



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**REGIONALIZACIÓN DEL  
GOLFO DE CALIFORNIA  
CON BASE EN EL CICLO ANUAL DE LA  
CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-*a***

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**FÍSICA**

PRESENTA:

**CITLALLI MÉNDEZ RAMOS**



DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. ROSARIO DE LOURDES ROMERO CENTENO

SEPTIEMBRE 2011

# ÍNDICE

RESUMEN.....	4
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	6
I.1. Conceptos básicos de la regionalización.....	6
I.2. Regionalización de los mares mexicanos.....	8
I.3 Estudios previos sobre regionalización en el Golfo de California .....	10
I.4. Los sistemas satelitales de monitoreo y las mediciones del fitoplancton.....	12
I.5. Objetivos.....	14
CAPÍTULO II	
CARACTERÍSTICAS BATIMÉTRICAS Y OCEANOGRÁFICAS DEL GOLFO DE CALIFORNIA.....	15
II.1. Ubicación geográfica y rasgos batimétricos.....	15
II.2. Masas de agua.....	17
II.3. Características oceanográficas, vientos, surgencias y flujos de calor.....	20
II.3.1. Mareas y corrientes de marea.....	20
II.3.2. Circulación.....	21
II.3.3. Vientos.....	23
II.3.4. Surgencias.....	26
II.3.5. Flujos de calor por la superficie.....	29
CAPÍTULO III	
DATOS Y METODOLOGÍA.....	30
III.1. Datos.....	30
III.1.1 Datos de concentración de clorofila-a.....	30
III.1.2. Características del proyecto SeaWiFS.....	30
III.2. Metodología.....	32
III.2.1 Preprocesamiento de los datos.....	32
III.2.2. Funciones Empíricas Ortogonales y Componentes Principales.....	33
III.2.3. Rangos característicos y regionalización.....	36
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS .....	37
IV.1. Descripción del ciclo anual.....	37
IV.2. Análisis de los modos de variación principales.....	62
IV.3. Identificación de patrones y propuesta de regionalización.....	68

CAPÍTULO V	
DISCUSIÓN.....	70
V.1 Descripción de los procesos físicos dominantes en cada región del GC.....	71
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES.....	86
REFERENCIAS.....	89

## RESUMEN

El Golfo de California (GC), ubicado al noroeste de México, es un mar marginal semicerrado que se caracteriza, entre otros rasgos, por su riqueza biológica. En su extremo sur se comunica abiertamente con el Océano Pacífico oriental, a través del cual se establecen los intercambios de calor y masa más importantes. En este trabajo se realiza un análisis detallado de la variabilidad estacional y espacial de la concentración de clorofila-*a* (CCa) en el GC y se establece una regionalización del golfo con base en el análisis del comportamiento estadístico de las anomalías promedio mensuales de la CCa, obtenidas a partir de los datos del satélite SeaWiFS para el período 1998-2008. El análisis se basa en los cuatro primeros modos o funciones empíricas ortogonales de las anomalías mensuales de CCa, los cuales describen el 84.7% de la varianza total contenida en los datos. De manera subjetiva, y comparando con los mapas de anomalías mensuales, se determinaron áreas con rangos de variación similares en cada uno de los cuatro modos. De esta forma se identificaron once patrones de variabilidad espacio-temporal, que representan áreas con comportamientos estadísticos diferentes, con los cuales se estableció una división del GC en 15 regiones específicas, algunas de las cuales presentan el mismo patrón de variabilidad aún cuando no son regiones contiguas.

En términos generales, las partes profundas del centro-sur y de la entrada al GC son las que muestran menores concentraciones de clorofila-*a* durante todo el año, mientras que las zonas más someras de las costas del norte y de la costa oriental son las más productivas. Combinando la información proporcionada por el primer modo, el cual describe el 52.3% de la varianza del campo de anomalías de CCa, y su componente principal asociada, se infiere que el patrón dominante de variación estacional de CCa en la mayor parte del GC presenta anomalías positivas durante invierno e inicios de la primavera y negativas en verano e inicios del otoño, sobre todo en la costa oriental, Bahía de Banderas y la región noroccidental del Golfo Norte. Sin embargo, hay algunas regiones que presentan un ciclo estacional con distinta fase, como el Canal de Ballenas, el Alto Golfo y las zonas costeras al norte de Sonora. Entre las regiones que se distinguen por presentar una variabilidad anual de CCa diferente se encuentra la bahía de La Paz, que muestra dos períodos con anomalías positivas, uno de Diciembre a Febrero y otro en Mayo-Junio, observándose el máximo absoluto en el mes de Junio.

Los procesos físicos que favorecen la entrada de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes a las capas superiores durante el invierno son el enfriamiento, los vientos intensos, la convección, la mezcla vertical y la surgencia costera del lado del continente. Por el contrario, durante el verano la columna de agua se estratifica como producto del calentamiento de las capas superficiales por la radiación solar y por la entrada de una onda baroclínica atrapada a la costa que provoca que la termoclina sea más profunda y el GC aumente su contenido de calor, inhibiendo la llegada de aguas ricas en nutrientes a la superficie. Existen además otros procesos locales que influyen sobre la variación estacional de la CCa, como puede ser la descarga de ríos durante la época de lluvias, especialmente importante en la región costera del sur de Sinaloa y Nayarit, los procesos de mezcla que se dan sobre las zonas relativamente someras de los umbrales en la región de las grandes islas y la intensificación de las corrientes al pasar por canales estrechos.

---

La tesis está organizada de la siguiente manera: en el Capítulo I se abordan los conceptos básicos de regionalización, poniendo como ejemplo algunas regionalizaciones realizadas en los mares mexicanos y, en particular, en el GC y se exponen los objetivos de la tesis; las características principales del GC, tanto fisiográficas como oceanográficas, se presentan en el Capítulo II; los datos utilizados y sus características, así como la metodología empleada para su análisis, se detallan en el Capítulo III; los resultados obtenidos y la discusión de los mismos se presentan en los capítulos IV y V, respectivamente. Finalmente, en el Capítulo VI se presentan las conclusiones del trabajo.

# CAPÍTULO I

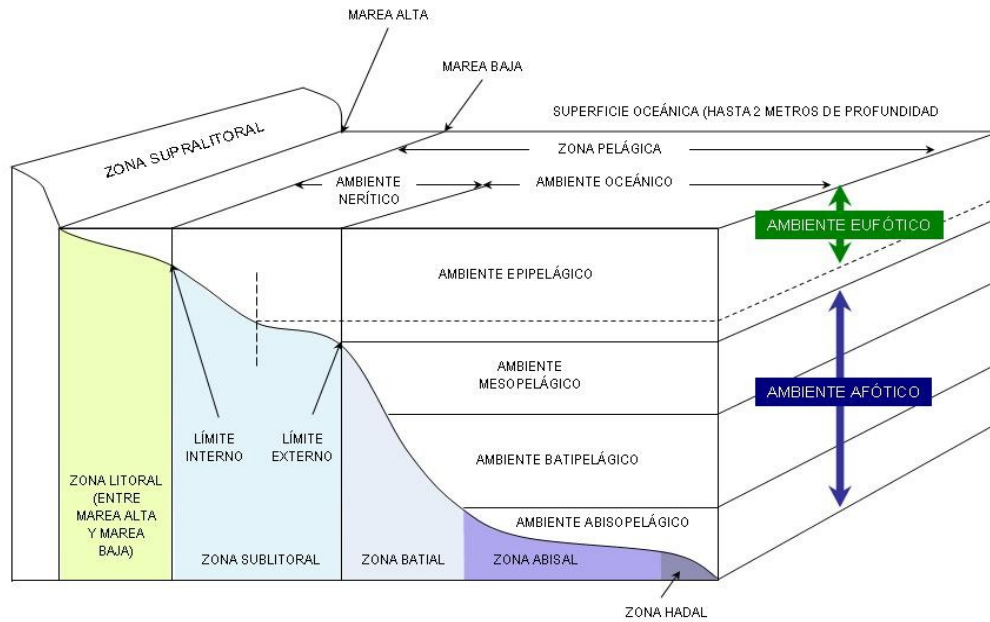
## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

### I.1. Conceptos básicos de la regionalización

El ser humano depende de manera muy importante de los recursos marinos y por lo tanto se ha visto en la necesidad de aumentar su conocimiento acerca del medio marino en general. Para avanzar en este sentido se deben identificar, delimitar y caracterizar regiones costeras y oceánicas con base en criterios y aspectos geográficos, climatológicos, geomorfológicos, oceanográficos, de biodiversidad y uso de los recursos naturales, entre otros. Sin embargo, la información acerca del ambiente marino es fragmentada y escasa debido, en buena parte, a que éste muestra una gran variabilidad en distintas escalas espaciales y temporales y a la dificultad de realizar mediciones en grandes extensiones marítimas. Es importante mencionar que existe mucho menos información cartográfica y bases de datos del ambiente marino en comparación con el ambiente terrestre (Espejel, 2006).

El objetivo principal de una regionalización o zonificación es establecer un modelo de referencia espacial para la organización de componentes de una base de datos o de información que se requiere caracterizar (Espejel, 2006). La regionalización comúnmente implica la división de un territorio en áreas menores con características comunes, que sirva de herramienta para el manejo de la información acerca de un área específica.

Históricamente se han realizado diversas zonificaciones de los mares, tanto a nivel global como regional, las cuales obedecen a objetivos específicos y pueden estar basadas en aspectos físicos y/o biológicos. En términos globales, se han establecido distintos dominios o ambientes marinos de acuerdo a su dimensión horizontal y vertical, los cuales se ven afectados por diversos procesos físicos como la penetración de la radiación solar, las corrientes y las mareas, que determinan su riqueza y diversidad biológica ([http://biocab.org/Ambientes\\_Marinos.html](http://biocab.org/Ambientes_Marinos.html)). Cabe señalar que las capas superficiales son las de mayor importancia para el ser humano y en ellas ocurre un mayor número de procesos y fenómenos en comparación con el océano profundo. El esquema de la figura 1.1 muestra una división del océano en distintas zonas y ambientes marinos.

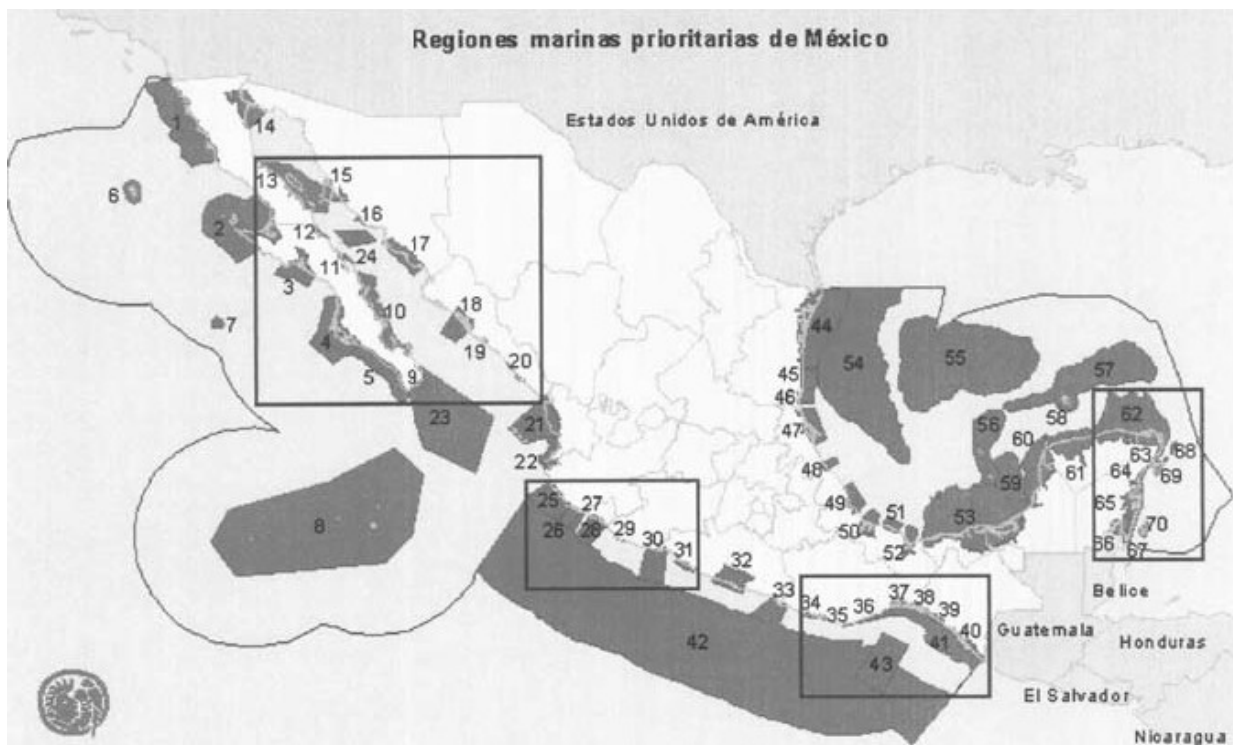


**Figura 1.1.** Esquema de la división oceánica en diferentes zonas y ambientes marinos (tomada de [http://biocab.org/Ambientes\\_Marinos.html](http://biocab.org/Ambientes_Marinos.html)).

La zona nerítica (o ambiente nerítico) incluye las aguas que cubren las plataformas continentales (hasta 200 m de profundidad), mientras que la zona oceánica (o ambiente oceánico) incluye el resto de las aguas. De la superficie al fondo el océano se divide en dos grandes zonas: la zona pelágica, que abarca toda la columna de agua, y el bentos o zona bentónica que se refiere al suelo marino. Por otra parte, la zona litoral es aquella que se ve influenciada por los efectos de la marea, por lo que también se conoce como zona intermareal, por encima de la cual se encuentra la zona de playa o supralitoral y por debajo se ubica la zona sublitoral o plataforma continental. Adyacente a la zona sublitoral hacia el fondo del mar se encuentran la zona batial o talud continental, la zona abisal y las fosas que forman la zona hadal. Considerando la penetración de la energía solar, la zona eufótica es aquella donde la luz es suficiente para que se lleven a cabo los procesos de fotosíntesis; por debajo de ésta se encuentra la zona afótica, donde la luz incidente ya no penetra la columna de agua. De acuerdo a la distribución de los organismos, éstos se dividen en tres grupos: plancton (organismos pequeños que viven suspendidos en la columna de agua y cuyo desplazamiento depende del movimiento del agua), necton (organismos nadadores que tienen locomoción propia) y bentos (todas las especies que viven en el suelo marino) (Espejel y Bermúdez, 2009).

## I.2. Regionalización de los mares mexicanos

En México se han realizado diversos esfuerzos con el fin de caracterizar los mares mexicanos, cuya metodología y alcances dependen de su objetivo específico. Por ejemplo, se ha regionalizado el ámbito marino en México con base en los ecosistemas, características ambientales o principales recursos y usos costeros; en función de la biodiversidad marina y costera o en función de la explotación de los recursos bióticos pesqueros; tomando en cuenta áreas prioritarias para la conservación o con base en las características geológicas, biológicas, físicas y químicas de cada región (ver referencias en Espejel y Bermúdez, 2009). Como un ejemplo particular, el mapa de la figura 1.2 representa una regionalización de los mares y costas mexicanas en donde se incluyeron zonas oceánicas, islas, lagunas, costas, arrecifes, manglares, marismas, bahías, caletas, dunas y playas. La división comprende 70 regiones marinas prioritarias para la conservación de la biodiversidad costera y oceánica en México, y que es el resultado de un proyecto cuyo objetivo fue desarrollar un marco de referencia para contribuir a la planificación, conservación y manejo sustentable de los ambientes marinos en nuestro país (<http://www.conabio.gob.mx/>).



**Figura 1.2.** Mapa de la regionalización de mares y costas mexicanas con 70 regiones marinas prioritarias para la conservación de la biodiversidad costera y oceánica en México (<http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Mmapa.html>).



Una de las regiones más productivas y con mayor diversidad biológica del país es el Golfo de California (GC), cuya delimitación en regiones es especialmente compleja dada la variedad de forzamientos ambientales y procesos físicos y dinámicos que lo afectan en distintas escalas de espacio y tiempo. En el GC se llevó a cabo el ejercicio de regionalización más completo que se haya realizado en los mares mexicanos con base en diversas variables físicas, como son batimetría, turbidez, influencia de las cuencas, etc. (SEMARNAT 2006). La aprobación de dicho proyecto se decretó oficialmente a finales del año 2006, denominado Programa de Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California (Diario Oficial de la Federación, en SEMARNAT 2006), con base en las siguientes consideraciones, entre otras:

“El Golfo de California es un mar altamente productivo, en el que existe una gran variedad de ecosistemas marinos y costeros que incluyen alrededor de 350,000 hectáreas de manglares, aproximadamente 383 especies endémicas de fauna marina, 5 géneros de tortugas marinas, 32 especies de mamíferos marinos que incluyen el 38% de las especies de cetáceos que se conocen en el mundo, y 875 especies de peces, de las cuales 77 son consideradas endémicas.”

“Las actividades de acuicultura y pesca en el Golfo aportan el 71.16% del volumen de la producción pesquera nacional y el 56.85% del valor de la misma, destacando especies de importancia y valor comercial como camarón, sardina, calamar, atún, lisa, chano norteño o berrugata, curvina golfina, sierra, manta, guitarra, tiburón, jaiba y almeja, entre otras; la producción de camarón es la más importante, representando el 52.72% de las capturas nacionales de la especie y el 94.76% del total que se produce mediante el cultivo en el país, y sus beneficios socioeconómicos van más allá de las divisas y los empleos directos que genera, pues también son de gran importancia los encadenamientos productivos con diferentes ramas de la industria y el comercio que directa o indirectamente generan estas actividades.”

“La región del Golfo de California es una zona muy dinámica y en pleno crecimiento donde las tendencias actuales muestran que, para el 2010, el 28% de la franja costera estará transformada para uso agrícola, acuícola, urbano o turístico, con un incremento poblacional que llegará a los casi diez millones de habitantes, por lo que es posible prever la pérdida de hábitat, la contaminación de las lagunas costeras y la afectación de las zonas de reproducción y crianza de especies de gran valor comercial, así como la pérdida de la vegetación de dunas costeras, la alteración de los patrones hidrológicos y una fuerte presión sobre las áreas naturales protegidas.”

Es claro entonces que se deben implementar planes para la conservación, protección, monitoreo, manejo, evaluación, recuperación y restauración de zonas altamente productivas y de gran importancia para el país, como el Golfo de California, que se ven afectadas por las diversas actividades que se realizan en ellas. Para ello es necesario delimitar y caracterizar las regiones costeras y oceánicas con el objeto de facilitar los análisis que deriven en la resolución de sus problemas ambientales y en el manejo sustentable de sus recursos naturales.

### **I.3 Estudios previos sobre regionalización en el Golfo de California**

Existen trabajos previos cuyo objetivo principal ha sido regionalizar el GC, a partir de los cuales se ha dividido al golfo en un número distinto de regiones dependiendo del criterio utilizado. A continuación se resumen algunos de estos trabajos.

Con la finalidad de hacer una caracterización ambiental de las regiones resultantes, Arias (1998) estableció una regionalización del GC a partir del análisis de los datos de concentración de pigmentos fotosintéticos obtenidos de las imágenes satelitales del Coastal Zone Color Scanner (CZCS) para un periodo de 8 años (1978-1986). En su trabajo determinó 3 regiones con base en los diferentes niveles de productividad, los cuales dependen de diversos factores de forzamiento: la región norte (influenciada por las mareas), la región centro (a la que le atribuyen cambios atmosféricos) y el sur del golfo (influenciado principalmente por el Océano Pacífico).

Santamaría-del-Ángel et al., (1994) llevaron a cabo una regionalización del GC utilizando imágenes satelitales de la concentración de clorofila-*a* (CCa). Con compuestos semanales generaron series de tiempo para 33 sitios específicos dentro del golfo; aplicando el método de Componentes Principales (CP) obtuvieron series de tiempo que muestran la variación estacional de la CCa, con máximos en invierno y mínimos en verano. A partir del análisis de las CP dividen el GC en 14 regiones y señalan que las concentraciones altas de clorofila-*a* se hacen evidentes gracias al efecto de las surgencias (ver sección II.3.4 en el siguiente Capítulo).

Con el objeto de estudiar la variabilidad interanual de la clorofila en el GC, Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007) analizaron compuestos semanales de clorofila-*a* obtenidos del sensor Sea-

viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) para un período de 5 años (1997-2002). Hicieron un ajuste armónico del que resultan series de tiempo mensuales y dividieron el GC en tres zonas, según su distribución promedio de clorofila-a: la boca del golfo, que es una zona oligotrófica; la parte central, que es mesotrófica<sup>1</sup> y la región costera y parte norte del golfo (incluida la región de las grandes islas), que es una zona eutrófica<sup>2</sup>. También mencionan que la variabilidad estacional de la clorofila-a es la predominante.

La SEMARNAT, en el proyecto denominado *Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California*, dedica un apartado a la regionalización del GC con la finalidad de caracterizar la diversidad de la zona costera y definir la relación que existe entre esta área y la zona costera terrestre, independiente del ámbito marino-oceánico. Esta regionalización se basa en la sobreposición de mapas (cartografía) de niveles. Dichos niveles corresponden a una clasificación previa en la que se toman en cuenta los rasgos físicos (ambiente, sistema, subsistema1, subsistema2, paisaje y unidad) comunes entre los dos ambientes. De esta manera logran conformar unidades ambientales con respecto a las aguas marinas, las aguas marinas interiores, la zona económica exclusiva, los estados y las cuencas hidrológicas ([www.semarnat.gob.mx/.../ordenamientoecologico/...golfo/8\\_regionalizacion1.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/.../ordenamientoecologico/...golfo/8_regionalizacion1.pdf)).

Otro trabajo en el que se utilizan datos de la CCA en el GC para analizar sus variaciones en distintas escalas de tiempo es el de Kahru et al. (2003), quienes consideran que las mediciones en los cambios del mar se encuentran aún limitados, por lo que encuentran en la producción primaria de clorofila-a un trazador de tendencias y cambios en los factores ambientales. Es por esto que estudian la variabilidad de la CCA y de la producción primaria neta en el GC dividiéndolo en 12 subregiones a partir de un análisis de conglomerados usando datos climatológicos del CZCS. Para estimar la CCA superficial en cada subregión utilizaron datos de los sensores SeaWiFS y Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) para un periodo de 6 años (1997-2003). Los autores concluyen que el ciclo anual es la escala de variabilidad dominante en todo el golfo, excepto en la zona que se encuentra al sur de las grandes islas donde domina un ciclo semianual debido, probablemente, al efecto de la mezcla por marea.

En consecuencia, para llevar a cabo un estudio de regionalización de una zona oceánica

---

<sup>1</sup> Mesotrófica = Con nivel intermedio de productividad de nutrientes.

<sup>2</sup> Eutrófica = Con alta o excesiva productividad de nutrientes.

determinada se debe contar con la información adecuada de acuerdo a los objetivos planteados. En la actualidad, los datos proporcionados por sensores remotos a bordo de satélites artificiales que orbitan alrededor del planeta constituyen una fuente de información fundamental para este tipo de estudios.

#### **I.4. Los sistemas satelitales de monitoreo y las mediciones del fitoplancton**

En apoyo a las diversas investigaciones de las regiones marinas se han desarrollado sistemas de monitoreo de los océanos, en los que destaca el uso de boyas, barcos, aviones, etc., con el fin de recolectar datos para su manipulación posterior. En este sentido, una herramienta que ha venido a revolucionar la manera de obtener información del planeta con una muy buena resolución espacial y temporal, particularmente de los ambientes marinos, son los sensores satelitales. Los satélites pueden observar grandes áreas oceánicas en un tiempo muy corto y proporcionar información de aspectos diversos, ya sea de manera directa o indirecta, tales como los vientos sobre la superficie del mar, su temperatura, la topografía de la superficie marina o la concentración y distribución de fitoplancton.

La importancia de medir la concentración y distribución de fitoplancton (plantas marinas microscópicas) se debe al papel crítico que éste juega para la vida en el planeta ya que, entre otras características, genera al menos la mitad del oxígeno que se encuentra en la atmósfera; es de vital importancia en los procesos de intercambio de gases entre el océano y la atmósfera; es la base de la cadena alimenticia marina y por lo tanto mantiene casi todo tipo de vida en los océanos (<http://ocean-color.gsfc.nasa.gov/>).

La biomasa algal (o fitoplanctónica) es el principal regulador de la claridad y el color del agua en muchas regiones acuáticas y la medida más utilizada de la biomasa fitoplanctónica es la clorofila-*a*. La clorofila-*a* es el pigmento común a todos los organismos que realizan fotosíntesis con liberación de oxígeno y es el principal pigmento fotosintético presente en el ambiente acuático. Su concentración se utiliza como un estimador de la biomasa fitoplanctónica presente en los sistemas y depende del estado fisiológico de la comunidad así como de su composición específica. Por lo tanto, la función fotosintética de la clorofila-*a* es un indicador de la productividad y de la biomasa vegetal marina (Peña del Valle, 2000).

La CCa en los océanos ha sido estimada mediante instrumentos que miden el color del océano desde el espacio a partir de 1978 con el lanzamiento del satélite Nimbus-7, equipado con el sensor CZCS, y seguido años después por el proyecto SeaWiFS que inició en 1997. El color del océano es proporcional a la cantidad de pigmentos de clorofila cerca de la superficie y la cantidad de clorofila es proporcional a la cantidad de fitoplancton en el agua, es decir, entre más clorofila haya en determinada área, mayor será la concentración de pigmentos y el agua será más verde (Peña del Valle, 2000 y las citas ahí incluidas).

En el océano, el principal factor limitante que regula el crecimiento de fitoplancton es la disponibilidad de nutrientes. Los nutrientes (nitratos, fosfatos, silicatos, etc.) se encuentran en grandes cantidades en las aguas más profundas y frías del océano. Siempre que hay mezcla en el océano, o donde las corrientes traen las aguas más frías y ricas en nutrientes desde las profundidades por procesos de surgencia, las aguas superficiales serán enriquecidas con nutrientes que pueden estimular el crecimiento del fitoplancton (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>); por lo tanto, los patrones de distribución de fitoplancton que observamos están relacionados con procesos físicos y biológicos. Por ello, los datos de CCa proporcionados por las misiones satelitales funcionan como trazadores o indicadores de los procesos físicos presentes en determinada región del océano. Cabe señalar, sin embargo, que los datos obtenidos por sensores remotos representan solamente las condiciones de la primera profundidad óptica del océano (profundidad a la cual la irradiancia es reducida a 1/e de su valor superficial) (Fuentes-Yaco et al., 2008) y que la distribución del fitoplancton no es uniforme en la columna de agua (Arias, 1998 y las citas ahí incluidas). Por lo tanto, se requiere complementar la información proporcionada por los satélites con la obtenida *in situ* de la distribución vertical de la biomasa para hacer estimaciones que representen toda la columna de agua (Arias, 1998).

Es importante mencionar que ciertos tipos de fitoplancton pueden florecer en grandes cantidades y producir toxinas bastante dañinas para la vida marina y, en algunos casos, para los humanos. Cuando el crecimiento de fitoplancton es estimulado por una sobre abundancia de nutrientes de fuentes como descargas de aguas residuales o escurrimientos de fertilizantes agrícolas, las consecuencias pueden ser muy serias. Los florecimientos densos de fitoplancton pueden bloquear la penetración de la luz solar hacia el fondo en áreas someras de bahías o estuarios y pueden causar la disminución masiva de la vegetación acuática sumergida, que es vital para muchas especies de peces e invertebrados. Además, cuando estos florecimientos mueren y el plancton se va al fondo, la descomposición bacteriana de toda esta materia orgánica le quita el oxígeno al agua. Los peces,

mariscos y la mayoría de otros seres vivientes en los océanos requieren oxígeno para sobrevivir y los florecimientos de fitoplancton en descomposición han sido la causa de muertes masivas de peces a lo largo de los años. Asimismo, los dinoflagelados, la forma más comúnmente conocida de fitoplancton que puede ser directamente dañina por sí misma, son la fuente de las mareas rojas (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

## **I.5. Objetivos**

Con base en lo anterior, los objetivos centrales de la tesis son los siguientes:

- 1) Realizar un análisis detallado de la variabilidad espacial y temporal de la CCa en el GC en la escala estacional.
- 2) Establecer una regionalización del golfo con base en dicho análisis.
- 3) Estudiar los procesos físicos que pudieran estar involucrados en las variaciones observadas de CCa en cada una de las regiones obtenidas con base en investigaciones previas realizadas en el GC.

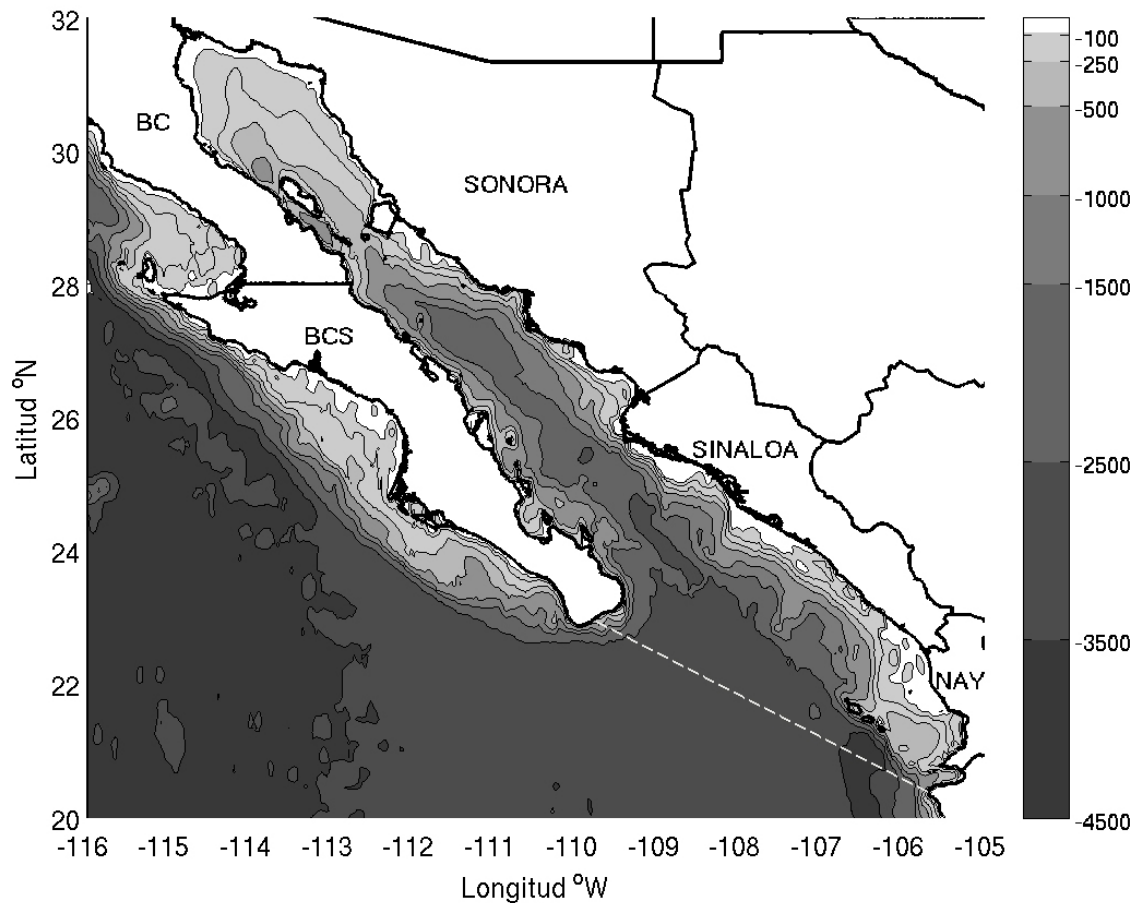
## CAPÍTULO II

# CARACTERÍSTICAS BATIMÉTRICAS Y OCEANOGRÁFICAS DEL GOLFO DE CALIFORNIA

### II.1. Ubicación geográfica y rasgos batimétricos

El Golfo de California (GC) o mar de Cortés es un mar marginal semicerrado de gran interés tanto oceanográfico como meteorológico en virtud de sus características hidrográficas, climatológicas y topográficas particulares. El GC se ubica en el noroeste de México, aproximadamente entre los 20° y 32° de latitud norte y los 105° y 115° de longitud oeste; está orientado en dirección noroeste-sureste y tiene una longitud aproximada de 1,400 km, con anchuras variables entre los 92 y los 222 km (<http://semarnat.gob.mx>). El GC está situado entre la península de Baja California, al oeste, y las costas de Sonora, Sinaloa y Nayarit al este, abarcando una línea de costa de más de 3,000 km (Fig. 2.1). Al norte limita con la desembocadura del río Colorado y al sur está limitado por una línea recta imaginaria que va de Cabo San Lucas en el extremo sur de la península de Baja California hasta Cabo Corrientes. Su comunicación abierta con el Océano Pacífico (OP) determina, en gran medida, las características oceanográficas del GC.

La batimetría del GC es muy compleja, abarcando desde regiones muy someras en la parte norte, cuyas profundidades son menores a los 50 metros, hasta cuencas que alcanzan los 3,500 metros de profundidad en la parte sur (Fig. 2.1). En el GC hay aproximadamente 240 islas e islotes, entre las que destacan la isla Ángel de la Guarda y la isla Tiburón por ser las de mayor tamaño (<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/2/igolfo.html>). Asimismo, existen numerosos esteros y lagunas costeras, principalmente a lo largo de la costa oriental, que forman parte del amplio espectro de hábitats marinos del GC. Es importante mencionar que las lagunas que están situadas en la parte norte reciben muy poca agua dulce proveniente de la precipitación sobre el continente y su desarrollo está relacionado con las mareas, cuya amplitud en esta parte del GC se encuentra entre las mayores del planeta. Por el contrario, las lagunas costeras localizadas más al sur, de Guaymas a Mazatlán, reciben grandes cantidades de agua dulce proveniente de las lluvias (<http://www.mexicodesconocido.com.mx/golfo-de-california-i.html>).



**Figura 2.1.** Ubicación y batimetría (contornos en metros) del Golfo de California. El límite sur del Golfo está indicado por la línea segmentada que une a Cabo San Lucas, B.C.S., con Cabo Corrientes, Jal.

## II.2. Masas de agua

Las masas de agua se identifican mediante sus características de temperatura y salinidad, a partir de las cuales se pueden inferir algunas otras características como su origen, y tienden a ocupar un lugar dentro de la columna de agua según su densidad. Las masas de agua adquieren sus características por influencia de los procesos físicos que se dan en la superficie del océano, como pueden ser procesos de enfriamiento o calentamiento por radiación solar, calor sensible y calor



latente, o procesos de precipitación y evaporación. Asimismo, las características originales de las masas de agua pueden modificarse al mezclarse con otras masas de agua en las capas subsuperficiales.

En este sentido, y de acuerdo con la clasificación de Torres-Orozco (1993) (algunas referencias a otros trabajos se especifican en los párrafos correspondientes), las masas de agua presentes en el GC son las siguientes (ver el recuadro en la Figura 5.1 del Capítulo V):

**Agua del Golfo de California (AGC).** Esta masa de agua se caracteriza por su alta salinidad ( $S \geq 35$  ups<sup>3</sup>), pero debido a su temperatura relativamente alta ( $12^{\circ}\text{C} < T < 31^{\circ}\text{C}$ ) siempre se encuentra en las capas superiores, generalmente en los primeros 150 metros. Es el agua dominante en la parte norte del GC donde se forma debido a la mezcla vertical producida por las corrientes de marea, el viento y la convección en invierno (Lavín y Marinone, 2003). El AGC ocupa aproximadamente el 6% del volumen total del Golfo, aunque se observa una mayor proporción de volumen en el verano-otoño en comparación con el invierno-primavera. Durante el verano el AGC fluye hacia el sur por la costa peninsular, mientras que en el invierno fluye por la parte continental (Arias, 1998).

**Agua Superficial Ecuatorial (ASE).** La masa de ASE se encuentra por encima de los 150 metros de profundidad y tiene como característica distintiva una salinidad  $< 35$  ups y una temperatura alta  $\geq 18^{\circ}\text{C}$ . Esta agua es la de menor proporción en el GC, con sólo el 1% del volumen total, mostrando un incremento estacional de invierno a otoño de acuerdo con la intensificación de la Contracorriente Ecuatorial y el desplazamiento hacia el norte de la Corriente Costera de Costa Rica. Se encuentra confinada en la región sur del GC, observándose hasta las inmediaciones de la cuenca Pescadero, con una mayor proporción frente a las costas de Sinaloa.

**Agua Subs superficial Subtropical (ASsSt).** Esta masa de agua se puede encontrar distribuida a lo largo de todo el golfo; la mayor proporción de ASsSt se observa en la región de las islas y disminuye hacia fuera de esta región en ambos sentidos (norte-sur). La proporción de ASsSt al norte

---

<sup>3</sup> Las unidades prácticas de salinidad (ups) se utilizan para describir la concentración de sales disueltas en el agua, definiendo la salinidad en términos de la relación entre la conductividad de una muestra de agua de mar y la de una solución estándar de cloruro de potasio, por lo tanto es una cantidad adimensional. Tradicionalmente la salinidad se ha expresado en partes por mil (ppm), es decir, una salinidad de 35 ppm significa 35 gramos de sal por 1,000 gramos de agua de mar. La salinidad en el océano abierto se encuentra generalmente en un rango de 32 a 37 ups (<http://science.nasa.gov/glossary/practical-salinity-unit/>).

del golfo es mayor en la mitad oeste y se extiende hasta el sur de la Cuenca Wagner; al sur, la mayor proporción en la región de las islas se encuentra en el lado oriental del golfo, es decir, se distribuye en las cuencas de Guaymas, del Carmen, Farallón y Pescadero. Tiene salinidades entre 34.5 y 35.0 ups y temperaturas entre 9° y 18°C, encontrándose aproximadamente a partir de los 150 m de profundidad. Ocupa el 19% del volumen total del GC y contribuye con más del 70% al volumen del Canal de Ballenas.

**Agua Intermedia del Pacífico (AIP).** Esta masa de agua se encuentra por debajo del ASsSt, al sur de la región de las grandes islas; la mayor proporción de esta masa de agua se encuentra en la Cuenca de Guaymas y hacia el sur en las Cuencas del Carmen, Farallón y Pescadero. El AIP se localiza entre los 500 y 1200 m de profundidad y se caracteriza por presentar un mínimo de salinidad ( $S_{\min} = 34.5$  ups) centrado aproximadamente a 900 m, con temperaturas bajas de entre 4° y 9°C. El AIP ocupa cerca del 33% del volumen total del GC y es una masa de agua dominante en la región central del golfo, viéndose afectada por la compleja batimetría en la región de las islas.

**Agua Profunda del Pacífico (APP).** Esta masa de agua domina en las cuencas profundas de la región sur del golfo y penetra hasta la isóbata de los 1200 m. Su salinidad aumenta ligeramente hacia el fondo, a partir de valores cercanos a 34.5 ups, y presenta temperaturas bajas  $< 4^{\circ}\text{C}$ . El volumen total que ocupa el APP en el GC es de aproximadamente el 41%.

**Agua de la Corriente de California (ACC).** Esta masa de agua proviene del norte y se desplaza a lo largo de la costa occidental de Baja California. Tiene un límite de profundidad menor a los 150 m y se caracteriza por sus temperaturas y salinidades relativamente bajas ( $12^{\circ}\text{C} \leq T \leq 18^{\circ}\text{C}$ ,  $S < 34.5$  ups) (Lavín et al., 1997). La contribución del ACC al volumen total del GC es muy pequeña, encontrándose siempre cerca de la boca.

En particular, la distribución espacial de las masas de agua más profundas en el GC se encuentra fuertemente restringida por la batimetría del golfo y los umbrales de la región de las islas, los cuales se localizan unos 200 m por debajo de la superficie. Las características de las masas de agua al sur de los umbrales son muy distintas de las que se encuentran al norte, región en donde los procesos de evaporación, enfriamiento y mezcla vertical les confieren características particulares de temperatura y salinidad.

## **II.3. Características oceanográficas, vientos, surgencias y flujos de calor**

El GC muestra características oceanográficas que lo diferencian de otros mares semicerrados ubicados a una latitud similar y con dimensiones similares, de las cuales la más importante es la fuerte mezcla por marea. Asimismo, el GC es afectado constantemente por una amplia gama de señales provenientes del OP, incluyendo las mareas, ondas de diversas frecuencias y El Niño, las cuales interactúan con otros forzamientos físicos como los vientos y los flujos de calor y humedad (Lavín y Marinone, 2003).

En las siguientes secciones se describen, de manera resumida, las características del GC que consideramos relevantes para este estudio, es decir, aquellas que son importantes para explicar la distribución observada de la concentración de clorofila en el golfo en escala estacional. La descripción está basada, en gran parte, en la revisión detallada que realizaron Lavín y Marinone (2003) sobre la oceanografía física del GC y que a su vez se basa en los resultados de un número importante de estudios previos. La referencia a otros trabajos se especifica en los párrafos correspondientes.

### **II.3.1. Mareas y corrientes de marea**

Las mareas<sup>4</sup> en el GC son producidas por co-oscilación con las mareas del OP y se atribuyen principalmente a las variaciones del nivel del mar en la entrada del golfo y no a la atracción gravitatoria ejercida por el sol y la luna. Las mareas en el GC son mixtas, principalmente semidiurnas<sup>5</sup> en las zonas norte y sur y diurnas<sup>6</sup> en la parte central. Las componentes semidiurnas muestran una amplificación en la altura de la marea hacia la cabeza del golfo; dicha amplificación ocurre debido a que el GC es casi resonante a las frecuencias semidiurnas. En contraste, las componentes diurnas están básicamente en fase en todo el golfo y la amplitud se incrementa hacia la cabeza por continuidad. El rango de marea<sup>7</sup> es grande, especialmente en la región norte o Alto Golfo,

---

<sup>4</sup> Elevación y descenso del nivel del mar causado por el efecto combinado de la rotación de la Tierra y las fuerzas gravitacionales ejercidas por la luna y el sol.

<sup>5</sup> El nivel del mar sube y baja dos veces por día.

<sup>6</sup> Un ciclo de marea por día.

<sup>7</sup> Diferencia entre marea alta y marea baja.

y varía considerablemente entre mareas vivas<sup>8</sup> (~6 m) y mareas muertas<sup>9</sup> (~1.5 m).

Las corrientes producidas por las mareas son débiles en la parte sur del GC, de unos cuantos cm/s, y las más intensas (~60 cm/s) se observan en la región de las islas y en el Alto Golfo. Parte de la energía producida por las corrientes de marea mediante la fricción con el fondo es usada para mezclar verticalmente la columna de agua y dicha mezcla es importante en las áreas donde la disipación es alta: el Alto Golfo, la región de las islas y la plataforma al sur de la Isla Tiburón. La mezcla también puede ocurrir en el interior del fluido por procesos como el rompimiento de ondas internas. Por ejemplo, sobre los umbrales y sus alrededores existen condiciones favorables para que ocurra una mezcla interna intensa. Es importante mencionar que las áreas donde existe una fuerte mezcla por marea son las de mayor productividad biológica en el GC, las cuales pueden identificarse en las imágenes satelitales de CCA.

Las corrientes de marea dentro del GC han sido poco investigadas, pero en general muestran las mismas características que la marea, es decir, muestran variaciones diurnas y semidiurnas, corrientes fuertes en mareas vivas, etc. (Marinone y Lavín, 1997).

### **II.3.2. Circulación**

La circulación en el GC está determinada por las mareas, los vientos, la distribución de la densidad del agua de mar y el intercambio de calor y agua con la atmósfera y con el OP nororiental. La circulación inducida por el viento y por el OP se encuentra en fase, es decir, ambos forzamientos producen circulación ciclónica (en sentido opuesto al de las manecillas del reloj) y anticiclónica (en el sentido de giro de las manecillas del reloj) en la misma época del año.

Se han desarrollado modelos numéricos para describir la circulación estacional en el GC y analizar los efectos individuales de diversos agentes de forzamiento como el OP, los vientos y el flujo superficial de calor. A partir de dichos análisis numéricos se llegó a la importante conclusión de que la circulación y la termodinámica estacionales en el GC están más influenciadas por el OP que por el viento y los flujos locales, procesos que son importantes en escalas de tiempo más cortas. En este sentido, se ha determinado que existe una perturbación forzada en la boca que viaja alrededor del GC

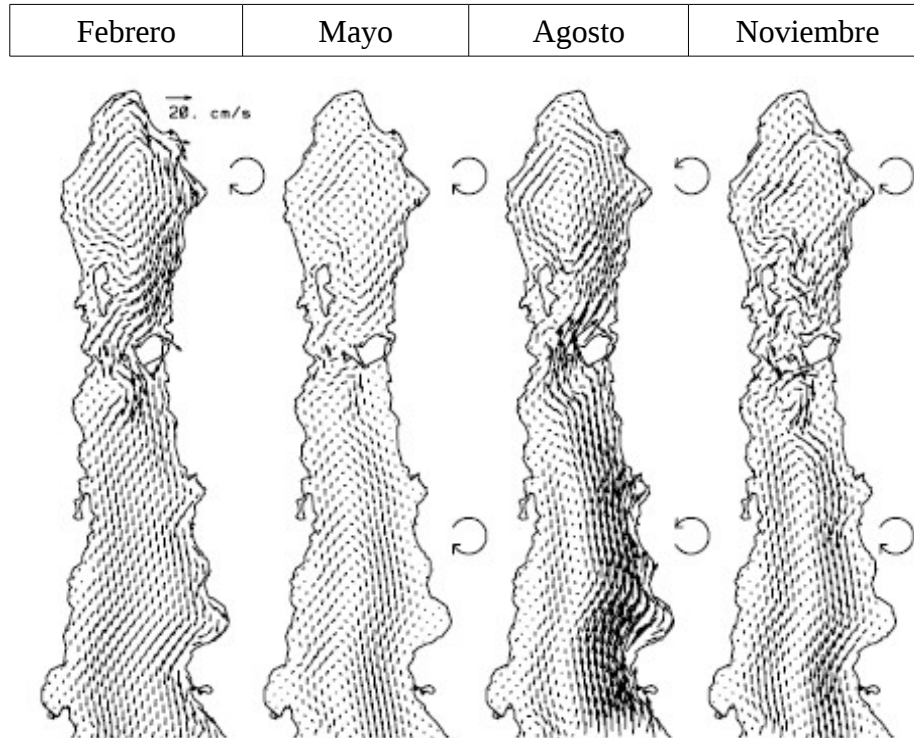
<sup>8</sup> Cuando el rango de marea es máximo.

<sup>9</sup> Cuando el rango de marea es mínimo.

en dirección opuesta a las manecillas del reloj, con una rapidez aproximada de 1.6 m/s (Beier, 1997). Esto sugiere que la circulación estacional del GC puede estar dominada por el OP, en oposición a la idea de que el viento era el principal agente forzante.

Las corrientes instantáneas en la parte norte son dominadas por las corrientes de marea, sin embargo a largo plazo las corrientes inducidas por los otros agentes, como el viento y la circulación residual inducida por las mareas, pueden tener efectos importantes. Según Marinone y Lavín (1997), alrededor de la zona de las islas y en la parte norte del golfo se presentan corrientes residuales producidas por marea que pueden ser de ayuda en la predicción del destino de la clorofila-*a*.

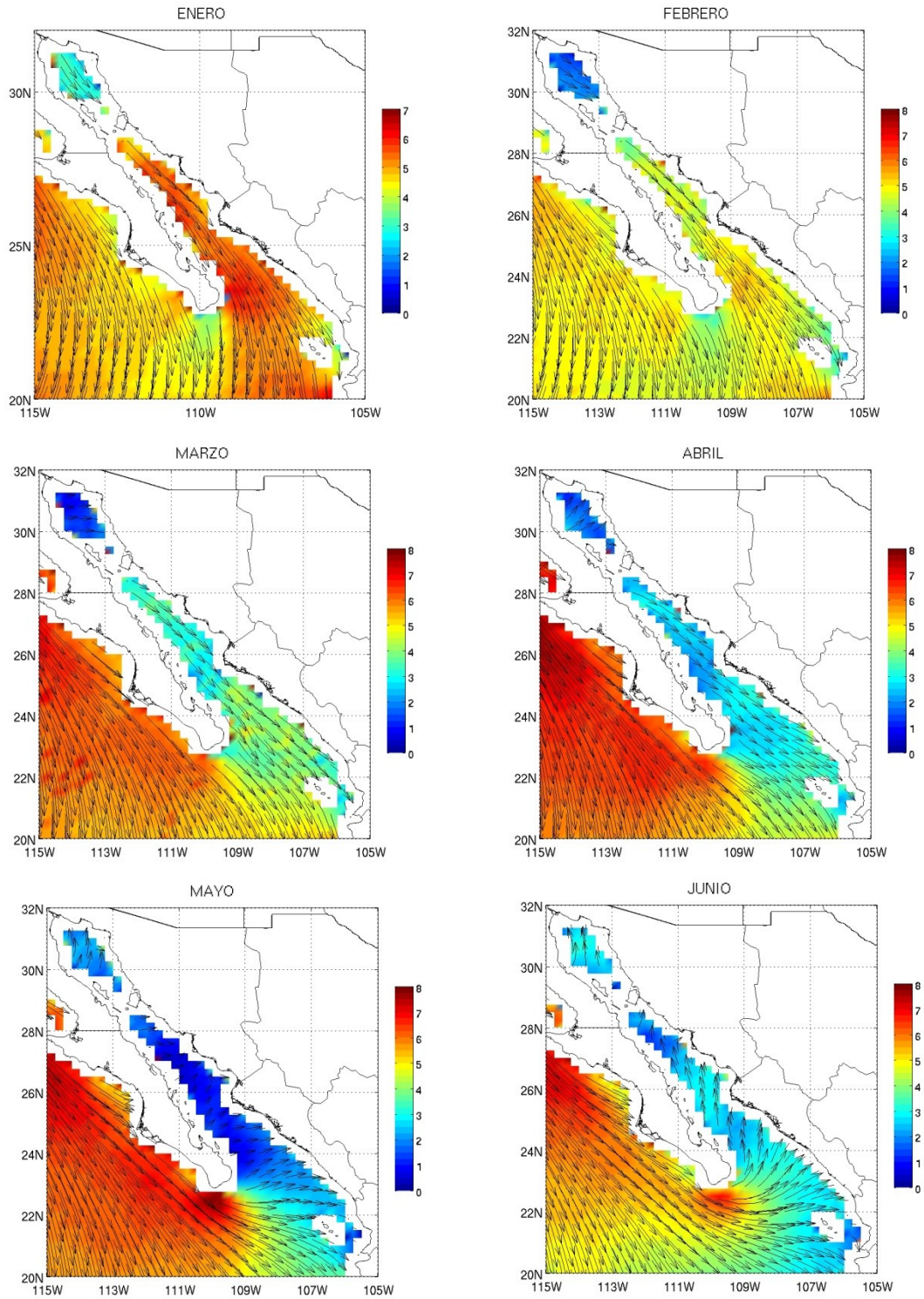
En escala estacional, la circulación en la parte norte del GC presenta un giro que revierte su sentido, con dirección ciclónica de Junio a Septiembre y anticiclónica de Noviembre a Abril. Al sur de las grandes islas también existen variaciones estacionales, observándose en el verano un flujo hacia el norte a lo largo de la costa oriental del golfo (Sinaloa y Sonora) y hacia el sur a lo largo de la costa peninsular, mientras que durante el invierno el sentido del flujo se invierte (Fig. 2.2). Cabe mencionar que existe evidencia de otros giros en el centro y sur del golfo; por ejemplo, Emilsson y Alatorre (1997) observaron la formación de un giro ciclónico a la entrada del golfo, el centro del cual se encuentra en la línea imaginaria entre La Paz y Topolobampo.



**Figura 2.2.** Corrientes superficiales (0-10 m) obtenidas con el modelo tridimensional de Marinone (2003) (Figura tomada de Lavín y Marinone, 2003).

### **II.3.3. Vientos**

El viento tiene muchas consecuencias importantes en la dinámica y termodinámica del GC; es el causante de las altas tasas de evaporación e impulsor de corrientes. Los vientos en el GC tienen una marcada variabilidad estacional, producto de los cambios estacionales de los centros de presión atmosférica en su vecindad y al efecto de encañonamiento producido por las cordilleras a ambos lados del golfo, lo que produce una circulación atmosférica dirigida principalmente a lo largo de su eje (Fig. 2.3). En promedio, los vientos predominantes de Octubre a Abril en la mayor parte del GC provienen del noroeste, siendo más intensos durante los meses de Diciembre y Enero. Este patrón favorece la ocurrencia de surgencias a lo largo de la costa continental (ver sección II.3.4).



**Figura 2.3.** Promedios mensuales del campo de viento (m/s) en el GC y zonas oceánicas adyacentes calculados a partir de los datos del escaterómetro QuikSCAT (1998-2008): Enero a Junio.

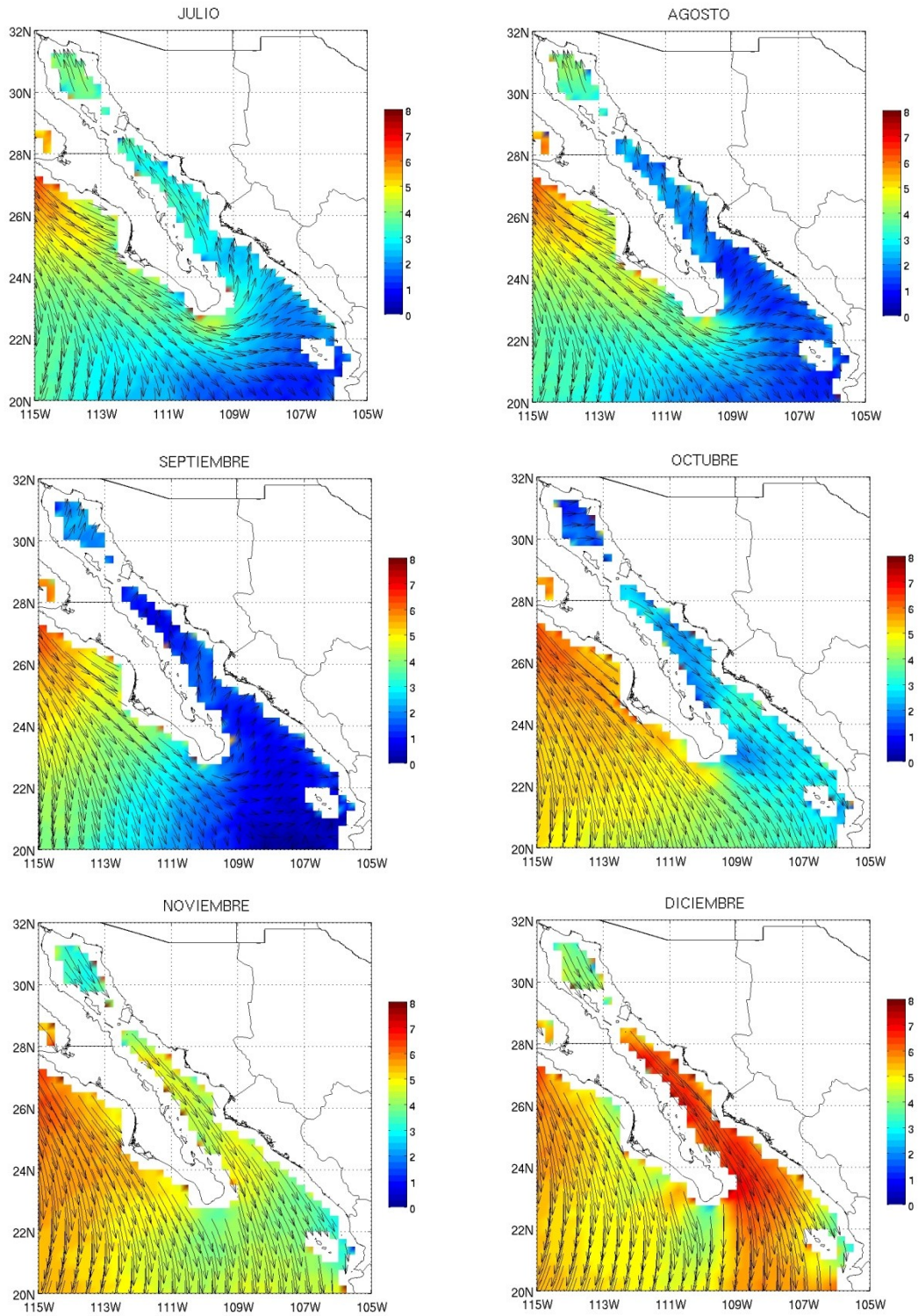


Figura 2.3. (Continuación) Julio a Diciembre.



A partir de Febrero los vientos del noroeste empiezan a debilitarse y para el mes de Mayo los vientos son muy débiles en la mayor parte del GC, soplando hacia la costa oriental del golfo. Cabe señalar que la región norte presenta un comportamiento algo diferente que el resto del golfo, mostrando vientos dominantes del oeste en Marzo, del oeste y suroeste en Abril y del sur en Mayo, siendo ligeramente más intensos que en la parte central del golfo. En Junio se observan vientos relativamente débiles del sur y sureste a lo largo de todo el GC, los cuales se intensifican para el mes de Julio. En la parte norte del golfo es donde se observan los vientos más intensos del sureste en los meses de Julio y Agosto, con magnitudes similares a las que presentan los vientos del noroeste durante Noviembre y Diciembre en esa región (Fig. 2.3). El patrón de vientos durante el verano puede favorecer surgencias en la costa peninsular.

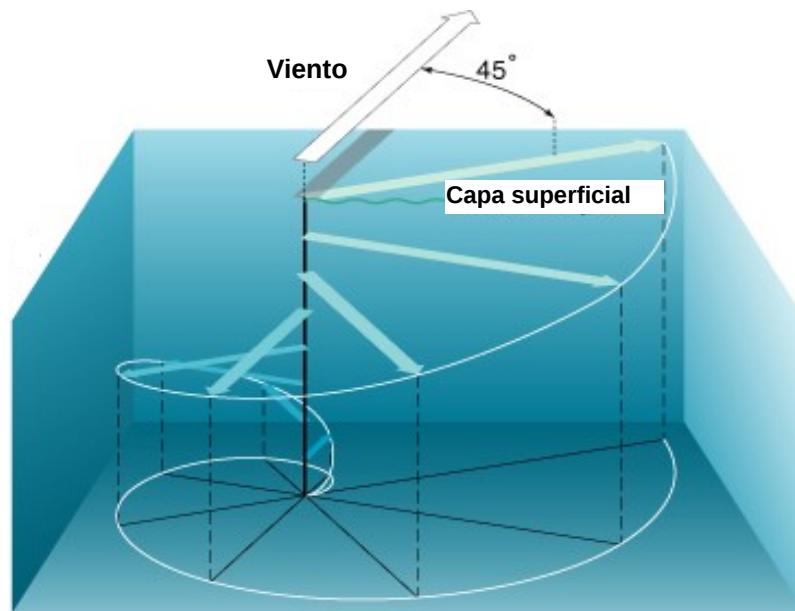
En Septiembre los vientos son muy débiles en el GC, predominando vientos con componente del sur en la parte central y del oeste a la entrada del golfo; en este mes, los vientos en la parte norte siguen siendo ligeramente más intensos que en el resto del golfo. En Octubre comienzan a predominar los vientos del noroeste en casi todo el golfo, con excepción de la parte norte donde se observan vientos muy débiles con componente del oeste.

Los vientos en el verano y el invierno presentan diferentes características de humedad y temperatura, debido a que las masas de aire asociadas tienen diferente origen en cada estación. Por ejemplo, en el verano el viento proviene de la zona marítima tropical, entonces será un viento húmedo y tibio; por el contrario, durante el invierno el aire proviene de la masa continental de Norteamérica lo que implica que sea un aire seco y frío (Allende-Arandía, 2005).

#### **II.3.4. Surgencias**

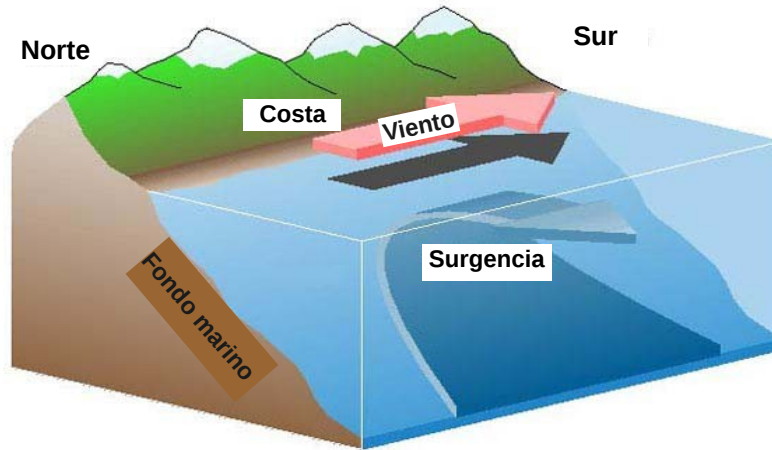
Los vientos afectan poderosamente a los océanos y son una fuerza importante para la generación de corrientes en la superficie oceánica como resultado del arrastre por fricción. Debido a la rotación de la tierra, la capa de agua superficial que es puesta en movimiento por el viento es desviada hacia la derecha de la dirección del flujo en el hemisferio norte, fenómeno conocido como efecto de Coriolis. Por efecto de la viscosidad, la capa superficial pondrá en movimiento a la capa inmediata inferior y esta interacción se propagará hacia abajo a través de capas sucesivas en el océano, cada una moviéndose más lentamente que la capa de arriba y cambiando la dirección de su

desplazamiento, modelo conocido como la espiral de Ekman (Fig. 2.4). La espiral de Ekman predice un flujo neto de agua a  $90^\circ$  de la dirección del viento en la superficie (hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur), a una profundidad de entre 100 y 150 metros, lo cual se conoce como el transporte de Ekman (<http://oceanmotion.org/>). Sin embargo, debe señalarse que, con frecuencia, el océano real no satisface exactamente las condiciones idealizadas de la espiral y el transporte de Ekman sino que los movimientos de agua difieren apreciablemente de las predicciones teóricas.



**Figura 2.4.** Esquema representativo de la espiral de Ekman en el océano (<http://oceanmotion.org/>).

Por lo anterior, cuando los vientos soplan paralelos a la línea de costa (supongamos una costa orientada norte-sur), los vientos del norte tienden a guiar las corrientes superficiales del océano hacia la derecha de la dirección del viento, es decir, empujan las aguas superficiales hacia fuera de la costa. Conforme el agua es empujada hacia fuera de la costa, el agua más profunda sube para reemplazarla (Fig. 2.5). El movimiento hacia arriba de esta agua profunda y fría es lo que se conoce como *surgencia*. Entonces, el proceso de surgencia lleva agua fría y rica en nutrientes hacia la superficie, lo cual estimula el crecimiento de algas marinas y el florecimiento de fitoplancton. Aunque las regiones de surgencia costera representan solamente el 1% de la superficie oceánica, éstas contribuyen aproximadamente con el 50% de las pesquerías mundiales (<http://oceanexplorer.noaa.gov/>).



**Figura 2.5.** Esquema representativo del proceso de surgencia (<http://oceanexplorer.noaa.gov/>).

La efectividad del proceso de surgencia y su capacidad para mantener una vida abundante en el mar depende en gran medida de la profundidad de la termoclina<sup>10</sup>. Una termoclina más profunda limita la cantidad de nutrientes que pueden ser llevados a zonas menos profundas mediante surgencias. Asimismo, factores como la variabilidad en la intensidad y dirección de los vientos y la topografía costera producen un patrón de surgencias extremadamente dinámico, el cual cambia sustancialmente a lo largo de la línea de costa y a través del tiempo (<http://oceanexplorer.noaa.gov/>).

Como se mencionó en la sección anterior, el patrón de viento en el GC es apropiado para la generación de surgencia sobre la costa continental en invierno y sobre la península en verano. Sin embargo, las imágenes de satélite sólo muestran de manera clara la surgencia de invierno en la costa continental. No es claro por qué la surgencia de verano es más débil, pero una razón posible es la debilidad de los vientos en verano. La tasa de surgencia promedio en el GC es de 1 a 3 metros por día.

---

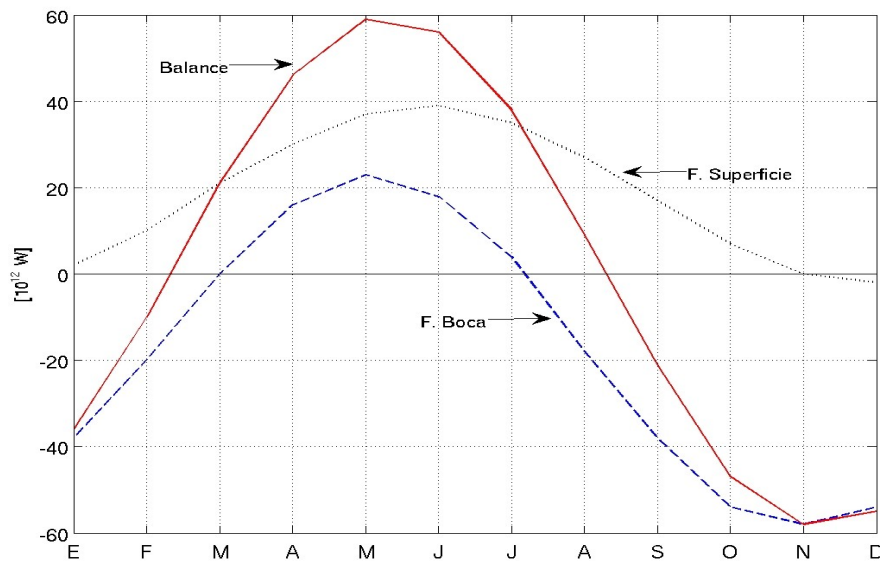
<sup>10</sup> Capa oceánica de transición entre la capa de mezcla superficial y el agua profunda. En la termoclina, la temperatura del agua decrece rápidamente de la temperatura relativamente cálida de la capa de mezcla a la temperatura mucho más baja del agua profunda.

### II.3.5. Flujos de calor por la superficie

La marcada estacionalidad de los flujos de calor a través de la superficie es debida a la estacionalidad de las variables meteorológicas y astronómicas. El calentamiento debido a la radiación solar es el término más importante en el balance de energía, mientras que la pérdida de calor más grande se debe a la evaporación, proceso que es responsable de la alta salinidad del AGC. El flujo neto de calor tiene, además del ciclo estacional, dos características importantes: 1) a diferencia de otros mares marginales evaporativos, el GC gana calor a través de la superficie en promedio anual, y 2) hay pérdidas netas de calor en el Golfo norte en Noviembre y Diciembre. El balance de calor en el GC en escala estacional está representado en la figura 2.6 y está dado por la siguiente relación:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = Q_s + \mathcal{F}_H$$

donde  $Q_s$  es el flujo de calor a través de la superficie y  $\mathcal{F}_H$  es el flujo de calor a través de la boca.



**Figura 2.6.** Balance estacional de calor en el Golfo de California (datos tomados de Lavín y Marinone, 2003, con base en los resultados de Castro et al., 1994).

De la figura anterior se infiere que el intercambio de calor estacional entre el GC y el OP es más importante que el flujo de calor por la superficie. Asimismo, el flujo de sal a través de la boca es más importante que la evaporación en el control de la salinidad promedio y la variación estacional del nivel del mar en el GC se debe principalmente a los flujos de calor a través de la boca.

# CAPÍTULO III

## DATOS Y METODOLOGÍA

### III.1. Datos

En esta sección se describen los datos utilizados en el análisis así como las características de la misión satelital de la cual provienen.

#### **III.1.1 Datos de concentración de clorofila-a**

Los datos de concentración de clorofila-a (CCa) utilizados en este estudio forman parte de la base de datos del proyecto SeaWiFS de la NASA. El producto utilizado, conocido como Level-3 Standard Mapped Image (L-3 SMI), consiste de arreglos bidimensionales globales de datos preprocesados de CCa, que incluyen calibración radiométrica y corrección geométrica, con una resolución espacial de 9.2 km<sup>11</sup>. Los datos se encuentran almacenados en archivos con formato HDF (Hierarchical Data Format) y los valores pueden convertirse a unidades geofísicas (en este caso mg/m<sup>3</sup>) usando los atributos de escalamiento especificados en los mismos archivos. Los datos fueron obtenidos del sitio Web <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. En este trabajo se utilizan los promedios climatológicos mensuales de CCa para el período de once años de Enero de 1998 a Diciembre de 2008.

#### **III.1.2. Características del proyecto SeaWiFS**

El propósito del proyecto SeaWiFS es proporcionar datos cuantitativos de las propiedades bio-ópticas del océano global a los estudiosos de las ciencias de la tierra. Dicho proyecto fue diseñado para desarrollar y operar un sistema de investigación que recolecte, procese, almacene y distribuya los datos recibidos de un sensor de color del océano. Los cambios sutiles en el color del océano indican la presencia de varios tipos y cantidades de fitoplancton marino, cuyo conocimiento tiene aplicaciones

---

<sup>11</sup> Debido a la resolución espacial de este producto, los datos presentan variaciones importantes en áreas muy cercanas a la línea de costa, pudiendo haber algunos errores de estimación en tales zonas.

tanto científicas como prácticas. Como se menciona en la introducción de esta tesis, la concentración de fitoplancton puede obtenerse mediante la observación y cuantificación del color del océano por medio de satélites; esto se debe al hecho de que el color en la mayoría de los océanos del mundo varía con la concentración de clorofila y de otros pigmentos de plantas presentes en el agua. Los datos del SeaWiFS son utilizados para estudiar la magnitud y variabilidad de la clorofila y de la producción primaria mediante el fitoplancton marino y para determinar la distribución y el momento de mayor crecimiento o abundancia (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>). Los estudios sobre la distribución de clorofila han permitido avanzar en el entendimiento sobre el acoplamiento de los procesos físicos y biológicos, el cual se da mediante los movimientos verticales de agua de gran escala. Los valores altos de clorofila se encuentran donde ocurren surgencias generadas por los sistemas de viento de gran escala, como en las zonas costeras, o en regiones con una importante mezcla vertical. Por otra parte, los valores relativamente bajos de clorofila se encuentran en regiones de hundimiento de las aguas.

La misión SeaWiFS fue lanzada en Agosto de 1997 y desde entonces se han colectado y procesado los datos que proporciona. El sensor SeaWiFS, montado en el satélite SeaStar, es un espectroradiómetro con el cual se obtienen los datos de color de los océanos. Un radiómetro es un instrumento que mide la irradiancia<sup>12</sup> del mar (luz reflejada) en longitudes de onda previamente determinadas (Peña del Valle, 2000). Un espectroradiómetro se basa en las características de algunos constituyentes ópticos del agua y en la transmitancia espectral<sup>13</sup> del oxígeno y el vapor de agua atmosféricos. El sensor SeaWiFS cuenta con 8 bandas espectrales. Las bandas 1 a 6 están localizadas en la región óptica del espectro electromagnético (400 - 700 nm) y se ubican en zonas características de absorción y/o reflexión del fitoplancton; las bandas 7 y 8 se localizan en la región del infrarrojo cercano (745 - 885 nm).

El SeaWiFS transmite los datos de dos maneras: los datos LAC (Local Area Coverage) que se transmiten de forma continua y tienen una resolución de 1.1 km en una franja de 2,800 km de ancho, y los datos GAC (Global Area Coverage) que se almacenan a bordo y se envían a la estación terrena de Wallops Flight Facility (situada en la Costa Este de Virginia - USA) cada 12 horas. Los GAC se obtienen submuestreando los LAC, presentando una resolución de 4 km en una franja de 1,500 km.

---

<sup>12</sup> La potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética.

<sup>13</sup> Relación entre el flujo radiante transmitido y el incidente en una única longitud de onda en condiciones geométricas fijas.

## **III.2. Metodología**

La metodología empleada para analizar los datos de *CCa* y obtener una regionalización para el GC está basada en el cálculo de funciones ortogonales o modos estadísticos, método conocido como análisis de Funciones Empíricas Ortogonales o análisis de Componentes Principales y que consiste en resolver un problema de eigenvalores y eigenvectores para la matriz de covarianzas de los compuestos de anomalías mensuales de *CCa*. Los eigenvectores representan los patrones o modos de variación espaciales y las componentes principales proporcionan el signo y amplitud de dichos modos como función del tiempo. La metodología incluye una parte subjetiva para identificar rangos de variación similares en cada modo a partir de los cuales se obtiene la división en regiones del GC. Esta metodología fue utilizada por Salmerón-García et al. (2010) para obtener una regionalización del Golfo de México. Cabe mencionar que los programas elaborados para el procesamiento y graficación de los datos se realizaron con el software MatLab.

A continuación se describe la metodología utilizada para el análisis de los datos de *CCa*, incluyendo la descripción del preprocesamiento que se les aplicó. La metodología empleada incluye lo siguiente:

- 1) Cálculo de las anomalías mensuales de *CCa*.
- 2) Descomposición en funciones empíricas ortogonales (patrones espaciales) y componentes principales (evolución temporal) de la matriz de covarianzas de las series de tiempo de las anomalías.
- 3) Elección, de manera subjetiva, de los rangos de variación en cada uno de los modos o patrones espaciales escogidos, de zonas que muestran variaciones similares dentro de cada modo.

### **III.2.1 Preprocesamiento de los datos**

Como se mencionó al principio de este capítulo, los datos utilizados corresponden a las climatologías mensuales de *CCa* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) obtenidas a partir de las estimaciones del satélite SeaWiFS para el período de Enero de 1998 a Diciembre de 2008. La base de datos consta de 12 archivos en formato HDF con las imágenes globales de *CCa*. Dichas imágenes son arreglos matriciales de tamaño

2160 x 4320. A partir de estas matrices se extrajeron los datos correspondientes a la zona que abarca de 20° a 32° de latitud norte y de 105° a 115° de longitud oeste, obteniéndose arreglos matriciales de tamaño 145 x 121. Para considerar únicamente los datos dentro del GC, se generó una matriz que sirviera para eliminar los puntos fuera de la región de estudio, con lo cual se obtuvieron los 12 mapas con los promedios mensuales de *CCa* en el GC.

A partir de estos mapas se calculó el promedio anual climatológico para el período analizado, el cual se utilizó para calcular las anomalías mensuales de *CCa* al restarlo de los campos mensuales. Para una mejor visualización y análisis de la variabilidad espacial de las anomalías mensuales de *CCa* se utilizó una escala logarítmica siguiendo la metodología de Zavala-Hidalgo et al. (2006).

Las posiciones en las cuales se muestra el campo de anomalías de *CCa* en un tiempo dado están distribuidas sobre un espacio bidimensional. Por lo tanto, el primer paso para llevar a cabo el procesamiento de los datos consiste en acomodarlos en vectores unidimensionales. De esta manera obtenemos una matriz de datos de dos dimensiones,  $D_{(M \times N)}$ , donde  $M = 3247$  representa el número de mediciones en el espacio (una vez eliminados los puntos fuera del GC) y  $N = 12$  representa el tiempo, es decir, los 12 meses del año. En este caso, como puede observarse, tenemos que  $M \gg N$ .

### ***III.2.2. Funciones Empíricas Ortogonales y Componentes Principales***

El objetivo del análisis conocido como Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) o análisis de Componentes Principales (CPs) es proveer una descripción compacta de la variabilidad temporal y espacial de series de datos en término de funciones ortogonales o “modos” estadísticos (Venegas, 2001). Es decir, se trata de reducir un problema multidimensional en el espacio vectorial a un conjunto pequeño de vectores ortogonales que “expliquen” la varianza en los datos. Se les llama *empíricas* para reflejar el hecho de que están definidas por la estructura de la covarianza del conjunto específico de datos que está siendo analizado. Generalmente, la mayor parte de la varianza de un conjunto de series de tiempo distribuidas espacialmente se encuentra en las primeras funciones ortogonales, cuyos patrones pueden estar vinculados con posibles mecanismos dinámicos. Sin embargo, es importante señalar que no necesariamente existe una relación física directa entre las FEOs puramente estadísticas y cualquier proceso dinámico con el que se les relacione (Venegas,



2001).

Para obtener las FEOs se calcula la matriz de covarianzas o matriz de dispersión de las series de tiempo de las anomalías (en la matriz D) y se obtienen sus eigenvectores y eigenvalores. Los eigenvectores representan el patrón de varianza en las mediciones espaciales y sus unidades son totalmente arbitrarias; la única característica importante es si sus valores son positivos o negativos. Es importante señalar que cada eigenvector está asociado con un eigenvalor específico. Generalmente, la matriz de covarianzas que se calcula está dada por:

$$C_{(M \times M)} = ( D_{(M \times N)} * D_{(N \times M)}^T ) / (M-1) \quad (1)$$

donde el superíndice T indica la transpuesta de la matriz. Calculando de esta manera la matriz de covarianzas  $C_{(M \times M)}$  sería de dimensión 3247 x 3247, la cual es extremadamente grande y difícil de trabajar. Sin embargo, dado que  $M > N$  la matriz de covarianzas es *singular*, lo cual implica que sólo tendrá N eigenvalores distintos de cero y resultaría innecesario calcular los demás, así como a sus correspondientes eigenvectores asociados. Por lo tanto, en lugar de calcular la matriz de covarianzas usando la ecuación (1), se calcula como:

$$C_{(N \times N)} = ( D_{(N \times M)}^T * D_{(M \times N)} ) / (N - 1) \quad (2)$$

que tiene dimensión 12 x 12 y cuyos eigenvalores son idénticos a los N eigenvalores distintos de cero que se obtendrían al usar la matriz de dimensión mayor  $C_{(M \times M)}$  (Venegas, 2001; Wilks, 2006). Al resolver el problema de eigenvalores para  $C_{(N \times N)}$ , se obtienen las matrices F y  $\Lambda$  tales que:

$$C_{(N \times N)} * F_{(N \times N)} = F_{(N \times N)} * \Lambda_{(N \times N)} \quad (3)$$

donde  $F_{(N \times N)}$  contiene los eigenvectores  $f_k$  de  $C_{(N \times N)}$  y  $\Lambda_{(N \times N)}$  es una matriz diagonal que contiene los eigenvalores  $\lambda_k$  de la matriz  $C_{(N \times N)}$ , los cuales son mayores o iguales a cero. La matriz  $F_{(N \times N)}$  de eigenvectores de  $C_{(N \times N)}$  no es igual a la matriz  $E_{(M \times M)}$  de eigenvectores  $e_k$  de  $C_{(M \times M)}$ , pero los N

eigenvectores que serían significativos en la matriz  $E_{(M \times M)}$  pueden calcularse a partir de los eigenvectores de la matriz  $F_{(N \times N)}$  mediante la proyección de  $F$  sobre el campo  $D$ :

$$E_{(M \times N)} = D_{(M \times N)} * F_{(N \times N)} \quad \text{ó} \quad \mathbf{e}_k = (D^T \mathbf{f}_k) / \|D^T \mathbf{f}_k\| \quad \text{con } k = 1, \dots, N.$$

De esta manera se obtienen los  $N$  modos o patrones espaciales a partir de los modos en el dominio del tiempo y tienen un tamaño igual al número de posiciones en los mapas de anomalías originales (Venegas 2001; Wilks 2006). Ahora bien, los eigenvalores están ordenados de mayor a menor, es decir,  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N$ , y su magnitud es una medida de la cantidad de varianza contenida en el conjunto de datos  $D$  que puede ser explicada por su eigenvector o modo asociado:

$$\% \text{ de varianza representado por el modo } k = \lambda_k / \sum \lambda_i * 100.$$

En nuestro caso, el porcentaje de la varianza total contenida en los datos que es explicada por los primeros cuatro modos es de 84.7%, por lo que se decidió tomar en cuenta únicamente estos 4 modos para el análisis posterior.

La evolución temporal de los modos espaciales está dada por las series de tiempo de la matriz  $A_{(K \times N)}$  de componentes principales, la cual se obtiene mediante:

$$A_{(K \times N)} = E_{(K \times M)}^T * D_{(M \times N)}, \quad \text{donde } K = 4 \text{ en nuestro caso.}$$

Los  $K$  renglones de  $A$  son series de tiempo de tamaño  $N = 12$  y son ortogonales en el tiempo. Cada componente principal proporciona el signo y la amplitud total del correspondiente modo o patrón espacial como función del tiempo. Una reconstrucción aproximada, menos ruidosa, del campo original  $D$  puede obtenerse como sigue:

$$\hat{D}_{(M \times N)} = E_{(M \times K)} * A_{(K \times N)},$$

tomando en cuenta solamente los  $K$  primeros modos que explican un alto porcentaje de la varianza de la matriz de datos  $D$ .

### ***III.2.3. Rangos característicos y regionalización***

Cada eigenvector (o patrón espacial) muestra claramente distintas regiones que se diferencian entre sí dentro del GC, las cuales se distinguen por presentar anomalías positivas o negativas muy marcadas. Analizando los patrones espaciales en conjunto con los mapas de anomalías mensuales de *CCa*, se determinaron de manera subjetiva (visualmente) once rangos de variación dentro de cada uno de los cuatro modos o eigenvectores. Estos rangos están asociados con las regiones que sobresalen dentro del GC, tanto en los mapas de anomalías de *CCa* como en los mapas de eigenvectores. A partir de esta clasificación, cada pixel dentro del GC queda asociado con alguno de los once rangos o patrones característicos de variabilidad espacio-temporal identificados, lo cual determina una división del GC en 15 subregiones (ver la sección IV.3 en el siguiente Capítulo).

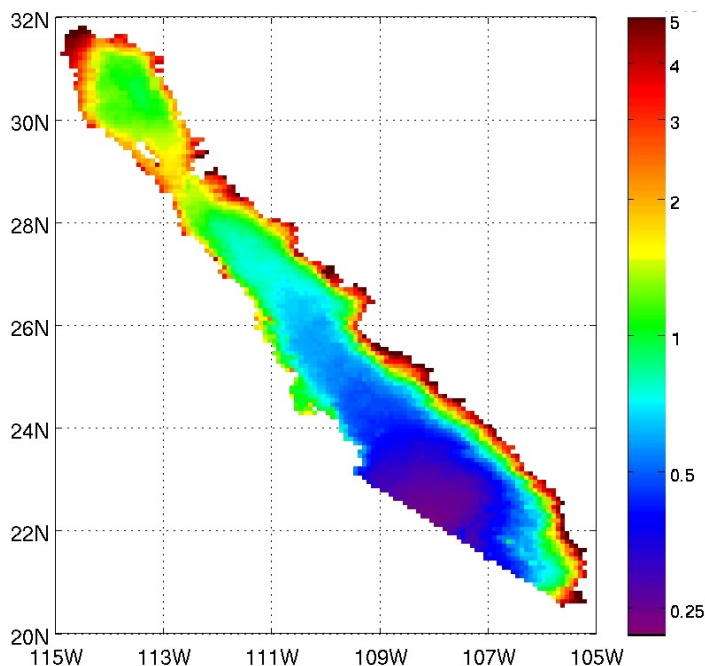
# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS

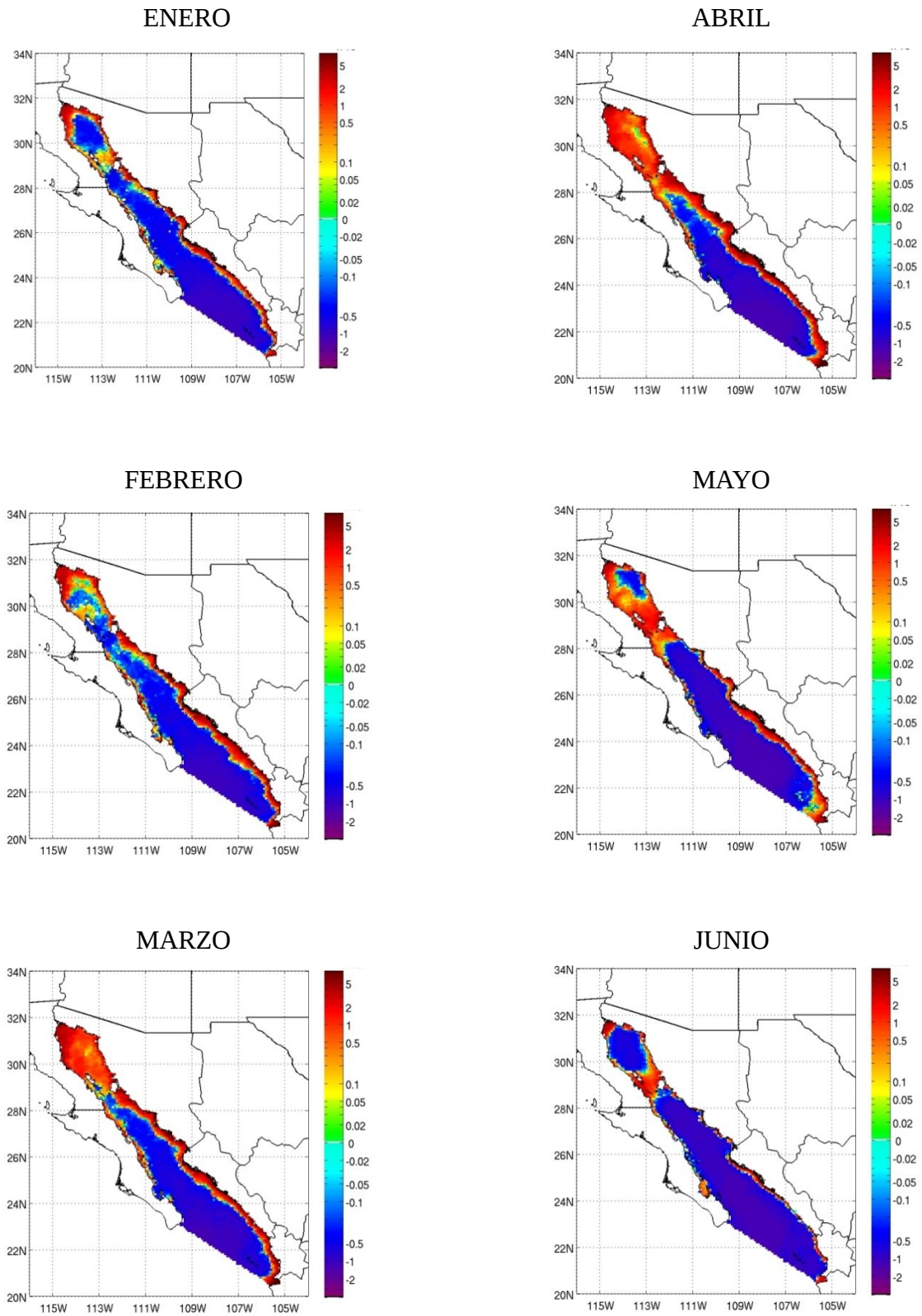
### IV.1. Descripción del ciclo anual

El promedio anual de *CCa* en el GC para el período 1998 – 2008 (Fig. 4.1) muestra valores máximos en las zonas costeras del lado oriental y en el extremo norte del GC ( $> 3 \text{ mg/m}^3$ ), que van disminuyendo hacia el centro y sur del golfo, es decir, hacia las zonas más profundas. También se observa que la región de las grandes islas muestra valores promedio relativamente altos ( $\sim 2 \text{ mg/m}^3$ ).

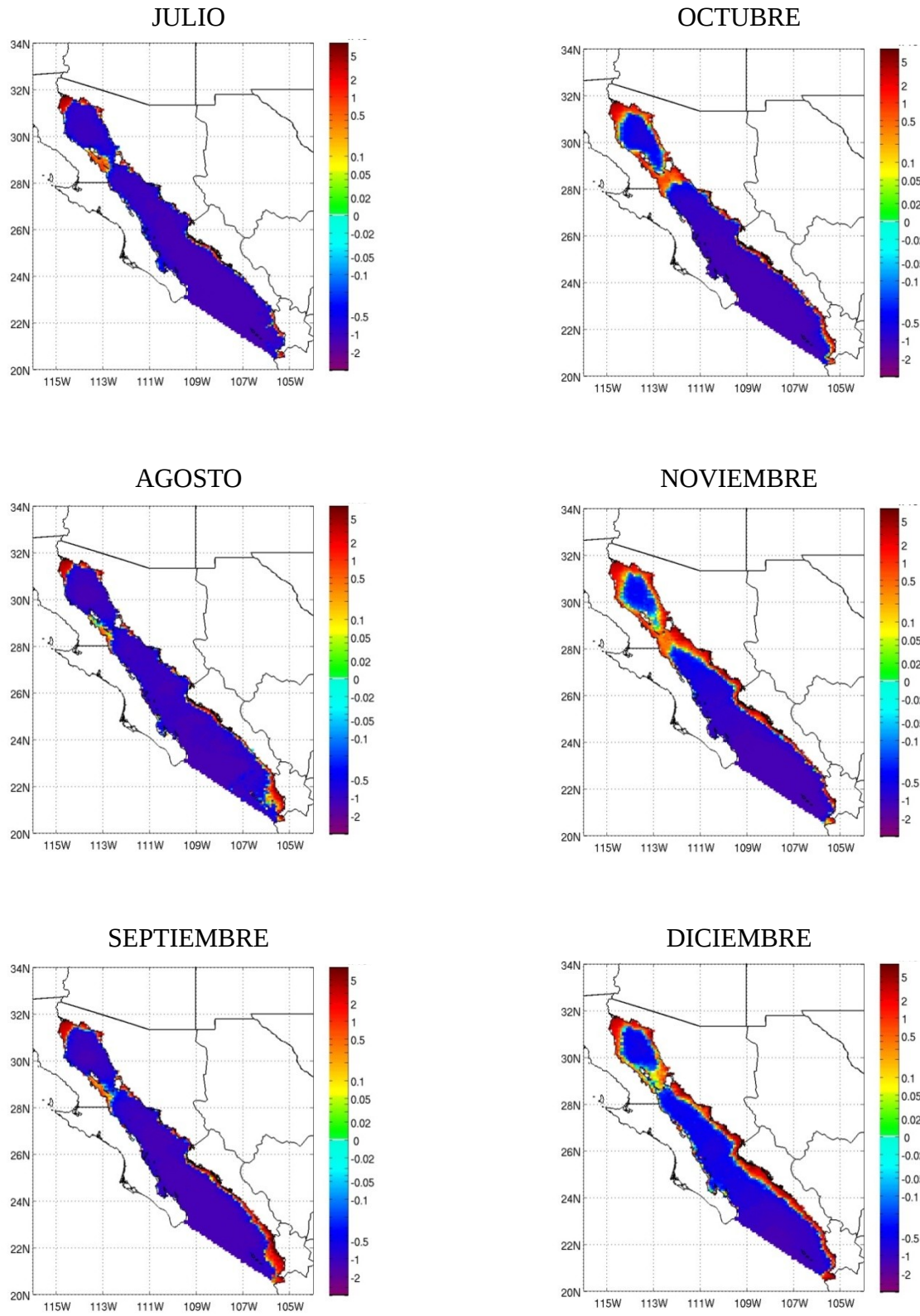
Con el objeto de analizar las variaciones estacionales de la *CCa* en el GC, se calcularon las anomalías mensuales restando a cada mapa promedio mensual el promedio general de todo el golfo para el período mencionado (e.d., el promedio del mapa presentado en la Figura 4.1), que es de  $1.46 \text{ mg/m}^3$ . Los mapas obtenidos se muestran en las gráficas de la Figura 4.2.



**Figura 4.1.** Promedio anual de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg/m}^3$ ) en el Golfo de California para el período 1998-2008.



**Figura 4.2.** Mapas de anomalías mensuales de la concentración de clorofila-*a* calculadas con respecto al promedio general del Golfo de California para el período 1998-2008. Enero a Junio.



**Figura 4.2.** (Continuación) Julio a Diciembre.

Los mapas mensuales de anomalías de  $CCa$  calculadas con respecto al promedio anual general del GC, muestran las siguientes características (Fig. 4.2):

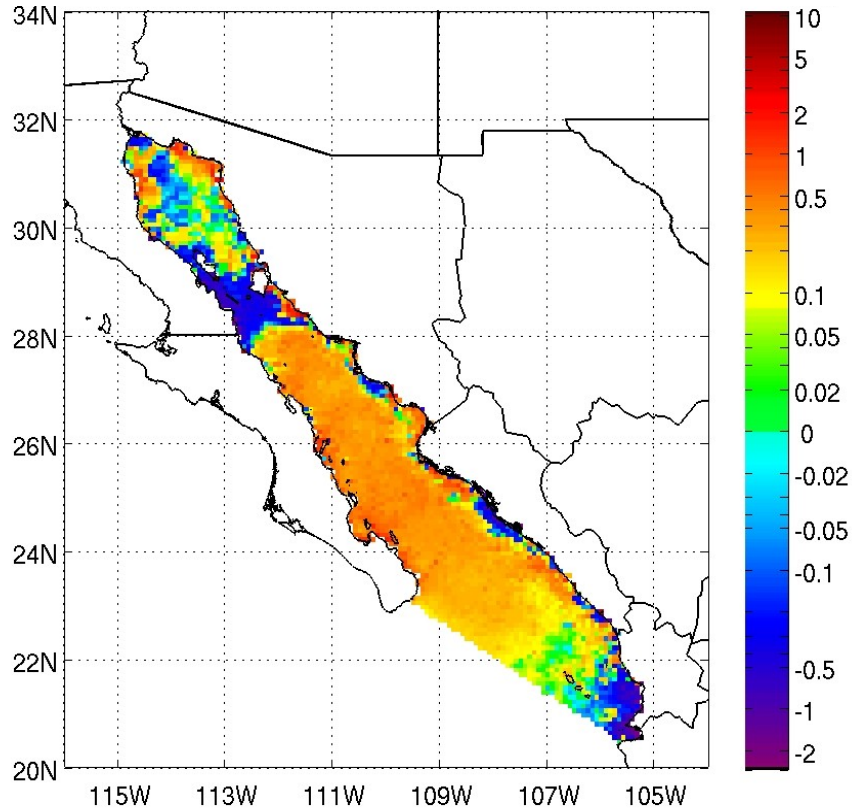
- El extremo norte, incluyendo las dos bahías alrededor de Puerto Peñasco en la zona costera del norte de Sonora, presenta anomalías positivas (exceso con respecto al promedio general del GC) a lo largo de todo el año.
- Toda la zona costera continental (Sonora, Sinaloa y Nayarit) muestra marcadas anomalías positivas de Diciembre a Mayo, aunque también en Octubre y Noviembre las áreas muy cercanas a la línea de costa muestran valores positivos. En particular, las costas de Nayarit se mantienen con anomalías positivas durante todo el año, distinguiéndose de las regiones adyacentes en Agosto y Septiembre y presentando valores mínimos en Junio y Julio (con algunas zonas de la parte sur mostrando valores negativos).
- Bahía de Banderas, en la frontera entre los estados de Jalisco y Nayarit, también presenta anomalías positivas de  $CCa$  durante todo el año, con máximos de Diciembre a Mayo y mínimos entre Junio y Noviembre, aunque muestra un máximo relativo en el mes de Septiembre.
- El Canal de Ballenas presenta anomalías positivas durante la mayor parte del año, con excepción del mes de Febrero, observándose valores máximos en Abril-Julio y Septiembre- Noviembre y valores más pequeños en Diciembre, Enero, Marzo y Agosto.
- A diferencia del Canal de Ballenas, la bahía de La Paz presenta anomalías negativas de  $CCa$  (déficit con respecto al promedio general del GC) durante la mayor parte del año, con excepción de los meses de Enero y Febrero cuando muestra anomalías positivas pequeñas y distinguiéndose de sus alrededores en el mes de Junio por presentar anomalías positivas cuando en toda la parte central, sur y de entrada al GC los valores son negativos.
- El ciclo anual de las anomalías de  $CCa$  en la parte norte del GC (al norte de las grandes islas pero sin incluir el extremo norte descrito arriba), muestra valores negativos durante la mayor parte del año, sobre todo de Junio a Septiembre. De Octubre a Enero el área con valores negativos se reduce un poco, manteniéndose sobre la parte central al tiempo que las zonas más someras a su alrededor muestran valores positivos (incluyendo la zona comprendida entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón). En Febrero se mantienen las anomalías negativas solamente en la parte más profunda y en Marzo-Abril toda la zona muestra anomalías positivas. A partir de Mayo se empiezan a observar las anomalías negativas en su parte oriental.

- El patrón de anomalías de *CCa* de la zona costera del estado de Baja California Sur (sin considerar la bahía de La Paz), cuya plataforma es más angosta que la de la zona costera continental, presenta valores positivos de Enero a Abril con máximos en Marzo-Abril. En Mayo las anomalías positivas empiezan a disminuir y de Julio a Diciembre son negativas.
- Una región pequeña ubicada al sur de las grandes islas muestra un comportamiento anual algo distinto al observado en la zona norte del GC y en el Canal de Ballenas. En esta región el patrón anual de *CCa* muestra anomalías positivas en Abril-Mayo y en Octubre-Noviembre, mientras que el resto de los meses presenta anomalías negativas.
- Toda la zona profunda de la parte centro-sur y de entrada al GC presenta anomalías negativas a lo largo del año.

Del análisis anterior se observa que, en términos de las anomalías calculadas con respecto al promedio general de todo el GC, existen regiones que presentan el mismo patrón a lo largo de todo el año, ya sea con valores positivos o negativos. Entonces, otra manera de analizar la variabilidad anual de la *CCa* es considerar el cálculo de las anomalías pero con respecto al promedio anual para cada pixel, restando a cada mapa de climatología mensual el mapa de la Figura 4.1. Con estas anomalías obtenemos información sobre las variaciones locales de la *CCa* en cada región particular. Los mapas de las anomalías mensuales así calculadas se muestran en las gráficas de las Figuras 4.3 a 4.14 y se describen en los siguientes párrafos.

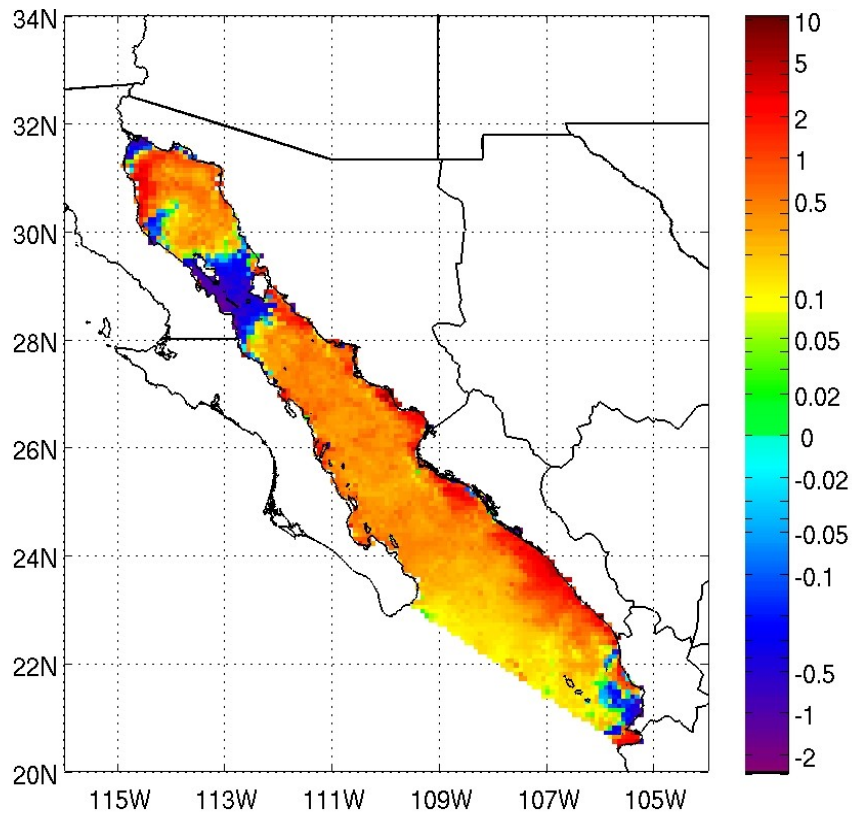
La información proporcionada por las anomalías anteriores (e.d., obtenidas con respecto al promedio general de todo el GC) indica que la parte centro-sur y de entrada al GC es la región con menor *CCa* de todo el golfo, al tiempo que las anomalías locales nos muestran que dicha región presenta un ciclo estacional con valores más altos durante el invierno y mínimos en verano-otoño. Otras regiones que presentan un comportamiento similar son ciertas áreas de la costa oriental (aproximadamente entre 26° y 29°N), pero con magnitudes distintas. Por otra parte vemos que el extremo norte o Alto Golfo, que es de las regiones más productivas del GC y muestra anomalías positivas de *CCa* a lo largo de todo el año (ver Fig. 4.2), presenta un ciclo anual con valores más altos en verano y menores en otoño-invierno. Otras zonas que se destacan por mostrar un ciclo estacional particular incluyen a la región de las grandes islas, la boca o entrada al golfo y la bahía de La Paz.





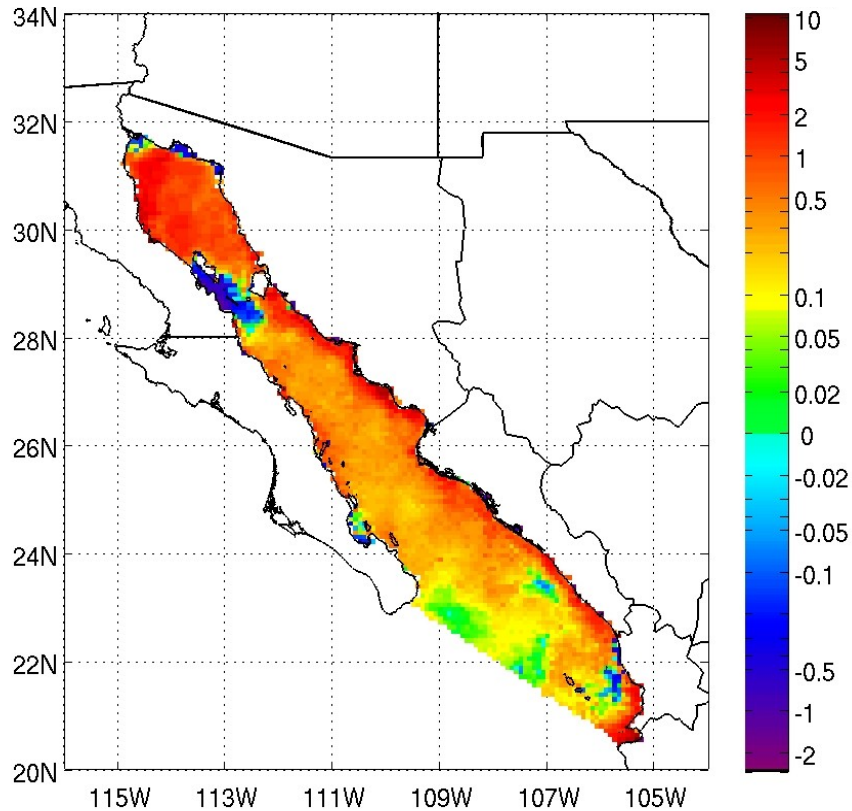
**Figura 4.3.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Enero.

En el mes de Enero (Fig. 4.3) la mayor parte de la región central y sur del GC presenta anomalías positivas, al igual que algunas zonas costeras de Sonora (particularmente alrededor de Puerto Peñasco, al sur de la Isla Tiburón y en el extremo sur del estado) y de Baja California Norte (alrededor de San Felipe). Lo anterior indica que en este mes dichas regiones presentan concentraciones de clorofila-*a* por arriba de su promedio anual. Por otro lado, las anomalías negativas más grandes se presentan en el Canal de Ballenas y en la zona de los umbrales al sur de éste, así como en el extremo sur-oriental de la entrada al golfo junto a las costas de Nayarit y en Bahía de Banderas, indicando que en este mes tales regiones, que son de las más productivas del GC, muestran valores de CCa considerablemente menores a su promedio anual. En el mes de Enero el Alto Golfo muestra cantidades variables de CCa, con valores bajos hacia el noreste y más altos hacia el suroeste.



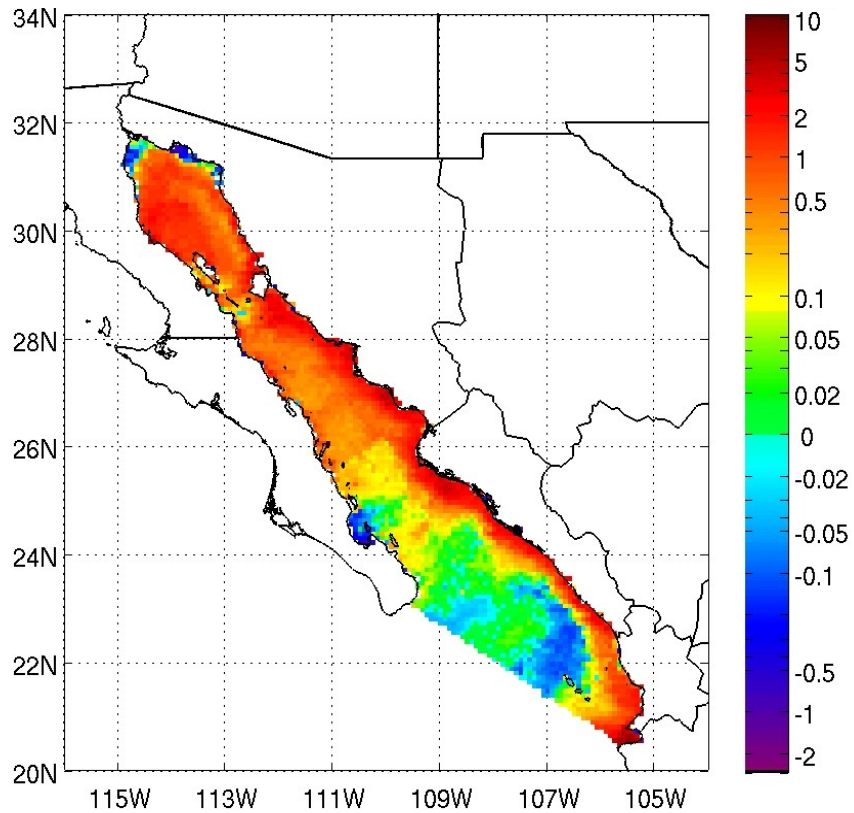
**Figura 4.4.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Febrero.

En el mes de Febrero (Fig. 4.4) la mayor parte del GC presenta anomalías positivas de *CCa*, observándose los valores máximos en algunas zonas someras de las costas orientales y de la parte noroccidental del golfo, con excepción de una franja alrededor de los 30°N donde se aprecian anomalías negativas. Sobresalen la zona del Alto Golfo en el extremo norte y la región de las grandes islas con valores de *CCa* considerablemente por debajo de su promedio anual. El área con anomalías negativas en el extremo suroriental a la entrada del golfo se ve reducida en este mes en comparación con lo observado en Enero y es notorio el cambio en la Bahía de Banderas que ahora muestra concentraciones de clorofila por encima de su promedio anual.



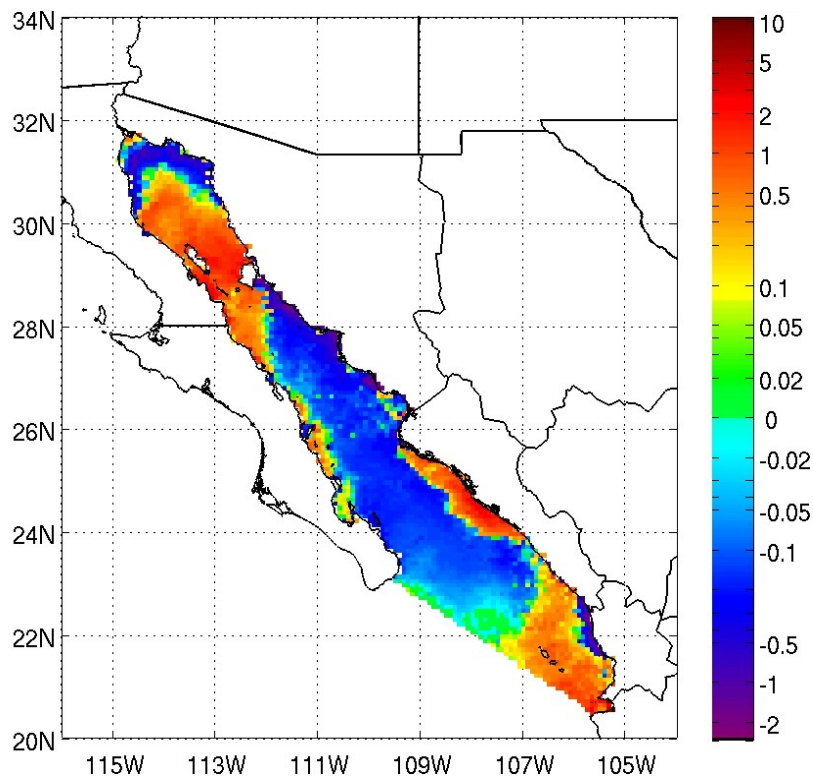
**Figura 4.5.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Marzo.

En Marzo (Fig. 4.5) el patrón de anomalías de *CCa* en el GC es parecido al de Febrero (ver Fig. 4.4) aunque con ciertas diferencias en magnitud; por ejemplo, en la parte norte se observan anomalías positivas más altas mientras que las anomalías negativas en el Alto Golfo son muy pequeñas. Asimismo, el área que presentaba anomalías negativas fuertes en la región de los umbrales y de las grandes islas disminuye, quedando confinada básicamente al Canal de Ballenas. La zona costera al noroeste de Sonora (alrededor de Puerto Peñasco) es notoria por sus anomalías negativas en comparación con los valores positivos observados hacia el sur y el oeste. En este mes las anomalías de *CCa* en la bahía de La Paz empiezan a diferenciarse de las aguas contiguas, mostrando valores positivos muy pequeños en su parte profunda y negativos cerca de la costa. Con excepción de un área pequeña que presenta valores negativos, la zona cercana a las costas de Nayarit y Bahía de Banderas muestran valores positivos. Las anomalías positivas en la zona de entrada al golfo empiezan a disminuir.



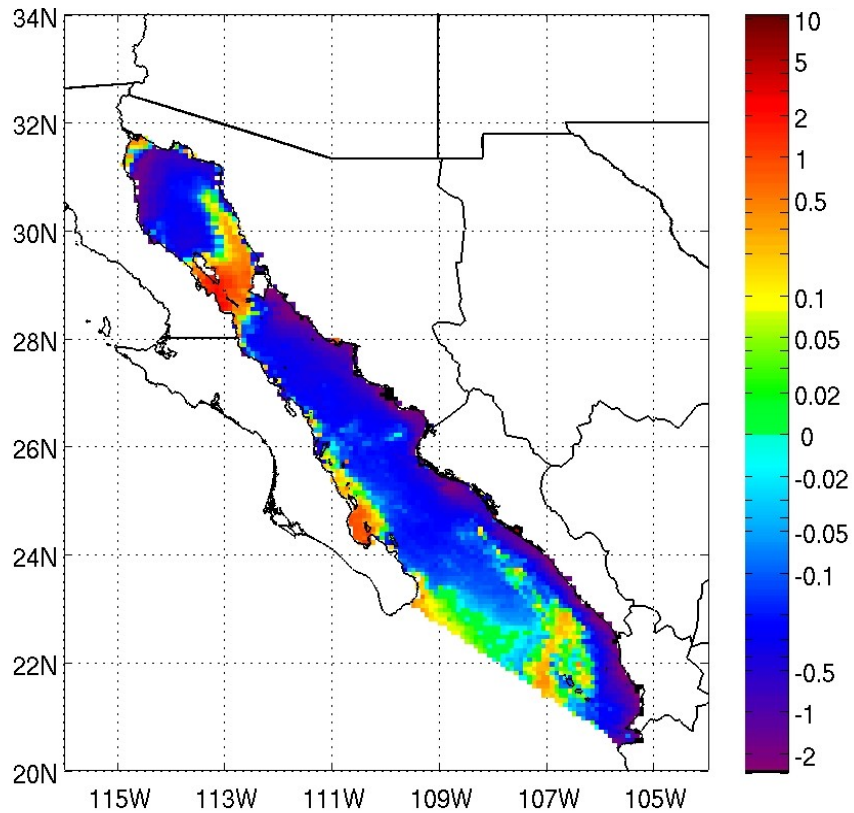
**Figura 4.6.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Abril.

En el mes de Abril (Fig. 4.6) desaparecen las anomalías negativas en el Canal de Ballenas mientras que permanecen alrededor de Puerto Peñasco y en el Alto Golfo. En la bahía de La Paz son ahora más fuertes las anomalías negativas, así como en ciertas partes de la zona profunda a la entrada del golfo, indicando concentraciones más bajas en este mes con relación a su promedio anual. El resto del GC presenta anomalías positivas en Abril con valores altos a lo largo de la costa oriental, principalmente desde la parte norte-central de Sonora hasta Bahía de Banderas.



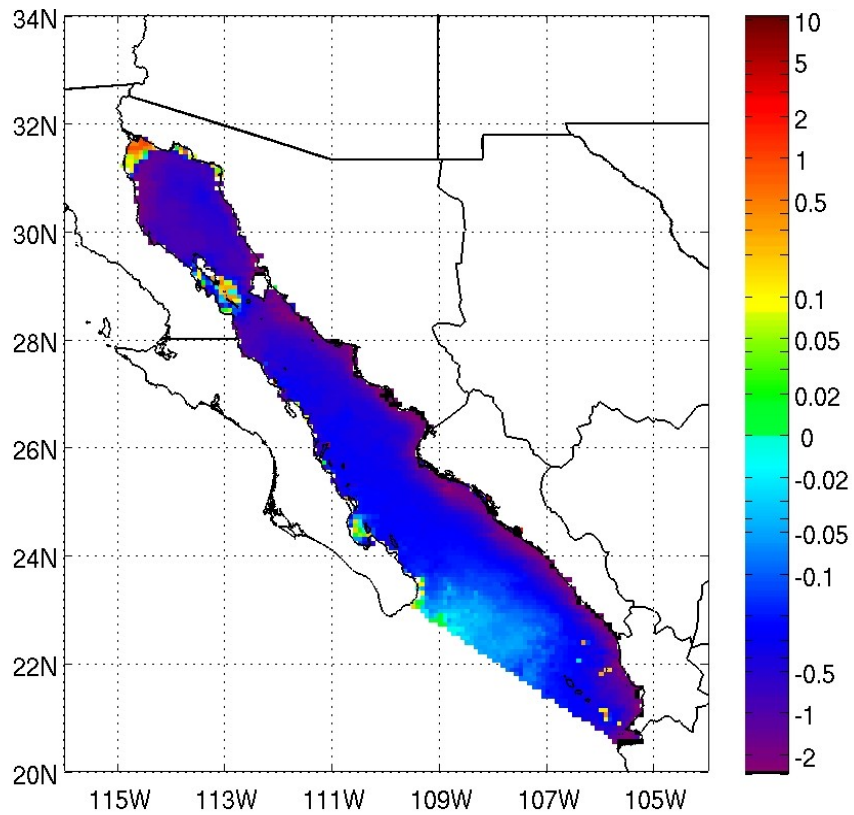
**Figura 4.7.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Mayo.

El patrón de anomalías de *CCa* en el GC cambia radicalmente en varias zonas en el mes de Mayo (Fig. 4.7). Un área en forma de “U” invertida en la parte somera de la región norte del golfo, incluyendo la zona costera alrededor de Puerto Peñasco, presenta anomalías negativas, mientras que las zonas más profundas, incluyendo la región de las grandes islas y la zona de los umbrales hasta los alrededores de Santa Rosalía en las costas de BCS, muestran anomalías positivas. También se observan valores positivos, aunque relativamente pequeños, en el Alto Golfo y en las costas de BCS alrededor de Loreto y hacia el sur hasta la bahía de La Paz. En este mes de Mayo se observa una amplia zona con anomalías negativas desde las costas del centro y sur de Sonora que se extiende a lo largo del golfo central hasta la parte norte de la entrada al golfo, donde los valores son muy pequeños. Por el contrario, gran parte de las costas de Sinaloa muestran fuertes anomalías positivas, indicando la influencia de procesos físicos distintos a los que producen las anomalías negativas en otras zonas costeras del GC. Con excepción de una pequeña región caracterizada por anomalías negativas fuertes en las costas del extremo sur de Sinaloa y la mitad norte de Nayarit, el resto de la parte sur de la entrada al golfo presenta anomalías positivas en Mayo.



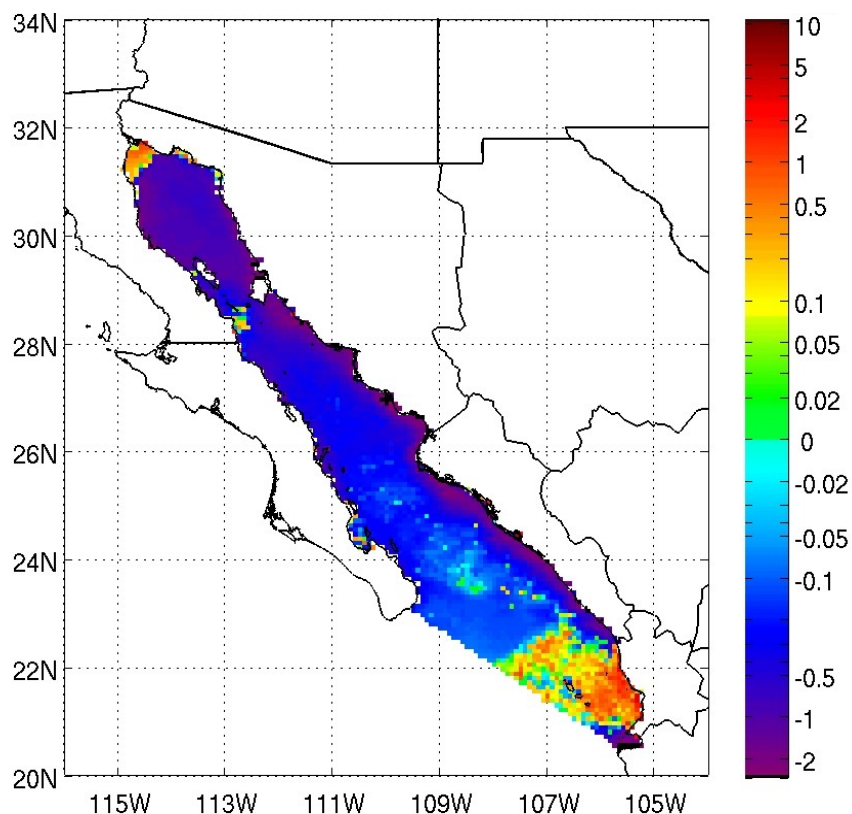
**Figura 4.8.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Junio.

En el mes de Junio (Fig. 4.8) gran parte del GC muestra valores de  $CCa$  por debajo de su promedio anual, con valores mínimos en la parte noroccidental del golfo y a lo largo de la costa oriental desde la parte sur de la Isla Tiburón hasta Cabo Corrientes, Jalisco. Sin embargo, sobresalen la región de las grandes islas y la bahía de la Paz por presentar marcadas anomalías positivas de  $CCa$  en este mes, así como el Alto Golfo aunque con valores más pequeños. Ciertas porciones de la zona profunda de la entrada al golfo también muestran valores positivos aunque relativamente pequeños.



**Figura 4.9.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Julio.

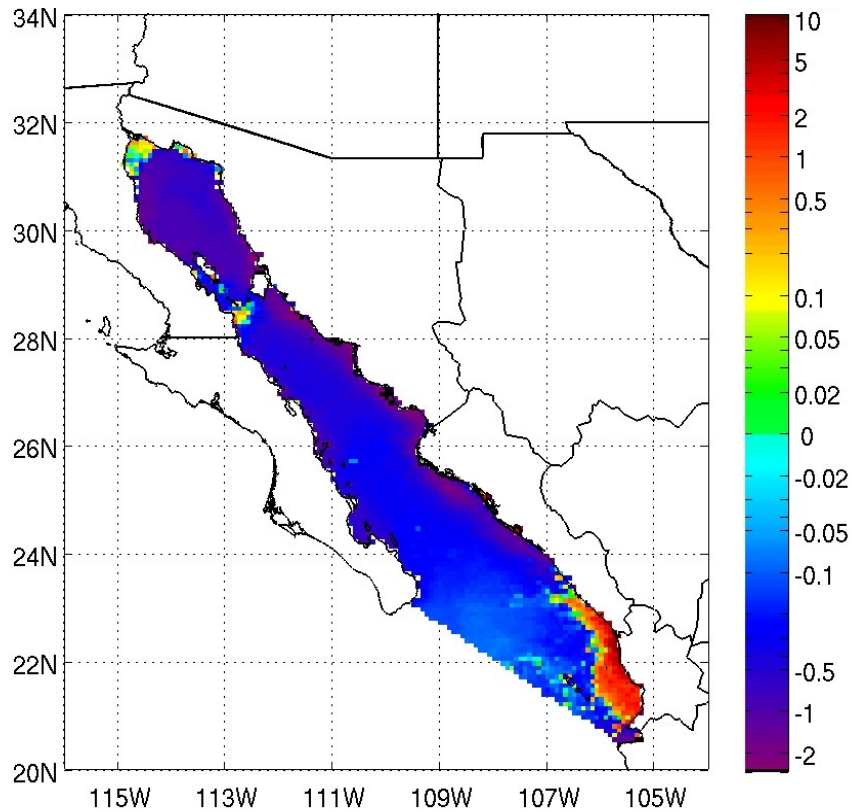
En el mes de Julio (Fig. 4.9) prácticamente todo el GC presenta valores de CCa por debajo de su promedio anual en cada región, con valores mínimos en la parte noroccidental y a lo largo de la costa oriental, patrón similar al observado en Junio. En este mes de Julio sobresale la región somera del Alto Golfo por presentar valores de CCa por encima de su promedio anual. Las zonas adyacentes a la línea de costa junto a Puerto Peñasco y una zona relativamente somera entre las islas junto al Canal de Ballenas también muestran anomalías positivas. En Julio la bahía de La Paz aún presenta anomalías positivas, aunque muy pequeñas, en algunas zonas.



**Figura 4.10.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* (mg/m<sup>3</sup>) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Agosto.

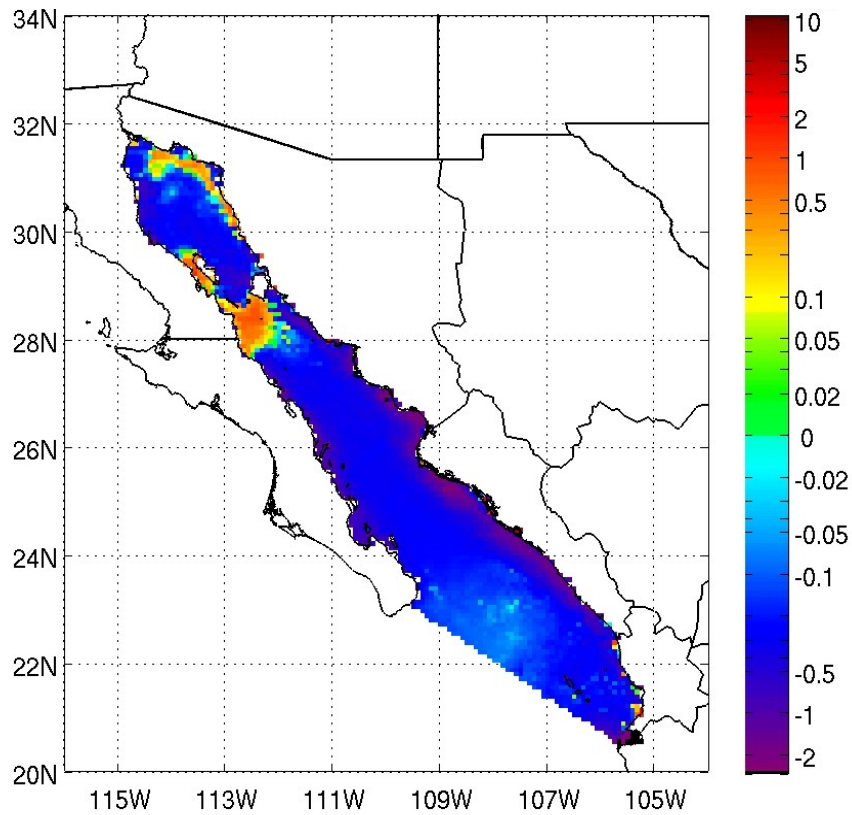
El patrón de anomalías de *CCa* en el mes de Agosto (Figura 4.10) es muy similar al de Julio, con excepción de la parte sur de la entrada al GC que muestra valores altos de *CCa*, con respecto a su promedio anual, junto a las costas de Nayarit, las cuales se extienden hacia la parte profunda y contrastan con las fuertes anomalías negativas en Bahía de Banderas y en las costas de Sinaloa. El Alto Golfo sigue mostrando anomalías positivas altas en este mes de Agosto y también la zona costera al norte de Pto. Peñasco. Un área reducida en la región de los umbrales al sur del Canal de Ballenas muestra anomalías positivas, al igual que pequeñas áreas en la bahía de La Paz.





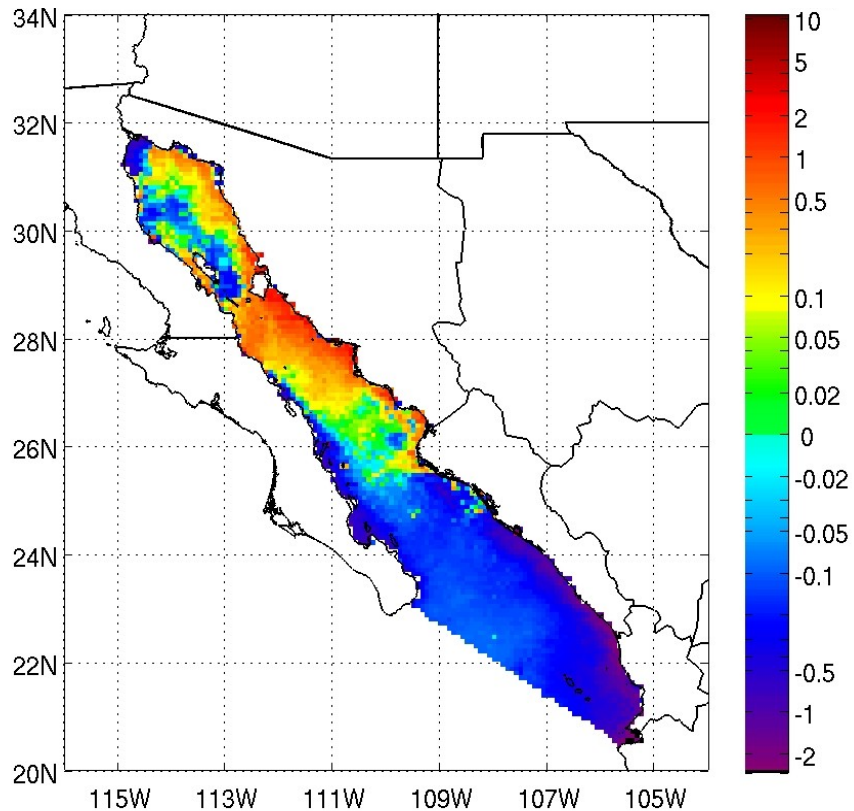
**Figura 4.11.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Septiembre.

El patrón de anomalías de C*Ca* en Septiembre (Figura 4.11) sigue siendo similar al observado durante los meses previos (Julio y Agosto), con algunas diferencias en magnitud sobre todo en el Alto Golfo donde los valores positivos se ven disminuidos. El área reducida en la zona de los umbrales al sur del Canal de Ballenas sigue mostrando anomalías positivas, al igual que la zona costera al norte de Pto. Peñasco. Sobresalen nuevamente los valores altos de C*Ca* junto a las costas de Nayarit cuya magnitud es superior a la observada en Agosto y que ahora se extienden hacia las costas del sur de Sinaloa; por el contrario, en la bahía de La Paz se presentan ahora concentraciones muy bajas de clorofila-*a* con respecto a su promedio anual.



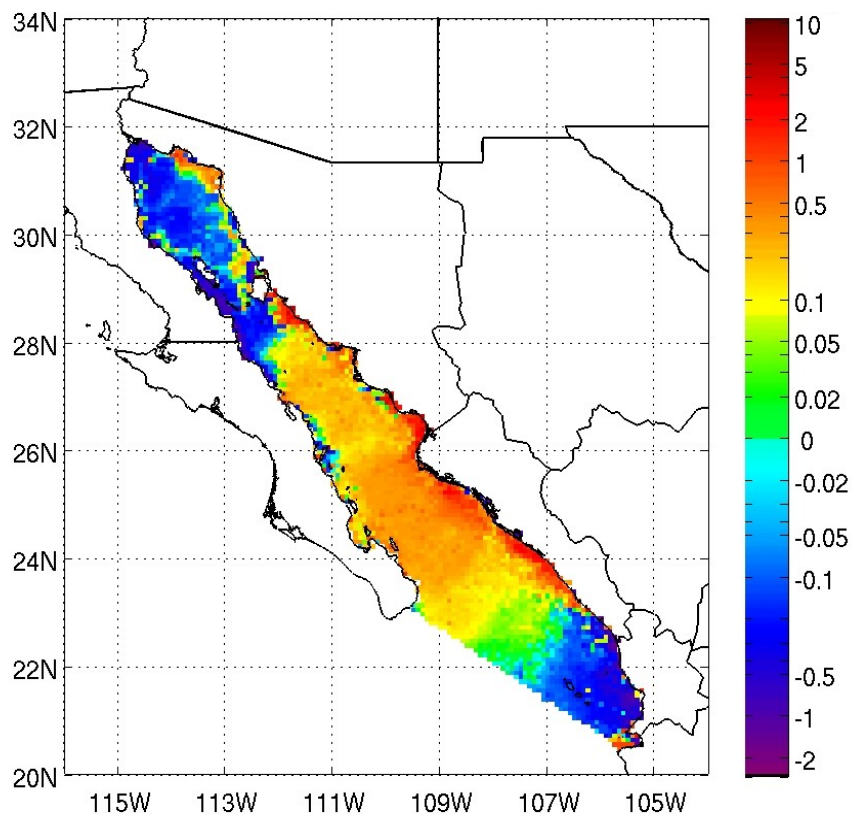
**Figura 4.12.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Octubre.

En Octubre (Figura 4.12) desaparecen las anomalías positivas de *CCa* cercanas a las costas de Nayarit y Sinaloa que ahora muestran valores negativos, con excepción de algunas áreas muy reducidas. Aunque la mayor parte del GC sigue mostrando valores de *CCa* por debajo de su promedio anual, sobre todo en las costas del sur de Sonora y en las de Sinaloa, en este mes se observan valores positivos altos en un área amplia alrededor de la zona de los umbrales y en el Canal de Ballenas. Son también notorias las anomalías positivas que empiezan a presentarse en la parte nororiental del golfo junto a las costas del norte de Sonora, aunque ahora las zonas adyacentes a la línea de costa junto a Puerto Peñasco muestran valores negativos, al igual que la región del Alto Golfo. Cabe señalar que Bahía de Banderas sigue presentando concentraciones muy bajas en Octubre con relación a su promedio anual.



**Figura 4.13.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Noviembre.

Para el mes de Noviembre (Figura 4.13) empieza a modificarse sustancialmente el patrón de anomalías de CCa en el GC, mostrando valores positivos en amplias áreas de la región norte del golfo, de la región de las grandes islas y en la parte central del golfo. Las costas de Sonora muestran concentraciones más altas que su promedio anual en este mes, mientras que las costas de BCS (hacia el sur de Sta. Rosalía, incluyendo la bahía de La Paz) muestran concentraciones más bajas. Asimismo, el Alto Golfo, la parte sur y la región de la entrada al golfo muestran también concentraciones de clorofila-*a* más bajas en Noviembre en comparación con su promedio anual.

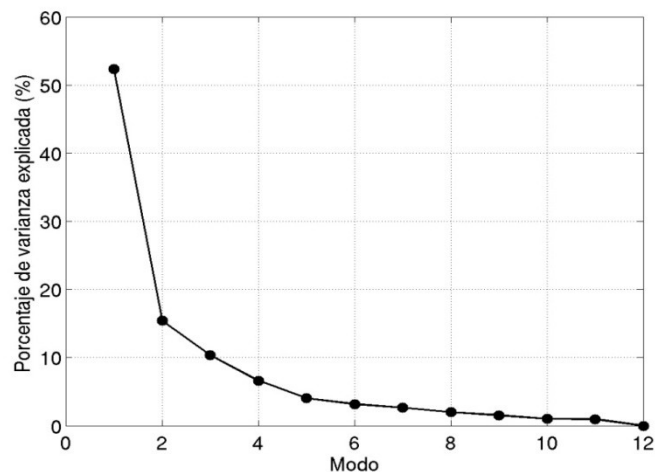


**Figura 4.14.** Anomalías de la concentración de clorofila-*a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el GC, calculadas con respecto al mapa promedio anual de la Figura 4.1, para el mes de Diciembre.

En el mes de Diciembre (Figura 4.14) prácticamente toda la parte sur y central del GC muestra valores de *CCa* por encima de su promedio anual, con excepción de una región costera en la parte central de BCS (alrededor de Loreto e Isla del Carmen, al norte de la bahía de La Paz) que presenta concentraciones bajas. En este mes la región de las grandes islas, la parte norte y el Alto Golfo muestran valores de *CCa* muy bajos con relación a su promedio anual, con excepción de la región costera alrededor de Pto. Peñasco que sobresale por presentar anomalías positivas altas. En la parte sur de la entrada al golfo y en las costas de Nayarit y el sur de Sinaloa las anomalías son negativas, contrastando con los valores positivos que se observa en Bahía de Banderas.

## IV.2. Análisis de los modos de variación principales

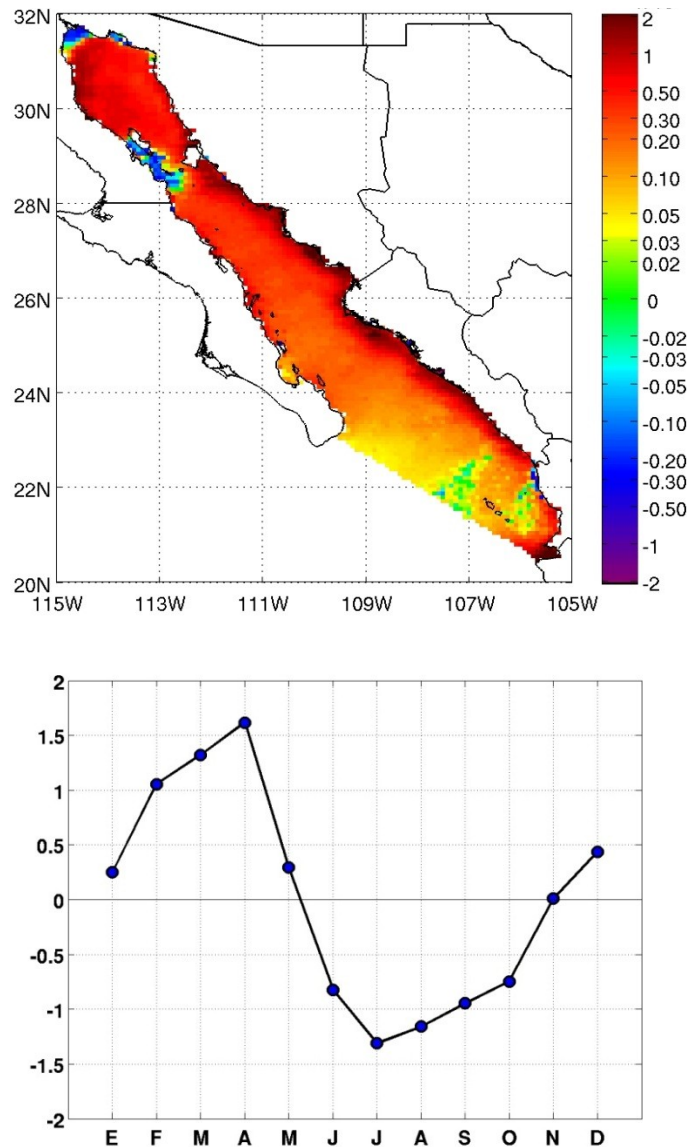
Como se mencionó en el Capítulo anterior, el objetivo del análisis de FEOs es proporcionar una descripción compacta de la variabilidad existente en una serie de datos mediante un conjunto pequeño de vectores ortogonales o “modos” estadísticos, los cuales “explican” un alto porcentaje de la varianza que hay en las observaciones. Partiendo de la matriz de covarianzas de las series de tiempo de las anomalías mensuales de *CCa*, calculadas con respecto al mapa promedio anual (ver Figuras 4.3 a 4.14), se obtuvieron sus 12 eigenvectores (o modos principales de variación espacial) y sus 12 eigenvalores asociados. De éstos, se consideraron únicamente los cuatro primeros modos para el análisis posterior, dado que la suma de ellos representa aproximadamente el 84.7% de la varianza total contenida en los datos (Fig. 4.15). Con el objeto de interpretar los patrones espaciales o modos, se obtuvo la matriz de CPs mediante la proyección de los cuatro primeros modos sobre la matriz original de anomalías de *CCa*. Cada una de las CPs proporciona la evolución temporal (fase y amplitud) del patrón espacial correspondiente.



**Figura 4.15.** Porcentaje de varianza explicada por cada uno de los 12 modos.

El primer modo o eigenvector representa el 52.3% de la varianza total del campo de anomalías de la *CCa* en el GC, es decir, es el patrón espacial que explica el mayor porcentaje de la varianza en los datos (Fig. 4.16, arriba). La CP asociada al primer modo muestra una variación estacional, con valores positivos de Diciembre a Mayo y negativos de Junio a Octubre, presentando un máximo absoluto en el mes de Abril y un mínimo absoluto en el mes de Julio (Fig. 4.16, abajo). El primer

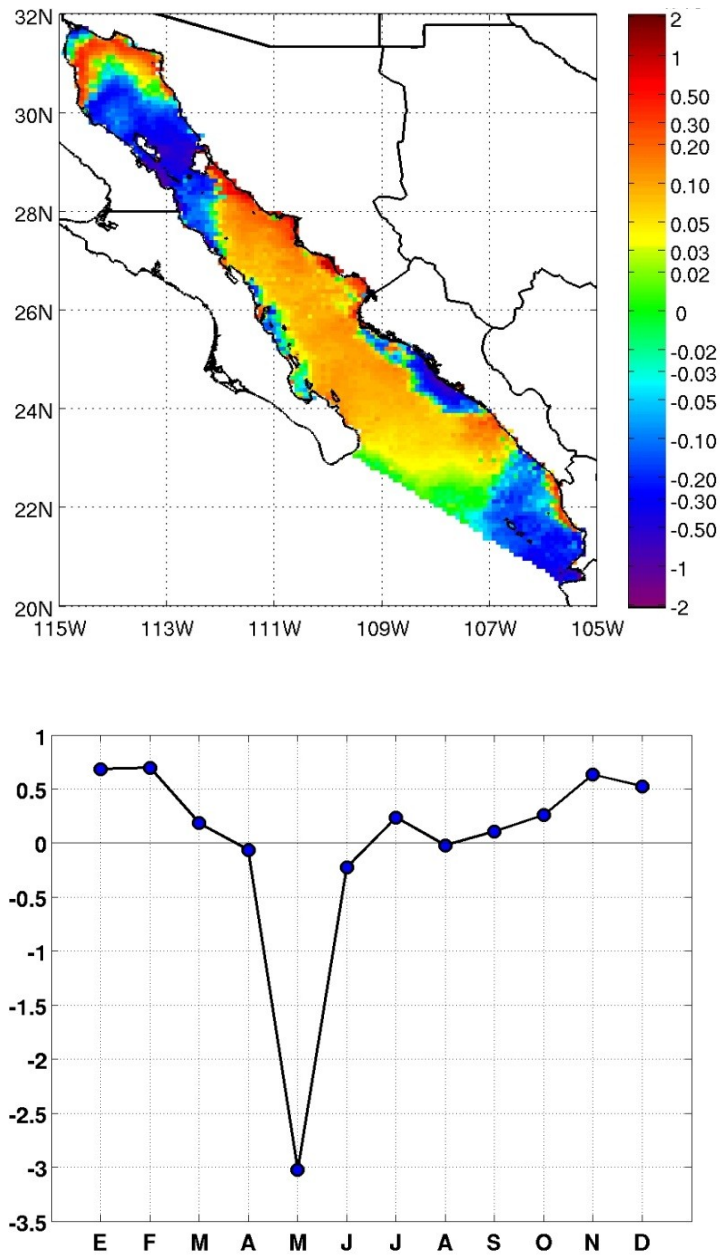
modo tiene una señal muy poco significativa en los meses de Enero, Mayo, Noviembre y Diciembre. Combinando la información proporcionada por el mapa del primer modo y la de su CP, se puede concluir que la mayor parte del GC presenta anomalías positivas de CCa durante invierno e inicios de la primavera y negativas en verano e inicios del otoño, sobre todo en la costa oriental, Bahía de Banderas y la región noroccidental del Golfo norte. Asimismo, se observa que el Canal de Ballenas, el Alto Golfo y las zonas costeras al norte de Sonora presentan un ciclo estacional inverso. Con excepción de Bahía de Banderas, la zona de entrada al GC no muestra una señal intensa en este modo.



**Figura 4.16.** Arriba: Primer modo o patrón espacial ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Abajo: Componente principal asociada al primer modo (adimensional).

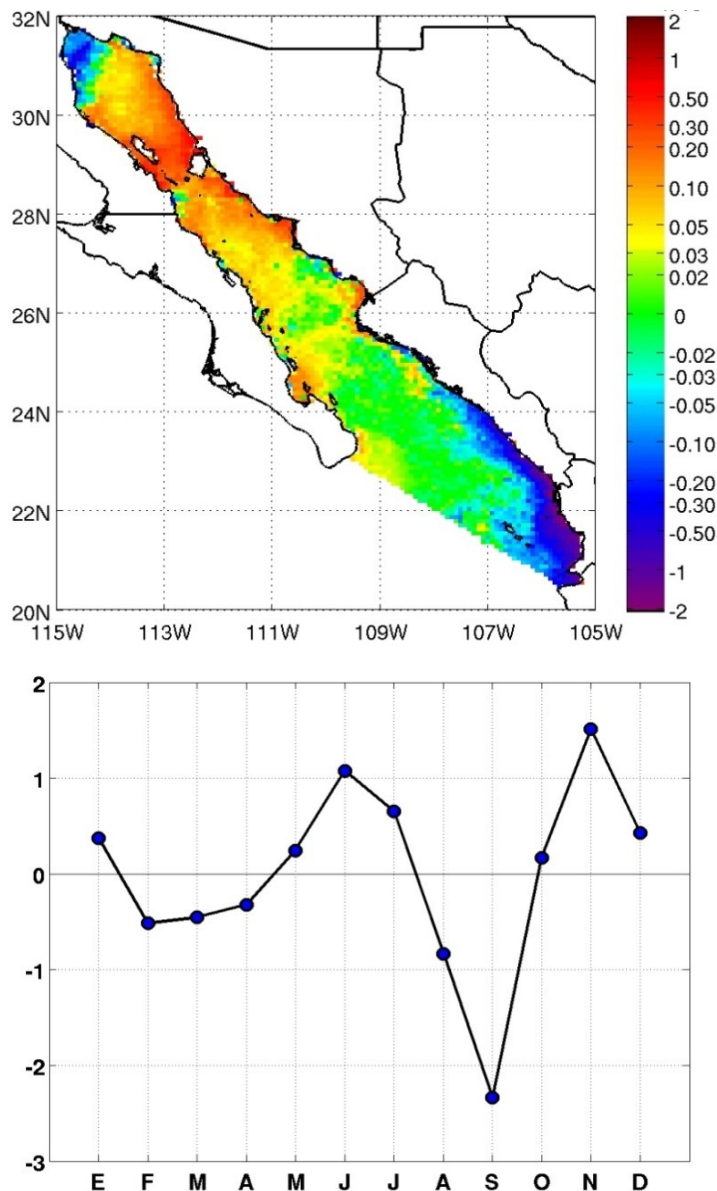
El segundo modo (Figura 4.17, arriba) representa el 15.4% de la varianza total y muestra al GC dividido en varias zonas bien delimitadas por sus valores positivos o negativos. La CP asociada a este modo (Figura 4.17, abajo) muestra al mes de Mayo con la amplitud más importante en el ciclo (con signo negativo), denotando que hay zonas en el GC cuya variación de CCa es muy importante en este mes. De hecho, el patrón espacial representado por el segundo modo es prácticamente un *espejo* del mapa de anomalías de CCa para el mes de Mayo (ver Figura 4.7), cuyas regiones características se describieron en la sección anterior. Con una amplitud mucho menor a la de Mayo, la CP muestra valores positivos máximos con magnitudes similares de Noviembre a Febrero, indicando que aquellas regiones que en Mayo presentan anomalías positivas (negativas) es probable que presenten anomalías negativas (positivas) durante dicho período. Para el resto de los meses la influencia de este modo puede considerarse despreciable.

El tercer modo (Figura 4.18, arriba) representa el 10.4% de la varianza total de la CCa en el GC y, de acuerdo con su CP (Figura 4.18, abajo), este patrón espacial tiene asociado un comportamiento anual con un mínimo absoluto en Septiembre (de signo negativo) y un máximo absoluto en Noviembre (de signo positivo), así como un máximo relativo en Junio. Analizando el mapa del tercer modo se observa que la región costera de Nayarit y sur de Sinaloa es la que domina, mostrando los valores negativos más intensos. Como se describió en la sección anterior, esta región se distingue por presentar concentraciones altas de clorofila-*a* en el mes de Septiembre con relación a su promedio anual (ver Figura 4.11). Otras regiones que sobresalen en el mapa son la región de las grandes islas, con los valores positivos más altos; la bahía de La Paz, también con valores positivos pero relativamente pequeños, y el extremo norte del Golfo, con valores negativos.



**Figura 4.17.** Arriba: Segundo modo o patrón espacial ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Abajo: Componente principal asociada al segundo modo (adimensional).

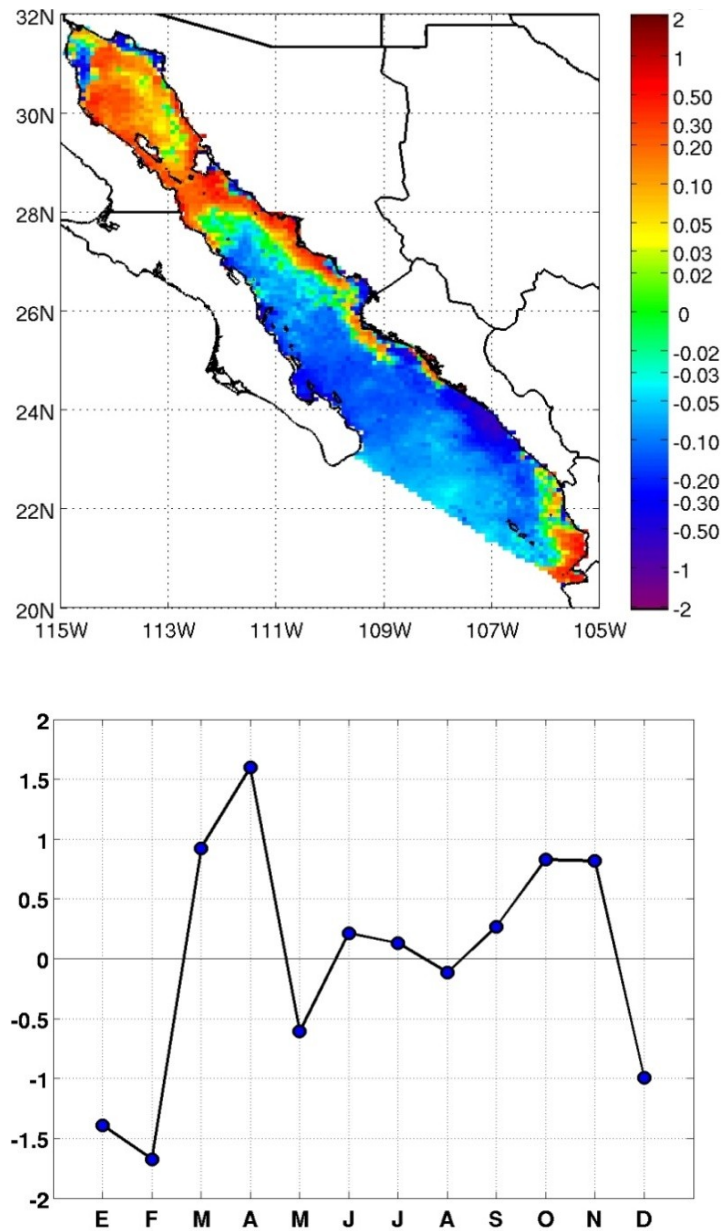




**Figura 4.18.** Arriba: Tercer modo o patrón espacial ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Abajo: Componente principal asociada al tercer modo (adimensional).

El cuarto modo (Figura 4.19, arriba) representa el 6.6% de la varianza total en los datos y muestra algunas regiones bien delimitadas, como el extremo suroriental de la entrada al GC, la parte sur del golfo, la región de las grandes islas y las costas de Sonora. Su comportamiento anual (Figura 4.19, abajo) presenta más variaciones que los modos anteriores, con valores positivos en Marzo-Abril, Junio-Julio y Septiembre-Noviembre, mostrando el máximo absoluto en Abril, y con valores

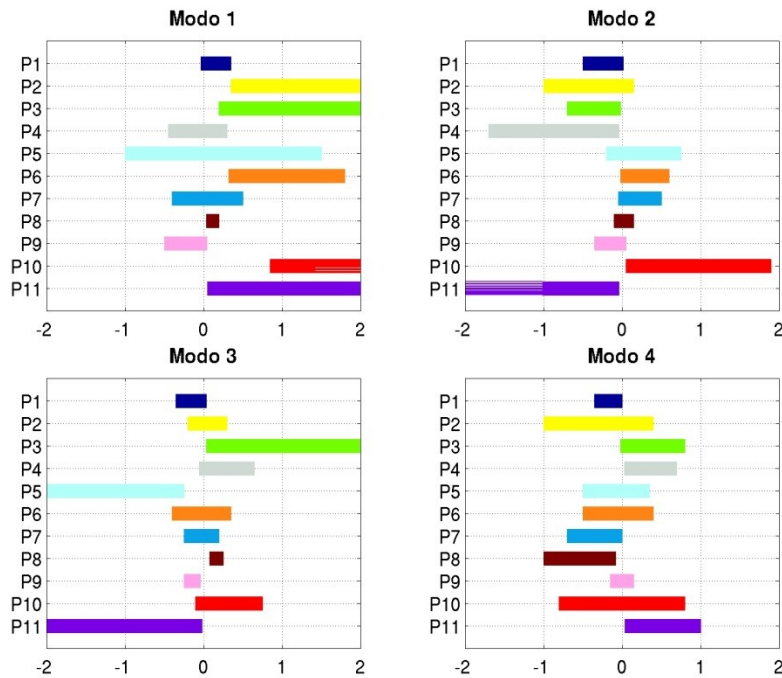
negativos en Enero-Febrero, Mayo, Agosto y Diciembre, mostrando el mínimo absoluto en Febrero. La magnitud de la CP para los meses de Enero, Febrero y Abril es similar, indicando que en estos meses es mayor la influencia del patrón espacial de anomalías representado por el cuarto modo, teniendo en cuenta el signo correspondiente. Cabe señalar que la influencia de este modo es muy poco significativa para el período de Junio a Septiembre.



**Figura 4.19.** Arriba: Cuarto modo o patrón espacial ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Abajo: Componente principal asociada al cuarto modo (adimensional).

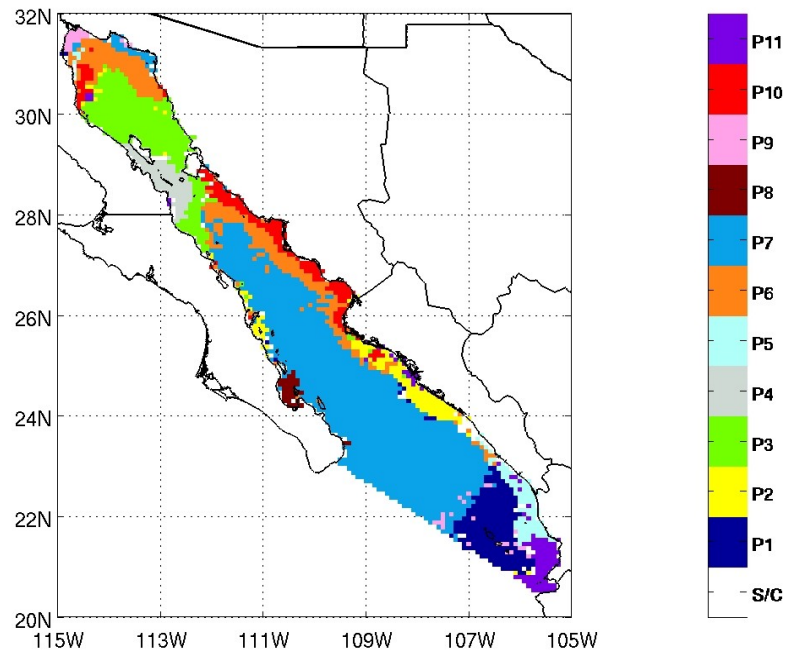
### IV.3. Identificación de patrones y propuesta de regionalización

Analizando los mapas de anomalías mensuales de CCa en conjunto con los patrones de variabilidad espacial representados por los 4 modos principales, se determinaron de manera subjetiva (mediante análisis visual) once rangos característicos de variación en cada uno de los modos (Figura 4.20).



**Figura 4.20.** Rangos de variación en cada uno de los modos estadísticos establecidos de manera subjetiva.

Los rangos escogidos representan patrones de variabilidad espacio-temporal similares y están relacionados con distintas zonas que se distinguen claramente tanto en los mapas de anomalías (Figs. 4.3 a 4.14) como en los modos principales (Figs. 4.16 a 4.19). Estos patrones determinan una división del GC en 15 regiones, algunas de las cuales presentan el mismo patrón de variabilidad pero no son contiguas (Figura 4.21). La regionalización obtenida se muestra en la Figura 4.22 en donde las regiones se encuentran numeradas de norte a sur, correspondiendo el número 1 al extremo norte o Alto Golfo y el 15 al extremo suroccidental de la entrada al GC.



**Figura 4.21.** Patrones de variabilidad espacio-temporal en el GC.

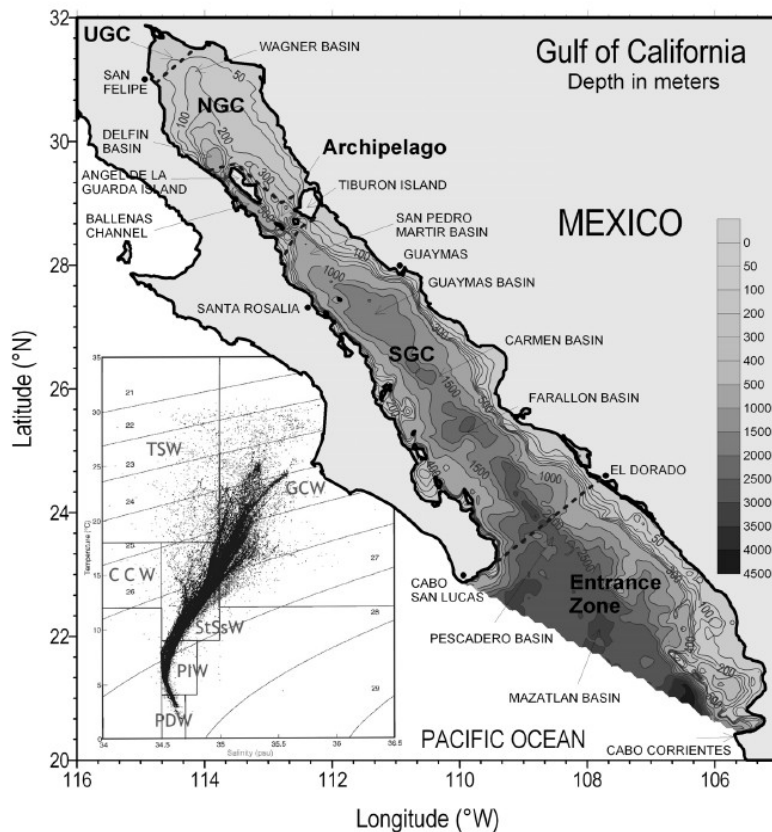


**Figura 4.22.** Regionalización obtenida para el Golfo de California.

# CAPÍTULO V

## DISCUSIÓN

La regionalización del GC obtenida en este trabajo está basada en el análisis de la variabilidad estacional promedio de la CCa para el período de 1998 a 2008. Con la metodología empleada, basada en el análisis de las anomalías mensuales de la CCa y de sus FEOs y CPs, se identificaron 11 patrones de variabilidad espacio-temporal con los cuales se estableció una división del GC en 15 regiones. Con base en estudios previos, a continuación se describen los procesos físicos que influyen en las variaciones estacionales de la CCa observadas en cada una de esas regiones. Únicamente con el objeto de facilitar la descripción, se tomó como referencia la división del Golfo en cinco provincias presentada por Lavín y Marinone (2003) (Fig. 5.1): el Alto Golfo, el Golfo Norte, el archipiélago o región de las grandes islas, la parte centro-sur y la zona de entrada al golfo.



**Figura 5.1.** División del GC en 5 provincias: el Alto Golfo (UGC), el Golfo Norte (NGC), el archipiélago o región de las grandes islas (Archipelago), la parte centro-sur (SGC) y la zona de entrada al golfo (Entrance Zone). El recuadro muestra el diagrama de temperatura vs salinidad con las masas de agua predominantes en el GC. (Figura tomada de Lavín y Marinone, 2003).

En el Alto Golfo está contenida la región 1; el Golfo Norte abarca las regiones 2, 3, 4 y parte de la 5; el archipiélago correspondería a la región 6; en la zona centro-sur del golfo está contenida una parte de la región 5, las regiones de la 7 a la 11 y gran parte de la 12; y la zona de entrada al golfo abarca la parte sur de la región 12 y las regiones 13, 14 y 15.

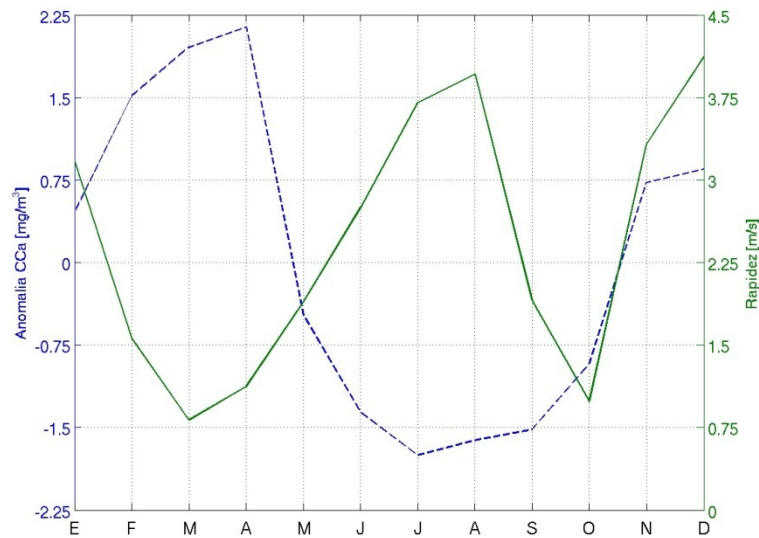
## V.1 Descripción de los procesos físicos dominantes en cada región del GC

En términos generales, los patrones que presentan una mayor amplitud en la variación anual de las anomalías de CCA (superior a  $3 \text{ mg/m}^3$ ) son los patrones 5, 10 y 11, asociados con las regiones 13, 3 y 7, y 15, respectivamente; aquellas con una amplitud media (entre  $1.5$  y  $3 \text{ mg/m}^3$ ) son los patrones 2, 3, 4 y 6, asociados con las regiones 9 y 11, 5, 6, y 4 y 8, respectivamente, mientras que los patrones que muestran una amplitud menor (inferior a  $1.5 \text{ mg/m}^3$ ) son los patrones 1, 7, 8 y 9, asociados con las regiones 14, 2 y 12, y 1 y 10, respectivamente. Estas amplitudes se estimaron a partir de los valores promedio mensuales de las anomalías, promediados dentro de las áreas que abarcan cada uno de los 11 patrones de variabilidad establecidos para el GC. A continuación se discuten los procesos físicos dominantes en cada una de las 15 regiones en las que se dividió el golfo.

\* **Región 1.** Es la región localizada en el extremo norte del GC y que es conocida como el Alto Golfo. Es una región costera muy somera, con profundidades menores de 30 m, en donde los procesos de mezcla vertical de la columna de agua producidos por la marea juegan un papel fundamental en la alta concentración de nutrientes que ahí se observa. Esta región presenta el mayor rango de mareas del GC (aunque con una diferencia grande entre mareas vivas y muertas), las corrientes de marea son intensas (de  $0.1$  a  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ ) y la energía de disipación por la marea es alta (Lavín y Marinone, 2003). Como se vió en el capítulo anterior, el Alto Golfo presenta valores altos de CCA a lo largo de todo el año con relación al promedio general del golfo, pero en términos locales muestra anomalías positivas durante el verano y negativas en el otoño-invierno (ver Figs. 4.3 a 4.14). Durante el verano, cuando se alcanzan las anomalías positivas máximas en esta región, los procesos de mezcla y la magnitud y dirección del viento predominante, que proviene del sur (ver Fig. 2.4) y puede favorecer surgencias costeras en esta región del GC en esta época del año, permiten que el agua subsuperficial llegue a la superficie mientras que en las regiones adyacentes las condiciones de estratificación no lo permiten.

\* **Región 2.** Localizada en el Golfo Norte, esta región abarca las dos bahías alrededor de Puerto Peñasco (Adair y San Jorge), en la costa noroeste de Sonora. Es una región muy somera que, al igual que la Región 1, presenta valores altos de  $CCa$  durante todo el año pero con un ciclo estacional un poco distinto, mostrando valores mínimos de  $CCa$  durante la primavera, cuando los vientos débiles del oeste no favorecen la surgencia, y máximos de Diciembre a Febrero, cuando los vientos del noroeste que fluyen paralelos a la costa pueden generar surgencias en la región (ver Fig. 2.4). En particular, la bahía de Adair es una zona con abundante vegetación acuática, que es la base de una alta productividad primaria; está incluida en la lista de Humedales de Importancia Internacional y está compuesta por tres hábitats diferentes: los esteros, los pozos artesianos y las salinas ([http://es.wikipedia.org/wiki/Bahía\\_Adair](http://es.wikipedia.org/wiki/Bahía_Adair)). Los esteros mantienen la conectividad entre los ecosistemas terrestres y los acuáticos y en esta interfase se importan y exportan nutrientes y especies, que combinan atributos de ambos ecosistemas y generan un ambiente muy rico en nutrientes (Glenn et al., 2006).

\* **Región 3.** También localizada en el Golfo Norte, esta región abarca las costas alrededor de San Felipe en BCN; es un área relativamente pequeña y somera que se encuentra al oeste de la cuenca de Wagner ubicada en la Región 4. A diferencia del Alto Golfo, esta región se caracteriza por presentar los valores más bajos de concentración de pigmentos durante el verano (Fig. 5.2), cuando la circulación en la cuenca de Wagner es ciclónica (ver Fig. 2.3) y favorece un apilamiento de agua superficial al oeste del centro del giro, inhibiendo la entrada de nutrientes a la zona eufótica. En esta parte del GC la intensidad de los vientos muestra un comportamiento bimodal, siendo más intensos en verano e invierno y más débiles en primavera y otoño (Fig. 5.2). Este comportamiento es inverso al de la  $CCa$  durante la mayor parte del año, indicando que en esta región relativamente somera los procesos de mezcla por marea y la convección vertical juegan un papel importante en el comportamiento estacional de la  $CCa$ .

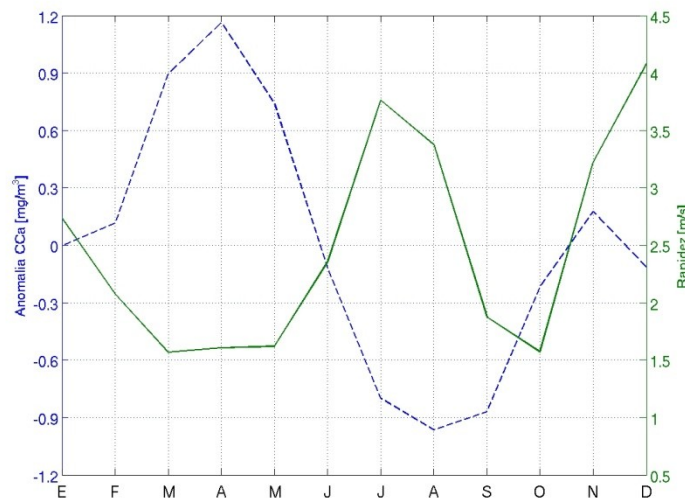


**Figura 5.2.** Valores mensuales de la anomalía de CCh promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 3 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 31.0°N, 114.2°W (línea verde).

\* **Región 4.** Ubicada entre las regiones 2 y 3 en el Golfo Norte, abarca la cuenca de Wagner y se extiende hacia el sur por la parte oriental hasta antes de los 30°N, cubriendo zonas más profundas que las tres regiones anteriores. En general, esta región muestra valores ligeramente más bajos de CCh que la Región 3, diferenciándose principalmente en los meses de Octubre y Noviembre cuando la Región 4 presenta anomalías positivas de CCh mientras que en la Región 3 los valores son negativos (ver Figs. 4.12 y 4.13). Esto puede deberse a la circulación anticiclónica que se desarrolla en el Golfo Norte en esta época del año y que favorece la disminución de nutrientes en el centro del giro, donde la termoclina es más profunda, y su aumento en los bordes, donde es más somera. Durante el mes de Mayo, cuando los vientos y las corrientes son débiles, es notoria la anomalía negativa de CCh en casi toda el área que abarcan las regiones 1 a 4, la cual contrasta con los valores positivos en la región adyacente hacia el sur.



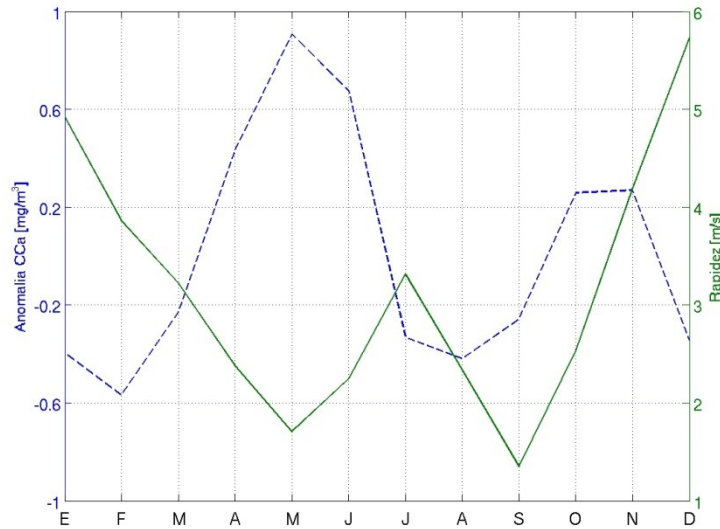
\* **Región 5.** Incluye la parte central y sur del Golfo Norte y se extiende hacia el sur del archipiélago a través de una franja estrecha y poco profunda que después se ensancha al llegar a las costas de BCN, alrededor de Santa Rosalía. En general, abarca zonas más profundas que las regiones 1 a 4, incluyendo la cuenca Delfin. Es una región influenciada por fuerte mezcla vertical y presenta valores máximos de CCa de Marzo a Mayo y mínimos de Julio a Septiembre (ver Figs. 4.5 a 4.7 y 4.9 a 4.12). Cabe hacer notar que en algunos meses esta región muestra diferente signo de la anomalía en la parte noroccidental que en la parte central y suroriental, indicando un posible desfase entre estas zonas que no es captado por el método. En la Figura 5.3, en donde se compara la variación anual de las anomalías de CCa promediadas en la Región 5 y de la componente del viento a lo largo del eje del golfo en un punto localizado dentro de dicha región, se observa un comportamiento inverso de estas variables, es decir, de Febrero a Mayo cuando en promedio los vientos son más débiles se tienen anomalías positivas y en los meses de Julio y Agosto, cuando se observan vientos relativamente intensos del sur, las anomalías observadas son negativas (comportamiento muy parecido al de la Región 3, pero con anomalías menores). Además de la fuerte mezcla vertical que se da en la zona de umbrales, la intensificación de las corrientes al pasar por la franja estrecha y la formación de giros (cyclónicos y anticiclónicos) en la zona del archipiélago, influyen de manera importante en el ciclo anual de la CCa.



**Figura 5.3.** Valores mensuales de la anomalía de CCa promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 5 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 29.9°N, 113.4°W (línea verde).

\* **Región 6.** Comprende básicamente la región conocida como el Canal de Ballenas (CB), localizado entre la península de BC y las islas Ángel de la Guarda y San Lorenzo, y la zona de umbrales hacia el sur del canal. Es una región aislada de la parte central y de la parte norte del golfo por una cordillera submarina, con profundidades relativamente someras sobre los umbrales (entre 300 y 600 m) y una profundidad máxima de 1,600 m en el interior del CB. Entre los factores físicos que influyen en los valores altos de  $CCa$  que ahí se observan, se pueden mencionar las intensas corrientes de marea, los vientos y la compleja batimetría (Romero-Centeno, 1995). La energía de disipación es muy fuerte en esta región, especialmente sobre los umbrales ( $>0.3 \text{ W/m}^2$ ; Argote et al., 1995). Una fracción de la energía extraída de las corrientes de marea por la fricción con el fondo es usada para el mezclado vertical, por lo tanto la mezcla por marea es importante en las áreas donde la disipación es alta y son estas las zonas biológicamente más productivas en el GC (Lavín y Marinone, 2003). Sin embargo, recientemente López et al. 2006 mostraron que la circulación a través de los umbrales en ambos extremos del CB consiste de un flujo hacia dentro del canal en aguas profundas y un flujo hacia afuera por la superficie. Esta circulación propicia una surgencia intensa en el canal que puede ser responsable de las temperaturas superficiales relativamente bajas y del aporte de nutrientes a la superficie durante todo el año. Con este patrón de circulación se descarta la idea de que la mezcla por marea sea el principal proceso responsable de las características hidrográficas y productivas tan particulares del CB.

Localmente, el CB presenta las anomalías positivas máximas de  $CCa$  en los meses de Abril a Junio y anomalías negativas de Diciembre a Marzo y de Julio a Septiembre, mostrando cierto desfase con respecto a las regiones anteriores (Fig. 5.4). Una posible explicación de este comportamiento es que, durante el invierno, el GC está menos estratificado y la disponibilidad de nutrientes en subsuperficie disminuye, de ahí las anomalías negativas en el CB; cuando el GC está medianamente estratificado, en primavera y otoño, los nutrientes no alcanzan la superficie en la zona centro-sur del golfo, pero sí pueden hacerlo en el CB debido a la fuerte mezcla que se da en esta región. Durante el verano, la alta estratificación en todo el GC inhibe la llegada de nutrientes a las capas superficiales, incluso en el CB. Otro mecanismo importante en el CB es la generación de ondas internas en las zonas de los umbrales

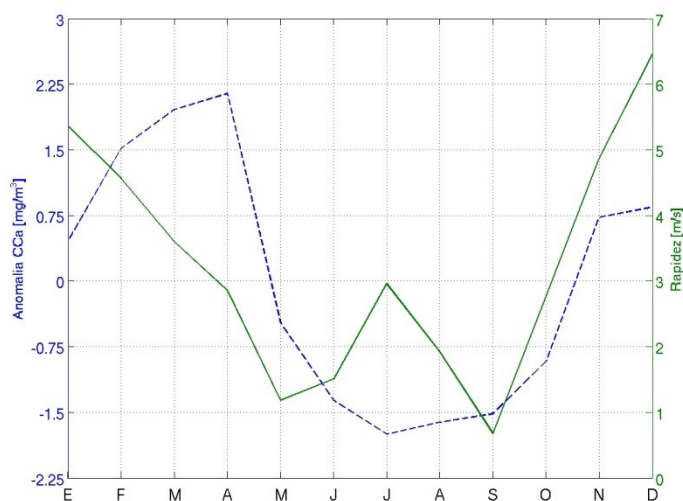


**Figura 5.4.** Valores mensuales de la anomalía de CCa promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 6 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 28.2°N, 112.2°W (línea verde).

\* **Región 7.** Abarca la zona costera de Sonora hacia el sur de la Isla Tiburón, la cual presenta valores altos de CCa con respecto al promedio general del GC a lo largo de todo el año. Localmente, las anomalías positivas de CCa más intensas se observan de Febrero a Abril y son menos intensas de Noviembre a Enero, mientras que el resto del año (Mayo-Octubre) se observan anomalías negativas (Fig. 5.5). Como puede observarse en las gráficas de la figura 2.4, los vientos durante los meses de Mayo a Septiembre no son favorables para la generación de surgencias en esta región, y el posible aporte de nutrientes por la descarga de ríos durante la temporada de lluvias no parece ser significativo. Los valores mínimos de CCa durante el verano también están asociados con la profundización de la capa mezclada debido a la entrada de la onda estacional de Kelvin. El cambio abrupto de Abril a Mayo, pasando del máximo de anomalías positivas en Abril a un valor negativo en Mayo, coincide con el cambio de dirección e intensidad de los vientos en el GC.

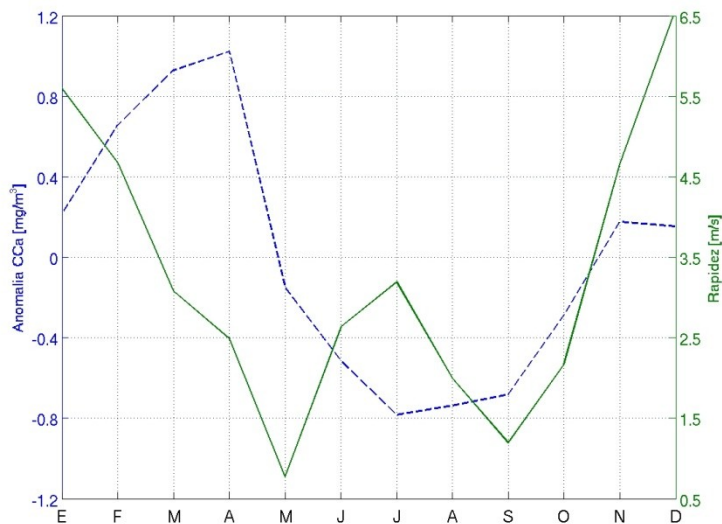
Cabe señalar que la Región 7 presenta el mismo patrón de variabilidad que la Región 3, aún cuando esta última se localiza en la costa noroccidental del GC y los procesos físicos que favorecen la

producción de nutrientes no son necesariamente los mismos. Sin embargo, la evolución temporal de la CCa en ambas regiones es semejante. Comparando las figuras 5.2 y 5.5 se puede observar que, durante los meses de invierno, los vientos alcanzan magnitudes mayores en la Región 7 que en la Región 3, pero son más débiles durante el verano.



**Figura 5.5.** Valores mensuales de la anomalía de CCa promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 7 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 27.6°N, 111.6°W (línea verde).

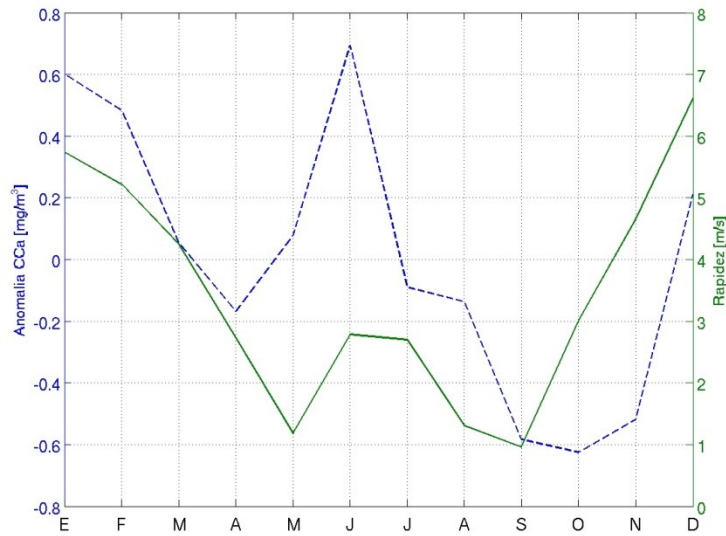
\* **Región 8.** Ubicada al sur de las grandes islas, es una región de transición entre la zona costera representada por la Región 7 y la zona central más profunda del GC correspondiente a la Región 12. La variabilidad estacional de la CCa es similar a la observada en la Región 7, pero con valores más pequeños de las anomalías, presentando valores positivos entre Noviembre y Abril y negativos en verano (Fig. 5.6), cuando los vientos no son favorables para generar surgencias (ver Fig. 2.4). Está influenciada tanto por la zona costera, mediante la surgencia de invierno, como por la zona profunda, con valores más bajos de CCa. La Región 8 presenta el mismo patrón de variabilidad que la Región 4, ubicada en la parte nororiental del Golfo Norte; con excepción del mes de Octubre, cuando ambas regiones muestran signos distintos en la anomalía de CCa (ver Fig. 4.12), el resto del año varían de manera similar.



**Figura 5.6.** Valores mensuales de la anomalía de CCh promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 8 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 26.5°N, 110.6°W (línea verde).

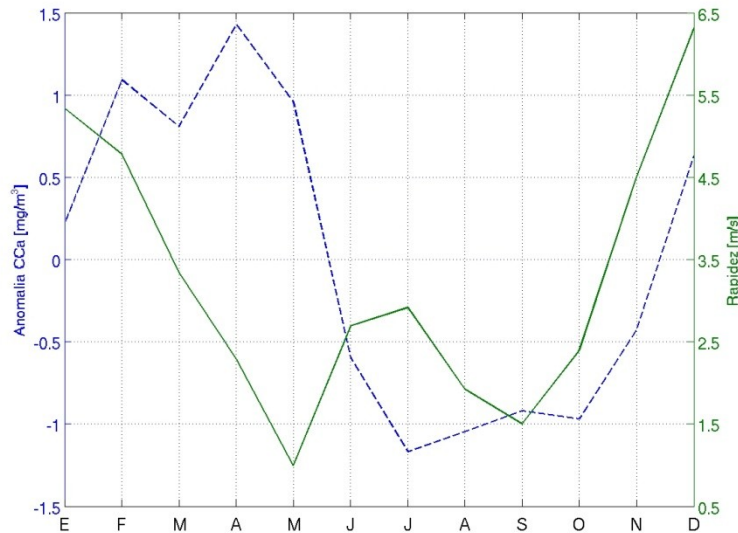
\* **Región 9.** Se localiza a lo largo de la costa central de Baja California Sur y se distingue porque abarca varias islas pequeñas. Es una región que no queda muy bien delimitada con el método y cuyo patrón de variabilidad de CCh lo comparte con la Región 11, la cual se localiza en la costa opuesta del golfo. Esta región presenta anomalías positivas principalmente durante la primera mitad del año y anomalías negativas durante la segunda mitad, manteniendo valores negativos en Noviembre y Diciembre cuando las zonas adyacentes presentan anomalías positivas. También se observa cierto retraso en las anomalías positivas, pues estas persisten en Mayo y Junio cuando las zonas adyacentes presentan valores negativos. En esta región no se observan concentraciones importantes de clorofila durante el verano, cuando los vientos del sur y sureste en el GC pudieran ser favorables para producir surgencia sobre la costa occidental, indicando que este proceso no es el más importante para explicar las variaciones anuales de CCh. Esto se debe probablemente a que los vientos durante el verano son débiles. La presencia de las pequeñas islas puede producir una intensificación de las corrientes y la generación de turbulencia que mezcla la columna de agua, siendo estos los mecanismos que dominan sobre las variaciones de CCh en esta región.

\* **Región 10.** Esta región corresponde a la Bahía de La Paz, la cual presenta un comportamiento distinto de la evolución anual de la CCa en comparación con las demás regiones. Santamaría-del-Angel et al. (1994) lo atribuyen al efecto que causan las islas Espíritu Santo y La Partida en su dinámica y al efecto del intercambio con la laguna costera Ensenada de la Paz ubicada al suroeste. La Bahía de La Paz es el cuerpo de agua costero más grande y profundo del GC y su intercambio con el golfo se da a través de una apertura amplia y profunda en la parte norte y por un canal estrecho y somero localizado al sureste (Obeso-Nieblas et al., 2008). Esta región mantiene un clima seco y árido la mayor parte del año, con una evaporación anual (215 mm) que excede la precipitación (180 mm), la cual es debida principalmente a las lluvias generadas por las tormentas tropicales durante el verano-otoño (Obeso-Nieblas et al., 2008). Debe mencionarse, sin embargo, que las descargas de arroyos son prácticamente nulas, por lo que no influyen sobre la CCa la cual presenta anomalías negativas durante el período de lluvias (Fig. 5.7). Las anomalías positivas más grandes se presentan en Enero y Febrero, aún cuando los vientos promedio del noroeste no son favorables para la surgencia en esta parte del golfo, y un máximo absoluto en el mes de Junio, con un cambio muy abrupto hacia valores negativos a partir de Julio y hasta el mes de Noviembre, después del cual se presenta otro cambio notable hacia anomalías positivas en Diciembre. A partir de muestras colectadas en cinco estaciones a lo largo de la Bahía de La Paz, Martínez-López et al., (2001) realizaron un estudio sobre la variabilidad estacional de la clorofila-*a*, encontrando concentraciones menores en los meses de verano, que atribuyen a la fuerte estratificación de la columna de agua como resultado de la intensa radiación solar, mientras que los valores más altos los observaron en la época fría, asociándolos con los procesos de mezcla de la columna de agua y con la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica. En general, estos resultados concuerdan con lo observado en las imágenes satelitales; sin embargo, los autores no mencionan un incremento en la CCa en Junio, aunque sus gráficas sí muestran cierto aumento en este mes en algunas de sus estaciones de medición. Aunque se requiere de más investigaciones para poder explicar el comportamiento observado en la Bahía, su compleja batimetría parece influir de manera muy importante, mostrando mayores concentraciones promedio de clorofila-*a* en las zonas someras, como la laguna interior, en donde la mezcla por marea juega un papel importante (Cervantes-Duarte et al., 2004).



**Figura 5.7.** Valores mensuales de la anomalía de CCh promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 10 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 24.0°N, 108.7°W (línea verde).

\* **Región 11.** Se localiza sobre la costa norte del estado de Sinaloa. En esta región se presentan anomalías positivas de CCh de Diciembre a Mayo (Fig. 5.8) (aunque en Enero una parte de esta región muestra anomalías negativas), favorecidas por la convección, la mezcla vertical y la surgencia por viento. En Mayo esta región se distingue de la zona costera de Sonora y de la parte central del GC por presentar marcadas anomalías positivas de CCh, que pueden ser producto de la influencia de la batimetría y de la línea de costa. En verano, la penetración de la onda atrapada a la costa profundiza la termoclina e inhibe la entrada de nutrientes a las capas superficiales, observándose anomalías negativas de CCh a pesar de que en Julio y Agosto es la temporada de lluvias y pudiera haber aporte de nutrientes por los ríos. Según la gráfica de la Figura 4.21, esta región comparte el mismo patrón de variabilidad que la región 9, aún cuando los procesos físicos favorables para la CCh son diferentes.



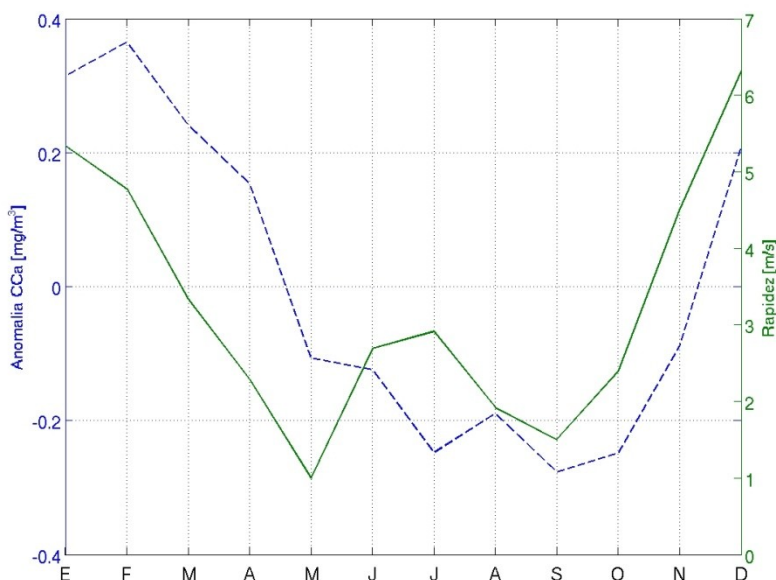
**Figura 5.8.** Valores mensuales de la anomalía de CCh promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 11 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 24.0°N, 108.7°W (línea verde).

\* **Región 12.** Abarca la zona profunda del centro y sur del GC, incluyendo parte de la zona de transición entre la boca del golfo y la línea imaginaria que une a Los Cabos con Cabo Corrientes. Es la región con los valores promedio de CCh más bajos en todo el GC, con concentraciones máximas en invierno y parte de la primavera y mínimas durante el verano (Fig. 5.9). El ciclo estacional de CCh en esta región está dominado por la estratificación en el golfo, es decir, durante el invierno, cuando los vientos son más intensos y las temperaturas superficiales son más bajas, la columna de agua está menos estratificada y los nutrientes pueden llegar a la zona eufótica, mientras que en verano la columna está estratificada debido a la ganancia de calor por la superficie y los nutrientes no llegan a la zona eufótica. Cabe señalar que en esta región se generan grandes giros o remolinos que tienen un efecto muy importante en la circulación, sobre todo durante el verano. Estos giros están asociados a inestabilidades de la onda que penetra durante el verano por la costa continental y su interacción con la línea de costa (Zamudio et al., 2008).

La Región 12 comparte el mismo patrón de variabilidad que la Región 2, la cual es una zona muy somera ubicada en las costas del noroeste de Sonora. Estas son dos regiones con características

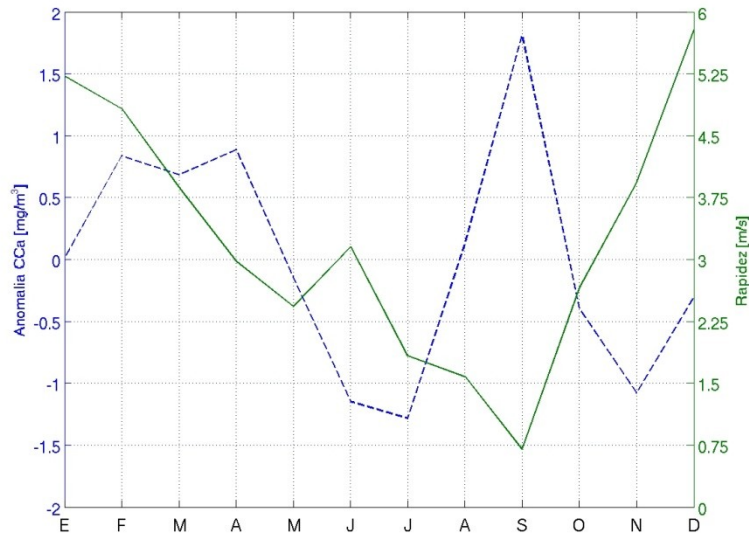


oroográficas y dinámicas muy distintas y los procesos físicos que afectan la evolución de la CCa en ambas regiones también son diferentes.



**Figura 5.9.** Valores mensuales de la anomalía de CCa promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 12 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 25.2°N, 109.8°W (línea verde).

\* **Región 13.** Ubicada en la zona de entrada al GC, se extiende a lo largo de la costa sur de Sinaloa y la costa norte de Nayarit. En esta región se observan dos períodos con anomalías positivas de CCa a lo largo del año, uno de Febrero a Abril y el otro en Agosto-Septiembre (Fig. 5.10). La intensa anomalía positiva observada sobre todo en el mes de Septiembre, que coincide con la temporada de vientos más débiles, distingue a esta región de las zonas adyacentes, tanto costeras como profundas. Este máximo de CCa, que es mayor cerca de la costa, puede estar asociado a la descarga de ríos por las intensas lluvias de verano en la zona y su valor es tan alto, relativamente, que influye sobre el signo de las anomalías observadas el resto del año. En particular en Mayo, la franja más pegada a la costa de esta región presenta anomalías negativas de CCa aunque hacia fuera de la costa presenta valores positivos.



**Figura 5.10.** Valores mensuales de la anomalía de CCa promediados dentro del área que abarca el patrón de variabilidad asociado con la Región 13 (ver Figs. 4.21 y 4.22) (línea azul), y promedios mensuales de la magnitud de la componente del viento a lo largo del eje del GC en el punto con coordenadas 22.7°N, 107.5°W (línea verde).

\* **Región 14.** Se localiza también en la zona de entrada al GC, con una batimetría compleja que incluye la región profunda del extremo sur del golfo y las Islas Marías. En general presenta valores muy bajos y una alta variabilidad en la CCa a lo largo del año, con anomalías positivas en Febrero y Marzo y ligeramente negativas en Abril, para volver a presentar valores positivos en Mayo que aún se distinguen en Junio, a diferencia de las zonas costeras adyacentes que presentan claras anomalías negativas. En Julio esta región muestra anomalías negativas pero en Agosto vuelve a presentar valores positivos. Este patrón tan variable está influenciado por los cambios que se observan en las regiones adyacentes.

\* **Región 15.** Esta región, ubicada en el extremo sureste del GC, incluye las costas del extremo sur de Nayarit y la Bahía de Banderas, aunque en las gráficas de las anomalías mensuales de CCa se observa claramente un comportamiento diferenciado en la zona de Bahía de Banderas con respecto al resto de la región. Durante el invierno, las corrientes en el norte de Cabo Corrientes van hacia el sur, mientras

que en el verano la corriente fluye hacia el norte a lo largo de la costa (Álvarez-Borrego, 2002). La orografía y línea de costa de la región, caracterizada por un cambio hacia el noreste después de Punta Mita y las altas montañas que rodean a la Bahía de Banderas, afectan los vientos en la región y por ende a la circulación. En particular, Bahía de Banderas, que está afectada por la descarga de desechos antropogénicos, muestra anomalías positivas de  $CCa$  a lo largo de todo el año con respecto al promedio general del GC, aunque son más intensas de Enero a Mayo y en Septiembre. Localmente, presenta marcadas anomalías positivas de Febrero a Mayo y anomalías negativas de Junio a Noviembre, mostrando claras diferencias con las regiones adyacentes. Los vientos durante el invierno tienen una componente hacia el sureste que favorece los procesos de surgencia costera, mientras que durante el verano los vientos se debilitan y tienen una fuerte componente del oeste (ver Fig. 2.4). Cabe señalar que en esta región existen importantes variaciones interanuales en la  $CCa$ , asociadas principalmente a fenómenos como El Niño y La Niña que tienen un fuerte efecto en las tasas de producción primaria debido a los cambios en la profundidad de la termoclina, así como condiciones locales que pueden favorecer la generación de florecimientos algales en la región (Gómez-Villarreal, et al., 2008).

# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES

Esta tesis contribuye al conocimiento de la variabilidad en escala estacional de la *CCa* en el GC y propone una nueva regionalización del golfo; el método utilizado es diferente al de estudios previos y se basa en el análisis de las anomalías de la *CCa* para el período 1998-2008 y mediante el cálculo de Funciones Empíricas Ortogonales y Componentes Principales. Analizando los mapas de anomalías mensuales de *CCa* y los 4 primeros modos empíricos (los cuales describen el 84.7% de la varianza contenida en los datos), se identificaron, de manera subjetiva, 11 patrones de variabilidad espacio-temporal a partir de áreas que presentan un comportamiento similar, en amplitud y en fase, a lo largo del año. De esta manera se estableció una división del GC en 15 regiones específicas, algunas de las cuales presentan el mismo patrón de variabilidad aún cuando no son regiones contiguas.

Con base en los resultados de trabajos previos, los procesos físicos que afectan de manera más significativa el nivel de *CCa* en el GC, de acuerdo con el análisis por regiones, son: la estratificación de la columna de agua, el forzamiento remoto, la mezcla vertical inducida por la marea y por procesos de turbulencia, la convección, los procesos de surgencia costera, la descarga de ríos y diversos procesos locales. La compleja batimetría del GC juega un papel determinante en la distribución de la *CCa*, observándose los valores más altos en las zonas someras del norte del golfo.

El modo dominante de variación estacional en la mayor parte del GC tiene un máximo en invierno y un mínimo en verano. El enfriamiento, los vientos intensos, la convección, la mezcla vertical y la surgencia costera del lado del continente son procesos que se dan durante el invierno y que favorecen la entrada de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes a las capas superiores. En verano, la columna de agua se estratifica como producto del calentamiento de las capas superficiales por la radiación solar y por la entrada de una onda baroclínica atrapada a la costa que provoca que la termoclina sea más profunda y el golfo aumente su contenido de calor, inhibiendo la llegada de aguas ricas en nutrientes a la superficie. Este proceso va afectando primero a la costa oriental del golfo, entrando de sureste hacia noroeste y posteriormente afecta las costas a lo largo de la península. Esto puede provocar que los máximos y mínimos en la *CCa* tengan un desfase entre las regiones. Sin embargo, existen otros procesos locales que pueden influir sobre la variación estacional de la *CCa* en

algunas regiones.

Otro proceso físico de gran importancia es la mezcla por marea que se da en la región de las islas y el Canal de Ballenas, que permite un gran aporte de nutrientes a la zona superficial. Al parecer este proceso permite que aguas subsuperficiales que en otras zonas no logran mezclarse con las de la superficie lo hagan al llegar a esta región, generando altos valores y anomalías de clorofila-*a*. Durante el invierno las aguas subsuperficiales se mezclan con las superficiales en gran parte del golfo por lo que al llegar al Canal de Ballenas no son tan ricas en nutrientes como lo pueden ser en Abril-Junio cuando se observan valores altos de *CCa* en esta región. Posteriormente, en Julio-Septiembre, la estratificación es tan intensa que incluso esta zona presenta anomalías negativas de *CCa*, excepto quizá sobre los umbrales donde la mezcla vertical es más intensa. Investigaciones recientes atribuyen los altos niveles de nutrientes en el Canal de Ballenas a un proceso de surgencia producido por la circulación en la región, la cual consiste de un flujo hacia dentro en aguas profundas y un flujo hacia afuera por la superficie a través de los umbrales en ambos extremos del canal.

Los vientos influyen de manera muy importante sobre la dinámica y termodinámica del GC, mostrando una marcada variabilidad estacional con vientos predominantes del noroeste de Octubre a Abril y del sureste durante los meses de verano. Esto favorece el desarrollo de surgencias costeras en la costa oriental durante el invierno y en la costa occidental durante el verano, aunque de mucho menor intensidad. Es importante señalar que la parte norte del GC presenta un desfase con respecto al resto del golfo durante los meses de primavera y otoño cuando se da el cambio de dirección de los vientos, así como una diferencia en cuanto a la magnitud de éstos mostrando vientos más intensos durante el verano y más débiles en el invierno en comparación con la parte central y sur del golfo.

La precipitación también tiene una variación importante a lo largo del año y regionalmente: en la zona sur las lluvias son mucho más intensas y perduran durante más tiempo que en la zona norte. Durante la época de lluvias, principalmente durante Agosto y Septiembre, la descarga de ríos en las costas del sur de Sinaloa y Nayarit es un factor importante en el aporte de nutrientes.

El método empleado, aún cuando tiene limitaciones, establece distintas regiones en el GC que muestran un comportamiento diferenciado en cuanto al ciclo anual de la *CCa*, tanto en la amplitud de las variaciones de las anomalías a lo largo del año como en la fase. Esto pudo explicarse para la mayoría de las regiones identificadas con base en los procesos físicos dominantes en cada una de

ellas. Esta nueva regionalización es, en buena medida, consistente con otras regionalizaciones realizadas previamente y aporta una mayor resolución espacial en la delimitación de las regiones en el GC, sugiriendo nuevas líneas de investigación en esta zona prioritaria para México.

## REFERENCIAS

Allende-Arandía, M.E.: *Giros de mediana escala en el Golfo de California: Balance energético, Estudio Numérico*. Tesis de Maestría. Departamento de Oceanografía Física, CICESE, 2005.

Álvarez-Borrego, S.: *Physical oceanography*. En: *A new island biogeography of the Sea of Cortés*. T.J. Case, M.L. Cody y E. Ezcurra (Eds.), Oxford University Press, 2002.

Arias Aréchiga, J.P.: *Regionalización del Golfo de California: una propuesta a partir de concentración de pigmentos fotosintéticos (CZCS)*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Biología Marina, UABCS, 1998.

Argote, M.L., Amador, A. y Lavín, M.F.: *Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100 (C8): 16,103-16,118, 1995.

Beier, E.: *A Numerical Investigation of the Annual Variability in the Gulf of California*. *Journal of Physical Oceanography*, 27: 615–632, 1997.

Cervantes-Duarte, R., Valdez-Holguín, J.E., y Reyes-Salinas, A.: *Comparación de reflectancia in situ 443/555 y 490/555 con clorofila-a y materia suspendida total en Bahía de La Paz, B.C.S., México*. *Hidrobiológica*, 14 (1): 11-17, 2004.

Emilsson, I. y Alatorre, M. A.: *Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California*. En: *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Unión Geofísica Mexicana, Monografía, 3:113–139, 1997.

Espejel, I.: *Regionalización*. En: *Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California (OEMGC)*. pp. 130-152, 2006.

Espejel, I. y Bermúdez, R.: *Regionalizaciones Biogeográficas Marinas. Propuesta Metodológica para la Regionalización de los Mares Mexicanos*. En: *Ordenamiento ecológico marino. Visión integrada de la regionalización*. Pp 145-207, 2009.

Espinosa-Carreón, L., y E. Valdez-Holguín: *Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California*. *Ecología Aplicada*, 6(1,2), 2007.

Fuentes-Yaco, C., J.E. Valdez-Holguín, E. Devred, T. Platt, S. Sathyendranath, J. Halfar, L. Godinez-Orta y J.M. Borges: *Teledetección del impacto del Huracán Ignacio (2003) en el Pacífico Tropical Oriental*. En: *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. INE, SEMARNAT, 19: 279-292, 2008.

Glenn, E.P., P.L. Nagler, R.C. Brusca, and O. Hinojosa-Huerta: *Coastal wetlands of the northern Gulf of California: inventory and conservation status*. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst*. 16: 5-28, 2006.

Gómez-Villarreal, M.C., M. D. Martínez-Gaxiola y J. L. Peña-Manjarrez: *Proliferaciones algales 2000–2001 en Bahía de Banderas, México según el sensor SeaWiFS*. *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744)*, Vol. 56 (4): 1653-1664, 2008.

- Kahru, M., Marinone, S. G., Lluch-Cota, S. E., Parés-Sierra, A. y Greg Mitchell, B.: *Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO*. Deep-Sea Research II, 51, 139-146, 2003.
- Lavín, M. F., L. Carrillo, R. Durazo, E. Palacios, and M.L. Argote: *Lagrangian observations of the circulation in the Northern Gulf of California*. Journal of Physical Oceanography, Vol. 27, No. 10, 2298-2305, 1997.
- Lavín, M. F. y Marinone S. G.: *An Overview of the Physical Oceanography of the Gulf of California*. En: Velasco Fuentes et al. (eds), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*, 173-204, 2003.
- López, M., Candela, J., Argote M.L.: *Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California?*. Geophys. Res. Lett. 33 (L11603): 1–5, 2006.
- Marinone, S.G., y Lavín, M.F.: *Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California*. Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Unión Geofísica Mexicana. Monografía No. 3, 113–139, 1997.
- Marinone, S. G.: *A three dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California*. Journal of Geophysical Res., 108 (C10), 3325, doi: 10.1029/2002 JC 001720, 2003.
- Martínez-López, A., Cervantes-Duarte, R., Reyes-Salinas, A. y Valdez-Holguín, J.E.: *Cambio estacional de clorofila-a en la Bahía de la Paz, B.C.S., México*. Hidrobiológica, 11 (1): 45-52, 2001.
- Obeso-Nieblas, M.; Shirasago- Germán, B.; Gaviño-Rodríguez, J.; Perez-Lezama, E.; Obeso-Huerta, H. y Jiménez-Illescas, A.: *Variabilidad hidrográfica en Bahía de La Paz, Golfo de California, México (1995-2005)*. Revista de Biología Marina y Oceanografía. 43(3): 559-567, 2008.
- Peña del Valle, A. E.: *Evaluación de las comunidades fitoplanctónicas del Pacífico Mexicano durante el evento ENSO 1997-1998*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, 2000.
- Romero Centeno, R.: *Comportamiento de los campos hidrográficos y flujos de calor y masa en el Canal de Ballenas*. Tesis de Maestría. División de Oceanología, Departamento de Oceanografía Física, CICESE, 1995.
- Salmerón-García, O., J. Zavala-Hidalgo, A. Mateos-Jasso and R. Romero-Centeno: *Regionalization of the Gulf of Mexico from space-time chlorophyll-a concentration variability*. Ocean Dynamics, DOI 10.1007/s10236-010-0368-1, 2010.
- Santamaría-del-Angel, E., Alvarez-Borrego, S., y Müller-Karger, F. E.: *Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery*. Journal of Geophysical Research. Vol. 99 (C4), 7411-7421, 1994.
- SEMARNAT. *Ordenamiento ecológico marino del Golfo de California*. 1a. Ed. Discover Editorial Group. pp. 140, 2006.
- Torres Orozco, E. “Análisis Volumétrico de las Masas de Agua del Golfo de California”. Tesis de Maestría. División de Oceanología, Departamento de Oceanografía Física, CICESE, 1993.



Venegas, S.A., *Statistical Methods for Signal Detection in Climate*. DCESS, University of Copenhagen, pp. 96, 2001.

Wilks, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series, Academic Press, Elsevier, 2<sup>nd</sup> Ed., 2006.

Zavala-Hidalgo, J., B. Martínez-López, A. Gallegos-García, S. L. Morey, and J. J. O'Brien, *Seasonal upwelling on the western and southern shelves of the Gulf of Mexico*. *Ocean Dynamics*. 53: 333-338, 2006.

Zamudio, L., P. Hogan and E. J. Metzger, *Summer generation of the Southern Gulf of California eddy train*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113 (C06020), doi:10.1029/2007JC004467, 2008.