominio general, el Golfo de California, son comparadas con mediciones directas y otros estudios con la finalidad de comparar e identificar las características físicas y los parámetros biológicos que se reproducen adecuadamente. Para la evaluación del aporte de N mediante el Río Yaqui se analizó únicamente la zona adyacente a éste.

Para comparar las simulaciones con río y sin río se generaron promedios temporales para cada régimen, calculando el promedio diario de la zona adyacente al río de superficie a 100 m de profundidad, zona en la que se encuentra el máximo subsuperficial del fitoplancton. Por otro lado, los promedios espaciales se calcularon por periodos de 10 días, iniciando con la descarga. Al igual que en las series temporales se calcularon dentro de los primeros 100 m de profundidad, pero para todo el Golfo.

2.5 Advección de Partículas

A partir de las salidas del modelo se calcularon las trayectorias de 150 partículas pasivas las cuales son advectadas por los campos de velocidad del modelo en los meses de marzo, agosto y noviembre. Las partículas se situaron en la desembocadura del Río Yaqui como posición inicial, y se resuelven en el mismo tiempo y espacio en el modelo tridimensional. Las partículas pueden moverse no sólo en la horizontal sino también en la vertical, siguiendo el método de Rivas y Samelson (2011).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Comparación del modelo con observaciones

Se realizó una comparación de las salidas del modelo con observaciones y trabajos previos para evaluar su confiabilidad, e identificar los procesos y patrones que están bien representados.

3.1.1 Datos de satélite

Se determinaron los promedios mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM) de las salidas del modelo para compararlas con datos satelitales, los cuales se obtuvieron del producto Aqua MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) provenientes de la página de internet de la NASA Ocean Color (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/>). El modelo reproduce adecuadamente la variación anual de la TSM en el Golfo de California, en donde se han reportado valores máximos en condiciones de verano (julio-septiembre) y valores mínimos en condiciones de invierno (enero-marzo). Para el año 2013 la temperatura mínima se observó en el mes de febrero con $\sim 18^{\circ}\text{C}$, tanto en los datos del MODIS como del ROMS, mientras que la temperatura máxima se observó en agosto con $\sim 30^{\circ}\text{C}$ en los datos del MODIS, pero de $\sim 27.5^{\circ}\text{C}$ en los datos del modelo (Figura 4). El esfuerzo del viento influye en la TSM ya que genera surgencias que transportan agua profunda y fría. Cuando predominan los vientos del sureste, generalmente en verano, la surgencia se da en la región peninsular del Golfo por transporte de Ekman, el viento genera un transporte de agua hacia fuera de la costa la cual es reemplazada por agua más profunda y fría; por otra parte, en la costa continental el transporte de agua cálida superficial es hacia la costa, provocando la acumulación y hundimiento de la misma.

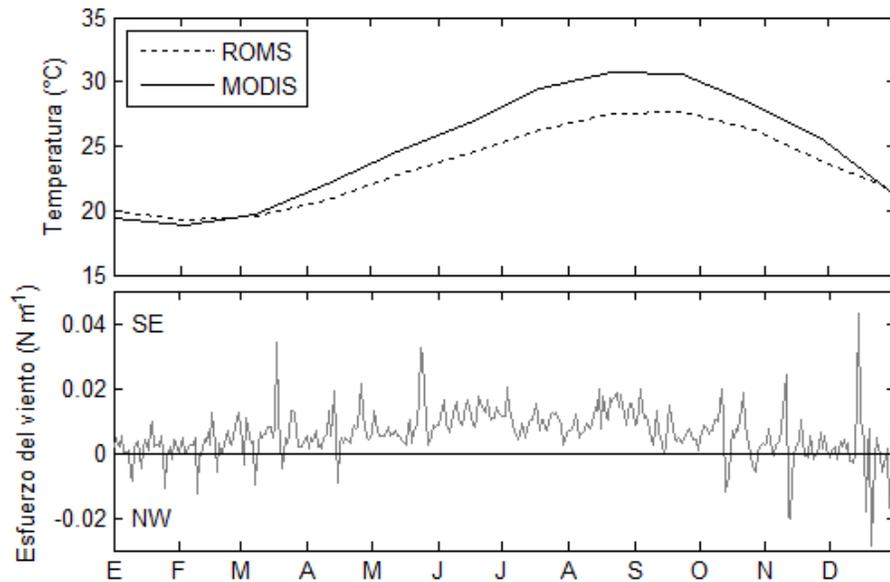


Figura 4. Serie de tiempo de la TSM para todo el Golfo con datos del modelo y del MODIS, y esfuerzo del viento a lo largo del Golfo (forzamiento en el modelo).

En la Figura 5 se presenta el promedio espacial de la TSM de las salidas del modelo y los datos satelitales para los meses de marzo y noviembre. Al igual que en las series temporales se puede observar que las salidas del modelo presentan temperaturas más frías que los datos satelitales, especialmente en la región del Alto Golfo en donde se puede observar diferencias de 2°C en el mes de noviembre, mientras que en el mes de marzo las diferencias son menores a 1°C (Figura 5 a2 y b2). Por otro lado, el patrón de variación de agua cálida en la entrada del Golfo a agua fría hacia el norte está bien representado, al igual que las temperaturas más bajas en la región de las Grandes Islas ocasionadas por las fuertes surgencias que persisten durante todo el año.

Se observaron núcleos cálidos y fríos a lo largo de todo el Golfo como consecuencia de la circulación estacional. En el Alto Golfo la circulación ciclónica en invierno dio como resultado la generación de un núcleo cálido, mientras que la circulación anticiclónica en verano generó un núcleo frío. Sobre la cuenca San Pedro Mártir se presentó un núcleo cálido durante la mayor parte del año, a excepción de los meses de julio, agosto y septiembre cuando cambió a un núcleo frío. Este núcleo por lo general es seguido hacia el sur por otro con circulación contraria.

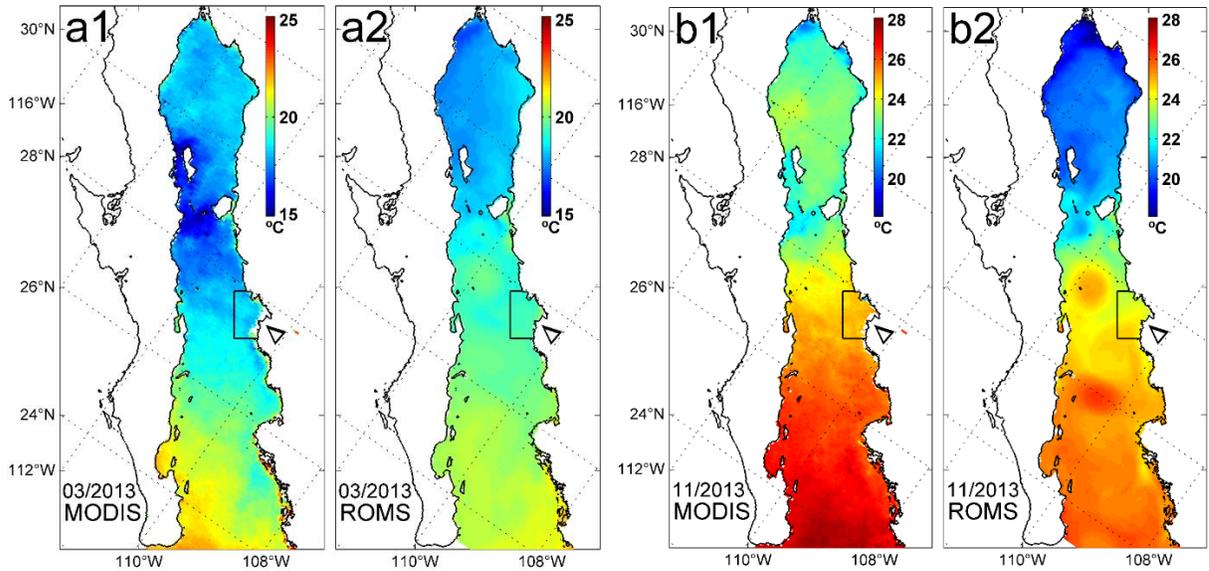


Figura 5. TSM promedio para el mes de (a) marzo y (b) noviembre, los números corresponden a los datos de satélite (1) y a los resultados del modelo (2).

3.1.2 Estructuras de mesoescala

Una de las características más importantes en la circulación del Golfo es la presencia de remolinos de mesoescala, particularmente en la entrada y centro del Golfo. Estas estructuras se han observado en su mayoría en la región sur del Golfo mediante imágenes satelitales, datos hidrográficos, boyas de deriva y modelos numéricos. Se han reportado tamaños de 70 a 120 km de diámetro aproximadamente, con duraciones de 2 a 3 meses, desplazándose hacia el centro del Golfo y alternando el sentido de su circulación (Lavín et al., 2013, 2014; Pegau et al., 2002; Zamudio et al., 2008).

En este estudio se observa una serie de remolinos durante todo el año en la región sur y centro del Golfo con diámetros de 50 a 90 km. Estos remolinos alternan el sentido de su circulación, excepto en los meses de marzo y abril, cuando dominan los remolinos anticiclónicos, provocando una elevación positiva del nivel del mar de ~ 5 cm, y en el mes de agosto cuando dominan los remolinos ciclónicos, provocando una depresión en el nivel del mar de ~ -9 cm. El remolino más grande se observa en la entrada del Golfo en el mes de marzo y presenta un diámetro de ~ 180 km y velocidades de ~ 0.2 m s $^{-1}$ (Figura 6a). En el mes de agosto también se observa este remolino, pero parece desprenderse de otro situado en la entrada del Golfo, en este periodo presentan velocidades mayores, de ~ 0.4 m s $^{-1}$ (Figura 6b).

Estos cambios en la circulación se reflejan también en la TSM. Como se mencionó anteriormente en los mapas de la TSM, se observa un remolino cerca de la cuenca de San Pedro Mártir el cual presenta un núcleo cálido en comparación con la TSM de los alrededores en los meses de marzo y noviembre (Figura 6a2 y b2), y un núcleo frío en agosto. En cuanto a la región norte del Golfo se puede observar un remolino cuya dirección cambia estacionalmente (Figura 6), particularmente en verano cuando las velocidades superficiales son mayores ($\sim 0.4 \text{ m s}^{-1}$) y se nota claramente la circulación ciclónica. En invierno las velocidades son menores ($\sim 0.1 \text{ m s}^{-1}$) en esta región y el giro anticiclónico no es tan apreciable, además se encuentra desplazado hacia la costa peninsular, mientras que en verano se observa hacia el centro del Golfo.

En la zona de la descarga del Río Yaqui también se observan remolinos que cambian de sentido, de noviembre a febrero persiste un remolino ciclónico con velocidades de 0.25 m s^{-1} , sin embargo en marzo y abril domina un remolino anticiclónico con velocidades 0.2 m s^{-1} . Durante julio y agosto se observa un remolino ciclónico, sin embargo una corriente junto a la costa continental con dirección hacia el norte parece dominar la circulación en la zona. Estos remolinos se encargan de transportar los nutrientes descargados por el Río Yaqui, al igual que con el fitoplancton en caso de que ocurra un florecimiento.

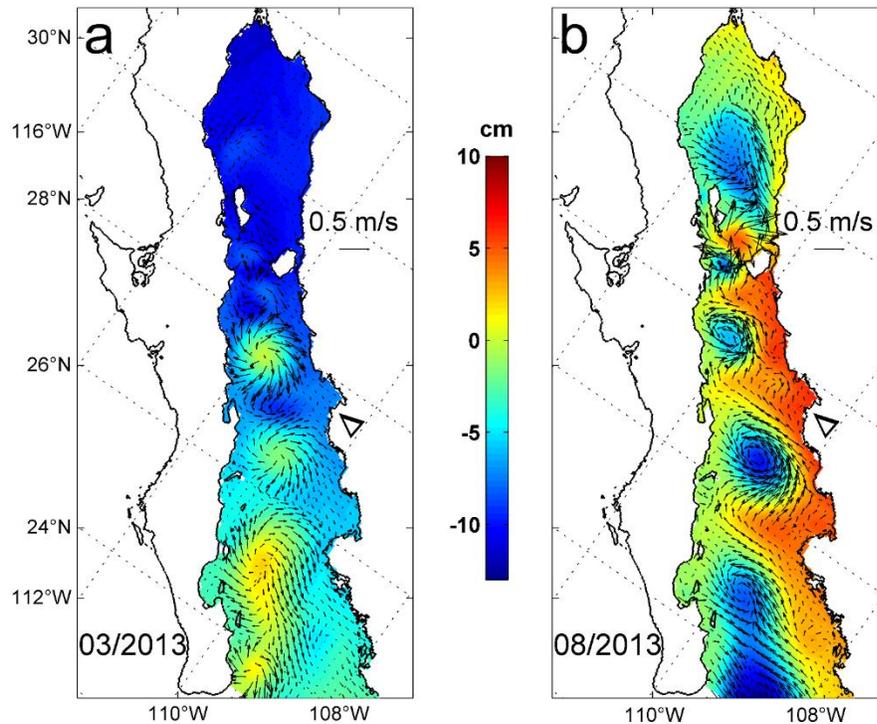


Figura 6. Vectores de velocidad promedio superficial (m s^{-1}) para (a) marzo y (b) agosto. En color se presenta el nivel del mar (cm).

3.2 Descargas costeras

Se presentan los resultados de los diferentes regímenes estacionales, invierno (marzo), verano (agosto) y otoño (noviembre), así como un evento extremo de aporte de nutrientes, con la finalidad de evaluar la respuesta del fitoplancton ante el aporte de nutrientes del Río Yaqui en diferentes condiciones físicas.

3.2.1 Invierno

El viento en el Golfo presenta una fuerte variación estacional debido a los cambios en los gradientes de presión. En invierno los vientos provienen del noroeste, son intensos y provocan el enfriamiento de las aguas superficiales, ya que transportan calor hacia fuera del Golfo (Lavín y Marinone, 2003; Roden, 1958). En la región del Alto Golfo se puede observar que el viento presenta grandes variaciones tanto en dirección como en intensidad, mientras en el centro y sur del Golfo la intensidad es constante, aunque existe variación en la dirección de norte a sur (Figura 7). Los vientos del noroeste son causantes de surgencias en la región continental y hundimiento en la región peninsular. La Figura 8 muestra las características del transecto que comienza en la desembocadura del Río Yaqui, atravesando el Golfo hasta la península de Baja California, donde se observa la distribución vertical de la temperatura promedio para el mes de marzo (Figura 8c) que en promedio es de 20°C en la superficie, disminuyendo con la profundidad. La isoterma de

los 18°C se encuentra en promedio a los 54 m de profundidad, y contrario a lo que se esperaría presenta un levantamiento en la región peninsular debido al bombeo de Ekman el cual es más intenso en esta zona (Figura 8-1), lo cual genera un intenso florecimiento con valores mayores a 1 mM m^{-3} . Sin embargo, en la Figura 8a se puede observar en la superficie un aumento en el fitoplancton en la costa continental, producto de la surgencia por el viento. El agua que se desplaza hacia fuera de la costa continental es reemplazada por agua profunda, fría y rica en nutrientes, lo cual promueve el crecimiento del fitoplancton, presentando valores de 0.4 mM m^{-3} , mientras que el máximo subsuperficial se encuentra alrededor de los 50 m con valores de hasta 1.5 mM m^{-3} (Figura 8a). Los nutrientes presentan valores mínimos en los primeros 50 m debido al consumo por fitoplancton, éstos aumentan con la profundidad alcanzando valores de 30 mM m^{-3} (Figura 8b). La sección que se presenta en la Figura 8 cruza los límites de dos remolinos anticiclónicos, ocasionando una depresión en el nivel del mar (Figura 8), lo cual junto con el régimen de viento y la circulación estacional provocan una surgencia favoreciendo el crecimiento del fitoplancton y una elevación de la isoterma.

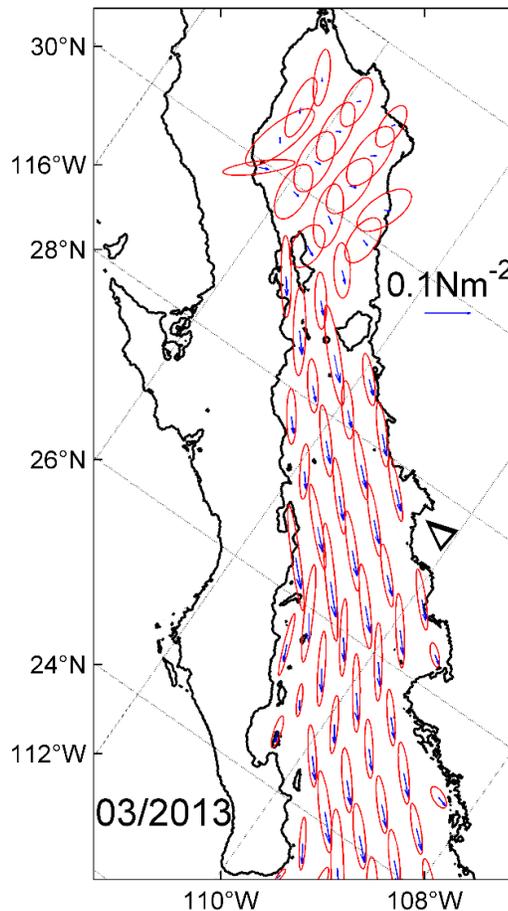


Figura 7. Esfuerzo y dirección del viento y sus elipses de variación (desviación estándar) para el mes de marzo.

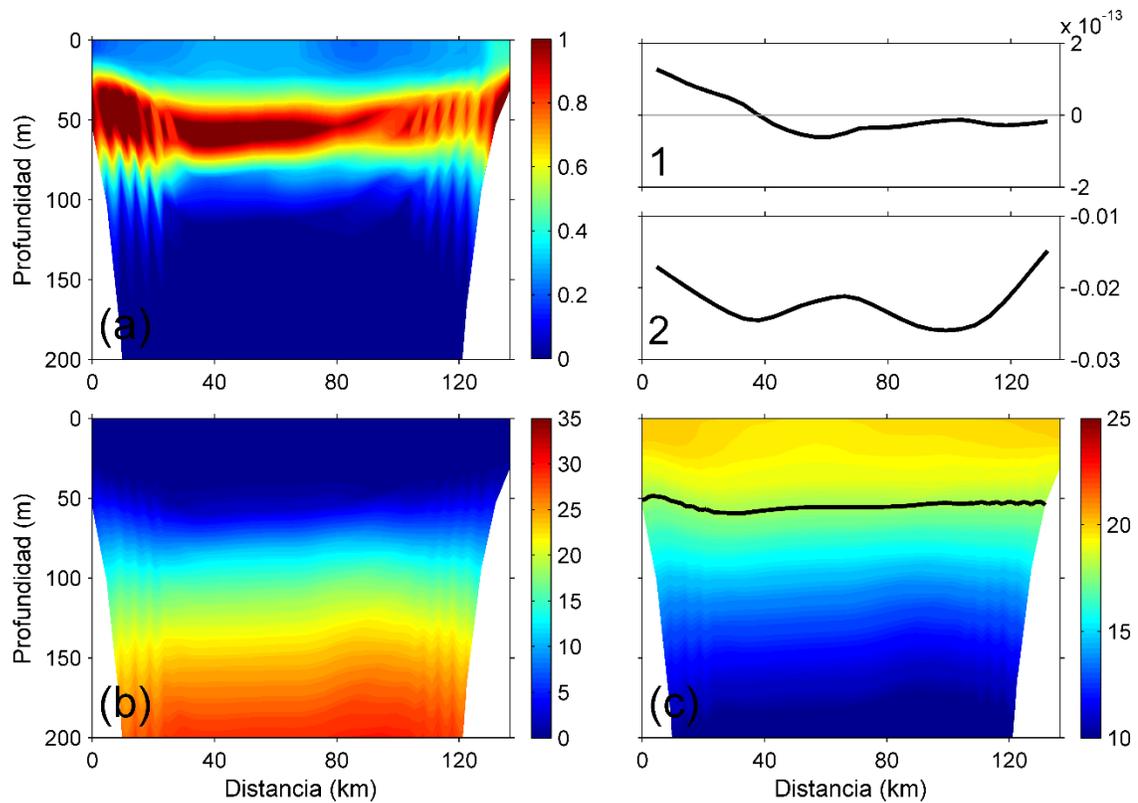


Figura 8. Distribución vertical de (a) Fitoplancton (mM m^{-3}), (b) Nutrientes (mM m^{-3}) y (c) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) promedio para el mes de marzo, se muestra la isoterma de los 18°C . Series temporales de (1) bombeo de Ekman (m s^{-1}) y (2) esfuerzo del viento (N m^{-2}) a lo largo de la sección. El lado izquierdo de las figuras representa la costa peninsular y el lado derecho la costa continental.

Como primera aproximación de la distribución que presentarían los nutrientes aportados por el Río Yaqui, se calculó la advección de 150 partículas pasivas durante 30 días, colocadas junto a la descarga de éste. En la Figura 9 se observan las trayectorias de 40 partículas (para mejorar la visualización), las cuales fueron advectadas hacia fuera de la costa, siguiendo la circulación de las estructuras de mesoescala. Dos remolinos anticiclónicos cerca de la zona ocasionaron una depresión en el nivel del mar de ~ 8 cm en sus límites, cerca de la desembocadura del río. Uno de los remolinos ubicado hacia el norte transportó las partículas hacia fuera de la costa, posteriormente el remolino ubicado al sur las desplazó nuevamente hacia la costa continental y hacia el sur (Figura 9a). Las partículas en los primeros 10 días, que generalmente se encuentran en la zona adyacente al río, en promedio se mantienen en la superficie a 3 m de profundidad, esto es debido a la surgencia se mantienen someras, algunas alcanzan como máximo 15 m de profundidad (Figura 9b). En general el desplazamiento de las partículas es hacia fuera de la costa y hacia el sur, transportadas por la fuerte circulación anticiclónica en este periodo, aunque la mayoría se quedan atrapadas en la región central de Golfo. Esto sugiere un transporte de nutrientes hacia la costa

peninsular, que podría generar un florecimiento de fitoplancton que se desplace rápidamente hacia el centro del Golfo.

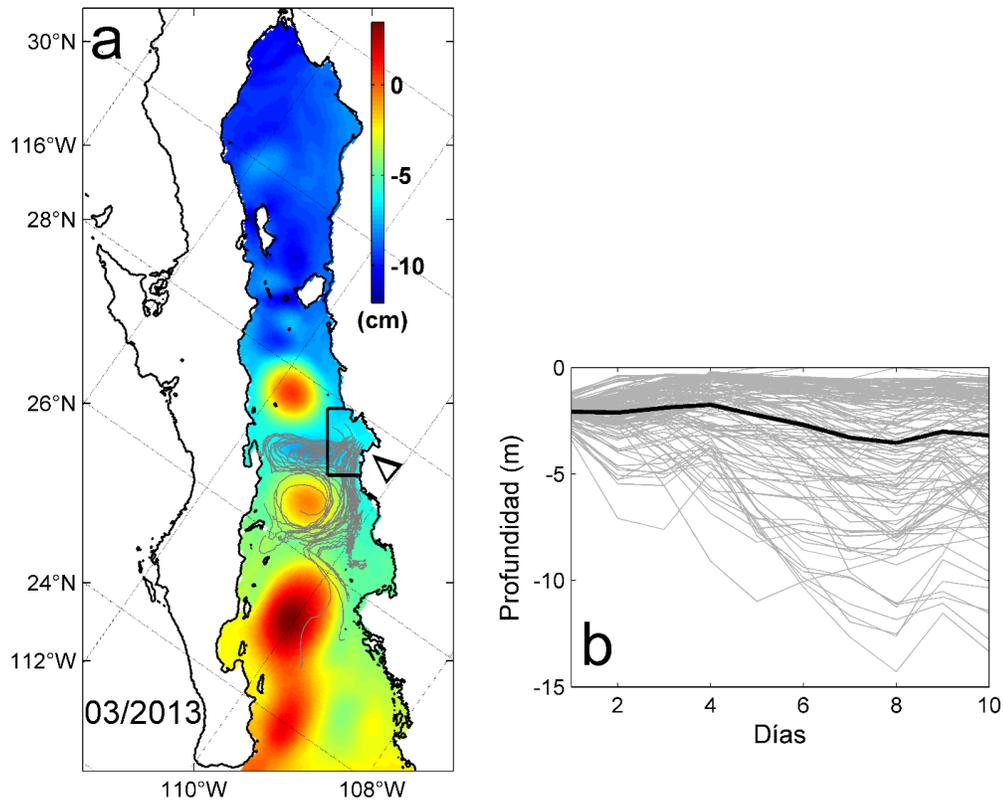


Figura 9. (a) Trayectoria de 40 partículas (de las 150 partículas advectadas) durante 30 días, iniciando el 1º de marzo, en color se muestra el nivel del mar promedio para ese mes, y (b) su trayectoria en la columna de agua durante 10 días.

En la Figura 10 se observan las diferencias promedio desde la superficie hasta 100 m, entre la simulación con río y sin río. La salinidad muestra una respuesta rápida ante el aporte del río, mostrando diferencias mayores a 0.6 en la desembocadura del río. Esta lengüeta de agua menos salada se desplaza hacia fuera de la costa mediante los remolinos que se presentan adyacentes al río, aunque se mezcla rápidamente con el agua interior del Golfo. Las diferencias más grandes se muestran en el periodo de 20 a 30 días, al final de la descarga, y de los 30 a 40 días, incluso cuando ya no hay descarga de agua. Se observan pequeñas diferencias en los nutrientes, pero el aumento en el fitoplancton a los 10 días de la descarga sugiere que están siendo consumidos. La descarga de nutrientes genera un florecimiento que se desplaza hacia el centro del Golfo, alrededor de 100 km lejos de la desembocadura del río. El florecimiento persiste incluso 10 días posteriores a la descarga, hasta que desaparece, sin embargo se observan pequeñas diferencias ($\sim 0.1 \text{ mM m}^{-3}$) de fitoplancton y nutrientes que siguen la dirección de los remolinos anticiclónicos presentes en este periodo. En consecuencia los nutrientes se ven transportados ocasionando que el

fitoplancton aumente incluso fuera de la zona junto al río. Los vectores del componente de velocidad no sólo indican el transporte de las variables, sino que también se observa que el cambio en la dirección de éstos influye en el aumento del fitoplancton, como se puede observar en el periodo de 20 a 30 días.

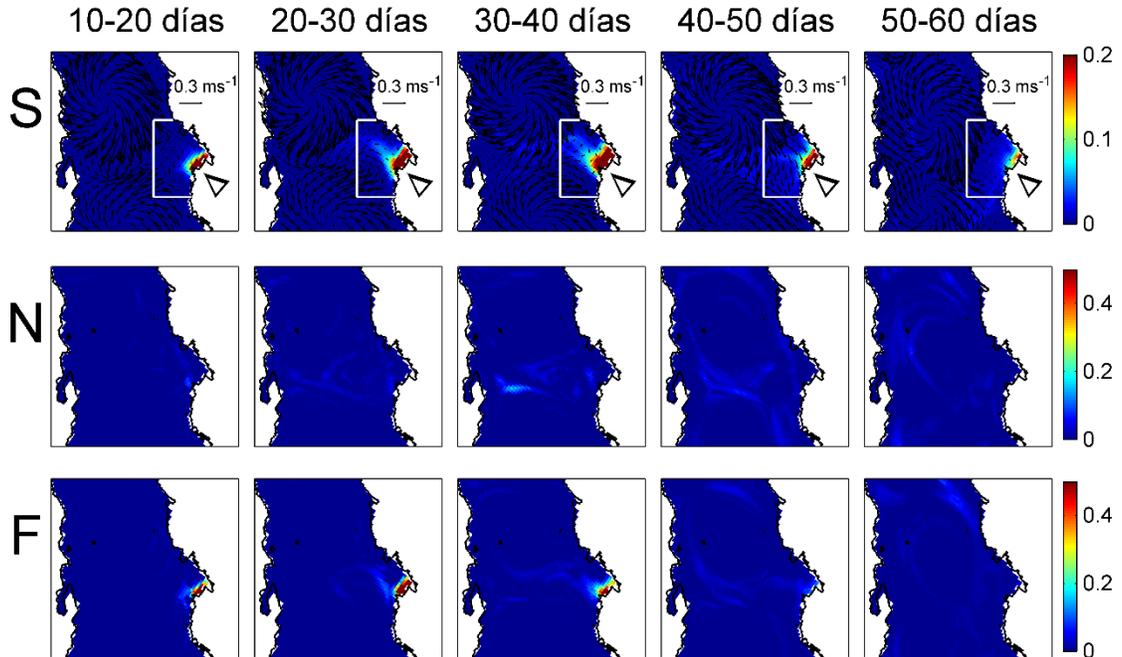


Figura 10. Diferencias espaciales con y sin río, desde superficie hasta 100 m, de salinidad, nutrientes (mM m^{-3}) y fitoplancton (mM m^{-3}), promedios para diferentes periodos, durante el mes de descarga (marzo) y 30 días después (abril). Los vectores muestran la velocidad promedio a cada periodo.

3.2.2 Verano

Como se mencionó anteriormente, el viento en el Golfo varía estacionalmente, cambiando su dirección e intensidad. En verano los vientos provienen del sureste y en comparación con el régimen de invierno son más débiles, a excepción de la región del Alto Golfo en donde el viento se intensifica presentando grandes variaciones en su dirección (Figura 11). La surgencia en este periodo se presenta en la región peninsular, pero se ha observado que su influencia en el crecimiento del fitoplancton es mínima ya que el agua se encuentra más estratificada y se requiere de mayor energía para transportar los nutrientes de aguas profundas hacia la zona eufótica (Santamaría-del-Ángel et al., 1999). Esta estratificación se puede observar en la Figura 12c, la cual muestra la distribución vertical de la temperatura promedio para el mes de agosto, cuando en la superficie alcanza valores de $\sim 30^\circ\text{C}$. La isoterma de los 18°C se encuentra a 78 m en promedio y se observa un ligero hundimiento de esta isoterma en la región peninsular, causada por el bombeo de Ekman (Figura 12-1), que contrario al régimen de invierno ahora ocasiona hundimiento en la costa. Sin embargo, alrededor de los 50 m se puede observar un florecimiento de $\sim 0.8 \text{ mM m}^{-3}$, debido al transporte

de Ekman ocasionado por los vientos del sureste se puede observar esta surgencia en la isoterma de los 22°C, la cual muestra un levantamiento en esta zona. En cuanto a la distribución vertical de nutrientes, éstos comienzan a aumentar a los 100 m, mientras que en invierno comenzaban a aumentar a los 70 m, esto ocasionado también por el hundimiento del máximo subsuperficial del fitoplancton, el cual se encuentra a los 75 m aproximadamente. En la región peninsular se observa mayor abundancia de fitoplancton ($\sim 0.9 \text{ mM m}^{-3}$), mientras que en la región continental (junto al río) los valores de fitoplancton son bajos ($\sim 0.3 \text{ mM m}^{-3}$), por lo que un aporte de nutrientes en este periodo pudiera tener un fuerte efecto en su abundancia. La sección vertical se ve influenciada por un remolino anticiclónico, el cual ocasiona el hundimiento de la isoterma y del máximo subsuperficial de fitoplancton.

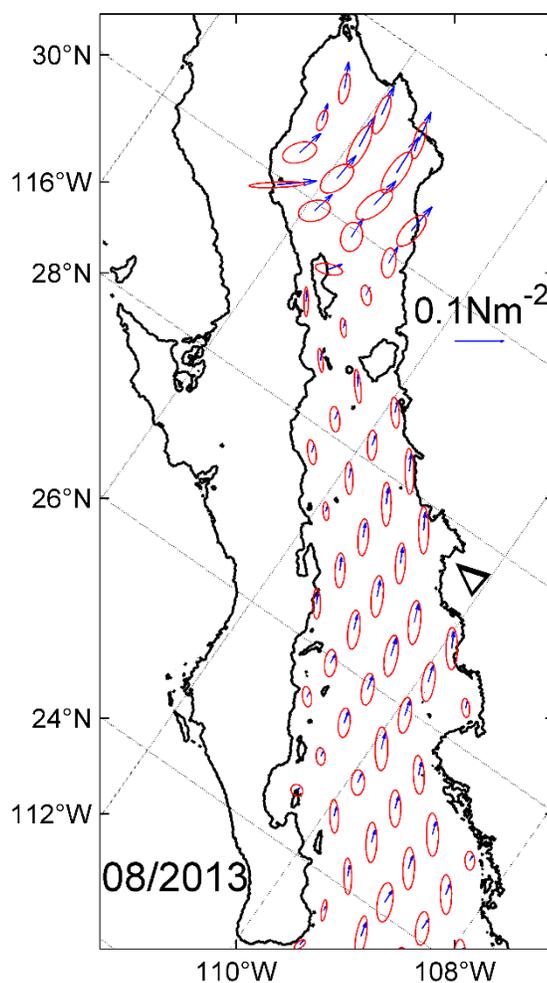


Figura 11. Esfuerzo y dirección del viento y sus elipses de variación (desviación estándar) para el mes de agosto.

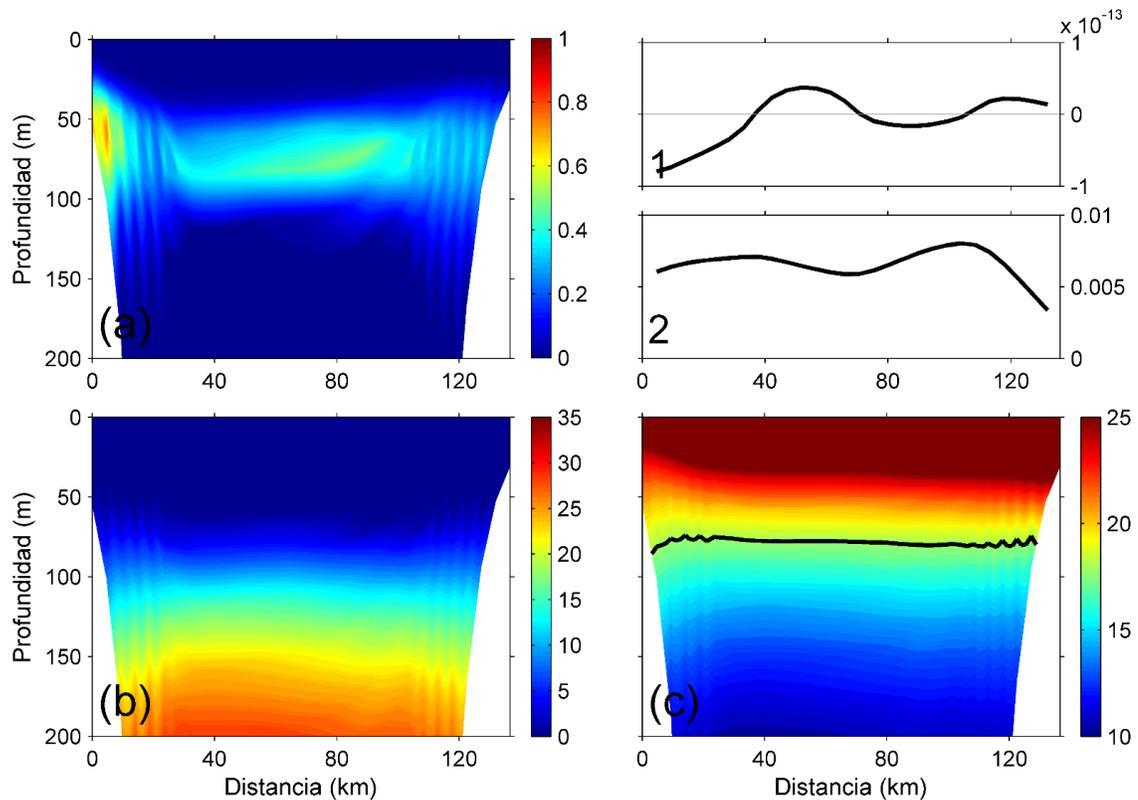


Figura 12. Distribución vertical de (a) Fitoplancton (mM m^{-3}), (b) Nutrientes (mM m^{-3}) y (c) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) promedio para el mes de agosto, se muestra la isoterma de los 18°C . Series temporales de (1) bombeo de Ekman (m s^{-1}) y (2) esfuerzo del viento (N m^{-2}) a lo largo de la sección. El lado izquierdo de las figuras representa la costa peninsular y el lado derecho la costa continental.

Las partículas muestran un desplazamiento hacia el norte junto a la costa continental, la circulación es mayormente ciclónica, por lo que las partículas quedan atrapadas a la costa, incluso algunas tardan hasta 20 días en salir de la zona adyacente al río (Figura 13a). Durante este periodo algunas partículas se hunden rápidamente, aunque en promedio se mantienen dentro de los primeros 5 m de profundidad (Figura 13b). Otras partículas son desplazadas más rápidamente hacia el norte, hasta llegar a las Grandes Islas. Este cambio en la circulación sugiere que la distribución de los nutrientes y el fitoplancton tendrán variaciones estacionales muy marcadas de acuerdo al momento de la descarga del río.

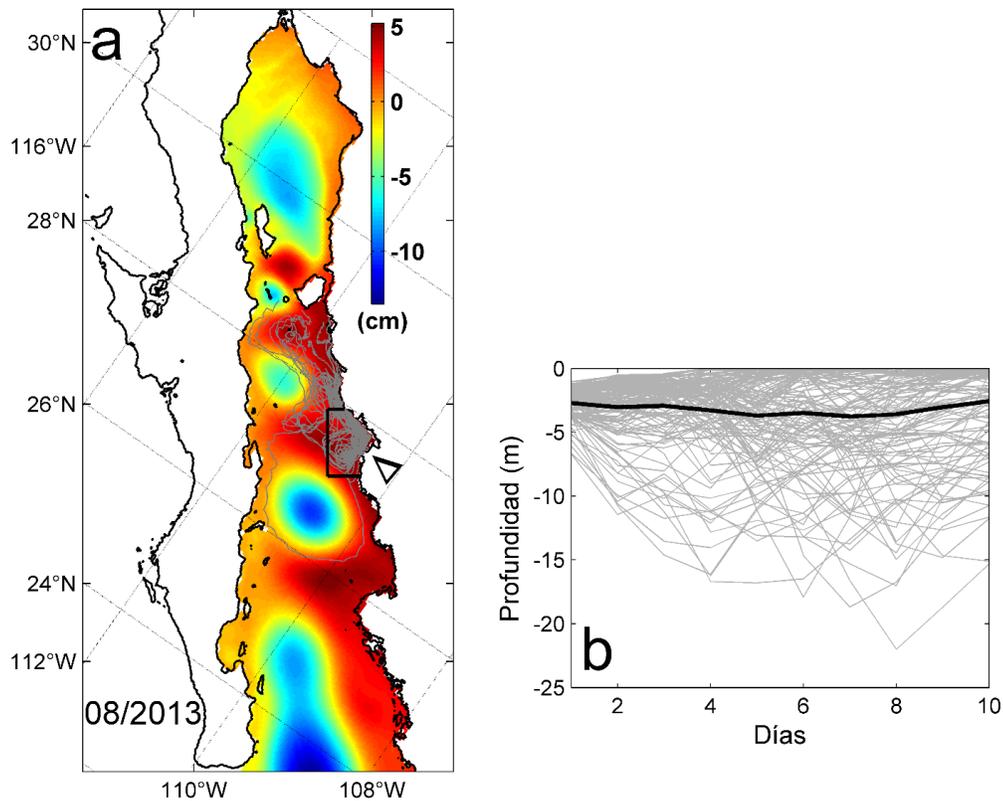


Figura 13. (a) Trayectoria de 40 partículas (de las 150 partículas advectadas) durante 30 días, iniciando el 1º de agosto, en color se muestra el nivel del mar promedio para ese mes, y (b) su trayectoria en la columna de agua durante 10 días.

Los nutrientes aumentan con el aporte de río y se observan diferencias de hasta 0.5 mM m^{-3} junto a la descarga, en esta zona se observan remolinos con velocidades de más de 0.3 m s^{-1} , los cuales varían su dirección en los periodos de 10 a 30 días. Se observa una corriente que va hacia el norte, influenciada por un remolino ciclónico, posteriormente un remolino anticiclónico domina la circulación en la zona. Estas estructuras transportan los nutrientes hacia el centro y norte del Golfo, incluso en los periodos posteriores a la descarga, en donde se pueden observar diferencias de 0.2 mM m^{-3} (Figura 14). Sin embargo las diferencias que se observan en el fitoplancton durante el mes de la descarga son mínimas ($<0.1 \text{ mM m}^{-3}$), es decir los nutrientes no están siendo consumidos, sino que están siendo transportados. A finales del mes de septiembre, es decir 20 días después del aporte de río, se observa un aumento en el fitoplancton (Figura 14). Esta diferencia se observa en los mapas espaciales de fitoplancton, en donde se puede observar una mancha de fitoplancton a 70 km de la descarga del río, lo cual sugiere que aunque los nutrientes no están siendo consumidos inmediatamente, están siendo transportados y pueden generar florecimientos en otras regiones del Golfo, incluso días después de la descarga del río.

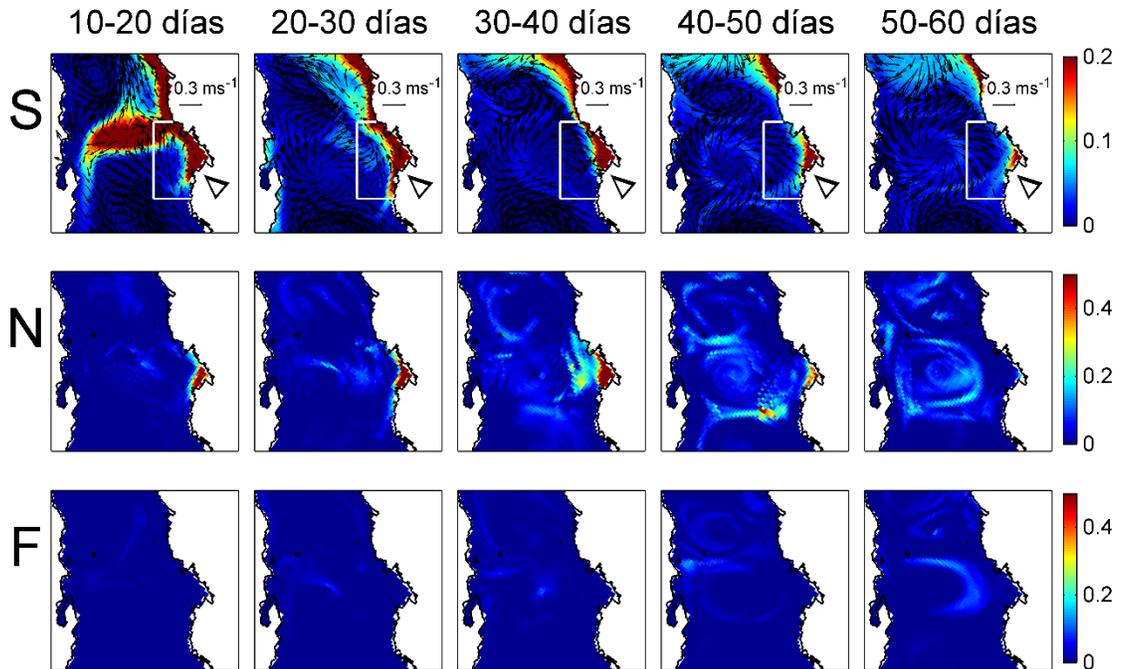


Figura 14. Diferencias espaciales de salinidad, nutrientes (mM m^{-3}) y fitoplancton (mM m^{-3}), promedios para diferentes periodos, durante el mes de descarga (agosto) y 30 días después (septiembre). Los vectores muestran la velocidad promedio a cada periodo.

3.2.3 Otoño

El viento, al igual que en marzo, proviene del noroeste, aunque presenta mayor variación en la dirección y es más débil, por lo que las surgencias no son tan intensas en este periodo (Figura 15). Como se observa en la Figura 16c la temperatura superficial disminuye, presentando en promedio 23°C , la isoterma de 18°C sigue estando más profunda que en invierno, a 70 m. Los valores de fitoplancton son bajos ($<0.4 \text{ mM m}^{-3}$) comparados a los valores de invierno (1.4 mM m^{-3}) y verano (0.7 mM m^{-3}) y el máximo subsuperficial se encuentra a $\sim 57 \text{ m}$ (más profundo que en invierno). La sección vertical cruza a los límites de un remolino anticiclónico al norte y un remolino ciclónico al sur, por lo que el transporte se mantiene en el centro del Golfo en donde se observan los valores más altos de fitoplancton, mientras que la región continental los valores de fitoplancton son $<0.1 \text{ mM m}^{-3}$ (Figura 16a).

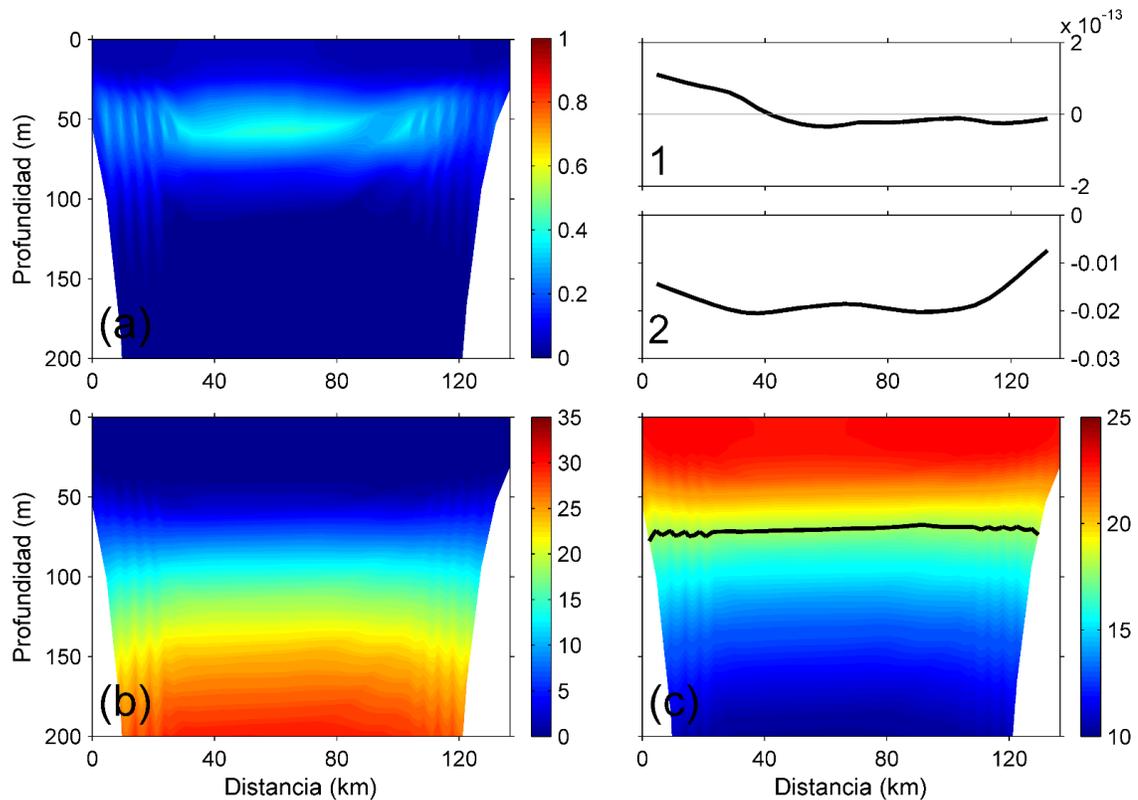


Figura 16. Distribución vertical de (a) Fitoplancton (mM m^{-3}), (b) Nutrientes (mM m^{-3}) y (c) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) promedio para el mes de noviembre, se muestra la isoterma de los 18°C . Series temporales de (1) bombeo de Ekman (m s^{-1}) y (2) esfuerzo del viento (N m^{-2}) a lo largo de la sección. El lado izquierdo de las figuras representa la costa peninsular y el lado derecho la costa continental.

El transporte de las partículas es similar al de marzo, sin embargo los remolinos son más intensos, provocando un mayor atrapamiento de las partículas. Al principio se observa que las partículas se quedan atrapadas en la zona adyacente al río, a partir de los diez días comienzan a desplazarse fuera de la zona hacia el noroeste, pero un cambio en la dirección del componente de velocidad las termina desplazando hacia el suroeste, aunque algunas continúan hacia el noroeste. La mayoría de las partículas no se desplazan más de 200 km, ya que se quedan atrapadas en el remolino ciclónico que se encuentra hacia el sur de la desembocadura del río, en el centro del Golfo (Figura 17).

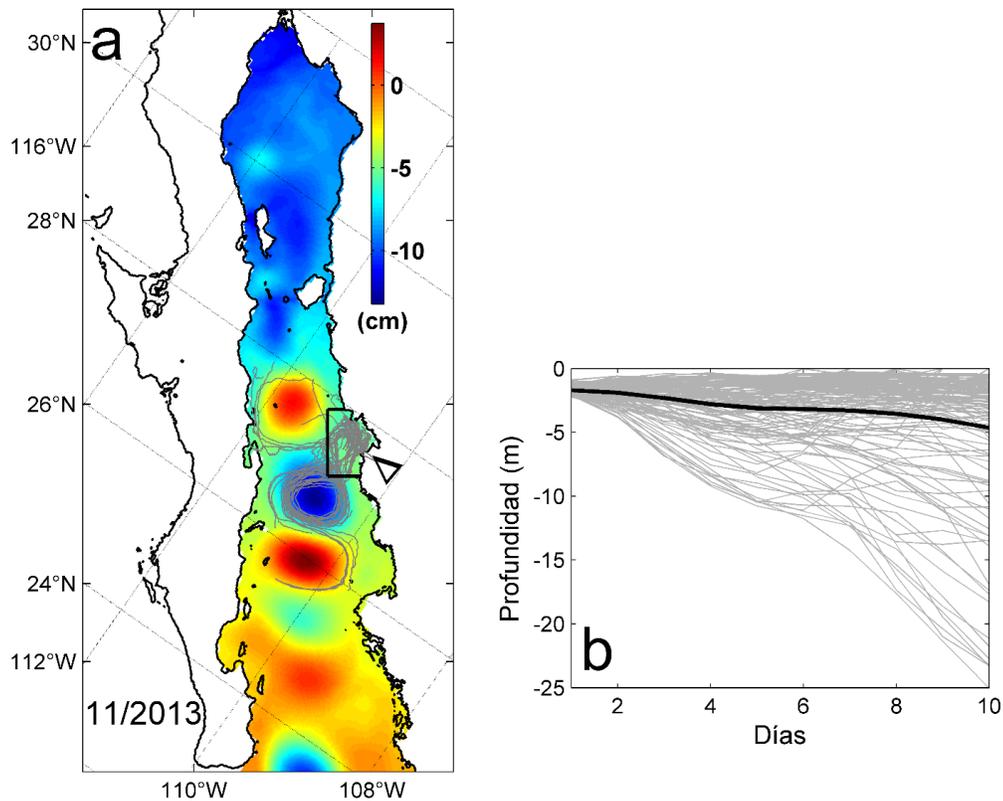


Figura 17. (a) Trayectoria de 40 partículas (de las 150 partículas advectadas) durante 30 días, iniciando el 1º de noviembre, en color se muestra el nivel del mar promedio para ese mes, y (b) su trayectoria en la columna de agua durante 10 días.

Se puede observar en la Figura 18 que la lengüeta de agua dulce proveniente del río se mantiene pegada a la costa, parece estar restringida a la zona junto al río, y no se desplaza a más de 40 km. En este periodo la zona está influenciada por dos remolinos (uno anticiclónico al norte y uno ciclónico al sur), en el periodo de 20 a 30 días se observa una corriente hacia el norte, y los nutrientes son transportados siguiendo el remolino anticiclónico, por lo que se observan diferencias al norte y centro del Golfo al finalizar el aporte de río. Estos nutrientes son consumidos por el fitoplancton, por lo que se observa un florecimiento a los 20 días del aporte, este florecimiento se restringe a la costa junto al río, aunque se observan pequeñas diferencias (0.2 mM m^{-3}) al norte de esta zona.

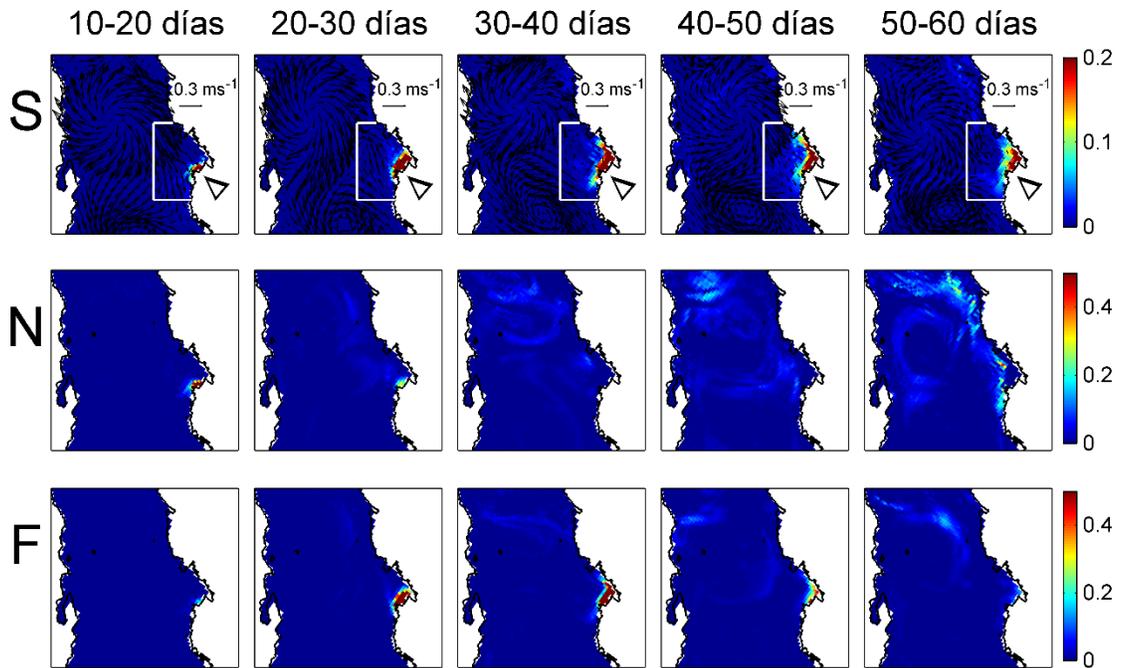


Figura 18. Diferencias espaciales de salinidad, nutrientes (mM m^{-3}) y fitoplancton (mM m^{-3}), promedios para diferentes periodos, durante el mes de descarga (noviembre) y 30 días después (diciembre). Los vectores muestran la velocidad promedio a cada periodo.

3.2.4 Evento extremo

La simulación se realizó en el mes de noviembre, ya que se han registrado las tasas más altas de fertilización en el Valle del Yaqui, lo que implicaría mayor cantidad de nutrientes transportados hacia el Golfo. Con este aporte de agua la salinidad disminuye drásticamente y los nutrientes aumentan de manera inmediata (Figura 19), sin embargo el fitoplancton no aumenta sino hasta los 20 días posteriores a la descarga. En el periodo de 10 a 20 días se observa un transporte hacia el sur en la lengüeta del río y los nutrientes siguiendo la dirección del componente de velocidad, posteriormente en el periodo de 20 a 30 días se observa un cambio en la dirección de este hacia el norte, cambiando también el transporte de las variables. En este periodo inicia el florecimiento de fitoplancton el cual se desplaza fuera de la costa hacia el centro del Golfo, aunque las mayores diferencias ocurren dentro de la zona junto al río, se observan pequeñas diferencias fuera de esta zona. En el periodo de 50 a 60 días (a los 20 días de haber finalizado la descarga), se observa un aumento en los nutrientes, lo cual sugiere que la remineralización debe estar transformando los detritos, provenientes del florecimiento de fitoplancton, en nutrientes nuevos. Por lo tanto aun días después del aporte se observan diferencias, incluso fuera de la zona adyacente al río.

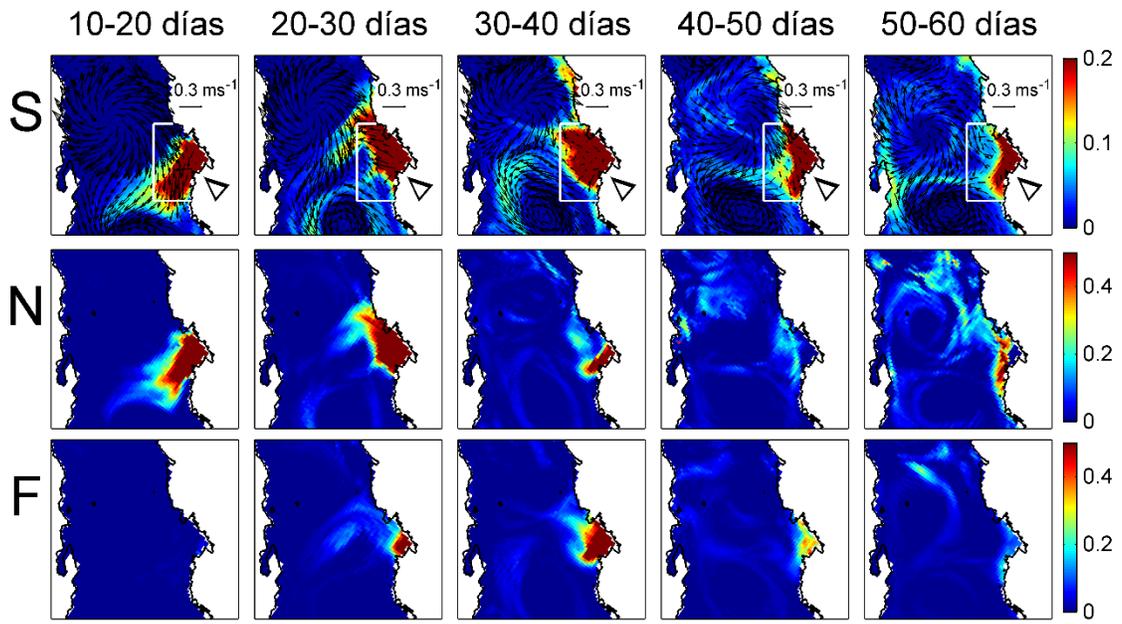


Figura 19. Diferencias espaciales de salinidad, nutrientes (mM m^{-3}) y fitoplancton (mM m^{-3}), promedios para diferentes periodos, durante el mes de descarga (noviembre) y 30 días después (diciembre). Los vectores muestran la velocidad promedio a cada periodo.

3.2.5 Comparación entre meses

La Figura 20 muestra la serie temporal de las diferencias entre las simulaciones río y no río de cada mes. Esta serie muestra el fitoplancton y los nutrientes integrados de la superficie a 100 m y únicamente los valores dentro de la zona adyacente al Río Yaqui (Figura 2). Al inicio de la descarga las diferencias son muy pequeñas para todos los meses, pero a partir del día 20 las diferencias se vuelven más grandes. Para el mes de marzo el mayor aumento en el fitoplancton se presentó al final de la descarga, en el día 30 con 4.1×10^8 mM, e incluso después de la descarga aún se observaron diferencias a los 50 y 60 días con 3.2 y 3.5×10^8 mM, respectivamente. En estas diferencias puede estar involucrado el proceso de remineralización, ya que el aumento de fitoplancton o los nutrientes que no están siendo consumidos pudieran transformarse a detritos y posteriormente a nutrientes nuevos. En agosto el fitoplancton no mostró diferencias positivas durante los 30 días del aporte de nutrientes, a pesar de que se observaron diferencias en los nutrientes (incluso más que en marzo y noviembre). El fitoplancton en este periodo se encuentra a una mayor profundidad, y hay más estratificación en la columna de agua lo cual puede disminuir el transporte vertical de nutrientes, y debido a que el aporte de éstos es superficial quizá no están disponibles para ser consumidos por el fitoplancton. Sin embargo a los 25 días de las descarga se observó un aumento en el fitoplancton de 2.6×10^9 mM, pero este florecimiento, el cual se observó también en los mapas de las diferencias espaciales (Figura 14) fuera de la costa, sugiere que los nutrientes que no están siendo consumidos sino que están siendo transportados a otras zonas con diferentes condiciones

físicas en las cuales el fitoplancton sí los puede consumir. En el mes de noviembre la diferencia más notable en los nutrientes se observó a los 15 días posteriores a la descarga, con 2.9×10^9 mM, e incluso se presentó otro máximo casi a los 30 días posteriores a la descarga. Sin embargo sólo se observó un máximo en el aumento del fitoplancton a los 15 días posteriores a la descarga con un valor de 9.7×10^8 mM.

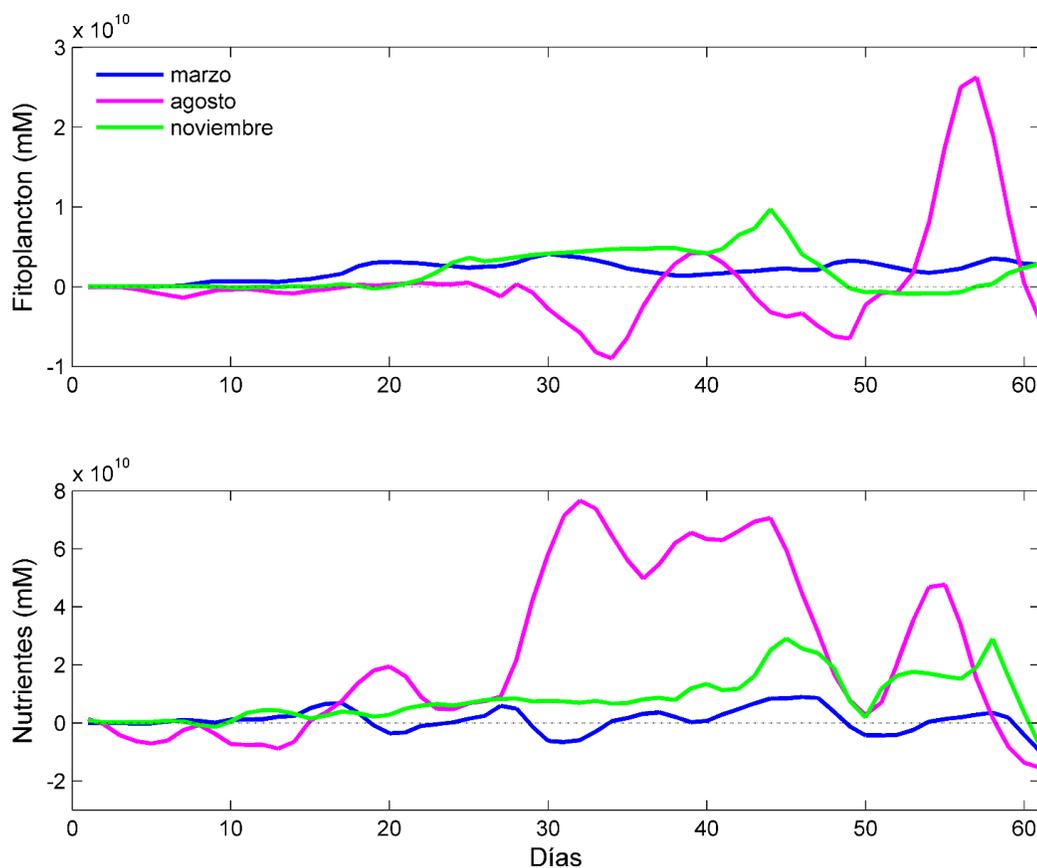


Figura 20. Serie temporal del fitoplancton y nutrientes integrados a 100 m, los primeros 30 días corresponden a la descarga del río, y los siguientes 30 días posteriores a la descarga. Se evaluaron únicamente los datos dentro de la zona adyacente al río (ver Figura 2).

Capítulo 4. Discusión

El modelo reproduce adecuadamente la variación anual y espacial de la TSM; al igual que en los datos satelitales, el modelo presenta valores máximos en verano y mínimos en invierno, aunque en el modelo el Golfo tiende a enfriarse de 2 a 3°C aproximadamente. Estas diferencias ocurren principalmente en el Alto Golfo, probablemente debido a que es una región muy somera por lo que los flujos de calor no están bien representados. Sin embargo en la región central, donde se encuentra la zona adyacente al río, la TSM está mejor representada (Figura 5), con diferencias menores a 1°C. En general la TSM disminuye hacia el norte y presenta diferencias entre la costa peninsular y continental de acuerdo a los eventos de surgencia o hundimiento, además de presentar núcleos cálidos y fríos de acuerdo la circulación estacional. La TSM ha sido analizada por Soto-Mardones et al. (1999) quienes concluyeron que la escala anual y semianual son las responsables de esta variación espacial. Para la zona de las Grandes Islas se observan valores mínimos de TSM durante todo el año, tanto en los datos del modelo como en los satelitales, esto ha sido observado por diferentes estudios y atribuido a la mezcla por mareas, y la elevada profundidad en el Canal de Ballenas (Paden et al., 1993; Roden, 1958; Soto-Mardones et al., 1999). Debido a que en el modelo los procesos biológicos no dependen de la temperatura, estas diferencias no influyen en la abundancia del fitoplancton de las salidas del modelo, aunque pueden ocasionar mayor o menor estratificación en la columna de agua y modificar el transporte vertical.

En promedio el modelo reproduce una circulación ciclónica en verano y anticiclónica en invierno, de acuerdo con otros modelos de circulación aplicados en el Golfo (Beier y Ripa, 1999; Marinone, 2003). Las estructuras de mesoescala reproducidas por el modelo se observan desplazándose hacia el sur y centro del Golfo y pueden cambiar de tamaño y dirección. El remolino de ~180 km de diámetro que se encuentra en la entrada del Golfo se observa desplazado hacia la península y parece desprender un remolino más pequeño; un remolino similar se observó en una campaña oceanográfica realizada en agosto del 2015, sin embargo presentó una circulación contraria a la observada en el modelo, y con velocidades mayores, de aproximadamente 0.5 m s^{-1} (Rivas et al., manuscrito en preparación). Una serie de remolinos se observa a lo largo del Golfo los cuales suelen alternar de dirección, aunque en general dominan los remolinos ciclónicos en invierno y los remolinos anticiclónicos en verano. Lavín et al. (2013) describieron las características hidrográficas de dos remolinos ciclónicos y dos remolinos anticiclónicos en la región sur del Golfo para agosto de 2004, los cuales alternaban el signo de su circulación, y en promedio presentaron un diámetro de 64-72 km aproximadamente, y velocidades mínimas de 0.3 m s^{-1} y máximas de 0.5 m s^{-1} . Estos autores establecieron el sentido de rotación de los remolinos con base en la concavidad de las isopícnas

debajo de la pycnoclina (>100 m), en forma de domo en los ciclónicos y hundida en los anticiclónicos, mientras que en las isopícnas más someras (dentro de la pycnoclina) sucedía lo contrario, lo que sugiere que la dinámica de la capa por debajo de la pycnoclina es diferente a la capa superior. Además reportaron un rotacional positivo (surgencia) en los remolinos anticiclónicos el cual produce bombeo de Ekman hacia arriba, elevando las isopícnas, mientras que el rotacional negativo en los remolinos ciclónicos hundió las isopícnas. Por esto concluyeron que la dinámica superficial al sur del Golfo parece está dominada por el esfuerzo del viento y el rotacional del esfuerzo del viento, al menos durante el verano cuando la termoclina es intensa y somera.

Estos remolinos son muy importantes ya que se encargan de distribuir y transportar las propiedades físicas y biológicas del Golfo. Como se observó en la advección de partículas pasivas, cuyas trayectorias dan una primera aproximación de cómo se distribuiría algún material que sea descargado en el Golfo mediante el Río Yaqui. Las trayectorias de las partículas dependen del mes que se evalúe. En marzo las partículas se desplazan hacia el sur hasta 250 km y llegan hasta la zona de desembocadura del Río Fuerte; en agosto las partículas viajan cerca de 300 km hacia el norte y alcanzan la zona de las Grandes Islas; en noviembre viajan una distancia menor de 190 km y al igual que en marzo se desplazan hacia el sur. Sin importar el mes que se evalúe las partículas siempre se desplazan con los remolinos, ya sea atrapadas o desplazadas por éstos, como se observa en el mes de noviembre cuando las partículas quedaron atrapadas en un remolino ciclónico. Como se mencionó anteriormente, los remolinos cambian de dirección constantemente, dado que la descarga del río ocurre durante un mes sería conveniente evaluar la trayectoria de las partículas iniciando cada día del mes. Debido a que son partículas pasivas no se ven afectadas por ningún proceso biológico, al contrario de lo que ocurriría con el fitoplancton o los nutrientes, que antes de ser transportados, al igual que las partículas, serían consumidos o transformados. Pero estas trayectorias podrían considerarse para algún material o sustancia que sea descargado en esta zona. Marinone (2012) caracterizó la zona adyacente al Valle de Yaqui y encontró que presenta gran potencial de dispersión comparada con otras zonas del Golfo, debido a las fuertes corrientes estacionales, lo cual sugiere una mayor conectividad entre especies. Las trayectorias de esta tesis (Figuras 9, 13, 17) concuerdan con el trabajo de Marinone (2012), quien encontró que en julio la dispersión de partículas es hacia el norte, mientras que en enero es hacia el sur y fuera de la costa.

Las diferencias en la circulación y otras características hidrográficas encontradas en los regímenes estacionales ocasionaron diferentes respuestas ante el aporte de nutrientes costeros. En invierno la lengüeta de agua dulce proveniente del río fue desplazada fuera de la costa por las corrientes superficiales. La presencia de un remolino anticiclónico desplazó la lengüeta hacia el centro del Golfo, este remolino

también estuvo presente en otoño, sin embargo en este periodo la lengüeta se mantuvo restringida a la zona adyacente al río, desplazándose hacia el norte y junto a la costa. En verano las corrientes se dirigían hacia el norte desplazando la lengüeta hacia esta dirección restringiéndola a la costa continental. Un remolino ciclónico presente al inicio del aporte provocó un desplazamiento de agua hacia el centro del Golfo, pero se mezcló rápidamente. Estos resultados mostraron que el principal forzamiento para desplazar el agua proveniente del río fueron los remolinos. Sin embargo el viento también es un forzamiento importante para la dispersión o retención de agua. Choi y Wilkin (2007) evaluaron la dispersión de la lengüeta del Río Hudson utilizando un modelo numérico forzado con diferentes direcciones de viento, encontraron que esto afecta la velocidad y trayectoria de la lengüeta de agua dulce, además de retrasar o acelerar la exportación de agua hacia el Atlántico. Esto puede explicar por qué en otoño, a pesar de que la circulación de las corrientes es muy similar a las de invierno, la lengüeta se queda restringida a la costa, en este periodo el viento viene del noroeste pero es más débil que en invierno, por lo que el transporte de Ekman hacia fuera de la costa es menor. La dirección del viento en verano pudiera estar favoreciendo el transporte hacia el norte, al igual que las corrientes, y el transporte de Ekman, que en este caso es hacia la costa continental, pudiera estar restringiendo el agua hacia la costa. Martínez-Flores et al. (2011) analizaron imágenes satelitales del MODIS-Aqua, a las cuales aplicaron algoritmos para detectar el material suspendido total integrado en la capa superficial del mar. Estas lengüetas, asociadas a los principales ríos del margen continental en el Golfo de California, fueron más evidentes durante el verano, debido a que el gasto medio anual de los ríos incrementa significativamente en esta época, especialmente durante eventos de tormenta. Encontraron una lengüeta de material suspendido en agosto de 2004, junto a la desembocadura del Río Yaqui, la cual se desplazó hacia la costa peninsular a ~100 km de distancia. Sin embargo en el presente estudio este desplazamiento fue característico del régimen de invierno, en el cual la lengüeta de agua dulce se desplaza hacia el centro del Golfo a ~80 km de distancia.

En cuanto al aporte de nutrientes, se observan pocas diferencias en el régimen de invierno, tanto en la serie temporal como en los mapas espaciales, sin embargo un florecimiento junto al río el cual inicia a los 10 días de la descarga (Figura 10) indica que están siendo consumidos; este florecimiento se desplaza hacia el centro del Golfo, y las diferencias observadas a más de 100 km de distancia de la desembocadura sugiere que otras zonas están siendo fertilizadas. En este periodo los vientos del noreste generan surgencia en la zona lo cual ocasiona que la nutriclina y termoclina se encuentren más someras, por lo que el fitoplancton es más abundante ($>1.5 \text{ mM m}^{-3}$). El hecho de que en invierno el Golfo de California es más productivo puede explicar por qué se observaron diferencias más pequeñas en las series temporales de nutrientes y fitoplancton, en comparación con los periodos de verano y otoño. En verano se observan diferencias en

los nutrientes, los cuales son transportados por las estructuras de mesoescala, sin embargo no están siendo consumidos por el fitoplancton, ya que no se observan diferencias durante el mes del aporte. En las series temporales mostradas en la Figura 20 se observa un pico de fitoplancton aproximadamente a los 50 días posteriores a la descarga, esto sugiere que el proceso de remineralización está actuando en este periodo ya que en las figuras espaciales se observa que el florecimiento se encuentra lejos de la descarga (Figura 14). Durante este periodo la zona junto al río es poco productiva, con valores de fitoplancton $<0.4 \text{ mM m}^{-3}$, debido a que los vientos del sureste provocan el hundimiento de la nutriclina y termoclina, por lo que el aporte de nutrientes costeros en verano genera las mayores diferencias en las series temporales.

En otoño el aporte de nutrientes tuvo efectos muy locales en el fitoplancton, se observó un florecimiento el cual se mantuvo junto a la desembocadura del río, sin embargo a los 50 días posteriores a la descarga ocurrió un florecimiento con diferencias de $\sim 0.2 \text{ mM m}^{-3}$. Al igual que en verano, la remineralización pudo haber ocasionado este florecimiento, el cual se observó a $\sim 100 \text{ km}$ lejos de la desembocadura. Únicamente con el evento extremo se observó una diferencia en los nutrientes $>0.5 \text{ mM m}^{-3}$ fuera de la zona junto al río. Este aumento de N generó un florecimiento, sin embargo no sucedió sino hasta el periodo de 20 a 30 días de la descarga, en el cual se observó un cambio en la dirección de la corriente, lo cual pudo generar una surgencia por bombeo de Ekman y elevar el máximo subsuperficial de fitoplancton, permitiendo que éstos consumieran los nutrientes descargados en la superficie y aumentar su biomasa. El florecimiento continuó incluso 20 días después de la descarga. Estos resultados muestran la importancia de las características físicas en el control los parámetros biológicos.

El fitoplancton en el Golfo de California se mantiene mediante mecanismos que transportan los nutrientes de aguas profundas hacia la zona eufótica, como lo son las surgencias en la costa continental en invierno, y en la costa peninsular en verano, mientras que en la zona de las Grandes Islas se ha reportado que la mezcla por mareas y la abrupta topografía provocan surgencias que fertilizan esta zona durante todo el año (Badan-Dangon et al., 1985; Santamaria-del-Ángel et al., 1994). Existen otros mecanismos como la escorrentía por precipitación y la descarga de río que transportan nutrientes terrígenos hacia el Golfo promoviendo el crecimiento del fitoplancton, como los resultados presentados por Beman et al. (2005) los cuales sugieren que las escorrentías del Río Yaqui aportan nutrientes del valle agrícola del Yaqui provocando florecimientos de $55 \text{ a } 570 \text{ km}^2$, especialmente en épocas de mayor precipitación. Ahrens et al. (2008) estimaron que el mayor aporte anual del valle del Yaqui a la costa es de $1.93 \times 10^6 \text{ kg de N}$ ($\sim 137.9 \times 10^6 \text{ mol N}$). Alvarez-Borrego (2012) realizó una estimación del nitrato requerido por la producción fitoplanctónica nueva de todo el Golfo, con un resultado de $(339 \pm 17) \times 10^9 \text{ mol año}^{-1}$, lo cual implica que, de acuerdo a la estimación de Ahrens et al. (2008), el aporte de nutrientes provenientes del Valle del Yaqui

comprende únicamente el 0.04% del aporte anual del Pacífico al Golfo. De acuerdo a la estimación de Álvarez-Borrego (2012) se requiere de 2.8×10^{13} mM NO_3 para mantener la producción nueva mensual. Los resultados en el presente estudio dieron un aporte máximo de nutrientes de 0.5×10^{10} , 2.1×10^{10} y 1.0×10^{10} mM para el mes de marzo, agosto y noviembre respectivamente, lo que compone menos del 0.1% de nutrientes requeridos para mantener la producción nueva de todo el Golfo, aun considerando el mayor aporte observado a principios de septiembre (7.9×10^{10} mM) el porcentaje es $\sim 0.3\%$. En los mapas de las diferencias entre la simulación río y no río se observó que el aporte de nutrientes provenientes del Río Yaqui genera florecimientos fitoplanctónicos intensos (0.5 mM m^{-3}) únicamente cerca de su desembocadura, con una extensión de $\sim 60 \text{ km}^2$, mientras que los florecimientos que se observan lejos de esta zona no superan los 0.2 mM m^{-3} .

Por otro lado existe cierta incertidumbre en las cantidades utilizadas de Q ($100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y N (100 mM m^{-3}) para la simulación del Río Yaqui. Estos valores son una aproximación a la realidad ya que existen limitaciones en las mediciones directas, después de todo se utilizaron valores arbitrarios pero con base en la literatura consultada. El Q, el cual se consideró constante, pudiera estar subestimado en verano, ya que coincide con la temporada de lluvias y tormentas en la zona y el aporte de agua pudiera ser mayor y por lo tanto el aporte de nutrientes. Mientras que para el mes de marzo el valor de Q pudiera estar sobrestimado, ya que durante el resto del año el aporte del río es mínimo, y los eventos de sequía son muy comunes. Sin embargo si se conocieran los valores exactos de los nutrientes y el agua que es aportada por el Río Yaqui se deberían esperar resultados similares a los expuestos en esta tesis, si acaso magnificados de acuerdo al transporte real del río. Por lo tanto, este trabajo representa una buena aproximación de los efectos de las descargas ribereñas en la abundancia del fitoplancton en el Golfo de California.

Capítulo 5. Conclusiones

El modelo reproduce adecuadamente las características físicas del Golfo de California, tales como la TSM, estructuras de mesoescala, surgencias y circulación estacional, y la distribución vertical de temperatura, nutrientes y fitoplancton. El modelo reprodujo una serie de remolinos de 50 a 90 km de diámetro, con velocidades de 0.2 a 0.4 m s⁻¹, los cuales son muy importantes en la circulación del Golfo ya que se encargan del transporte de materiales biológicos e inertes. La circulación estacional de estos remolinos ocasionó diferencias de desplazamiento y transporte de la lengüeta de agua dulce en los regímenes estacionales evaluados. En invierno la lengüeta se desplazó hacia fuera de la costa a ~100 km, lejos de la desembocadura del río, mientras que en otoño se mantuvo restringida a la costa. Ambos periodos presentaron una circulación anticiclónica, ocasionada por los vientos del noroeste, sin embargo en otoño los vientos resultaron más débiles lo que puede explicar por qué en este periodo la lengüeta no se desplazó tan rápidamente.

Las mayores diferencias observadas por el aporte de nutrientes ocurrieron en verano. Durante este periodo el fitoplancton resultó ser menos abundante, comparado con los otros regímenes, debido al hundimiento de la nutriclina en la zona ocasionada por los vientos del sureste. Por esto el aporte de nutrientes del río ocasionó un aumento de hasta 2.0x10¹⁰ mM, sin embargo no tuvo un efecto notable en el fitoplancton, ya que éste no aumentó durante los 30 días del aporte. Sin embargo, se observó un aumento de 2.8x10¹⁰ mM en el fitoplancton a los 25 días posteriores al aporte, lo que sugiere que otros procesos están controlando la biología de la zona. Este resultado también es evidencia de que la remineralización pudiera estar actuando, ya que el florecimiento se observó lejos de la zona de desembocadura, por lo que estos nutrientes fueron transportados, y seguramente transformados, hasta que las condiciones fueron favorables para que el fitoplancton los asimilara.

La fuente más importante de nutrientes en el Golfo de California es el intercambio de agua con el Océano Pacífico, llevados a la superficie mediante eventos de surgencia. Los resultados presentados indicaron que el aporte de nutrientes por río comprende menos del 0.1% de los nutrientes aportados por el Pacífico, sin embargo aunque el aporte de río aparentemente tenga poco efecto en el Golfo de California, los resultados observados indican que estos nutrientes generan florecimientos locales en invierno y otoño que pueden modificar los ciclos biogeoquímicos en las lagunas costeras y estuarios. Si se consideran otras sustancias, como metales pesados o contaminantes, aportados por el río, el modelo de circulación provee una buena aproximación de cómo se distribuirían una vez que la descarga llegue al Golfo, ya que su distribución y trayectoria varía con el periodo en que el aporte ocurra.

Literatura citada

- Ahrens, T. D., Beman, J. M., Harrison, J. A., Jewett, P. K., y Matson, P. A. 2009. A synthesis of nitrogen transformations and transfers from land to the sea in the yaqui valley agricultural region of northwest Mexico. *Water Resources Research*, 45(7). <http://doi.org/10.1029/2007WR006661>
- Álvarez-Borrego, S. 2012. New phytoplankton production as a tool to estimate the vertical component of water exchange between the Gulf of California and the Pacific. *Ciencias Marinas*, 38(1A), 89–99. Retrieved from <Go to ISI>://000302487200007
- Álvarez-Borrego, S., Rivera, J. A., Gaxiola-Castro, G., Acosta-Ruiz, M. de J., y Schwartzlose, R. A. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 5(2), 53–71.
- Badan-Dangon, A., Koblinsky, C. J., y Baumgartner, T. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta*, 8(1), 13–22.
- Beier, E., y Ripa, P. 1999. Seasonal Gyres in the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 29(2), 305–311. [http://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<0305:SGITNG>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<0305:SGITNG>2.0.CO;2)
- Choi, B.-J., y Wilkin, J. L. 2007. The Effect of Wind on the Dispersal of the Hudson River Plume. *Journal of Physical Oceanography*, 37(7), 1878–1897. <http://doi.org/10.1175/JPO3081.1>
- Egbert, G. D., y Erofeeva, S. Y. 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204. [http://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- Fasham, M. J. R., Ducklow, H. W., y McKelvie, S. M. 1990. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *Journal of Marine Research*, 48(3), 591–639. <http://doi.org/10.1357/002224090784984678>
- Flores, M., Sánchez, E. H. N., y Zaitzev, O. 2011. Teledetección de plumas de material suspendido influenciadas por escorrentía en el sur del Golfo de California. *Oceanides*, 26(1), 1–18.
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., y Cosby, B. J. 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience*, 53(4), 341. [http://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)
- Galloway, J. N., Schlesinger, W. H., Levy, H., Michaels, A., y Schnoor, J. L. 1995. Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2), 235–252. <http://doi.org/10.1029/95GB00158>
- Gan, J., Lu, Z., Dai, M., Cheung, A. Y. Y., Liu, H., y Harrison, P. 2010. Biological response to intensified upwelling and to a river plume in the northeastern South China Sea: A modeling study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(9). <http://doi.org/10.1029/2009JC005569>
- Haidvogel, D. B., Arango, H., Budgell, W. P., Cornuelle, B. D., Curchitser, E., Di Lorenzo, E., ... Wilkin, J. 2008. Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the

- Regional Ocean Modeling System. *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3595–3624.
<http://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.06.016>
- Harrison, J., y Matson, P. 2003. Patterns and controls of nitrous oxide emissions from waters draining a subtropical agricultural valley. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(3).
<http://doi.org/10.1029/2002GB001991>
- Howarth, R. W. 2008. Coastal nitrogen pollution: A review of sources and trends globally and regionally. *Harmful Algae*. <http://doi.org/10.1016/j.hal.2008.08.015>
- Huang, B., Xue, Y. y Behringer, D. W. 2008. Impacts of Argo salinity in NCEP Global Ocean Data Assimilation System: The tropical Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 113, C08002.
- Lavín, M. F., Castro, R., Beier, E., y Godínez, V. M. 2013. Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(3), 1367–1381. <http://doi.org/10.1002/jgrc.20132>
- Lavín, M. F., Castro, R., Beier, E., Cabrera, C., Godínez, V. M., y Amador-Buenrostro, A. 2014. Surface circulation in the Gulf of California in summer from surface drifters and satellite images (2004–2006). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(7), 4278–4290.
<http://doi.org/10.1002/2013JC009345>
- Lavín, M. F., y Marinone, S. G. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics* (pp. 173–204).
<http://doi.org/10.1029/RG021i005p01105>
- Marinone, S. G. 2003. A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 108(C10), 1–27. <http://doi.org/10.1029/2002JC001720>
- Marinone, S. G. 2012. Seasonal surface connectivity in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 100, 133–141. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.01.003>
- Matthews, E. 1994. Nitrogenous fertilizers: Global distribution of consumption and associated emissions of nitrous oxide and ammonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 8(4), 411–439.
<http://doi.org/10.1029/94GB01906>
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P. C., Ebisuzaki, W., ... Shi, W. 2006. North American regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3), 343–360.
<http://doi.org/10.1175/BAMS-87-3-343>
- Michael Beman, J., Arrigo, K. R., y Matson, P. A. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature*, 434(7030), 211–214.
<http://doi.org/10.1038/nature03370>
- Naylor, R. L., Falcon, W. P., y Puente-González, A. 2001. Policy reforms and Mexican agriculture: Views from the Yaqui Valley. *Agricultural Economics*. Retrieved from
<http://fsi.stanford.edu/sites/default/files/nayloryaqui.pdf>

- Paden, C. A., Winant, C. D., y Abbott, M. R. 1993. Tidal and Atmospheric Forcing of the Upper Ocean in the Gulf of California: 2. Surface Heat-Flux. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 98(C11), 20091–20103.
- Pegau, W. S. 2002. Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 29(9), 29–31. <http://doi.org/10.1029/2001GL014076>
- 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*, 23(5), 660–662. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.07.004>
- Powell, T. M., Lewis, C. V. W., Curchitser, E. N., Haidvogel, D. B., Hermann, A. J., y Dobbins, E. L. 2006. Results from a three-dimensional, nested biological-physical model of the California Current System and comparisons with statistics from satellite imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(7), 1–14. <http://doi.org/10.1029/2004JC002506>
- Ravichandran, M., Behringer, D., Sivareddy, S., Girishkumar, M. S., Chacko, N. y Harikumar, R. 2013. Evaluation of the Global Ocean Data Assimilation System at INCOIS: The Tropical Indian Ocean. *Ocean Modelling*, 69, 123-135.
- Riley, W. J., Ortiz-Monasterio, I., y Matson, P. A. 2001. Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61(3), 223–236. <http://doi.org/10.1023/A:1013758116346>
- Ripa, P. 1997. Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(5), 597–614.
- Rivas, D., y Samelson, R. M. 2011. A Numerical Modeling Study of the Upwelling Source Waters along the Oregon Coast during 2005. *Journal of Physical Oceanography*, 41(1), 88–112. <http://doi.org/10.1175/2010JPO4327.1>
- Roden, G. 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, 12(1), 21–45. Retrieved from <http://scholarspace.manoa.hawaii.edu/handle/10125/7874>
- Santamaria-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., Millán-Núñez, R., y Müller, F. E. 1999. Sobre el efecto débil de las srugencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Revista de La Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 49, 207–212.
- Santamaria-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., y Muller-karger, F. E. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery ., 99, 7411–7421.
- Smith, W. H. 1997. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*. <http://doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>
- Smith, S. D. 1988. Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research*, 93, 15467-15472.
- Soto-Mardones, L., Marinone, S. G., y Parés-Sierra, A. 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25(1), 1–30.

- Spitz, Y. H., Allen, J. S., y Gan, J. 2005. Modeling of ecosystem processes on the Oregon shelf during the 2001 summer upwelling. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 110(10), 1–21.
<http://doi.org/10.1029/2005JC002870>
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. a, Schindler, D. W., ... Tilman, D. G. 1997. Vitousek et al. 1997. *Ecological Applications*, 7(3), 737–750. [http://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0737:HAOTGN\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2)
- Vitousek, P. M., y Howarth, R. W. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 13(2), 87–115. <http://doi.org/10.1007/BF00002772>
- Zamudio, L., Hogan, P., y Metzger, E. J. 2008. Summer generation of the Southern Gulf of Colifornia eddy train. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(6), 1–21.
<http://doi.org/10.1029/2007JC004467>
- Zeitzschel B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology*, 3(3), 201–207.