

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**Variabilidad espacial y temporal de la biomasa y
productividad fitoplanctónica en la región de las Grandes Islas
(Golfo de California) con base en imágenes de satélite**

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS

LAURA LUCERO ALVAREZ MOLINA

Ensenada Baja California, México Agosto del 2007

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ECOLOGÍA MARINA

**Variabilidad espacial y temporal de la biomasa y
productividad fitoplanctónica en la región de las Grandes Islas
(Golfo de California) con base en imágenes de satélite.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

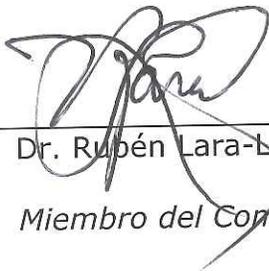
LAURA LUCERO ALVAREZ MOLINA

Ensenada, Baja California, México, 27 de Agosto de 2007.

TESIS DEFENDIDA POR
Laura Lucero Alvarez Molina
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dr. Saúl Álvarez Borrego
Director del Comité



Dr. Rubén Lara-Lara
Miembro del Comité



Dr. Silvio Guido Marinone
Moschetto
Miembro del Comité



Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera
*Coordinador del programa de
posgrado en Ecología Marina*

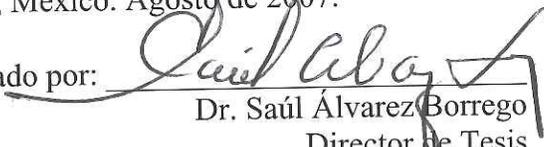


Dr. Edgar Gerardo Pavía López
Director de Estudios de
Posgrado

Ensenada, Baja California, 27 de Agosto de 2007

RESUMEN de la tesis de LAURA LUCERO ALVAREZ MOLINA presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA MARINA, Ensenada, Baja California, México. Agosto de 2007.

Resumen aprobado por:


Dr. Saúl Álvarez Borrego
Director de Tesis

El Golfo de California ha sido descrito como un mar con alta fertilidad desde los tiempos de los primeros exploradores. La región de las Grandes Islas (Isla Ángel de la Guarda e Isla Tiburón) se caracteriza por una dinámica muy intensa debida principalmente a fenómenos asociados a las mareas. En este trabajo se utilizaron imágenes de color del océano y al infrarrojo en forma de composiciones mensuales de los años 2005 y 2006 para describir la variación espacial e intra-anual de la concentración de clorofila (Chl) y la temperatura superficiales del mar, y la productividad fitoplanctónica (PP) integrada para la zona eufótica. Esto se hizo para la región de las Grandes Islas del golfo y la cuenca al sur de la misma (San Pedro Mártir). Uno de los objetivos de este trabajo fue el utilizar estas variables como posibles trazadoras de la circulación en el Canal de Ballenas, así como de giros en la cuenca San Pedro Mártir. Para el cálculo de la PP se utilizó un modelo con distribución vertical uniforme de la biomasa fitoplanctónica, y que genera resultados integrados por metro cuadrado y por día. Los valores de Chl y PP reportados en este estudio se comportan dentro de los rangos reportados en la literatura para esta área y, en el caso de la PP, generados con otros modelos y con el método tradicional del ^{14}C . La PP, presentó un rango de 0.54 a 4.04 $\text{gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Los datos de este trabajo apoyan la idea de la existencia de un flujo divergente en el Canal de Ballenas que ocurre principalmente en "condiciones de verano" (julio-noviembre), lo cual implicaría una barrera física al flujo de materiales en solución y en suspensión entre el norte y sur del golfo occidental. En el resto del año, aún sin el flujo divergente, el transporte neto débil reportado en la literatura, en una dirección u otra, podría ser también una barrera al flujo de materiales. Los resultados también apoyan la propuesta de un giro en la cuenca San Pedro Mártir, que no es permanente y en ciertos periodos puede ser ciclónico o anticiclónico. Este giro es anticiclónico la mayor parte del tiempo, sobre todo en verano. En la región de las Grandes Islas, la estratificación y la turbulencia extremas disminuyen la biomasa fitoplanctónica y la PP. La turbulencia más fuerte se presentó en diciembre, enero y febrero; y la estratificación más fuerte se presentó en julio, agosto y septiembre. En los meses intermedios, la turbulencia intermedia propició biomasa fitoplanctónicas elevadas, particularmente en abril y mayo (hasta $>4 \text{ mg m}^{-3}$). En la cuenca San Pedro Mártir, los valores más altos de Chl y PP fueron los de la costa oriental (hasta $>5 \text{ mg m}^{-3}$ y $>5 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Esto puede deberse a surgencias de invierno.

Palabras clave: Golfo de California, región de las Grandes Islas, clorofila y temperatura superficiales, productividad primaria, imágenes de satélite.

ABSTRACT of the Thesis of LAURA LUCERO ALVAREZ MOLINA presented as partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in MARINE ECOLOGY, Ensenada, Baja California, Mexico, August 2007.

Approved by:


Dr. Saul Alvarez-Borrego
Thesis Director

From the times of the first explorers, the Gulf of California has been described as a sea with very high fertility. The Midriff Islands region (Angel de la Guarda and Tiburón islands) is characterized by a very intense dynamics due mainly to phenomena associated to tides. In this work, infrared and color satellite imagery, in the form of monthly composites of the years 2005 and 2006, were used to describe the spatial and intra-annual variation of the surface temperature and chlorophyll concentration (Chl), and phytoplankton productivity (PP) integrated for the whole euphotic zone. This was done for the Midriff Islands region and for the basin immediately to the south (San Pedro Martir). One of the objectives of this work was to use these variables as possible tracers of circulation in Ballenas Channel, and also gyres in San Pedro Martir basin. To estimate PP, a model was used with homogeneous vertical distribution of phytoplankton biomass, that generates integrated results in per square meter and per day. Chl and PP values reported in this study behave within the ranges of those reported in the literature and, in the case of PP, generated with other models and with the traditional ^{14}C method. Primary productivity had a range of $0.54 - 4.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. The data of this study support the idea of the existence of a divergent flux in Ballenas Channel, mainly under "summer conditions" (July – November), which could imply a physical barrier to the flux of dissolved and suspended materials between the northern and southern western gulf. During the rest of the year, even without this divergent flux, the very weak net transport in one direction or the other, as reported in the literature, could also be a barrier to the flux of materials. Results also support the idea of a gyre in San Pedro Martir basin, which is not permanent and during certain periods it can be cyclonic or anticyclonic. This gyre is anticyclonic during most of the year, especially during summer. In the region of the Midriff Islands, both extreme stratification and turbulence decreased the phytoplankton biomass and PP. Strongest turbulence occurred in December, January and February, and strongest stratification occurred in July, August and September. During the other months, intermediate turbulence induced high phytoplankton biomass, particularly during April and May (up to $>4 \text{ mg m}^{-3}$). In San Pedro Martir basin, highest Chl and PP values were those at the eastern coast (up to $>5 \text{ mg m}^{-3}$ and $>5 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). This could be due to winter upwelling.

Keywords: Gulf of California, Midriff Islands region, sea surface chlorophyll and temperature, primary productivity, satellite imagery.

A la memoria de mi Padre

Agradecimientos

Gracias a Dios por darme la vida, por brindarme salud y sentir siempre su apoyo cuando lo necesitaba y por rodearme de gente maravillosa y buena conmigo.

Antes que a nadie, le tengo que dar gracias a la persona que hizo lo posible y lo imposible para que mi sueño dejara de ser eso, sólo un sueño, y hablo de mi mamá. Esa mujer a la que le debo todo y que nunca terminaré de pagárselo, sólo por el momento le puedo decir GRACIAS, te quiero mucho.

La segunda y no menos importante es a mi hermana Katya, tu has sido y serás un apoyo muy grande en mi vida, sabes que te quiero mucho, GRACIAS por estar a mi lado cuando te necesito.

A mis abuelitos, Tere y Pato, les agradezco que siempre estuvieron ahí para darme ánimos y sabios consejos cuando más los necesitaba.

Al Dr. Saúl, quien sin ninguna reserva compartió sus conocimientos conmigo, por ser una excelente persona y ayudarme a superarme y ponerme nuevas metas y retos, por darme su confianza y hacerme ver que todo se puede lograr si le ponemos empeño y dedicación a lo que hacemos.

A los doctores Rubén Lara-Lara y Guido Marinone por darme sus recomendaciones y consejos para poder sacar adelante este trabajo lo mejor posible, muchas gracias !!!

Al CONACyT por otorgarme la beca con la que pude realizar uno más de mis sueños.

A todos los profesores del posgrado de Ecología Marina por compartir sus conocimientos con los alumnos de la generación 2005-2007.

A mis amigas del alma Vanessa y Charminita, que aunque la distancia nos separó por dos años siguen siendo mis mejores amigas del mundo, las quiero muchísimo (VALUCHA), gracias por darme siempre ánimo, jamás voy a encontrar amigas como ustedes.

A mi conciencia de toda la vida Maru.

También quiero darle las gracias a Marcos David Martínez Gaxiola, infinitamente muchas gracias por tu tiempo que me regalaste, por enseñarme cosas interesantes y nuevas, y por darme muchísimos ánimos siempre.

Y cómo olvidar a Claudia (Poli), que es mi mejor amiga de toda Ensenada, gracias por dejarme compartir contigo mis penas y alegrías, mis logros y los fracasos, pero sobre todo gracias por darme ánimos y por hacerme ver las cosas positivas en todo, te quiero mucho Poli !!!

A todos mis amiguitos del CICESE (el grupo Decibeles) que fueron y son como una familia para mi en esta nueva aventura que emprendí hace dos años, gracias por brindarme muchísimos momentos de alegría. La verdad que ustedes me enseñaron muchas cosas nuevas.

Y ahora sí, gracias a Ismael, sin ti esta estancia en Ensenada no hubiera sido la misma, gracias por todos los momentos buenos y también porqué no los malos de los cuales aprendí muchas cosas. Gracias mi vida por el apoyo que me brindaste siempre, por alentarme y hacer siempre que diera más de mi misma, y por estar a mi lado cuando más lo necesitaba, te amo.

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Justificación.....	6
I.2 Hipótesis.....	7
I.3 Objetivos.....	8
I.4 Descripción del área de estudio.....	8
I.4.1. Sensores remotos.....	14
II. METODOLOGÍA.....	16
III. RESULTADOS	19
IV. DISCUSIÓN.....	34
V. CONCLUSIONES.....	39
VI. LITERATURA CITADA.....	39



LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Canal hipotético que dividía a la península de Baja California en dos islas en el periodo del Mioceno según Murphy y Aguirre-León (2002). Modificada de Riginos (2005).	3
2	La región de las Grandes Islas separa la parte somera del norte del golfo de la parte profunda del sur. Las flechas representan los giros observados mediante las imágenes de color del océano de verano (Tomada de Pegau et al., 2002).	5
3	Corrientes residuales de la primera capa del modelo (10m). Este modelo incluye los agentes forzantes. La flecha circular ayuda a comprender el sentido de la circulación. Los números de la derecha son la magnitud de la velocidad. (Marinone, 2003).	12
4	Las líneas marcan la ubicación de los transectos de donde fueron obtenidos los datos. A) Transecto del Canal, B) Transecto entre las Islas Ángel de la Guarda y Tiburón y C) Transecto de la cuenca San Pedro Mártir.	17
5	Distribución de la temperatura superficial, clorofila y productividad primaria para el transecto A para los años 2005 y 2006. Se muestran dos meses que ejemplifican el comportamiento general de las variables en "condiciones de invierno" y dos meses en "condiciones de verano". La línea negra representa la temperatura superficial, la línea gris representa la clorofila y la línea punteada la productividad primaria. La flecha transparente señala dónde se encuentra el umbral norte del canal y la flecha sombreada el umbral sur del canal y el inicio hacia el sur del giro en la cuenca San Pedro Mártir.	20
6	Distribución de la temperatura superficial, clorofila y productividad primaria para el transecto B para los años 2005 y 2006. Se muestran dos meses que ejemplifican el comportamiento general de las variables en "condiciones de invierno" y dos meses en "condiciones de verano". La línea negra representa la temperatura superficial, la línea gris representa la clorofila y la línea punteada la productividad primaria.	23

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

- 7 Distribución de la temperatura superficial, clorofila y productividad primaria para el transecto C para los años 2005 y 2006. Se muestran dos meses que ejemplifican el comportamiento general de las variables en “condiciones de invierno” y dos meses en “condiciones de verano”. La línea negra representa la temperatura superficial, la línea gris representa la clorofila y la línea punteada la productividad primaria.

25

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Medias mensuales y sus errores estándares de la temperatura superficial para las áreas norte, centro y sur de la parte del transecto A al norte del umbral de San Lorenzo (Fig. 4). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006.	28
II	Medias mensuales y sus errores estándares de la clorofila superficial para las áreas norte, centro y sur de la parte del transecto A al norte del umbral de San Lorenzo (Fig. 3). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006. Cuando aparecen valores de 0.00 para el error estándar es que es < 0.005 .	29
III	Medias mensuales y sus errores estándares de la productividad primaria integrada para las áreas norte, centro y sur de la parte del transecto A, al norte del umbral de San Lorenzo (Fig. 4). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006.	30
IV	Medias mensuales y sus errores estándares de la temperatura superficial para las áreas occidental, central y oriental del transecto C (Fig. 4). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006.	31
V	Medias mensuales y sus errores estándares de la clorofila superficial para las áreas occidental, central y oriental del transecto C (Fig. 3). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006. Cuando los errores estándares son 0.00 es que los valores son < 0.005 .	32
VI	Medias mensuales y sus errores estándares de la productividad primaria integrada para las áreas occidental, central y oriental del transecto C (Fig. 4). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006.	33

I. Introducción

La región del Golfo de California donde se encuentran Isla Ángel de la Guarda, Isla Tiburón, y un gran número de otras islas menos grandes, se ha denominado región de las Grandes Islas (Fig.1). Esta ha sido caracterizada por tener concentraciones altas de clorofila (Chl) y productividad fitoplanctónica (PP) elevada prácticamente a lo largo de todo el año (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004). Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) generaron series de tiempo de Chl en cinco puntos geográficos de esta región, de 1978 a 1986, con base en los datos del sensor de satélite Coastal Zone Color Scanner. Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) generaron promedios representativos de condiciones de “invierno” y de “verano” de producción primaria para toda la región, para los años 1997-2002, con base en datos del sensor de satélite SeaWiFS. Sin embargo, en estas dos contribuciones no se presentaron resultados detallados, espacial y temporalmente, de la variación anual de la biomasa y producción fitoplanctónica de esta región.

Debido a la gran biodiversidad de la región de las Grandes Islas, de la cual existen incontables reportes no sólo de aves y mamíferos marinos sino también de muchos otros grupos taxonómicos (v. g.: Tershy *et al.*, 1991), es relevante hacer una análisis de la variabilidad espacial y temporal de propiedades básicas del agua relacionadas con esta biodiversidad, tales como temperatura, Chl y PP. Además, estas variables pueden servir como trazadoras de los movimientos de masas de agua, principalmente la circulación superficial, e indicadoras de procesos físicos como la mezcla por fenómenos asociados a las mareas.

Circulación oceánica es el movimiento que produce transporte neto de agua y materiales en solución y en suspensión. Generalmente se piensa en la circulación como este mecanismo de transporte neto, sin embargo en algunas situaciones muy específicas la circulación puede ser una barrera al flujo de materiales. Este es el caso de la circulación con flujos divergentes que impiden, por ejemplo, el transporte de organismos fitoplanctónicos de una región oceánica a otra; los remolinos costeros son otro ejemplo al transportar materiales hacia fuera de la costa. En este último caso, si el material son huevos y larvas de peces rocosos el flujo hacia aguas profundas impide el reclutamiento y el intercambio de material genético entre subpoblaciones a un lado y otro del remolino.

El Golfo de California es un mar que cuenta con corrientes y remolinos muy dinámicos a lo largo de sus 1,100 km de longitud. Estas corrientes y remolinos pueden tener repercusiones muy grandes en la biodiversidad del golfo, ya que en algunos sitios probablemente actúan como barreras de materiales disueltos y en forma de partículas. El golfo se caracteriza por tener una alta diversidad biológica incluyendo especies endémicas, particularmente peces de arrecifes rocosos (Walker, 1960; Thomson *et al*, 2000). Con relación a estos peces, Walker (1960) describió dos regiones biogeográficas en la costa occidental del Golfo de California separadas por la parte sur del Canal de Ballenas (Fig. 1). Walker (1960) se basó en las diferencias morfológicas entre las mismas especies de estos peces, considerando además que estas diferencias probablemente surgieron como una respuesta al medio ambiente. Esta separación recientemente se ha confirmado con estudios que se han realizado aplicando técnicas genéticas (Riginos y Nachman, 2001).

Para entender lo anterior, Murphy y Aguirre-León (2002) han sugerido que en la época del Mioceno tardío (hace ~7 millones de años) las aguas del Océano Pacífico se

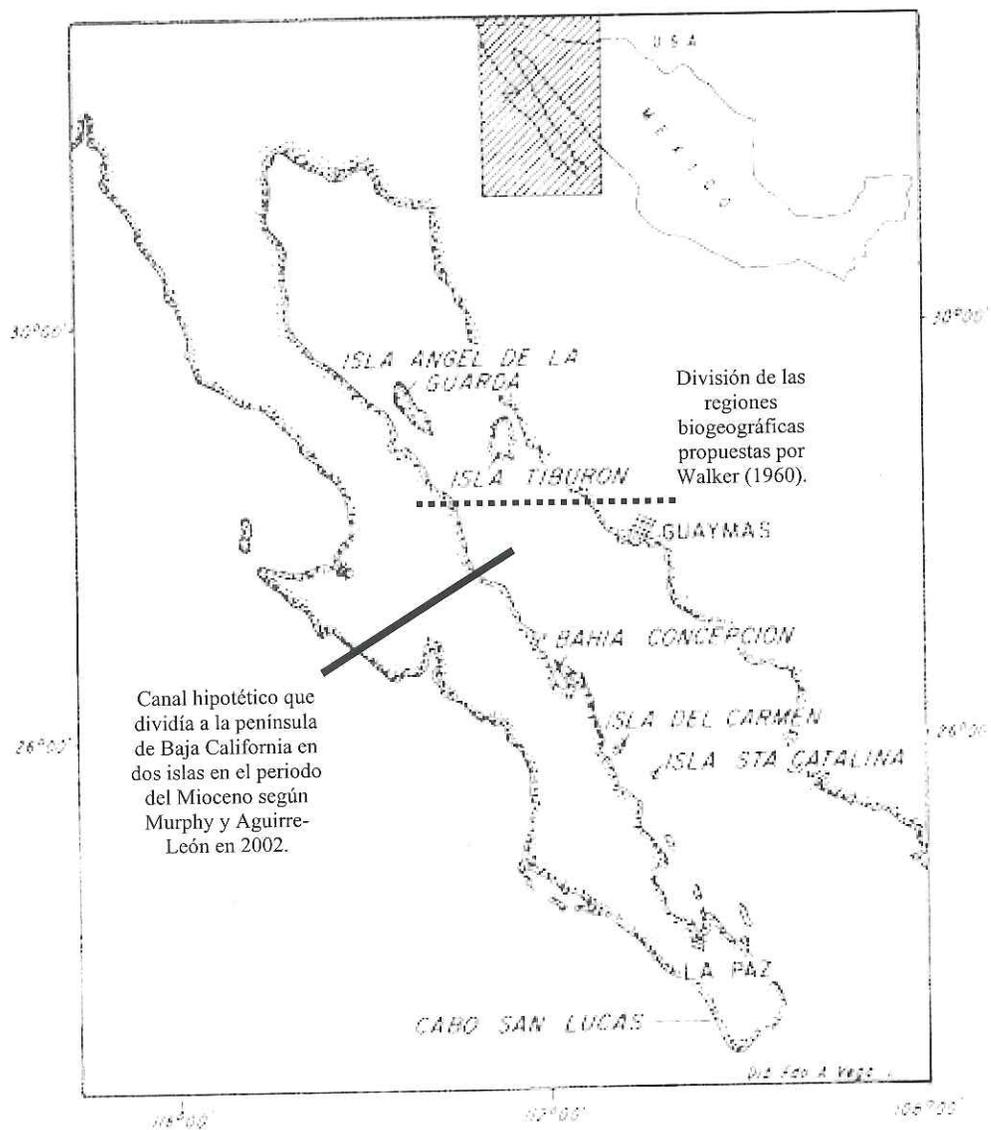


Figura.1. Canal hipotético que dividía a la península de Baja California en dos islas en el periodo del Mioceno según Murphy y Aguirre-León (2002). Modificada de Riginos (2005).

comunicaban con el Golfo de California principalmente por un canal ubicado casi a la altura de la región de las Grandes Islas que dividía la península de Baja California en dos zonas biogeográficas (Fig. 1).

El flujo a través de este canal no permitía un flujo genético entre subpoblaciones de peces rocosos de la costa occidental del golfo al sur y al norte del canal. El flujo en el canal era una barrera que obstaculizaba el transporte de huevos y larvas de peces costeros a lo largo del golfo; principalmente para peces de costas rocosas y aquellos con poca capacidad de dispersión. A pesar de que la península se ha mantenido unida en el último millón de años todavía se da la separación en dos regiones biogeográficas, lo cual implica que existe algún tipo de barrera críptica (difícilmente definible) que impide el flujo genético en la costa occidental del golfo (Riginos, 2005).

Las disimilitudes entre las comunidades de peces del golfo pueden deberse a barreras físicas que no se observan de una manera directa, tales como remolinos que acarrearán a las partículas y larvas de peces lejos de la costa hacia aguas profundas, o flujos divergentes, o ausencia completa de circulación neta, impidiendo que haya un flujo genético entre las dos bio-regiones. Estas barreras no han sido detectadas todavía, solamente han sido propuestas por los que han estudiado estos peces de arrecifes rocosos (Sponaugle, *et al.*, 2002; Riginos y Nachman, 2001; Riginos, 2005). De existir, constituirían barreras al flujo de cualquier material en solución, en suspensión o que se encuentre flotando en la columna de agua incluyendo la superficie. Su detección sería muy importante para un manejo más racional de esta área que es de gran importancia por su biodiversidad. Sería interesante inferir qué pasaría con contaminantes en solución como el cobre proveniente de Santa Rosalía, o en el caso de un derrame de petróleo. La circulación

superficial de agua entre la región de las Grandes Islas y la boca del golfo parece estar dominada por una serie de remolinos con circulaciones alternadas (Marinone, 2003; Pegau *et al.*, 2002) (Fig. 2). Mateos *et al.* (2006) sugirieron la existencia de un giro anticiclónico

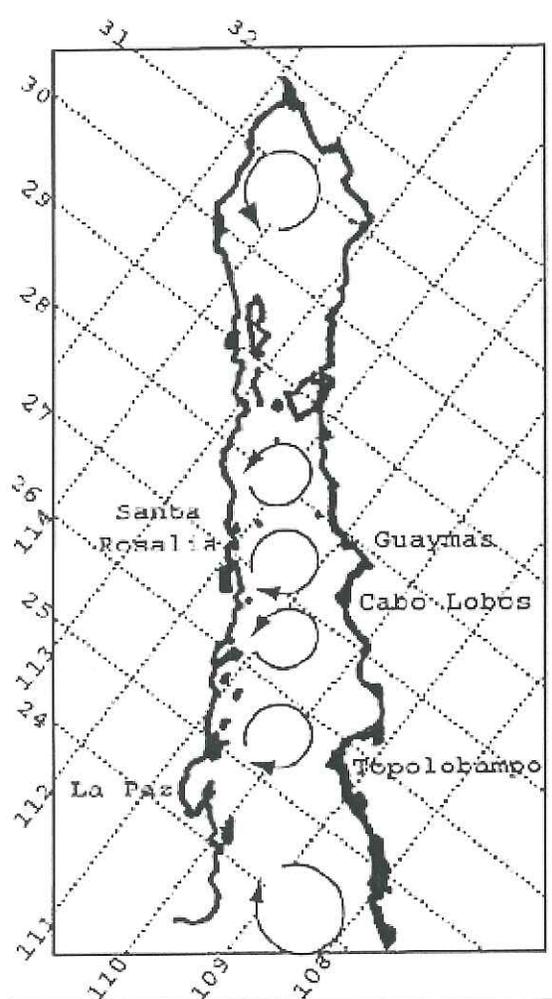


Figura. 2. La región de las Grandes Islas separa la parte somera del norte del golfo de la parte profunda del sur. Las flechas representan los giros observados mediante las imágenes de color del océano de verano (Tomada de Pegau *et al.*, 2002).

casi permanente en la parte central del golfo, sobre la cuenca de San Pedro Mártir, al sur de las grandes islas. Ellos utilizaron datos de temperatura y salinidad de cruceros que se realizaron de 1939 a 1996 por lo que sus resultados manifiestan la climatología. Los remolinos producen corrientes que pueden acarrear partículas pasivas de la costa hacia aguas profundas y viceversa (Pegau *et al.*, 2002), esto puede crear barreras a la dispersión de materiales disueltos y en forma de partículas entre regiones del golfo.

Si esta barrera consiste en flujos divergentes superficiales y/o remolinos deben tener un efecto cuantificable en la biomasa y producción fitoplanctónica. Estas barreras físicas posiblemente pueden ser detectadas con imágenes de satélites si se manifiestan con gradientes de variables como temperatura y Chl superficiales. Los datos que proporcionan las imágenes al infrarrojo y de color del océano sobre cómo se distribuye la temperatura superficial y biomasa fitoplanctónica han sido utilizados para conocer la circulación del agua dentro del Golfo de California (Badan-Dangon *et al.*, 1985; Soto-Mardones *et al.*, 1999; Paden *et al.*, 1991; Gaxiola-Castro *et al.*, 1999; Kahru *et al.*, 2004; Pegau *et al.*, 2002) y la producción primaria fitoplanctónica (Hidalgo-González y Alvarez-Borrego, 2004).

I.1 Justificación

Debido a la biodiversidad alta de la región de las Grandes Islas, el gobierno federal mexicano ha realizado varios esfuerzos de conservación, incluyendo instrumentos legales como decretos de reservas ecológicas y parques nacionales. Recientemente (5 de junio del 2007) se decretó a la zona de Bahía de los Ángeles como parque nacional. Bahía de los Ángeles se encuentra en la península de Baja California, dentro del Canal de Ballenas (Fig. 1).

VARIABLES como la temperatura y la biomasa fitoplanctónica son muy importantes para estudios de biodiversidad marina (incluyendo la abundancia de especies). La PP provee el material para sostener toda la red trófica. El conocimiento de la variación espacial a detalle de estas propiedades físicas y biológicas nos puede ayudar a explicar variaciones espaciales de la biodiversidad dentro de la región de las Grandes Islas; y la variación temporal, mes a mes, a lo largo de un año entero pueden también servir como herramienta para explicar variaciones intra-anales de las diferentes especies.

Además, el uso de la temperatura superficial del mar y la biomasa fitoplanctónica para la detección de fenómenos físicos, como flujos divergentes y remolinos, puede orientarnos para hacer inferencias sobre el movimiento de materiales disueltos o en forma de partículas, incluyendo el fitoplancton, larvas y huevos de peces y contaminantes.

I.2 Hipótesis

Con relación al flujo divergente:

H_0 : Las medias de temperatura superficial, concentración de clorofila superficial y productividad primaria de los extremos del Canal de Ballenas y el centro, son iguales.

H_a : Las medias de temperatura superficial, concentración de clorofila superficial y productividad primaria de los extremos del Canal de Ballenas y el centro son diferentes.

Con relación a la posible existencia del giro anticiclónico al sur del Canal de Ballenas:

H_0 : Las medias de temperatura superficial, concentración de clorofila superficial y productividad primaria de las orillas y del centro del supuesto giro son iguales.

H_a : Las medias de temperatura superficial, concentración de clorofila superficial y productividad primaria de las orillas y del centro del supuesto giro son diferentes.

I.3 Objetivo

General.

Describir la variación espacial y temporal de la temperatura superficial, la biomasa y productividad fitoplanctónica de la Región de las Grandes Islas que se manifiesten por medio de imágenes compuestas mensuales de color del océano y al infrarrojo.

Particulares.

- ✓ Describir la variación espacial de temperatura, Chl y PP superficiales en transectos a lo largo del Canal de Ballenas, entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón, y en dos transectos en la cuenca San Pedro Mártir.
- ✓ Describir la variación temporal de temperatura, Chl y PP superficiales de los mismos transectos, mes a mes, a lo largo de 2005 y 2006.
- ✓ Explorar evidencias del flujo superficial divergente en el Canal de Ballenas a través de su posible efecto en la distribución de la temperatura y clorofila superficiales.
- ✓ Explorar evidencias del giro anticiclónico al sur del Canal de Ballenas con su parte superior adyacente al mismo, de la misma forma que en el objetivo anterior.
- ✓ Analizar el efecto de la estratificación de verano y la turbulencia de invierno en la biomasa fitoplanctónica.

I.4 Descripción del área de estudio

El Golfo de California es un mar semicerrado muy dinámico y ha sido descrito como uno de los más fértiles desde los primeros exploradores. Es un mar subtropical con una productividad primaria excepcional (Zeitzschel, 1969). Topográficamente está dividido en una serie de cuencas, la más profunda de las cuales está en la región de la entrada al

golfo y tiene profundidad mayor a 3000 m, y la más somera es de aproximadamente 200 m cerca del Alto Golfo (Alvarez-Borrego, 2007a). El Golfo de California está separado en dos áreas distintas por la región de las islas Ángel de la Guarda y Tiburón, conocida como la región de las Grandes Islas (Fig.2). La parte norteña del golfo es relativamente somera y está separada de la parte sur por umbrales en la región de las Grandes Islas. El sur del golfo incluye las cuencas de San Pedro Mártir y la de Guaymas en el norte, y una serie de cuencas extendiéndose hasta la boca. Al norte de las Grandes Islas la plataforma continental es ancha y somera. Al sur de las Grandes Islas, sobre el lado oeste (península) la plataforma es generalmente angosta y rocosa de una manera continua.

En el lado este del golfo (continente) la plataforma es más ancha, está rodeada por costas arenosas (playas y estuarios) donde se encuentran lagunas costeras, y tiene aporte de agua de ríos que provienen de las montañas de la Sierra Madre. Este aporte actualmente es limitado por las presas que permiten el uso del agua para desarrollos agrícolas y urbanos (Alvarez-Borrego, 2007a).

El Golfo de California se divide en dos épocas del año, las condiciones de “invierno” que abarcan los meses de diciembre a junio y las condiciones de “verano” que son de los meses de julio a noviembre. En las condiciones de invierno los vientos que predominan tienen una dirección del noroeste lo cual provoca surgencias en la parte este del golfo y en condiciones de verano hay vientos del sureste propiciando que las aguas se vuelvan más calientes y oligotróficas. Dentro del golfo ocurren procesos físicos como surgencias y mezcla por vientos, mezcla por fenómenos asociados a las mareas (principalmente en la región de las Grandes Islas), intercambios de calor, evaporación, etc., que afectan la dinámica y alteran las características del agua (Lavín *et al.*, 1997). Un

fenómeno físico de importancia particular es que, a pesar de la evaporación, el golfo gana calor (Lavín y Organista, 1988), en promedio 100 W m^{-2} . Debido a esto, el golfo se tiene que deshacer de este calor, lo cual causa una circulación de intercambio neto con el Océano Pacífico con un flujo superficial hacia fuera y un flujo compensatorio hacia dentro a profundidad. En realidad esta circulación se debe a todos los factores forzantes: intercambio de calor, vientos, mareas y la influencia del Océano Pacífico (Marinone, 2003).

La región de las Grandes Islas se caracteriza por tener umbrales someros y canales angostos que comunican a la parte norte y la parte sur del golfo. El Canal de Ballenas, entre la península y la cadena de islas que van desde San Lorenzo hasta Ángel de la Guarda, es muy profundo (hasta 1600 m) (Bray, 1988a; Alvarez-Borrego, 2007b), y cuenta con umbrales tanto en el sur como en el norte. El umbral en la parte sur tiene una profundidad máxima de 420 m y el umbral del norte, que separa al Canal de Ballenas de la Cuenca Delfín, tiene ~600 m. El umbral de San Esteban, que separa el sur del golfo con la Cuenca Tiburón (entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón), también tiene una profundidad de ~600 m. Esto hace que las condiciones hidrográficas de la región de las Grandes Islas tenga características especiales, las corrientes de marea fuertes y el posible rompimiento de ondas internas causan mezcla y alta productividad en esta región (Beier y Ripa, 1999). El intercambio de agua entre la parte norte y sur del golfo ocurre a través de estos umbrales, y la comunicación más amplia ocurre entre las islas San Lorenzo y San Esteban, con muy poca circulación a través del Canal de Ballenas (Marinone, 2003).

Con excepción del Alto Golfo de California, donde las profundidades son $<30 \text{ m}$, los valores más altos de velocidad de disipación de energía de marea se han calculado para el Canal de Ballenas (Argote *et al.*, 1995) donde la mezcla intensa alcanza profundidades

de >500 m (Simpson *et al.*, 1994). La región de las Grandes Islas presenta mareas vivas con rangos mayores a 4 m. Recientemente se ha descrito la circulación del Golfo de California, mediante un modelo tridimensional, con el resultado de que hay un transporte grande de agua entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón y muy poco transporte en el Canal de Ballenas (Marinone, 2003) (Fig.3).

López *et al.* (2006) realizaron mediciones directas con correntímetros en los umbrales norte y sur del Canal de Ballenas y concluyeron que existen flujos profundos hacia adentro en los dos extremos (convergencia). Por lo anterior infirieron un flujo compensatorio superficial divergente hacia fuera tanto en la parte norte como en la parte sur. Esto provocaría una surgencia que sería la responsable de que el canal tenga las temperaturas más bajas del golfo y alta productividad. Las aguas superficiales frías y de biomasa fitoplanctónica elevadas se pueden usar como trazadores de esta circulación con el flujo divergente.

Sin embargo Martínez-Díaz de León *et al.* (2006) reportaron que la temperatura superficial del Canal de Ballenas es relativamente invariante espacialmente. Esto implica que en realidad no hay surgencia por flujo divergente sólo en el centro del canal, sino quizá a todo lo largo del canal, o más bien este efecto de divergencia es realmente débil y lo que realmente causa un efecto fuerte es una gran mezcla por los fenómenos asociados a las mareas, y de existir una barrera al flujo entre las zonas al norte y al sur del canal sería más bien por ausencia de una circulación significativa. Alvarez-Sánchez *et al.* (1984) utilizaron radio boyas para generar mediciones de corrientes superficiales a 50 m durante períodos

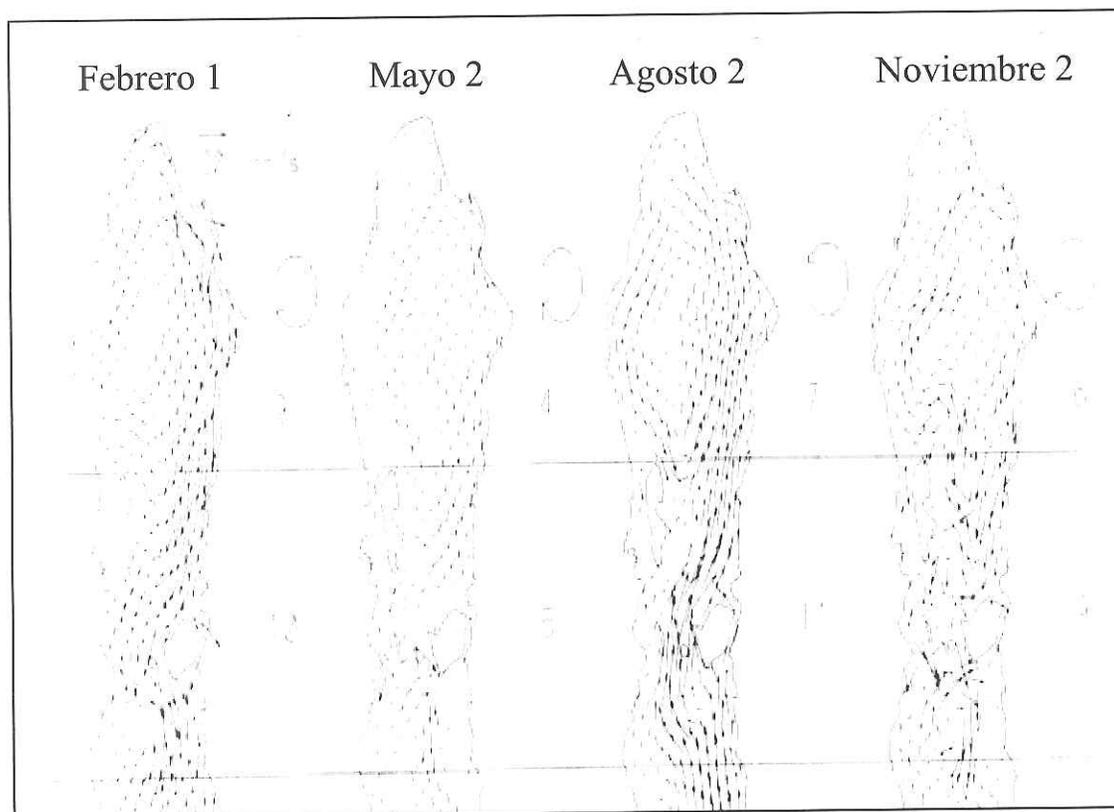


Figura. 3. Corrientes residuales de la primera capa del modelo (10m). Este modelo incluye los agentes forzantes. La flecha circular ayuda a comprender el sentido de la circulación. Los números de la derecha son la magnitud de la velocidad (Tomada de Marinone, 2003).

cortos de hasta 74 horas. Aunque no son concluyentes, sus resultados muestran que a pesar de que las velocidades instantáneas fueron de hasta 3 m s^{-1} (6 nudos) y el desplazamiento máximo fue de hasta 15 km, las boyas tendieron a moverse en giros o remolinos dentro del canal, sin una circulación neta considerable.

El Golfo de California es un área con las condiciones adecuadas para realizar estudios con imágenes de satélite. Las montañas de la península de Baja California bloquean el paso de las nubes y neblina asociadas con el aire marino que proviene del Océano Pacífico. Esto permite que el cielo sobre el golfo este regularmente libre de nubes.

Las montañas en ambos lados del golfo tienden a canalizar los vientos, así fluyen a lo largo del golfo (Badán *et al.*, 1991). Los vientos causan surgencias intensas con condiciones de “invierno” (diciembre a junio) en el lado oriental del golfo, lo cual ocasiona una alta productividad a lo largo de toda la costa (Lluch-Cota, 2000). Debido a la circulación en forma de remolinos, la alta productividad de la parte oriental del golfo también se manifiesta frente a la costa de la península (Santamaría-Del-Ángel *et al.*, 1994).

Las corrientes excepcionalmente rápidas del Canal de Ballenas producen una turbulencia fuerte que provee de los nutrientes necesarios para el florecimiento del fitoplancton (Alvarez-Borrego *et al.*, 1978). Sin embargo, las corrientes de marea sólo acarrear los materiales para un lado y para otro, sin hacer un transporte neto. La circulación es la que causa el transporte (Lavín y Marinone, 2003; Marinone, 2003).

Los datos de satélite de color del océano muestran que las concentraciones de pigmentos son relativamente altas a lo largo de todo el año en la zona de las Grandes Islas donde las temperaturas superficiales son relativamente bajas (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994) y las concentraciones de nutrientes son altas (Alvarez-Borrego *et al.*, 1978; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) debido a que hay una fuerte mezcla y rompimientos de ondas internas (Simpson *et al.*, 1994). La alta productividad primaria en el golfo es el resultado del transporte eficiente de nutrientes hacia la zona eufótica (Valdéz-Holguín y Lara-Lara, 1987).

Los datos para calcular la producción primaria son en algunas ocasiones difíciles de determinar, ya que estos tienen una alta variabilidad en el océano porque están sujetos a los cambios de las condiciones ambientales. Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) describieron la variación temporal de la concentración de clorofila en un sólo punto del Canal de Ballenas

utilizando datos del satélite del CZCS. Con base en esta información, estos autores concluyeron que el Canal de Ballenas es una región bio-geográfica con un comportamiento diferente al de las demás, mientras que la zona entre las dos grandes islas es otra zona bio-geográfica.

I.4.1 Sensores Remotos

Cuando la luz incide en la superficie de un objeto, este puede absorberla o reflejarla dependiendo de la longitud de onda, los objetos son del color de la luz que reflejan. En el espectro visible las ondas más largas son las de color rojo, en tanto que las más cortas son las violeta. Cuando la luz llega al océano, la parte roja es absorbida en los primeros metros en tanto que la longitud de onda azul penetra a más profundidad y es altamente esparcida, es por eso que el océano se ve azul. Sin embargo existe materia orgánica en el mar que afecta el color del océano, como en las zonas costeras, desembocaduras de ríos, suspensión de arena debido al oleaje y por tormentas, y partículas vivas como el fitoplancton con sus pigmentos fotosintéticos.

Con lo anterior, lejos de la costa lo que más afecta el color del océano es el fitoplancton, el cual contiene clorofila y otros pigmentos accesorios que absorben luz. El mínimo de absorción de luz por el fitoplancton esta en las longitudes intermedias que corresponden al color verde (~550 nm). Al tener las condiciones propicias, puede surgir un florecimiento de fitoplancton lo cual se observa en las imágenes de satélite como una gran mancha roja, por los falsos colores que se asocian a los datos del sensor.

La biomasa fitoplanctónica se puede representar con las concentraciones de pigmentos fotosintéticos como lo es la clorofila *a* (Chl *a*). Estas concentraciones pueden medirse desde el espacio por medio de los sensores remotos. Los valores obtenidos son

únicamente los de la capa superficial (~20% superior de la zona eufótica o de cero a 8 m de profundidad) que corresponde a la primera profundidad óptica (Kirk, 1984; Balch y Byrne, 1994). Para la realización de algunos estudios biológicos en el océano los datos obtenidos a partir de sensores remotos son de gran utilidad, ya que pueden abarcar grandes áreas (decenas de miles de km^2) en un mismo tiempo (Fargion *et al.*, 1994).

II. Metodología

Se realizó un acopio de imágenes de color del océano y temperatura superficial, las cuales son proporcionadas por la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Las imágenes utilizadas fueron composiciones mensuales del SeaWiFS de los años 2005 y 2006 con una resolución de 9 Km². Estas imágenes se obtuvieron y se guardaron en formato HDF (Hierarchical Data Format, por sus siglas en inglés) porque incluye los datos científicos con funciones especiales para sensores remotos como el SeaWiFS, MODIS, entre otros.

Para analizar las imágenes se utilizó el programa Wim (Windows Image Manager) el cual es un programa diseñado para visualizar y analizar imágenes de satélite (M. Kahru, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla). Con este programa se obtuvieron los transectos para el análisis de las variables. Los transectos fueron ubicados en tres lugares principales. El primero se situó desde el Canal de Ballenas hasta la cuenca de San Pedro Mártir, con una longitud de 214 Km (A). El segundo transecto se situó en medio de las islas Ángel de la Guarda y Tiburón, con una longitud de 114 Km (B). Y el tercer transecto se situó en la cuenca San Pedro Mártir de la costa de la península a la costa del continente, con una longitud de 107 Km (C) (Fig. 4).

El programa Wim tiene algoritmos integrados que calculan la concentración de clorofila (mg m⁻³) y productividad primaria (PP mgC m⁻² d⁻¹). Particularmente para las imágenes de PP se utilizó el modelo no espectral de la producción verticalmente integrada de Behrenfeld y Falkowsky (1997) a partir de las concentraciones de la clorofila:

$$PP = P_{opt}^b f(PAR_{(0)}) DL Chl Z_{eu}, \quad (1)$$

donde P_{opt}^b es la razón de fotosíntesis en el óptimo de luz dentro de la columna de agua, $f(PAR_{(0)})$ es una función de la PAR que incide en la superficie y que representa el efecto de la luz en toda la columna eufótica, DL es la longitud del día en horas (Day Length) y Z_{eu} es la profundidad de la zona eufótica (m).

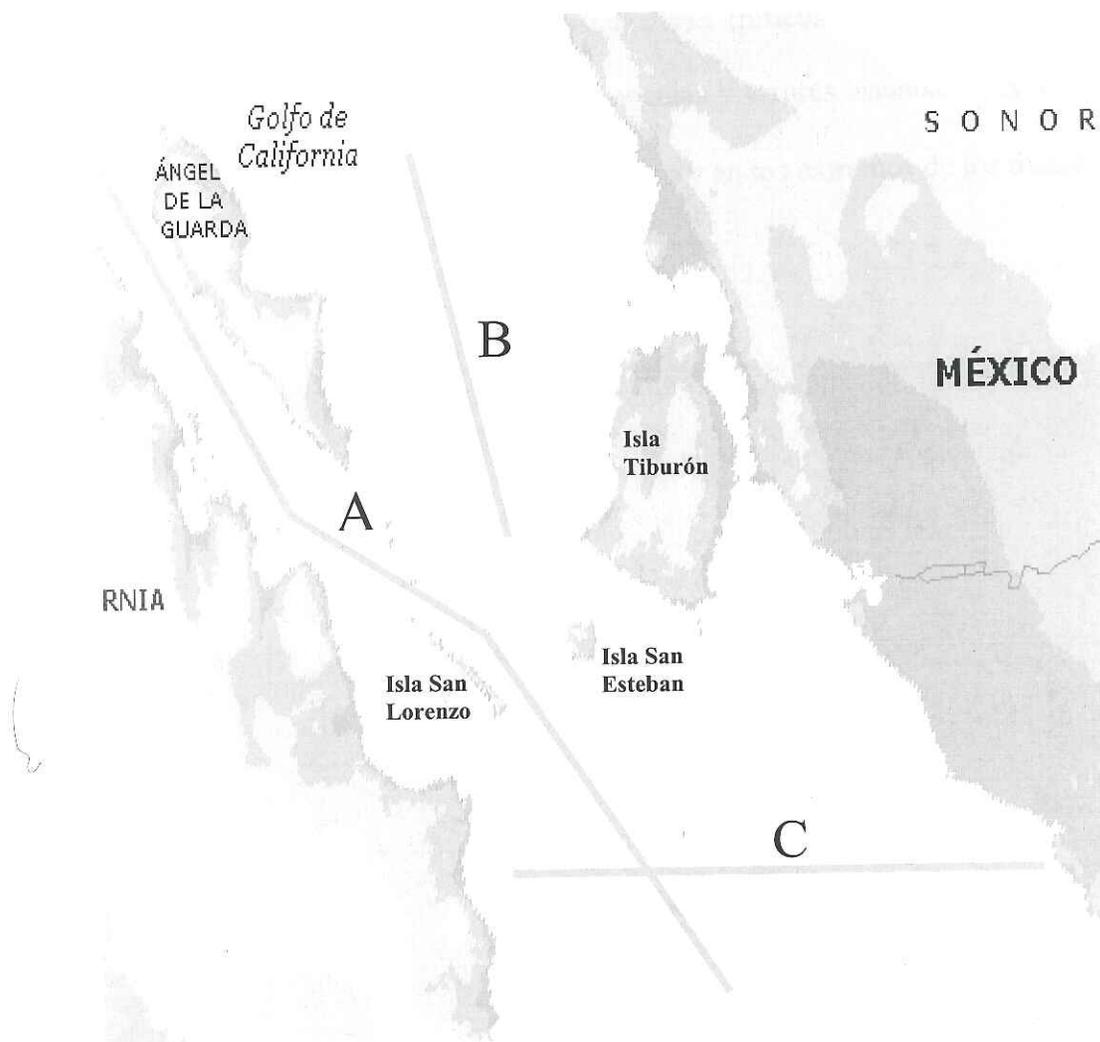


Figura. 4. Las líneas marcan la ubicación de los transectos de donde fueron obtenidos los datos. A) Transecto del Canal, B) Transecto entre las Islas Ángel de la Guarda y Tiburón y C) Transecto de la cuenca San Pedro Mártir.

Posteriormente con los datos obtenidos se generaron gráficas con programática comercial donde se observaron los patrones de distribución de temperatura y clorofila superficiales y de la productividad primaria. Estas gráficas se construyeron para todos los meses de 2005 y 2006, pero para fines de ejemplo sólo se muestran cuatro meses representativos de cada año en la sección de resultados.

Finalmente se aplicaron técnicas estadísticas (prueba t de Student) para hacer pruebas de hipótesis. Para esto, se obtuvieron medias y errores estándares de T °C, Chl y PP para cuadros de $12 \times 12 \text{ Km}^2$ situados en el centro y en los extremos de los transectos.

III. Resultados

Como se mencionó anteriormente, en el Golfo de California el año se divide en dos épocas, las condiciones de “invierno” que abarcan los meses de diciembre a junio y las condiciones de “verano” que son de los meses de julio a noviembre. Por lo anterior, se describirán los resultados para cada una de estas dos épocas.

Temperatura, Chl a y Productividad Primaria en el Canal de Ballenas y cuenca San Pedro Mártir (transecto A).

La temperatura más baja en el Canal de Ballenas para el año 2005 se registró para las condiciones de invierno, con valores desde 16.15 °C en enero hasta la máxima temperatura de 26.6 °C en junio. Para las condiciones de verano la temperatura del canal se incrementó hasta alcanzar un máximo de 30.7° C en agosto y luego disminuyó a 21.4 °C en noviembre.

En verano la temperatura fue más homogénea que en invierno en todo el transecto, mientras que en invierno se presentó una tendencia a aumentar hasta ~2 °C en la parte sureste del transecto, cerca de Sonora. Esta variable mostró picos cuasi-permanentes al inicio del transecto durante todo el año, un poco al norte del umbral norte del canal (Fig. 5).

En 2006 para condiciones de invierno el valor mínimo fue 14.8 °C en marzo y el valor más alto fue 27.6 °C en junio. En tanto que para condiciones de verano el valor más alto fue 30.8 °C en julio y luego disminuyó a 25.6 °C en octubre. Los valores de temperatura fueron un poco más extremos que en 2005, más altos en condiciones de verano y más bajos en invierno (Fig. 5).

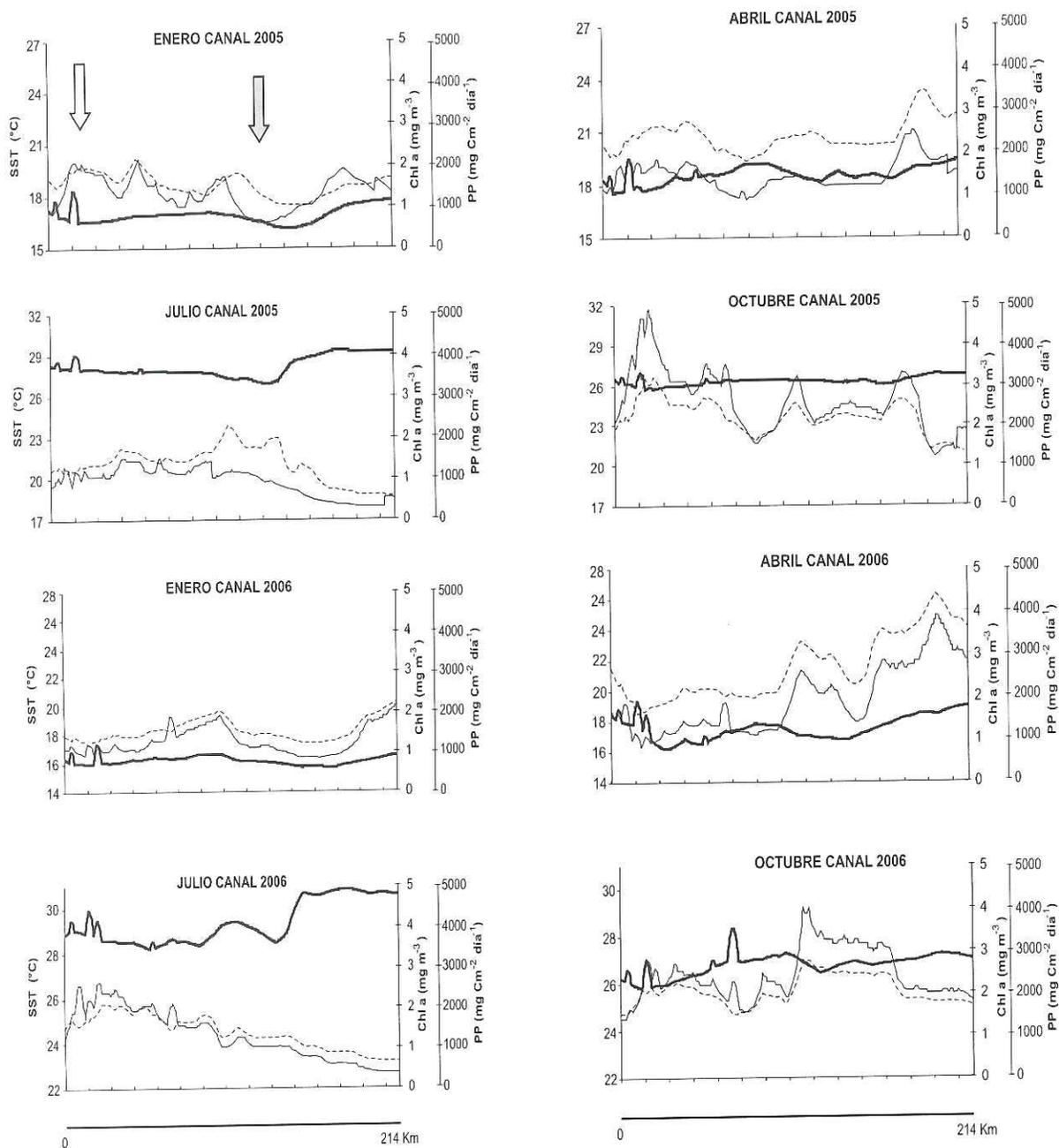


Figura. 5. Distribución de la temperatura superficial, clorofila y productividad primaria para el transecto A para los años 2005 y 2006. Se muestran dos meses que ejemplifican el comportamiento general de las variables en “condiciones de invierno” y dos meses en “condiciones de verano”. La línea negra representa la temperatura superficial, la línea gris representa la clorofila y la línea punteada la productividad primaria. La flecha transparente señala dónde se encuentra el umbral norte del canal y la flecha sombreada el umbral sur del canal y el inicio hacia el sur del giro en la cuenca San Pedro Mártir.

Igual a los resultados de 2005, en 2006 la distribución superficial de temperatura fue relativamente homogénea en verano y espacialmente variable en invierno (Fig. 5).

La concentración de clorofila *a* en condiciones de invierno de 2005 tuvo un mínimo en junio con valor de 0.30 mg m^{-3} en la parte sureste del transecto y en mayo se registró un valor alto de 4.36 mg m^{-3} . Este último estuvo en la zona entre el umbral sur del canal y la cuenca San Pedro Mártir. Para las condiciones de verano se registró el mismo mínimo de 0.30 mg m^{-3} en julio en la parte sureste del transecto y el valor máximo en octubre con 4.84 mg m^{-3} cerca del umbral norte del canal (Fig. 5). Para las condiciones de invierno de 2006, la Chl mínima se presentó en junio con 0.58 mg m^{-3} y la máxima en marzo con 5.73 mg m^{-3} . En condiciones de verano el mínimo de Chl se obtuvo en julio con 0.37 mg m^{-3} y el máximo en octubre con 4.03 mg m^{-3} (Fig. 5).

Bajo condiciones de invierno de 2005, en junio la productividad primaria presentó un valor mínimo de $1047 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y un máximo en mayo de $4958 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Con condiciones de verano el mínimo se presentó en julio con $583 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y el máximo en octubre con $3180 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Fig. 5). Esta propiedad mostró mucha variabilidad durante todo 2005, pero hay que destacar que hubo valores muy altos casi siempre cerca del umbral norte del canal y los valores tienden a ser relativamente bajos al norte de este umbral (Cuenca Delfín).

Para las condiciones de invierno de 2006, el valor mínimo se presentó en junio con $1044 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y el máximo en marzo con $4433 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Mientras que con condiciones de verano el mínimo fue $654 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en julio, y el máximo fue $2766 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en octubre (Fig. 5).

Temperatura, Chl a y Productividad Primaria entre las Grandes Islas (transecto B)

Para 2005, se encontró que en condiciones de invierno la temperatura en general tendió a decrecer en la parte sur del transecto, esto es en las inmediaciones del umbral entre San Lorenzo y San Esteban, con un mínimo de 16.3 °C en enero y máximo de 26.1 °C en junio. Para las condiciones de verano se encontró que el valor más bajo se presentó en noviembre con 21.3 °C y el máximo se presentó en septiembre con 30.8 °C. Cabe señalar que las variaciones espaciales para verano fueron mínimas, variando solamente hasta en un grado. Por ejemplo, en agosto la temperatura varió a lo largo de todo el transecto de 29.7 °C a 30.8 °C, o la variación fue menos de un grado como en el caso de octubre donde la temperatura fluctuó en todo el transecto de 27.1 °C a 27.35 °C. Para condiciones de invierno de 2006, el valor mínimo de temperatura fue 14.8 °C en marzo, en tanto que el máximo fue 27.7 °C en junio. En condiciones de verano la temperatura mínima fue 22.45 °C en noviembre y la máxima fue 31.3 °C en agosto.

De una manera similar al 2005, en invierno de 2006 en general la temperatura tendió a decrecer en la parte sur del transecto, mientras que en verano la variación espacial fue más irregular (Fig. 6).

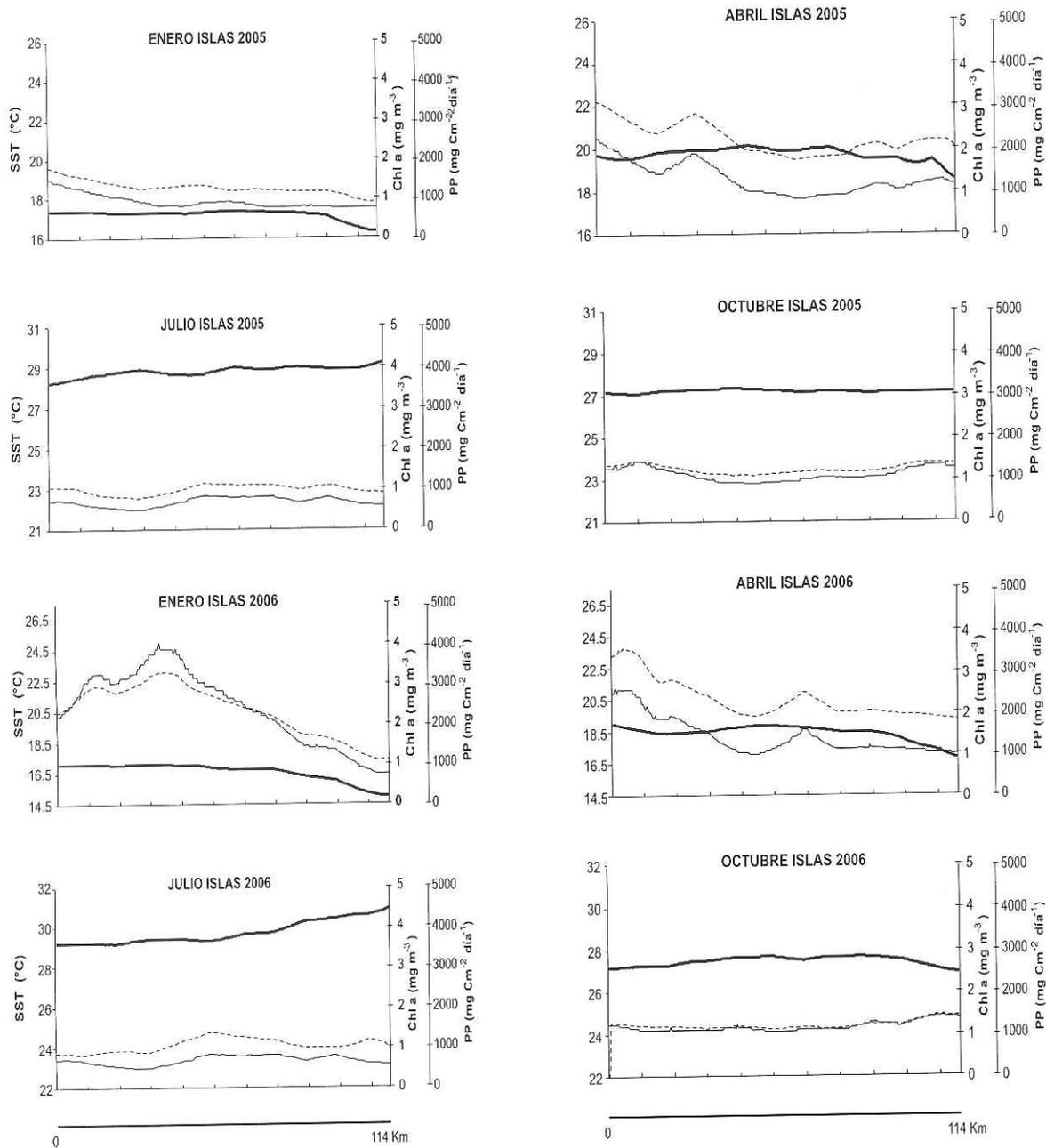


Figura 6. Distribución de la temperatura superficial, clorofila y productividad primaria para el transecto B para los años 2005 y 2006. Se muestran dos meses que ejemplifican el comportamiento general de las variables en "condiciones de invierno" y dos meses en "condiciones de verano". La línea negra representa la temperatura superficial, la línea gris representa la clorofila y la línea punteada la productividad primaria.

En 2005, la Chl de este transecto presentó los valores más bajos de este trabajo para ambos periodos, invierno y verano, con valores no mayores a 2.8 mg m^{-3} . Es importante también notar que su distribución espacial fue prácticamente homogénea en todo el transecto. El valor mínimo para las condiciones de invierno se encontró en febrero con 0.49 mg m^{-3} y el valor máximo en marzo con 2.78 mg m^{-3} . Con condiciones de verano el valor mínimo se presentó en julio con 0.47 mg m^{-3} y el valor máximo fue en octubre con 1.44 mg m^{-3} (Fig. 6). En condiciones de invierno de 2006, la Chl tuvo un valor mínimo de 0.62 mg m^{-3} en febrero y un máximo de 4.03 mg m^{-3} en enero. En condiciones de verano el valor mínimo fue 0.50 mg m^{-3} en julio y el máximo fue 1.45 mg m^{-3} en octubre (Fig. 6).

Con condiciones de invierno de 2005, el valor mínimo de productividad primaria fue $909 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en enero, y el valor más alto se presentó en mayo con $3576 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. En tanto que con condiciones de verano el valor mínimo se presentó en agosto con $535 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y el máximo en noviembre con $1617 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

Para las condiciones de invierno de 2006, el valor mínimo de productividad primaria fue $1056 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en febrero y el máximo fue $4223 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en mayo. Para condiciones de verano el mínimo fue $654 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en julio, y el máximo fue $2766 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en octubre (Fig. 6).

Temperatura, Chl a y Productividad Primaria en la cuenca San Pedro Mártir (transecto C)

En la mayoría de los meses de ambos años, la temperatura se incrementa de la parte occidental hacia la oriental del golfo. Para las condiciones de invierno de 2005, el valor mínimo de temperatura superficial se presentó en diciembre con 16.1 °C , y el valor máximo

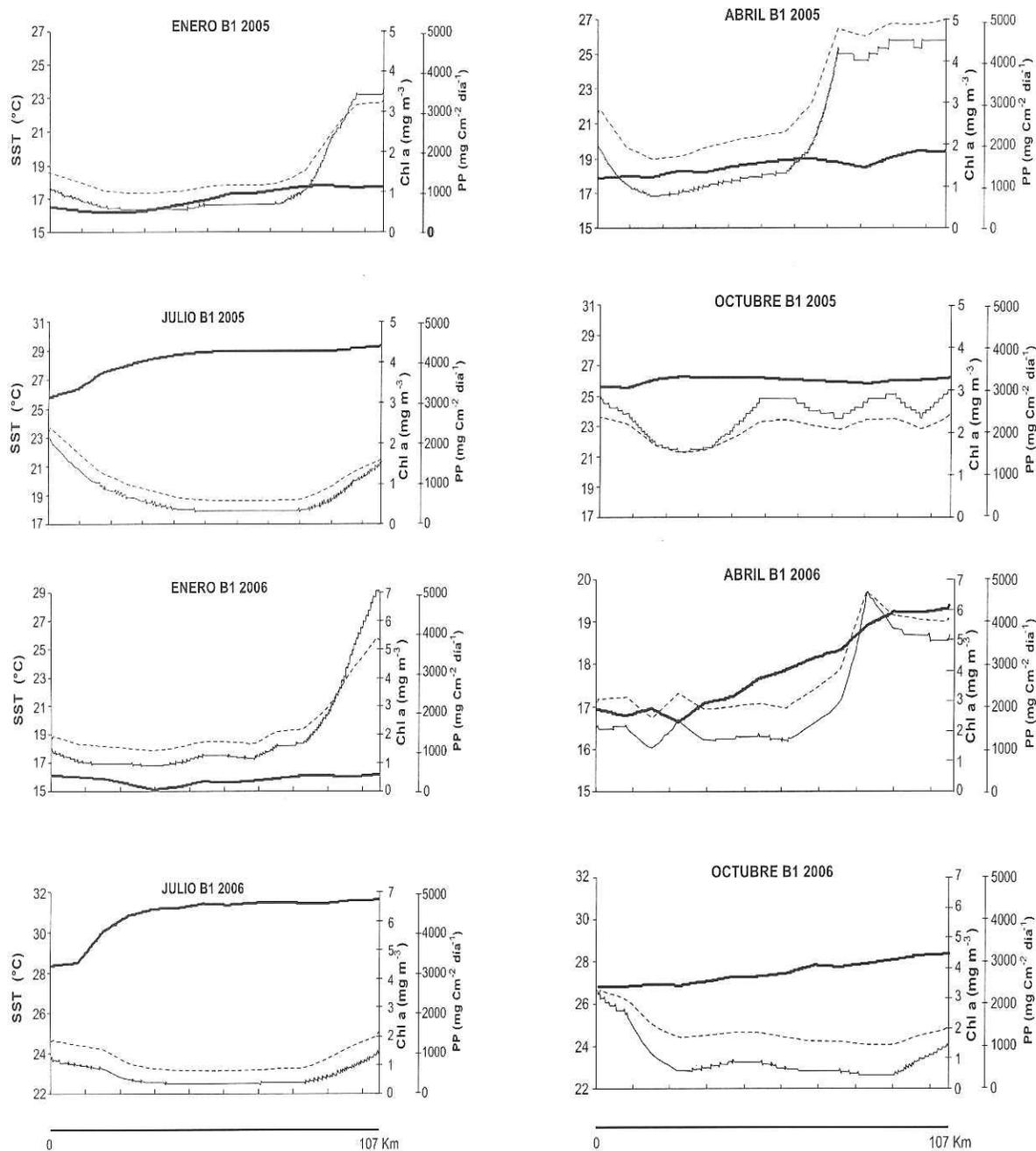


Figura 7. Distribución de la temperatura superficial, clorofila y productividad primaria para el transecto C para los años 2005 y 2006. Se muestran dos meses que ejemplifican el comportamiento general de las variables en "condiciones de invierno" y dos meses en "condiciones de verano". La línea negra representa la temperatura superficial, la línea gris representa la clorofila y la línea punteada la productividad primaria.

en junio con 27.75 °C. En condiciones de verano el mínimo se presentó en noviembre con 18.2 °C y el máximo en septiembre con 31.4 °C. Para condiciones de invierno de 2006, el valor mínimo fue 15.1 °C en enero y el máximo fue 28.7 °C para junio. En condiciones de verano la temperatura mínima fue 22.6 °C para noviembre y el máximo en agosto con 31.9 °C.

Para las concentraciones de clorofila *a* se observa que los valores más altos se encuentran en los extremos de los transectos, esto es cerca de la zona costera, teniendo presente que estos valores varían dependiendo del mes en el que se hayan tomado los datos. Así se tiene que para el año 2005, el valor mínimo para condiciones de invierno es de 0.47 mg m⁻³ en el mes de junio y el valor máximo es de 5.37 mg m⁻³ en abril. Para las condiciones de verano el valor mínimo se obtuvo en el mes de julio con 0.32 mg m⁻³ (Fig. 7) y un valor máximo en noviembre de 5.18 mg m⁻³.

En el año del 2006 se tiene que en condiciones de invierno el valor mínimo fue de 0.41 mg m⁻³ en junio y el valor máximo de 7.33 mg m⁻³ en enero. Para condiciones de verano se obtuvo un valor mínimo de 0.33 mg m⁻³ en julio y un máximo de 4.03 mg m⁻³ en octubre (Fig. 7).

Para la productividad primaria con condiciones de invierno de 2005, el valor mínimo se presentó en junio con 912 mgC m⁻² día⁻¹ y el máximo fue 5497 mgC m⁻² día⁻¹ y se presentó en abril. Con condiciones de verano el mínimo fue 598 mgC m⁻² día⁻¹ y se presentó en julio (Fig. 7) y el máximo fue 4201 mgC m⁻² día⁻¹ y se presentó en noviembre. Con condiciones de invierno de 2006, el mínimo fue 736 mgC m⁻² día⁻¹ en junio y el máximo fue 6108 mgC m⁻² día⁻¹ en abril. Con condiciones de verano el mínimo fue 605 mgC m⁻² día⁻¹ en julio y el máximo fue 2747 mgC m⁻² día⁻¹ en octubre (Fig. 7).

Comparación de las medias de T °C, Chl y PP de los extremos y el centro de los transectos A y C.

Las pruebas estadísticas muestran que las medias de T °C para el centro del transecto A son significativamente menores que las de los extremos sólo de mayo a septiembre de 2005 y de abril a septiembre de 2006. En el resto de los meses de ambos años, T °C fue significativamente mayor que uno o ambos de los dos extremos (Tabla I). La media de Chl para el centro del transecto A no fue significativamente menor que las de los dos extremos en ningún mes de ambos años. En todos los meses hubo diferencias significativas de la media del centro con las de uno o ambos extremos (Tabla II). La media de PP para el centro del transecto A sólo fue significativamente menor que las de los extremos en abril y mayo de 2006 (Tabla III).

La media de T °C del centro del transecto C no fue significativamente mayor que las de los extremos para ningún mes de 2005 y 2006 (Tabla IV). La media de Chl para el centro del transecto C fue significativamente menor que las de los extremos para todos los meses de 2005. Sin embargo, en 2006 esta situación prevaleció solamente de enero a marzo. Las medias mensuales de la parte oriental de este transecto generalmente fueron mayores que las del centro y la parte occidental. Pero los meses de junio y julio de 2005 y junio de 2006 mostraron las medias más altas en el extremo occidental. De mayo a diciembre los valores de la parte oriental cambiaron de menores a mayores, y viceversa, que las del centro (Tabla V). Las medias de PP mostraron una gran congruencia con las de Chl, presentando en general el mismo comportamiento (Tabla VI).

Tabla I. Medias mensuales y sus errores estándares de la temperatura superficial para las áreas norte, centro y sur de la parte del transecto A al norte del umbral de San Lorenzo (Fig. 4). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006.

CANAL	2005		2005		2005	
	NORTE		CENTRO		SUR	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	16.9	0.002	17.1	0.001	17.6	0.001
Febrero	16.8	0.005	17.1	0.002	17.2	0.004
Marzo	16.7	0.005	17.7	0.002	18.8	0.004
Abril	18.0	0.003	19.1	0.003	19.0	0.001
Mayo	22.8	0.003	21.7	0.001	22.2	0.004
Junio	25.1	0.008	24.5	0.008	26.1	0.002
Julio	28.5	0.005	27.5	0.006	29.4	0.001
Agosto	30.1	0.003	29.1	0.005	30.5	0.002
Septiembre	30.4	0.001	29.5	0.002	30.7	0.002
Octubre	26.4	0.006	26.7	0.004	27.0	0.003
Noviembre	21.7	0.003	22.0	0.004	22.3	0.005
Diciembre	18.3	0.004	18.3	0.005	18.1	0.002

CANAL	2006		2006		2006	
	NORTE		CENTRO		SUR	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	16.0	0.001	16.2	0.001	16.6	0.001
Febrero	15.4	0.008	15.8	0.001	17.3	0.003
Marzo	15.1	0.002	15.3	0.001	17.2	0.002
Abril	17.9	0.006	17.0	0.002	19.2	0.002
Mayo	20.9	0.020	19.6	0.009	23.5	0.004
Junio	26.9	0.007	25.8	0.014	27.4	0.002
Julio	29.3	0.003	28.8	0.005	30.6	0.001
Agosto	30.0	0.002	29.5	0.002	30.6	0.001
Septiembre	30.0	0.001	29.4	0.002	30.0	0.001
Octubre	26.0	0.003	26.6	0.002	27.6	0.004
Noviembre	23.2	0.003	23.2	0.003	24.2	0.001
Diciembre	19.4	0.008	19.4	0.009	19.2	0.006

Tabla II. Medias mensuales y sus errores estándares de la clorofila superficial para las áreas norte, centro y sur de la parte del transecto A al norte del umbral de San Lorenzo (Fig. 3). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006. Cuando aparecen valores de 0.00 para el error estándar es que es < 0.005 .

CANAL	2005		2005		2005	
	NORTE		CENTRO		SUR	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	1.18	0.01	1.23	0.00	0.63	0.00
Febrero	0.72	0.00	1.06	0.00	0.72	0.00
Marzo	1.34	0.02	1.37	0.00	1.15	0.00
Abril	1.33	0.01	1.25	0.00	1.08	0.00
Mayo	3.63	0.04	3.20	0.01	1.54	0.01
Junio	1.96	0.02	2.67	0.00	2.02	0.01
Julio	1.34	0.02	1.29	0.00	1.08	0.01
Agosto	0.88	0.02	1.02	0.00	0.96	0.00
Septiembre	0.89	0.01	1.06	0.00	1.28	0.00
Octubre	3.53	0.03	2.81	0.01	2.06	0.01
Noviembre	1.03	0.00	1.34	0.00	1.37	0.00
Diciembre	2.08	0.02	2.67	0.01	1.56	0.00

CANAL	2006		2006		2006	
	NORTE		CENTRO		SUR	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	0.88	0.00	1.51	0.00	0.96	0.00
Febrero	0.96	0.00	1.04	0.00	0.82	0.00
Marzo	1.47	0.01	1.29	0.01	1.22	0.00
Abril	1.69	0.01	1.54	0.01	1.47	0.00
Mayo	3.06	0.02	2.93	0.01	1.24	0.00
Junio	1.34	0.01	3.88	0.01	1.63	0.01
Julio	1.89	0.02	1.50	0.00	0.81	0.00
Agosto	0.93	0.01	1.40	0.00	1.27	0.00
Septiembre	0.93	0.01	1.13	0.00	1.34	0.04
Octubre	1.60	0.01	1.91	0.01	2.54	0.01
Noviembre	1.20	0.01	1.58	0.00	1.36	0.00
Diciembre	0.85	0.00	0.93	0.00	0.86	0.00

Tabla III. Medias mensuales y sus errores estándares de la productividad primaria integrada para las áreas norte, centro y sur de la parte del transecto A, al norte del umbral de San Lorenzo (Fig. 4). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006.

CANAL	2005		2005		2005	
	NORTE		CENTRO		SUR	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	1518	4	1603	1	1595	3
Febrero	1138	3	1364	1	1760	4
Marzo	1450	6	2033	1	2187	4
Abril	1838	5	2464	1	2199	4
Mayo	3405	8	3818	6	4037	5
Junio	2091	6	2960	6	3345	4
Julio	1159	4	1466	2	1516	2
Agosto	713	2	1153	1	1175	2
Septiembre	739	3	1145	1	1145	1
Octubre	2012	6	2469	2	2449	3
Noviembre	1483	2	1805	2	1780	4
Diciembre	1805	5	2560	2	2663	5

CANAL	2006		2006		2006	
	NORTE		CENTRO		SUR	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	1252	3	1391	1	1631	2
Febrero	1226	3	1520	1	1554	27
Marzo	1437	8	2618	8	1880	3
Abril	2166	7	2124	3	2462	6
Mayo	3447	11	3001	5	3888	7
Junio	1377	6	1963	4	3794	4
Julio	1601	6	1881	2	1618	2
Agosto	868	2	1027	1	1403	2
Septiembre	1761	5	2052	2	1835	5
Octubre	1761	5	2052	2	1835	5
Noviembre	1480	4	1913	3	1858	3
Diciembre	1704	4	1470	1	1552	4

Tabla IV. Medias mensuales y sus errores estándares de la temperatura superficial para las áreas occidental, central y oriental del transecto C (Fig. 4). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006.

BI	2005		2005		2005	
	OESTE		CENTRO		ESTE	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	16.6	0.003	17.2	0.003	18.0	0.001
Febrero	16.5	0.002	17.5	0.005	18.8	0.001
Marzo	17.3	0.003	17.2	0.003	19.8	0.006
Abril	18.3	0.004	19.1	0.002	20.2	0.008
Mayo	19.3	0.014	23.6	0.004	23.8	0.008
Junio	24.0	0.001	27.0	0.002	28.0	0.004
Julio	24.6	0.004	29.8	0.001	30.3	0.005
Agosto	28.5	0.002	30.7	0.002	31.4	0.003
Septiembre	29.2	0.002	30.2	0.004	30.2	0.004
Octubre	26.2	0.001	26.8	0.001	27.1	0.003
Noviembre	21.9	0.002	20.2	0.009	21.3	0.006
Diciembre	18.5	0.005	16.3	0.002	16.8	0.002

BI	2006		2006		2006	
	OESTE		CENTRO		ESTE	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	16.1	0.001	15.8	0.002	16.3	0.001
Febrero	16.0	0.004	16.2	0.004	17.4	0.003
Marzo	15.4	0.003	16.0	0.005	18.0	0.004
Abril	16.9	0.002	17.7	0.003	19.6	0.009
Mayo	19.4	0.009	22.5	0.005	24.2	0.007
Junio	25.6	0.011	28.1	0.003	28.6	0.002
Julio	28.3	0.005	31.4	0.001	31.7	0.003
Agosto	29.3	0.003	31.0	0.002	31.9	0.002
Septiembre	29.1	0.002	30.4	0.001	30.6	0.001
Octubre	26.8	0.001	27.3	0.001	28.3	0.001
Noviembre	23.3	0.001	23.3	0.002	22.3	0.008
Diciembre	20.5	0.006	18.3	0.003	17.7	0.003

Tabla V. Medias mensuales y sus errores estándares de la clorofila superficial para las áreas occidental, central y oriental del transecto C (Fig. 3). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006. Cuando los errores estándares son 0.00 es que los valores son <0.005 .

BI	2005		2005		2005	
	OESTE		CENTRO		ESTE	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	1.04	0.00	0.66	0.00	3.97	0.01
Febrero	1.15	0.00	0.85	0.00	2.80	0.01
Marzo	1.75	0.01	1.65	0.00	3.97	0.01
Abril	2.12	0.01	1.50	0.00	6.04	0.01
Mayo	3.92	0.01	1.44	0.00	4.00	0.00
Junio	3.82	0.01	0.48	0.00	2.05	0.01
Julio	2.14	0.01	0.33	0.00	1.79	0.01
Agosto	1.42	0.00	0.54	0.00	1.76	0.02
Septiembre	1.32	0.00	1.22	0.00	1.58	0.01
Octubre	2.81	0.01	2.63	0.00	3.51	0.01
Noviembre	1.84	0.01	1.47	0.00	5.84	0.01
Diciembre	2.53	0.01	0.89	0.00	5.00	0.01

BI	2006		2006		2006	
	OESTE		CENTRO		ESTE	
	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD	MEDIA	ERROR STD
Enero	3.04	0.01	1.22	0.00	6.57	0.01
Febrero	1.27	0.00	1.20	0.00	5.49	0.02
Marzo	1.06	0.01	1.04	0.00	5.35	0.02
Abril	1.66	0.00	1.69	0.00	6.34	0.02
Mayo	2.00	0.01	2.03	0.00	3.07	0.01
Junio	0.78	0.02	0.48	0.00	1.37	0.01
Julio	0.45	0.04	0.34	0.00	1.85	0.01
Agosto	0.39	0.00	0.55	0.00	1.96	0.02
Septiembre	0.77	0.01	0.68	0.00	2.09	0.01
Octubre	1.17	0.02	1.57	0.00	2.81	0.01
Noviembre	0.99	0.01	1.63	0.00	2.85	0.01
Diciembre	1.15	0.00	0.84	0.00	3.50	0.01

Tabla VI. Medias mensuales y sus errores estándares de la productividad primaria integrada para las áreas occidental, central y oriental del transecto C (Fig. 4). La parte superior corresponde a 2005 y la inferior a 2006.

BI	2005		2005		2005	
	OESTE MEDIA	ERROR STD	CENTRO MEDIA	ERROR STD	ESTE MEDIA	ERROR STD
Enero	1416	3	1099	1	3375	3
Febrero	1548	1	1416	1	3001	5
Marzo	2359	4	2285	2	4148	4
Abril	2977	9	2419	1	5728	5
Mayo	4679	6	2263	1	4223	3
Junio	3643	11	918	0	2124	4
Julio	2404	5	601	0	1827	8
Agosto	1468	1	816	2	1757	11
Septiembre	1293	1	1253	2	1528	7
Octubre	2365	2	2180	2	2547	3
Noviembre	2120	3	1938	3	4493	5
Diciembre	2512	7	1260	1	3668	2

BI	2006		2006		2006	
	OESTE MEDIA	ERROR STD	CENTRO MEDIA	ERROR STD	ESTE MEDIA	ERROR STD
Enero	1641	3	1487	1	4390	5
Febrero	1377	1	1648	3	4453	9
Marzo	2391	6	1621	1	4877	11
Abril	2703	10	2562	3	5731	7
Mayo	2761	10	2969	2	3558	7
Junio	3982	9	844	1	1566	5
Julio	1448	2	614	0	1864	8
Agosto	1491	2	817	0	1864	9
Septiembre	1745	5	880	1	1770	7
Octubre	2946	8	1512	2	1994	6
Noviembre	2395	3	1874	3	2623	4
Diciembre	2403	6	1149	1	2557	1

IV. Discusión

Desde el primer crucero del *E. W. Scripps* al Golfo de California en febrero-marzo de 1939, se reconoció que la hidrografía de la región de las Grandes Islas tiene características oceanográficas únicas (Sverdrup, 1941). Las temperaturas superficiales más bajas (Robinson, 1973) y los nutrientes y TCO₂ más altos (Alvarez-Borrego *et al.*, 1978; Hidalgo-González *et al.*, 1997) de todo el golfo se encuentran persistentemente en esta región. Esto produce el que esta región tenga alta biomasa y productividad fitoplanctónica similares a las de zonas de surgencias costeras.

Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004) estimaron promedios de los valores de Chl superficial con condiciones de invierno, por medio de sensores remotos, para toda la región de las Grandes Islas de 0.45 a 0.83 mg m⁻³ (para los años 1997-2002). Estos últimos autores utilizaron el modelo no-espectral con distribución vertical no homogénea de biomasa fitoplanctónica de Platt *et al.* (1991) para estimar PP. En este estudio, en el transecto A el mínimo de Chl fue 0.63 y el máximo 3.88 mg m⁻³, y en el transecto B el mínimo fue 0.30 mg m⁻³ y el máximo 3.04 mg m⁻³. En sentido estricto, los valores de este trabajo no son comparables con los de Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004), porque ellos calcularon sus medias de Chl para toda el área de la región de las Grandes Islas y para las condiciones de invierno. Los valores de Chl de enero a febrero (y en algunos casos hasta marzo), de los transectos A y B, son relativamente bajos (a menudo <1.0). Lo mismo pasó con los valores de Chl de julio y agosto (en algunos casos desde junio y en otros hasta septiembre). Estos valores relativamente bajos se deben a la alta turbulencia en invierno y a la alta estratificación en verano. Con condiciones intermedias de marzo a junio y de octubre

diciembre, la biomasa fitoplanctónica es mayor. Esto es similar al efecto del florecimiento de primavera del Atlántico Norte, como fue explicado por Sverdrup (1953). La turbulencia intermedia de las Grandes Islas que se presenta de marzo a junio y de octubre a diciembre permitió un florecimiento del fitoplancton que aumenta Chl de ~ 1.0 hasta $>4 \text{ mg m}^{-3}$.

El rango de la producción integrada que obtuvieron Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004) fue de 1.45 a $1.73 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Mientras que en este trabajo el rango fue de 0.54 a $4.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. De nuevo, en este estudio el rango es más amplio porque los valores están más detallados espacial y temporalmente. Las comparaciones entre los valores obtenidos con base en imágenes de satélite y aquellos que son obtenidos *in situ* como los del método del ^{14}C son un tanto inapropiadas de hacer, ya que las características de escalas de espacio y tiempo en las que son realizadas son muy diferentes. Sin embargo, es interesante comparar ambos tipos de datos.

Alvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) reportaron 12 valores de producción derivados de ^{14}C con un promedio de $2.1 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, que es mayor que el máximo del rango de Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004) pero dentro del rango de este estudio. Millán-Núñez *et al.* (1993) reportaron valores de producción integrada por el método del ^{14}C para cinco localidades, con un promedio de $1.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ el cual está dentro del rango de Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004) para las condiciones de invierno. Por todo lo anterior, se puede concluir que los valores reportados en este trabajo se comparan razonablemente con los generados mediante imágenes de satélite y con otros modelos y con los generados con el método tradicional de ^{14}C , pero los datos de este trabajo tienen información mucho más detallada espacial y temporalmente.

La variabilidad de los valores que se encontraron en el transecto del canal (A) puede deberse a que esta zona tiene alta turbulencia durante todo el año, además de que las corrientes de marea son muy fuertes. López *et al.* (2006) sugirieron la existencia de un flujo superficial divergente en el canal lo cual podría provocar que las aguas del centro del canal fueran más frías. Por otro lado, Martínez-Díaz-de-León *et al.* (2006) señalaron que en el Canal de Ballenas las variaciones espaciales de la temperatura superficial son mínimas (<0.5 °C). Con los resultados mostrados en este trabajo, los valores más bajos de temperatura se presentaron en el centro del transecto para los meses de mayo a septiembre en 2005 y de abril a septiembre en 2006. La distribución espacial y temporal de T °C fue casi homogénea en la mayoría de los meses, en tanto que la clorofila no muestra ser más baja en el centro que en los extremos, sino que los valores están entre medio o más altos que en los extremos. Por lo anterior, si en efecto existe una divergencia superficial que pudiera actuar como barrera al flujo de materiales en suspensión y en solución, ésta se presenta sólo en ciertos periodos y los datos de este trabajo muestran que esto es principalmente en verano. En el resto del año, la falta de transporte neto en una dirección u otra dentro del Canal de Ballenas también podría ser una barrera al flujo de materiales.

Con estas comparaciones se puede decir que los datos obtenidos en este trabajo no apoyan completamente los resultados de López *et al.* (2006) o de Martínez-Díaz-de-León *et al.* (2006), sino que muestran que en diferentes épocas del año se puede dar una situación o la otra. Por ejemplo, López *et al.* (2006) colectaron datos hidrográficos en un crucero de marzo de 2002, con los cuales construyeron una figura mostrando la distribución espacial de la densidad en la Canal de Ballenas y en la Cuenca Delfin. Esta figura muestra que la más alta densidad superficial (que corresponde a la más baja temperatura) se presentó sobre

el umbral que separa al Canal de Ballenas de la Cuenca Delfín. Esto puede deberse a que el umbral provoca una mayor turbulencia con el paso de las corrientes de marea. En este estudio se encontró que de enero a marzo de 2005 y 2006, en el Canal de Ballenas la temperatura promedio más baja se presentó precisamente en el norte, sobre el umbral mencionado (Tabla I). No hay que perder de vista que esta zona es considerada como una de las más productivas en el golfo y se puede explicar con los valores que se encontraron de productividad primaria elevada, por lo que ambos fenómenos físicos (posible divergencia de circulación superficial y mezcla intensa por fenómenos asociados a las mareas) pueden ser responsables de esta fertilidad.

En la zona entre las Grandes Islas (transecto B), generalmente se presentaron gradientes espaciales débiles con relativamente poca variación de temperatura, Chl y PP a lo largo del transecto. Esto puede deberse a que es en esta zona donde se da una circulación fuerte (Marinone, 2003), con poco tiempo de residencia para el fitoplancton.

En la zona de la cuenca San Pedro Mártir, los valores más altos que se encontraron de todas las variables, fueron en general los que se obtuvieron cerca de la zona costera oriental. Estos valores altos (hasta $>5 \text{ mg m}^{-3}$ para Chl y hasta $>5000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para la PP) pueden deberse a las surgencias que se dan en condiciones de invierno sobre todo en la parte oriental por los vientos del noroeste, en tanto que los valores disminuyen en verano por los vientos del sureste causando la entrada al golfo del Agua Ecuatorial del Pacífico Oriental, más caliente y oligotrófica.

Con relación a la hipótesis de un posible giro anticiclónico en la cuenca San Pedro Mártir, adyacente a la parte sur del Canal de Ballenas, propuesto por Mateos *et al.* (2006), los resultados de este trabajo indican que este giro no es permanente. Posiblemente se

Con relación a la hipótesis de un posible giro anticiclónico en la cuenca San Pedro Mártir, adyacente a la parte sur del Canal de Ballenas, propuesto por Mateos *et al.* (2006), los resultados de este trabajo indican que este giro no es permanente. Posiblemente se presentó como tal durante todo el año 2005 ya que Chl fue menor en el centro del transecto C que en los extremos occidental y oriental. Por el efecto de Coriolis, los giros ciclónicos del hemisferio norte tienen surgencia en el centro por lo que tienden a tener más alta biomasa fitoplanctónica en el centro. Un ejemplo muy claro de esto es el domo de Costa Rica (Lluch-Cota *et al.*, 1997). Y los giros anticiclónicos tienen un efecto contrario, por lo que se espera que tengan más bajas Chl en el centro. Pegau *et al.* (2002) indicaron que para verano es muy difícil detectar estos giros con imágenes de satélite al infrarrojo porque los gradientes de temperatura son muy débiles en verano, pero ellos pudieron detectar giros de verano con imágenes de satélite de color del océano. El giro de Pegau *et al.* (2002) de la cuenca San Pedro Mártir (que fue detectado con imágenes de los primeros siete días de agosto de 1999) es ciclónico, contrario al propuesto por Mateos *et al.* (2006). Los resultados de este trabajo muestran que este giro se puede revertir en periodos tan cortos como un mes. En la mayoría de los casos de este trabajo, el giro fue anticiclónico, como durante todos los meses de 2005 y de enero a marzo de 2006. Esto explica por qué con el promedio de 15 cruceros de 1939 a 1996, Mateos *et al.* (2006) concluyeron que el giro es anticiclónico. Si realmente es anticiclónico la mayor parte del tiempo, representa una barrera física al flujo de materiales en suspensión y en solución a lo largo de la costa occidental de golfo inmediatamente al sur del Canal de Ballenas.

V. Conclusiones

- Los valores de clorofila y productividad primaria reportados en este estudio se comportan dentro de los rangos de los generados con otros modelos y con el método tradicional del ^{14}C , de acuerdo con los reportes de la literatura.
- Los datos de este trabajo indican que la posible existencia del flujo divergente en el Canal de Ballenas ocurre principalmente en “condiciones de verano” (julio-noviembre), lo cual implicaría una barrera física al flujo de materiales en solución y en suspensión. En el resto del año, aún sin el flujo divergente, el transporte neto débil, en una dirección u otra, podría ser también una barrera al flujo de materiales disueltos o en suspensión.
- Los datos de este trabajo indican que el giro en la cuenca San Pedro Mártir no es permanente y en ciertos periodos puede ser ciclónico o anticiclónico. Los datos indican que los giros anticiclónicos se presentan la mayor parte del tiempo, sobre todo en verano.
- En la región de las Grandes Islas, la estratificación y la turbulencia extremas disminuyen la biomasa fitoplanctónica. La turbulencia más fuerte se presentó en diciembre, enero y febrero; y la estratificación más fuerte se presentó en julio, agosto y septiembre. En los meses intermedios, la turbulencia intermedia propició biomasa fitoplanctónicas elevadas, particularmente en abril y mayo.

VII. Literatura citada

- Alvarez-Borrego, S., J. A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M. J. Acosta-Ruíz y R. A. Schwartzlose. 1978. "Nutrientes en el Golfo de California". *Ciencias Marinas*. 5: 21-36 p.
- Alvarez-Borrego, S. y J. R. Lara-Lara. 1991. "The physical environment and primary productivity of the Gulf of California". In J. P. Dauphin and B. R. Simoneit (eds.). *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. AAPG, Memoir 47, Tulsa. 555-567 p.
- Alvarez-Borrego, S. 2007a. "Oceanography of the Gulf of California". En: R. Brusca (ed). *Gulf of California*. University of Arizona Press, Tucson. En prensa.
- Alvarez-Borrego, S. 2007b. "Oceanography of the midriff island region". En: E. Ezcurra y G. Danemann (eds). *Bahía de los Ángeles: Recursos naturales y comunidad*. Instituto Nacional de Ecología y PRONATURA, Ensenada. En prensa.
- Alvarez-Sánchez, L. G., A. Badán-Dangon y J. M. Robles. 1984. "Lagrangian observations of near-surface currents in Canal de Ballenas". *CalCOFI Reports*. 25: 35-42 p.
- Argote, M. L., A. Amador, M. F. Lavín y J. R. Hunter. 1995. "Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California". *Journal of Geophysical Research*, 100: 16103-16118 p.
- Badán-Dangon, A., C. J. Koblinsky y T. Baumgartner. 1985. "Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns". *Acta Oceanologica* 8 (1): 13-22 p.
- Badán-Dangon, A., C. E. Dorman, M. A. Merrifield y C. D. Winant. 1991. "The lower atmosphere over the Gulf of California." *Journal of Geophysical Research*, 96: 16877-16896 p.
- Beier, E., P. Ripa. 1999. "Seasonal gyres in the northern Gulf of California". *Journal of Physic Oceanography*. 29: 305-311 p.

- Behrenfeld, M. J. y P. G. Falkowski. 1997. "Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration". *Limnology and Oceanography*, 42: 1-20 p.
- Bray, N. 1988. "Water mass formation in the Gulf of California". *Journal of Geophysical Research*. 93: 9223-9240 p.
- Ezcurra, E., L. Bourillón, A. Cantú, M. Elena y A. Robles. 2002. "Ecological conservation". En: T. Case, M. Cody and E. Ezcurra (eds). *A new island biogeography in the Sea of Cortés*. Oxford Univ. Press, Oxford. 417-444 p.
- Gaxiola-Castro, G., S. Alvarez-Borrego, M. F. Lavín, A. Zirino y S. Nájera-Martínez. 1999. "Spatial variability of the photosynthetic parameters and biomass of the Gulf of California phytoplankton". *Journal of Plankton Research*. 21: 231-245 p.
- Hastings, P. A. 1998. "Biogeography of the tropical eastern Pacific: distribution and phylogeny of chaenopsid fishes". *Zoological Journal of Linnean Society*. 128: 319-335 p.
- Hidalgo-González, R. M. y S. Alvarez-Borrego. 2004. "Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS". *Deep-Sea Research II*. 51: 739-752 p.
- Kahru, M., S. G. Marinone, S. E. Lluch-Cota, A. Parés-Sierra y B. G. Mitchell. 2004. "Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO". *Deep-Sea Research II*. 51: 139-146 p.
- Lavín, M. F. y S. Organista. 1988. "Surface heat flux in the northern Gulf of California". *Journal of Geophysical Research*. 93: 14,033-14,038 p.
- Lavín, M. F., E. Beier y A. Badán. 1997. "Estructura hidrográfica y circulación en el Golfo de California: Escalas estacional y anual. En: M. F. Lavín (ed). *Contribuciones a la oceanografía física en México*. Unión Geofísica Mexicana. Ensenada, Baja California, México. Monografía, 3: 245-267 p.

- Lavín, M. F y S. G. Marinone. 2003. "Residual flow and mixing in the large islands region of the central Gulf of California. En: O. U. Velasco Fuentes, J. Sheinbaum and J. Ochoa (eds.). *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 365-371 p.
- López, M., J. Candela y M. L. Argote. 2006. "Origen y circulación del agua profunda en el norte del Golfo de California". *Reunión Anual de la Unión de Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Geos. 25 (1): 136 p.*
- Lluch-Cota, S. E., S. Alvarez-Borrego, E. M. Santamaría-del-Ángel, F. E. Muller-Karger, y S. Hernández-Vazquez. 1997. "The Gulf of Tehuantepec and adjacent areas: spatial and temporal variation of satellite derived photosynthetic pigments." *Ciencias Marinas. 23: 329-340 p.*
- Lluch-Cota, S. E. 2000. "Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Acta Oceanológica. 23: 731-740 p.*
- Marinone, S. G. 2003. "A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California". *Journal of Geophysical Research (Ocean). 108 (C10), 3325* doi: 10.1029/2002JC001720.
- Martínez-Díaz-de León, A., I. Pacheco-Ruíz, F. Delgadillo-Hinojosa, J. A. Zertuche-González, A. Chee-Barragán, R. Blanco-Betancourt, J. M. Guzmán-Calderón y A. Gálvez-Telles. 2006. "Spatial and temporal variability of the sea surface in the Ballena-Salsipuedes Channel (central Gulf of California)". *Journal of Geophysical Research. 3: C02008*, doi: 10.1029/2005JC002940.
- Mateos, E., S. G. Marinone, y M. F. Lavín. 2006. "Role of tides and mixing in the formation of an anticyclonic gyre in San Pedro Mártir Basin, Gulf of California." *Deep-Sea Research II. 53: 60-76 p.*
- Millán-Núñez, R., R. Cajal-Medrano, E. Santamaría-del-Ángel, y E. Millán-Núñez. 1993. "Primary productivity and chlorophyll *a* in the central part of the Gulf of California (Autumn 1987)". *Ciencias Marinas. 19: 29-40 p.*

- Millán-Núñez, E. y C. M. Yentsch. 2000. "El Canal de Ballenas, Baja California, como ambiente favorable para el desarrollo de fitoplancton". *Hidrobiológica*. 10: 91-100 p.
- Murphy, R. W. y G. Aguirre-León. 2002. "Nonavian reptiles: origins and evolution. En: T. Case, M. Cody y E. Ezcurra (eds). *A New Island Biogeography in the Sea of Cortez*. Oxford Univ. Press. Oxford, U. K. 181-220 p.
- Paden, C. A., M. R. Abbott y C. D. Winant. 1991. "Tidal and atmospheric forcing on the upper ocean in the Gulf of California 1. Sea surface temperature variability". *Journal of Geophysic Research*. 96: 18 337-18 359 p.
- Pegau, W. S., E. Boss y A. Martínez. 2002. "Ocean color observation of eddies during the summer in the Gulf of California". *Geophysical Research Letters*. 29 (9): 10.1029/2001GL014076.
- Riginos, C. y W. Nachman. 2001. "Population subdivisión in marine environments: the contributions of biogeography, geographical distance and discontinuous habitat to genetic differentiation in a blennioid fish, *Axoclinus nigricaudus*". *Molecular Ecology*. 10: 1439-1453 p.
- Riginos, C. 2005. "Cryptic vicariance in Gulf of California mammals and reptiles". *Evolution*. 59: 2678-2690 p.
- Robinson, M. K.: 1973. "Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperatures in the Gulf of California, Mexico". San Diego Society of Natural History. *Memoir* 5, 97 p.
- Santamaría-Del-Ángel, E., S. Alvarez-Borrego y F. E. Muller-Karger. 1994. "Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color sanner imagery". *Journal of Geophysical Research*. 99: 7411-7421 p.
- Simpson, J. H., A. J. Souza and M. F. Lavín. 1994. "Tidal mixing in the Gulf of California". In: Beven, K. J., P. C. Chatwin, and J. H. Millbank (eds.). *Mixing and Transport in the Environment*, John Wiley & Sons, London. 169-182 p.

- Soto-Mardones, L., S. G. Marinone y A. Parés-Sierra. 1999. "Time and spatial variability of sea surface temperature in the Gulf of California". *Ciencias Marinas*. 25: 1-30 pp.
- Sponaugle, S., R. K. Cowen, A. Shanks, S. G. Morgan, J. M. Leis, J. Pineda, G. W. Boehlert, M. J. Kingsford, K. C. Lindeman, C. Grimes and J. L. Munro. 2002. "Predicting self-recruitment in marine populations: biophysical correlates and mechanisms". *Bull. Mar.Sci.* 70, Supplement : 341-375 p.
- Sverdrup, H. U. 1941. "The Gulf of California: preliminary discussion on the cruise of the E. W. Scripps in February and March 1939". 6th Pacific Science Congress Procedures. 3: 161-166 p.
- Thershy, B.R., D. Breese and S. Alvarez-Borrego. 1991. "Increase in cetacean and seabird numbers in the Canal de Ballenas during an El Niño-Southern Oscillation event". *Marine Ecology Progress Series*. 69: 299-302 p.
- Thompson, D. A., L. T. Findley y A. N. Kerstich. 2000. "Reef fishes in the Mar of Cortez". The University of Texas Press. Austin Tx. 368 p.
- Thompson, D. A. y M. R. Gilligan. 2002. "The rocky-shore fishes". En: T. Case, M. Cody and E. Ezcurra (eds). *A new island biogeography in the Sea of Cortés*. Oxford Univ. Press, Oxford. 247-259 p.
- Valdés-Holguín, J. E. y R. Lara-Lara. 1987. "Primary productivity in the Gulf of California: effects of El 1982-1983 event". *Ciencias Marinas*. 13: 34-50 p.
- Walker, B., W. 1960. "The distribution and affinities of the marine fish fauna of the Gulf of California". *Systematic Zoology*. 9 (3-4): 123-133 p.
- Zeitzschel, B. 1969. "Primary productivity in the Gulf of California". *Marine Biology*. 3:201-207 pp.

