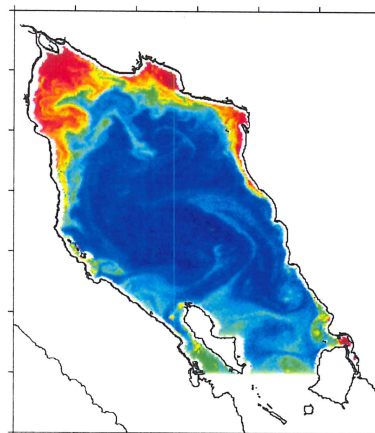
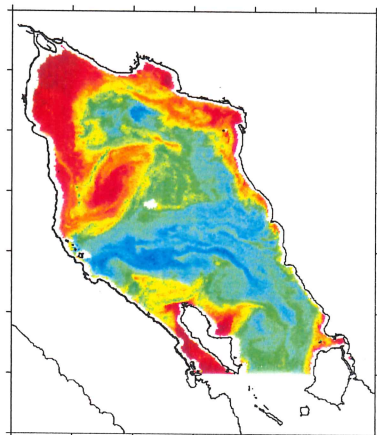




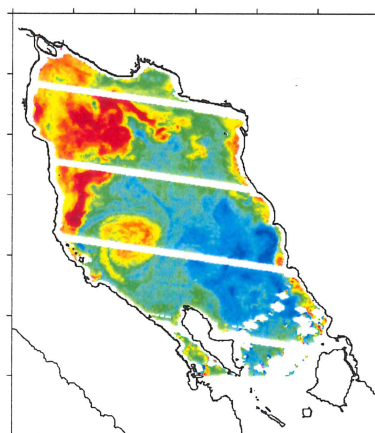
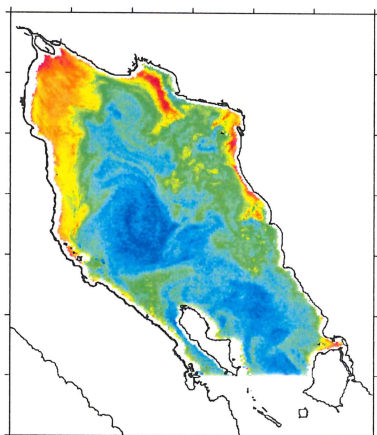
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA



**Variabilidad anual e interanual de la clorofila-a  
(SeaWiFS) y el viento superficial (QuikSCAT) en el Alto  
Golfo de California: su circulación y asociación**



TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN CIENCIAS**  
PRESENTA:  
JORGE MANUEL LÓPEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**Variabilidad anual e interanual de la clorofila-a (SeaWiFS) y  
el viento superficial (QuikSCAT) en el Alto Golfo de  
California: su circulación y asociación**

TESIS QUE PRESENTA:  
JORGE MANUEL LÓPEZ CALDERÓN


APROBADA POR:



DR. EDUARDO SANTAMARÍA DEL ÁNGEL  
DIRECTOR



DR. ANTONIO MARTÍNEZ ALCALÁ  
SINODAL



DR. ADRIANA GONZÁLEZ SILVERA  
SINODAL



DR. ROBERTO MILLÁN NÚÑEZ  
SINODAL

Para:

mi hermana Eva que es la otra mitad de mi corazón.

mi mamá, el faro que me mantiene en curso.

mi papá, el arquitecto de mi vida.

*Der Himmel ist nicht mehr grau, sondern wieder blau.*

### Slow Dance

Have you ever watched kids On a merry-go-round? Or listened to the rain Slapping on the ground? Ever followed a butterfly's erratic flight? Or gazed at the sun into the fading night? You better slow down. Don't dance so fast. Time is short. The music won't last.	Ever told your child, We'll do it tomorrow? And in your haste, Not see his sorrow? Ever lost touch, Let a good friendship die 'Cause you never had time To call and say "Hi"? You'd better slow down. Don't dance so fast. Time is short. The music won't last.
Do you run through each day On the fly? When you ask "How are you?" Do you hear the reply? When the day is done, Do you lie in your bed With the next hundred chores Running through your head? You'd better slow down. Don't dance so fast. Time is short. The music won't last.	When you run so fast to get somewhere You miss half the fun of getting there. When you worry and hurry through your day, It is like an unopened gift... Thrown away. Life is not a race. Do take it slower Hear the music Before the song is over.

---

David.L. Weatherford

A la memoria de Armando Rodríguez Pinal  
1946-2004



## Agradecimientos

A Toño Martínez por todas sus correcciones y sugerencias que me han servido de mucho, no sólo para la tesis sino para mi vida profesional.

Muy en especial para las secretarias de la Facultad de Ciencias Marinas: Angélica Arce y Lorena Cabadas, por la paciencia que siempre han tenido conmigo y con toda la bola de trámites con los que las abrumo... ¡GRACIAS!

A Eduardo Santamaría por aceptarme como estudiante, por prestarme su máquina para procesar mis imágenes y por apoyarme a través de los proyectos UABC-310 y UABC-322.

Al Capitán, ahora Ph.D. Flais, por estos ocho años de amistad, por las invaluable horas de juego en el Billar California y por toda su ayuda durante estos tres años de la Maestría. Y a la banda de La Paz que permanece (algunos de manera intermitente) en Ensenada: Armando Jaramillo, Edna Sánchez, Ernesto Vázquez, Guillermo Fernández, Andrés López y Felipe Becerril.

A los camaradas Diego De Dios y Erick Rivera, imponderables compañeros y amigos desde el inicio de la licenciatura, tiempo en el cual hemos compartido instantes felices y amargos.

A Román Lizárraga por sus consejos y por todo lo que he aprendido de él en mi estancia en Ensenada. Al *jefe* Eduardo Gil por todas las extraordinarias salidas de campo a Rosarito, B.C. (1999-2004). A Víctor Camacho por su excelente curso de Oceanografía Química y por todo lo que aprendí de él dentro y fuera del aula.

A todos los profesores y compañeros del curso "Luz y Fotosíntesis" en Puerto Morelos, Quintana Roo: Ania Banaszak, Susana Enríquez, Roberto Iglesias, Helmut Maske, Ernesto García, Lizette Quan, Sashenka Fierro, Nadine Schubert, Lyz Legaria y José Luis Peña.

Y en particular a CONACyT por haber financiado mi posgrado a través de la beca 171076.

# Variabilidad anual e interanual de la clorofila-*a* (SeaWiFS) y el viento superficial (QuikSCAT) en el Alto Golfo de California: su circulación y asociación

## Resumen

El Golfo de California (GC) es un mar que se distingue por presentar una ganancia anual neta de calor de la atmósfera, una gran biodiversidad, especies endémicas (algunas en peligro de extinción) e importantes pesquerías. Lo anterior justifica aún más la necesidad de tener un mejor conocimiento de procesos como su circulación, oceánica y atmosférica, y la relación que tienen con los elementos biológicos de la región. De acuerdo con trabajos anteriores la sucesión de un centro de alta y baja presión sobre el GC genera un patrón de viento anual homogéneo hacia el Sureste (invierno) y hacia el Noroeste (verano), que es reforzado por el efecto de embudo de la orografía local. Y que contribuye a que en el Alto Golfo de California (AGC) se produzca una circulación anticiclónica (invierno) y ciclónica (verano). El escenario previo podría estar incompleto debido a la baja resolución temporal y espacial de las mediciones. Aquí utilizamos datos de viento (QuikSCAT, 1999-2003) y concentración de clorofila-*a* (SeaWiFS, 1998-2003) para analizar la circulación superficial del AGC; la variabilidad anual e interanual del viento y de la concentración de clorofila-*a*; y la asociación entre ambas variables. La circulación en verano es ciclónica y promueve un importante intercambio de masas de agua entre ambas costas, a través de la propagación de estructuras de mesoescala (remolinos y plumas). La circulación en invierno es más lenta, más variable y no muestra un patrón definido la mayor parte del tiempo. Sólo en 1999 se observó un remolino anticiclónico similar al reportado en la literatura. Las estructuras de mesoescala son una característica permanente de la circulación superficial en invierno y verano, que deben jugar un papel importante en la dinámica del AGC. Las series de tiempo de concentración de clorofila-*a* fueron dominadas por la variabilidad anual (máximos en invierno, mínimos en verano), excepto en el Delta del Río Colorado y entre las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón. Existe una clara diferencia en las concentraciones de las estaciones costeras (mayor concentración de clorofila-*a*) y las de mar abierto (menor concentración de clorofila-*a*). El campo de viento muestra una alta variabilidad, principalmente en verano, con al menos dos direcciones principales en invierno (S-N-NE) y en verano (N-E). Dada la frecuencia de los vientos hacia el Este, se considera que la orografía de Baja California no aísla por completo al AGC de la influencia del Océano Pacífico, contrario a lo que ha sido reportado. De acuerdo con los resultados mencionados y con la baja correlación obtenida entre las series de tiempo de clorofila-*a* y magnitud del viento, se concluye que el sentido de la circulación superficial del AGC no muestra una relación evidente con la dirección del viento.

## Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos .....	iii
Resumen .....	iv
Lista de Tablas.....	vi
Lista de Figuras .....	vii
1. Introducción .....	1
2. Objetivo.....	5
3. Método.....	5
3.1. Procesado de imágenes diarias de concentración de clorofila- <b>a</b> .....	6
3.2. Procesado del viento superficial.....	7
3.3. Análisis de datos de concentración de clorofila- <b>a</b> y viento.....	8
4. Resultados .....	10
4.1. Circulación superficial .....	10
4.1.1. Verano.....	12
4.1.2. Invierno.....	19
4.2. Concentración de clorofila- <b>a</b> .....	27
4.3. Viento.....	33
4.4. Correlación.....	43
5. Discusión .....	45
6. Conclusiones .....	57
7. Referencias.....	58

## Lista de Tablas

TABLA 1. Número de imágenes de concentración de clorofila- <i>a</i> utilizadas en el análisis de la circulación superficial del AGC. ....	6
TABLA 2. Número y tipo de estructuras de mesoescala observadas en el AGC mediante imágenes de concentración de clorofila- <i>a</i> durante invierno y verano (1998-2003). ....	10
TABLA 3. Parámetros mínimos y máximos de las estructuras de mesoescala observadas en el AGC durante invierno y verano (1998-2003). ....	15
TABLA 4. Correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ) entre las series de tiempo de concentración de clorofila- <i>a</i> y magnitud del viento, para 12 estaciones del AGC. ....	44
TABLA 5. Número de correlaciones espaciales significativas ( $p < 0.05$ ) para el AGC. ....	44

## Lista de Figuras

<b>FIG. 1.</b> Orografía, batimetría y posición de las estaciones de muestreo en el Alto Golfo de California. ....	2
<b>FIG. 2.</b> Esquema de un remolino anticiclónico y un remolino ciclónico.....	11
<b>FIG. 3.</b> Imágenes de concentración de clorofila- <i>a</i> para 13 días de agosto y septiembre de 1998 a 2003. ....	13
<b>FIG. 4.</b> Imágenes de concentración de clorofila- <i>a</i> para 12 días de febrero y marzo de 1998 a 2003. ....	21
<b>FIG. 5.</b> Posición inicial de los remolinos y los hongos observados en las imágenes de concentración de clorofila- <i>a</i> , de 1998 a 2003. ....	26
<b>FIG. 6.</b> Series de tiempo obtenidas de las imágenes de concentración de clorofila- <i>a</i> para los meses de febrero-marzo (invierno) y agosto-septiembre (verano): estaciones 1, 5, 9, 10, 11 y 14.....	28
<b>FIG. 7.</b> Series de tiempo obtenidas de las imágenes de concentración de clorofila- <i>a</i> para los meses de febrero-marzo (invierno) y agosto-septiembre (verano): estaciones 6, 7, 8, 12, 13 y 15.....	30
<b>FIG. 8.</b> Series de tiempo obtenidas de las imágenes de concentración de clorofila- <i>a</i> para los meses de febrero-marzo (invierno) y agosto-septiembre (verano): estaciones 2, 3, 4 y 16. ....	32
<b>FIG. 9.</b> Promedio espacial de las 16 estaciones de muestreo para las componentes $u'$ y $v'$ del viento. Para invierno y verano.....	34
<b>FIG. 10.</b> Histogramas de la dirección y magnitud del viento para los meses de febrero-marzo (invierno 2000-2003) y agosto-septiembre (verano 1999-2003). ....	36
<b>FIG. 11.</b> Histogramas de las componentes $u'$ y $v'$ del viento para los meses de febrero-marzo (invierno 2000-2003) y agosto-septiembre (verano 1999-2003). ....	38
<b>FIG. 12.</b> Ejes principales y vectores del viento superficial para las 16 estaciones de muestreo del AGC, durante febrero-marzo (invierno) de 2000 a 2003. ....	39
<b>FIG. 13.</b> Ejes principales y vectores del viento superficial para las 16 estaciones de muestreo del AGC, durante agosto-septiembre (verano) de 1999 a 2003.....	40
<b>FIG. 14.</b> Serie de tiempo de la correlación espacial entre la concentración de clorofila- <i>a</i> y la magnitud del viento. ....	46

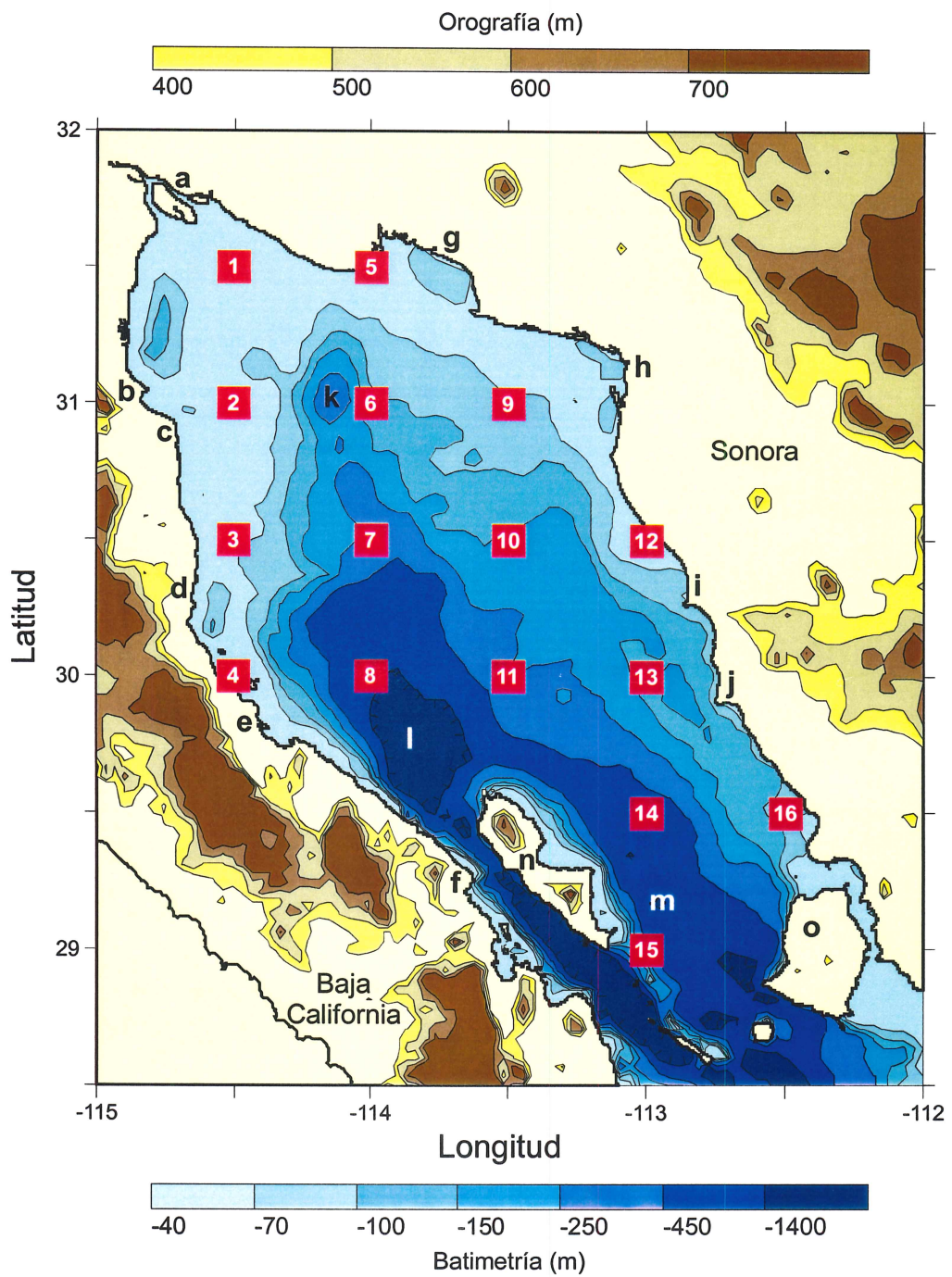
## 1. Introducción

El Golfo de California (GC) es la única cuenca de evaporación en el Océano Pacífico (Roden, 1958), que se distingue de otras cuencas similares como el Mar Mediterráneo y el Mar Rojo por tener una ganancia de calor anual neta de la atmósfera (Lavín y Organista 1988; Paden *et al.* 1993; Castro *et al.* 1994). Lo que se debe principalmente al hecho de que el GC está verticalmente bien mezclado (Paden *et al.* 1993). En el GC la evaporación es máxima en la parte Norte ( $\sim 1 \text{ m año}^{-1}$ ) y la ganancia de calor es máxima en la parte Sur ( $\sim 130 \text{ W m}^{-2}$ ) (Castro *et al.* 1994).

La productividad primaria del GC es en general alta (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Sus valores de productividad primaria superficial son mayores en la parte Norte y menores en la parte Sur, aunque esto es compensado si considera que la profundidad de la zona eufótica aumenta de la cabeza hacia la boca del GC (de  $\sim 30$  a  $80 \text{ m}$ ) (Álvarez-Borrego y Lara-Lara 1991).

Aspectos importantes del GC también son la formación de Agua del Golfo de California, que es Agua Subsuperficial Subtropical que ha sufrido un incremento en su salinidad debido a la evaporación ( $S\text{‰} \geq 35$ ;  $T^{\circ}\text{C} > 12$ ) (Lavín *et al.* 1995; Lavín y Marinone 2003); su gran biodiversidad (aves, mamíferos marinos, peces, moluscos, crustáceos); una abundante pesca comercial y deportiva (camarón, calamar, sardina, anchoveta, tiburón, pez vela); y actividades de ecoturismo (avistamiento de mamíferos marinos, tiburón ballena, mantas, buceo recreativo).

Específicamente el Alto Golfo de California (AGC), comprendido desde el Delta del Río Colorado hasta la latitud  $29^{\circ}\text{N}$  (Fig. 1), tiene una gran importancia biológica puesto que incluye las áreas de distribución de especies endémicas como la Totoaba (*Totoaba macdonaldi*), la Vaquita (*Phocoena sinus*) y el bivalvo *Mulinia coloradoensis* (Flessa y Téllez-Duarte 2001), todas ellas especies en peligro de extinción; y es el sitio de desove y maduración de especies como la sardina *Sardinops sagax* (Hammann *et al.* 1998; Lluch-Cota 2000), el camarón azul (*Litopenaeus stylirostris*) (Calderón-Aguilera *et al.* 2003; Marinone *et al.* 2004b) y el camarón café (*Farfantepenaeus californiensis*) (Marinone *et al.* 2004b).



**FIGURA 1.** Orografía, batimetría y posición de las 16 estaciones de muestreo en el Alto Golfo de California. Los cuadros rojos indican el área de muestreo (12x12 km) utilizada para obtener las series de tiempo de concentración de clorofila-a. Las letras indican las localidades o rasgos geográficos mencionados en el texto: a) Delta del Río Colorado, b) San Felipe, c) Punta Estrella, d) Puertecitos, e) San Luis Gonzaga, f) Punta Remedios, g) Bahía Adair, h) Bahía San Jorge, i) Cabo Tepoca, j) Puerto Libertad, k) Cuenca Wagner, l) Cuenca Delfín, m) Cuenca Tiburón, n) Isla Ángel de La Guarda, o) Isla Tiburón.

El AGC se caracteriza por poseer una batimetría somera, con una profundidad aproximada de 200 m, lo que, combinado con la característica resonante del GC con la componente semidiurna de la marea (Argote *et al.* 1995), provoca que ésta se amplifique y alcance durante las mareas vivas amplitudes del orden de 5 m en el Delta del Río Colorado, y corrientes de marea de  $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$  (Salas-de-León *et al.* 2003).

Por otro lado, la temperatura superficial del mar muestra una marcada señal anual con mínimos en invierno y máximos en verano (Soto-Mardones *et al.* 1999). Este calentamiento da como resultado una fuerte estratificación en verano y débil en invierno (Argote *et al.* 1995; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2001). Sin embargo alrededor de las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón (Fig. 1) la temperatura superficial es siempre menor al resto del GC, debido a una intensa mezcla vertical (Soto-Mardones *et al.* 1999). Uno de los responsables de esta mezcla es la marea, que en esta región y en las zonas más someras al Norte disipa el 95% de su energía (García-Silva y Marinone 2000).

Utilizando modelos numéricos se ha propuesto que el sentido de la circulación en el AGC es una consecuencia de la dirección del viento (Beier 1997; Beier y Ripa 1999; Marinone 2003). El cual, se asume, sopla de manera homogénea hacia el Noroeste durante verano y hacia el Sureste durante invierno (Badan-Dangon *et al.* 1991; Marinone *et al.* 2004a). Y que genera una circulación oceánica ciclónica en verano y anticiclónica en invierno (Lavín *et al.* 1997; Carrillo *et al.* 2002; Palacios-Hernández *et al.* 2002). Otros autores han propuesto que esta circulación es producto del gradiente térmico generado entre las zonas someras y profundas del AGC (Lepley *et al.* 1975; Paden *et al.* 1991). Este gradiente genera un flujo de las zonas cálidas hacia las más frías, el cual, modificado por el efecto Coriolis, produce una circulación anticiclónica en invierno y ciclónica (más intensa) en verano (Lepley *et al.* 1975; Paden *et al.* 1991).

De acuerdo con el patrón de viento anual propuesto (Beier 1997; Marinone *et al.* 2004a), las surgencias en el GC ocurren a lo largo de la costa de Baja California durante verano y a lo largo de la costa de Sonora durante invierno (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994; Lluch-Cota 2000; Lavín y Marinone 2003). Sin embargo, este patrón de viento se basa en datos de estaciones meteorológicas costeras, isleñas, y en la ubicación de centros de presión atmosférica. Lo que puede proporcionar un panorama incompleto acerca de su variabilidad, dada la baja resolución espacial y temporal de las

mediciones. Por otro lado, el análisis de la circulación oceánica, en general, se ha realizado por periodos de tiempo corto y mediante el uso de modelos numéricos que utilizan forzamientos idealizados, como en el caso del viento.

Actualmente son pocos los trabajos enfocados al estudio de la variabilidad de mesoescala en el GC (Merrifield y Winant 1989; Lavín *et al.* 1997; Martínez y Allen 2002), y aún son menos aquellos cuyo muestreo comprende intervalos espaciales pequeños (kilómetros) y periodos de tiempo largos (meses) (Martínez y Allen 2002). Mediciones con estas escalas son necesarias para poder comprender el efecto de la circulación, oceánica y atmosférica, sobre la biota del GC.

Aquí utilizamos datos de alta resolución temporal de viento y espacial de concentración de clorofila-*a*, obtenidos de los sensores remotos QuikSCAT y SeaWiFS, con el propósito de analizar la circulación superficial en el AGC; la variabilidad anual e interanual de la clorofila-*a* y el viento; y la asociación entre ambas variables. Una de las ventajas de estos datos de viento es que reflejan mejor las condiciones de la atmósfera sobre el mar, contrario a aquellos registrados en estaciones meteorológicas costeras. La circulación superficial es inferida de las imágenes de concentración de clorofila-*a*, puesto que está comprobada la utilidad de los pigmentos fotosintéticos como trazadores de masas de agua (Svenjkovsky 1988; García y Robinson 1989; Pegau *et al.* 2002; Doney *et al.* 2003). Y que estas imágenes pueden resultar más confiables que las imágenes de temperatura superficial del mar, considerando que en el GC el intenso calentamiento solar puede eliminar los gradientes de temperatura superficial rápidamente (Paden *et al.* 1991; Pegau *et al.* 2002).

## 2. Objetivo

El objetivo general es determinar si el patrón de circulación superficial del AGC depende del patrón de viento local, para lograrlo lo hemos dividido en cuatro objetivos particulares:

- Determinar los rasgos principales de la circulación superficial en el AGC.
- Determinar la variación anual e interanual de la concentración de clorofila-*a* superficial para el AGC.
- Determinar la variación anual e interanual del viento superficial para el AGC.
- Evaluar la asociación espaciotemporal entre los campos de concentración de clorofila-*a* y viento superficiales.

## 3. Método

Como primera exploración de la estacionalidad del AGC, se analizaron imágenes semanales de concentración de clorofila-*a* y temperatura superficial del mar del AGC, con una resolución espacial de 4 km. Obtenidas de los sensores SeaWiFS (Sea-viewing Wide-Field-of-View Sensor) y AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) para los 12 meses de 1998 a 2003. Con esto se confirmó la existencia de dos escenarios opuestos: una época fría, con altas concentraciones de clorofila-*a* y una época cálida con bajas concentraciones de clorofila-*a*. Además se observó que en los meses de febrero-marzo y agosto-septiembre fue donde apareció mejor definida la señal asociada con los remolinos durante invierno y verano. Por lo tanto se utilizaron estas dos parejas de meses como representativas de los dos escenarios dominantes en el AGC. Posteriormente se procedió a un análisis más a detalle, mediante el uso de imágenes diarias de clorofila-*a*.

### 3.1. Procesado de imágenes diarias de concentración de clorofila-a

Se obtuvieron 3034 imágenes diarias LAC (Local Area Coverage) de concentración de clorofila-a superficial ( $\text{mg chl m}^{-3}$ ) del sensor SeaWiFS, con una resolución espacial de 1 km, obtenidas del NASA-GSFC<sup>1</sup> a través de siete antenas terrenas HRPT (High Resolution Picture Transmission). Sólo cuatro de estas siete antenas proporcionaron imágenes útiles para el análisis de la circulación superficial (Tabla 1). Las imágenes correspondieron a los meses febrero-marzo (invierno) y agosto-septiembre (verano) de 1998 a 2003. Estas imágenes contenían únicamente el valor de radiancia superficial medida por el sensor (nivel L1A). Por lo tanto, la primera fase de su procesamiento consistió en transformar a concentración de clorofila-a los valores de radiancia, mediante el algoritmo OC4 (O'Reilly *et al.* 2000), y agregar las coordenadas geográficas correspondientes (nivel L2).

La cobertura espacial de las imágenes varió de acuerdo con la antena origen, sin embargo siempre incluyó una región mayor a la del AGC, por lo que fue necesario extraer dicha área de cada imagen. Esto se consiguió al re proyectar cada imagen en un mapa base de 512x512 pixeles, que correspondió al AGC (Fig. 1).

**TABLA 1.** Número de imágenes de concentración de clorofila-a utilizadas en el análisis de la circulación superficial del AGC. Ordenadas por antena y por año.

Antenas	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Totales	Porcentajes
<b>MBR</b>	25	38	30	30	40	34	197	50%
<b>UTX</b>	26	19	15	15	19	14	108	27%
<b>USC</b>	10	3	4	7	26	11	61	15%
<b>ARM</b>	4	8	4	9	2	4	31	8%
<b>Totales</b>	65	68	53	61	87	63	397	100%

Antenas HRPT: MBR (Monterey, California); UTX (Austin, Texas); USC (Santa Barbara, California); ARM (Arenas Blancas, Nuevo México).

El 52% de las imágenes re proyectadas no pudieron ser utilizadas, ya que el porcentaje de cobertura de pixeles por imagen no alcanzaba ni el 1%, y por lo tanto fueron eliminadas antes de proseguir con el procesamiento de datos. El restante 48% (1455 imágenes) se utilizó para construir series de tiempo para 16 puntos dentro del AGC (Fig. 1). Se eligieron 16 estaciones porque, como se verá más adelante, ese era el número máximo de datos de viento disponibles espacialmente.

<sup>1</sup> <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>

En la posición de cada estación hubo días en los que no hubo valor de concentración de clorofila-*a* debido a la frecuente presencia de áreas sin datos; por otro lado la distribución de concentración de clorofila-*a* presentó fuertes gradientes en todo el AGC. Esto generó dos posibles problemas: una reducción en la longitud de las series de tiempo y un sesgo hacia valores altos o bajos de concentración de clorofila-*a*. Para contrarrestar ambos problemas, se decidió emplear un área de muestreo de 12x12 km para cada estación (Fig. 1), y utilizar el percentil 25 de cada área como representativo de la estación.

Muchas de las imágenes correspondieron a un mismo día, pero provenían de distintas antenas, así que fueron utilizadas (siempre que fue posible) para completar espacios aún existentes en las series de tiempo, o para sustituir valores extremos (el 22% de las series de tiempo fue completado o sustituido gracias a estas imágenes adicionales). En 6 de las 16 series de tiempo hubo algunos días en los que se observaron concentraciones mayores a 30 mg chl m<sup>-3</sup>. Estos valores fueron, sin embargo, escasos (2% del total) y estaban muy alejados del grupo principal de concentraciones. Esto nos hizo suponer que se trataba de valores erróneos y por lo tanto fueron eliminados de las series de tiempo.

Finalmente de las 1455 imágenes disponibles se eligieron 397 (Tabla 1), las más nítidas y con la mejor cobertura de píxeles con datos, para analizar la evolución de la circulación superficial en el AGC, con especial interés en la formación de remolinos.

### 3.2. Procesado del viento superficial

Los datos de viento superficial fueron obtenidos del NCAR<sup>2</sup>, y son el producto de una combinación espacial entre los datos generados por el sensor SeaWinds, a bordo del satélite QuikSCAT, y de un modelo de circulación atmosférica (NCEP). Este procedimiento fue adaptado de Chin *et al.* (1998) y aprovecha la alta resolución espacial de QuikSCAT (25 km) y la alta resolución temporal del NCEP (6 h).

La cobertura temporal de los datos de viento fue idéntica a la de las imágenes de concentración de clorofila-*a* excepto en 1998 y en el invierno de 1999, puesto que QuikSCAT inició sus mediciones en julio de 1999<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> <http://dss.ucar.edu/datasets/ds744.4>

Inicialmente estos datos estaban organizados en una matriz de 20x19 que cubría todo el GC y parte del Océano Pacífico (22.5°N, 32°N; 107.5°O, 116.5°O), con vectores de viento (m/s) cada 6 h (0:00, 6:00, 12:00, 18:00 h) y con una resolución espacial de 0.5°. Únicamente 16 de los 380 vectores iniciales correspondieron al AGC y por lo tanto se designaron como las 16 estaciones para el muestreo de series de tiempo (Fig. 1).

Para facilitar la interpretación de los resultados las componentes  $u$  y  $v$  del viento fueron rotadas anticiclónicamente 36°. Con esto se obtuvieron las componentes  $u'$  (perpendicular al GC) y  $v'$  (a lo largo del GC) que pueden ser más fácilmente relacionadas con procesos oceanográficos locales como las surgencias.

### 3.3. Análisis de datos de concentración de clorofila-a y viento

Debido a la alta dispersión en las series de tiempo de concentración de clorofila-a se analizó la variabilidad de cada estación por separado, utilizando a la mediana como su descriptor. Por el contrario, dado que la componente  $u'$  y  $v'$  del viento mostraron una baja desviación estándar en sus 16 estaciones, fue posible usar su promedio para analizar la variabilidad de cada componente. Se utilizó la mediana como descriptor de la concentración de clorofila-a porque el algoritmo que transforma la radiancia a clorofila-a utiliza una escala logarítmica, la cual concentra los valores en las concentraciones bajas. Una distribución de ese tipo es descrita de una manera más representativa por un parámetro estadístico como la mediana.

Para analizar la variabilidad espacial de la dirección del viento se utilizó el método de ejes principales, el cual concentra la varianza de un conjunto de vectores en un par de ejes perpendiculares, un eje mayor y un eje menor. El eje mayor representa algo parecido a un vector promedio sólo que presenta una ambigüedad en cuanto a su sentido, es decir, únicamente indica la dirección en la que se concentra la mayor parte de la variabilidad.

Para la correlación temporal entre la concentración de clorofila-a y el viento, primero se cortaron las series de tiempo de viento para que coincidieran con aquellos días para los cuales hubo datos de concentración de clorofila-a. La serie de viento era sin embargo cuatro veces más larga que la de concentración de clorofila-a, pues tenía datos diarios cada 6 horas. Por lo tanto había cinco posibles arreglos para

correlacionar, incluyendo al promedio de los cuatro datos. Así que se realizaron todas las correlaciones posibles entre los cinco arreglos del viento y la concentración de clorofila-a, para las 16 estaciones y para los cinco años que teníamos datos. Esto dio como resultado que el dato de las 0:00 h fue el mejor correlacionado, y por lo tanto fueron los valores que se utilizaron en los análisis posteriores.

Para analizar la correlación espacial se realizó una serie de tiempo de su correlación, la cual consistió en obtener la correlación diaria entre los valores de concentración de clorofila-a y viento de las 16 estaciones del AGC, y repetir este procedimiento para los 364 días disponibles. Los 364 días corresponden a aquellos para los cuales hubo concentraciones de clorofila-a al menos para 14 de las 16 estaciones.

## 4. Resultados

### 4.1. Circulación superficial

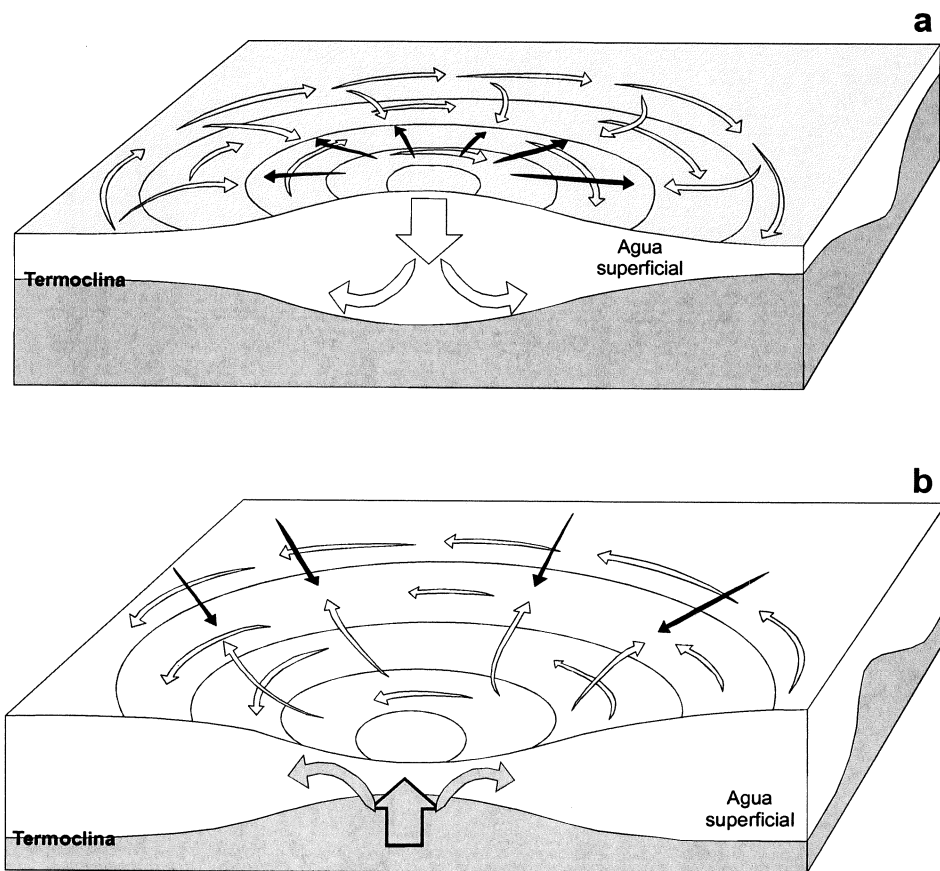
El AGC presentó una gran cantidad de estructuras de mesoescala la mayor parte del tiempo, por lo que se procuró registrar solamente aquellas que fueran más evidentes. Las estructuras más frecuentes, tanto en invierno (febrero-marzo) como en verano (agosto-septiembre), fueron remolinos (ciclónicos y anticiclónicos), plumas y hongos (Tabla 2).

**TABLA 2.** Número y tipo de estructuras de mesoescala observadas en el AGC mediante imágenes de concentración de clorofila-*a* durante invierno y verano (1998-2003).

Años	Invierno (I) Verano (V)	Remolinos	Plumas	Hongos	Totales
1998	I	1-5-1	3		10
	V	6-3-0	3	1	13
1999	I	2-0-0	5	1	8
	V	1-1-0	2	4	8
2000	I	0-4-1	4	3	12
	V	0-1-0	4	4	9
2001	I	0-2-0	1		3
	V	10-4-1	7	4	26
2002	I	0-4-1	5	5	15
	V	4-3-0	3		10
2003	I	1-3-1	2		7
	V	3-1-0	5	1	10
<b>Totales</b>		28-31-5	44	23	131

La rotación de los Remolinos es: Anticiclónica - Ciclónica - Indefinida.

Los remolinos anticiclónicos presentan una rotación a favor a las manecillas del reloj y en los casos en que son afectados por la rotación terrestre (geostroficados) producen una elevación de la superficie del océano en su centro que decrece radialmente hacia su borde (Fig. 2a), este desnivel genera un flujo hacia el interior de la columna de agua que resulta en una depresión de la termoclina y un engrosamiento de la capa superficial (Duxbury *et al.* 2000). Tradicionalmente estos remolinos se asocian con temperaturas cálidas (Kitano 1975; Smith y Baker 1985; Van Aken *et al.* 2003), aunque éstas no siempre son mayores a las de sus alrededores (Morrow *et al.* 2003), y con bajas densidades fitoplanctónicas (Van Aken *et al.* 2003).



**FIGURA 2.** Esquema de un remolino anticiclónico (a) y un remolino ciclónico (b). Las flechas grises denotan el flujo geostrófico, las flechas blancas el efecto Coriolis, las flechas negras la fuerza de gravedad. Se indica el flujo vertical asociado con cada remolino junto con la posición de la termoclina. Modificado de Duxbury *et al.* 2000.

En un remolino ciclónico geostrofico ocurre lo contrario (Fig. 2b), una depresión de la superficie del océano y un flujo de agua hacia la superficie, con una consecuente elevación de la termoclina y un adelgazamiento de la capa superficial (Duxbury *et al.* 2000). Esto hace que los remolinos ciclónicos sean comúnmente asociados con una temperatura menor a la adyacente (Schmitz y Vastano 1975), una concentración de nutrientes alta (Müller-Karger y Fuentes-Yaco 2000; Fiedler 2002; Vaillancourt *et al.* 2003) y una alta densidad fitoplanctónica (Müller-Karger y Fuentes-Yaco 2000; Fiedler 2002; Vaillancourt *et al.* 2003). Sin embargo, en la parte sur del GC se observa una relación opuesta a la anteriormente mencionada, es decir, remolinos anticiclónicos con alta concentración de clorofila-*a* y remolinos ciclónicos con baja concentración de clorofila-*a* (Pegau *et al.* 2002).

En adelante denominaremos hongo a la estructura de mesoescala formada por una franja o banda que gradualmente es deformada en uno de sus extremos por la aparente influencia de dos remolinos, uno ciclónico (a la izquierda de la banda) y uno anticiclónico (a la derecha de la banda), lo que le da su forma característica.

#### 4.1.1. Verano

Durante el verano el AGC presentó tres áreas con circulación distinta, la primera de ellas abarcó desde el Delta del Río Colorado hasta una línea imaginaria entre Punta Estrella y la punta Noroeste de Bahía Adair (porción norte) (Fig. 1), y tuvo en general una circulación poco definida. La segunda cubrió desde el límite anterior hasta una línea imaginaria entre Punta Remedios y Puerto Libertad (porción central) (Fig. 1) y mostró una circulación claramente ciclónica. Y la tercera se extendió hasta los 29°N y presentó una gran variación en su circulación (porción sur) (Fig. 1).

La circulación de la porción central estuvo caracterizada por la presencia casi constante de grandes remolinos ciclónicos que presentaron bajas concentraciones de clorofila-*a* ( $\sim 0.2 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) en su interior (Fig. 3). El diámetro máximo de estos remolinos fue de 133 km y tuvieron una rotación promedio de  $21.46 \text{ km d}^{-1}$ . Sin embargo, estos no fueron los únicos remolinos durante el verano. En la porción central y sur se observaron otros 35 remolinos de diámetro menor, 24 de ellos fueron anticiclónicos, 10 ciclónicos y 1 de diámetro demasiado pequeño para definir su rotación (9 km) (Tabla 2).

**FIGURA 3.** Imágenes de concentración de clorofila-*a* del AGC para 13 días de agosto y septiembre de 1998 a 2003. En cada imagen se muestran también las isóbatas de 40, 100 y 250 m, los vectores de viento disponibles del día correspondiente y el valor de correlación espacial entre la clorofila-*a* y la magnitud del viento. (\*\*= $p < 0.05$ ). En a) se muestran las divisiones entre las porciones norte, central y sur.

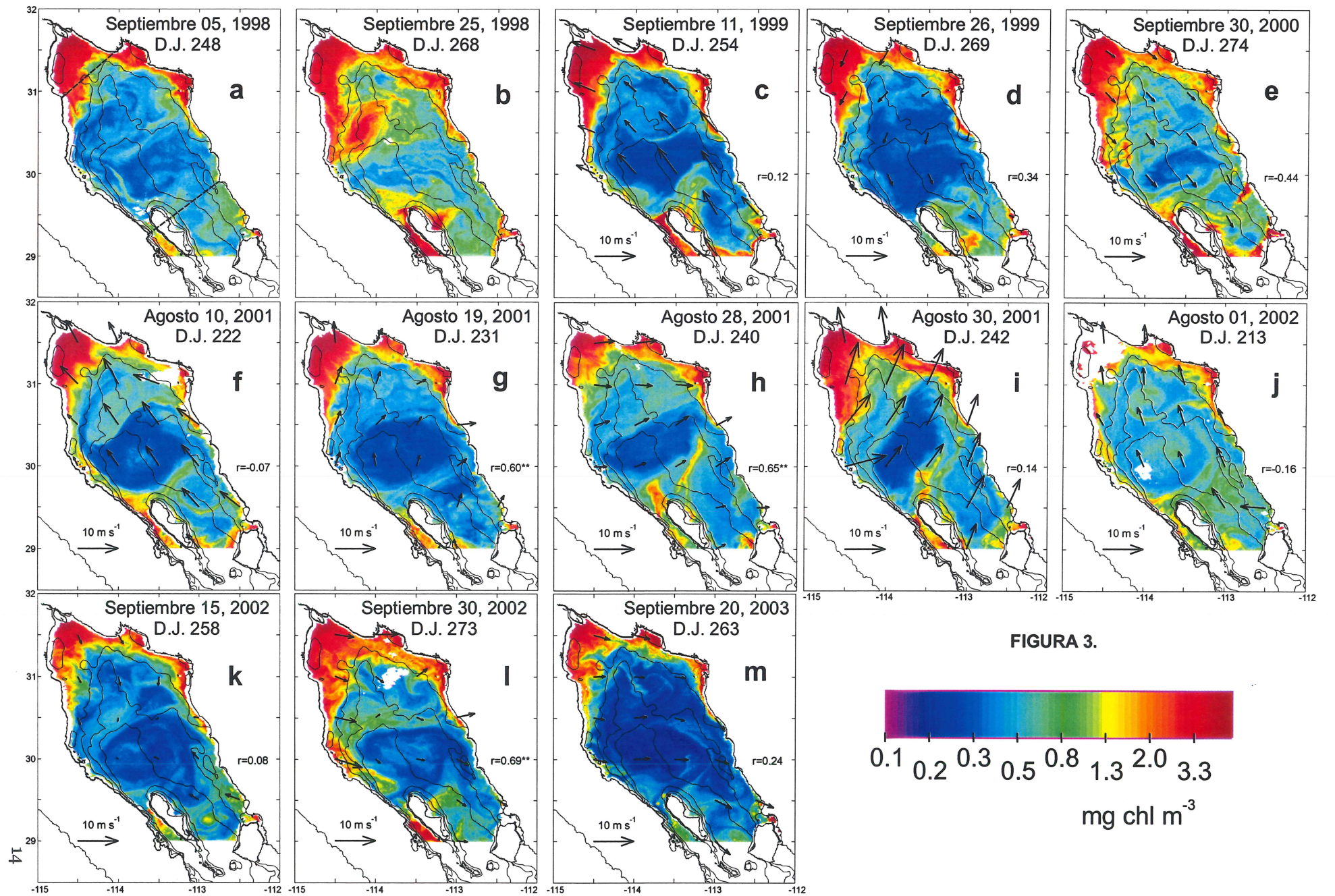


FIGURA 3.

Los remolinos anticiclónicos y ciclónicos tuvieron, en promedio, un diámetro y rotación similares: 50 km y 16.2 km d<sup>-1</sup> (Tabla 3). Su longevidad promedio fue también similar (3 días) aunque el mayor registro para un remolino anticiclónico y ciclónico fue de 11 y 59 días. Por otro lado, la propagación promedio de los remolinos anticiclónicos (8.53 km d<sup>-1</sup>) fue ligeramente mayor a la de los remolinos ciclónicos (6.15 km d<sup>-1</sup>). Además de los remolinos se observaron también 19 plumas y 14 hongos con una longitud promedio de 78.47 y 36.64 km, una duración promedio de 3 y 2 días, y en el caso de los hongos una propagación promedio de 8.46 km d<sup>-1</sup> (Tabla 3).

**TABLA 3.** Parámetros mínimos y máximos de las estructuras de mesoescala observadas en el AGC durante invierno (I) y verano (V) (1998-2003).

Parámetros	Remolinos anticiclónicos		Remolinos ciclónicos		Plumas		Hongos	
	I	V	I	V	I	V	I	V
Diámetro/Longitud (km)	24-85	18-110	7-62	17-133	34-156	27-127	15-59	16-83
Longevidad (d)	2-55	1-11	1-8	1-59	1-20	1-8	1-6	1-4
Propagación (km d <sup>-1</sup> )	3-8	4-14	1-5	1-14			0.4-6	5-14
Rotación (km d <sup>-1</sup> )	6-19	15-17	6-23	7-32				

De las imágenes disponibles, se seleccionaron 13 que describen las principales estructuras observadas en el AGC durante los meses de agosto y septiembre. La primera de ellas corresponde al 5 de septiembre de 1998 (Fig. 3a). En ella se observa que la circulación de la porción central estuvo dominada por dos remolinos de dimensiones similares (diámetro=110 y 98 km), uno anticiclónico (al Norte) y otro ciclónico (al Sur). Ambos remolinos tuvieron concentraciones de clorofila-*a* menores a las de sus alrededores (centro-borde=0.25–0.53 mg chl m<sup>-3</sup>). Este mismo patrón se repitió en los veranos de 2002 y 2003, aunque con un gradiente de concentración de clorofila-*a* y una duración menores. Para 1998 esta circulación tuvo una duración de cuatro días.

En la porción sur, la circulación cambió frecuentemente. Como se ve en esta y en las siguientes imágenes su circulación estuvo dominada la mayor parte del tiempo por alguna estructura de mesoescala como un frente, hongo o pluma, y en un menor número de ocasiones presentó un flujo anticiclónico o ciclónico.

En la imagen del 25 de septiembre de 1998 (Fig. 3b) la circulación ciclónica de la porción central fue interrumpida debido a la presencia de un remolino ciclónico (diámetro=94 km) formado cuatro días antes frente a la costa de Puertecitos (Fig. 1) y que se propagó en dirección Este ( $12.35 \text{ km d}^{-1}$ ) hacia la costa de Sonora. Este remolino pudo ser observado durante un periodo de 10 días (21-30 septiembre). Esta fue la única ocasión en la que un remolino se originó en la costa de Baja California para después propagarse hacia la costa de Sonora. Más al Sur, se formaron dos plumas con alta concentración de clorofila-*a* ( $>1.4 \text{ mg chl m}^{-3}$ ), una en la costa Este de la Isla Ángel de La Guarda y otra en su costa Norte (Fig. 3b). La formación de plumas alrededor de la Isla Ángel de La Guarda fue un fenómeno muy común en verano.

En septiembre 11 de 1999 (Fig. 3c) se observó otro fenómeno que fue frecuente en verano. La formación de un remolino anticiclónico en la costa de Sonora, al Sur de Bahía San Jorge, que se propagó en dirección Oeste hacia el Norte de San Luis Gonzaga (Fig. 1). La formación de este tipo de remolinos se observó cada verano, en por lo menos cuatro de los seis años analizados (1999, 2001–2003), con un diámetro, rotación y propagación promedio de 54.88 km, 15.75 y  $9.75 \text{ km d}^{-1}$ . La trayectoria de este remolino pudo ser observada desde su formación hasta su destrucción, lo cual tuvo una duración de 11 días. La circulación ciclónica en la porción central no fue interrumpida por la formación de estos remolinos, por el contrario aparecieron como una parte de ella.

En la imagen del 26 de septiembre de 1999 (Fig. 3d) se observa la entrada de una pluma con alta concentración de clorofila-*a* de la porción norte hacia la porción central. Las plumas, en esta zona, son más frecuentes que los remolinos. En la porción sur la circulación fue anticiclónica del 24 al 30 de septiembre. Durante este periodo se formó una pluma con concentración de clorofila-*a* media ( $0.6\text{--}1.3 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) en la costa Este de la Isla Ángel de La Guarda, que dio origen a un hongo cuya duración, longitud y propagación fueron de 3 días, 30 km y  $13.05 \text{ km d}^{-1}$  (Fig. 3d). En la porción central el rasgo más sobresaliente fue una pluma con baja concentración de clorofila-*a* ( $0.01\text{--}0.5 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) que fue transportada hacia el Oeste a aproximadamente  $30.3^\circ\text{N}$ .

El 30 de septiembre de 2000 (Fig. 3e) se observó una pluma entre la porción norte y central, similar a la observada en la imagen anterior. Sólo que ahora la masa de agua con alta concentración de clorofila-*a* se extendió hasta el Norte de San Luis Gonzaga y además dio origen a un hongo, más pequeño que el descrito en la imagen anterior. En la porción central el área de influencia de la circulación ciclónica fue claramente menor a la observada usualmente. Esta reducción en su área de influencia comenzó el 15 de septiembre como un incremento en las masas de agua con concentración de clorofila-*a* media y alta al Norte, y la reducción y aislamiento del remolino ciclónico hacia el Sur (como aparece en esta imagen). Sin embargo, la circulación ciclónica se mantuvo en el Norte hasta el 25 de septiembre, y cesó del 26 al 30 de septiembre. Durante estos cinco días la concentración de clorofila-*a* en el área disminuyó, lo que indica que a pesar de no observarse una circulación ciclónica en estos cinco días las condiciones usuales tendieron a restablecerse.

El 10 de agosto de 2001 (Fig. 3f) ocurrieron tres grandes remolinos, uno anticiclónico en la porción central, formado dos días antes (diámetro=43 km), con concentraciones mayores en su interior que en el exterior (0.75–0.4 mg chl m<sup>-3</sup>). El remolino ciclónico característico de la porción central, con un parche de clorofila-*a* media en su centro. Y un remolino anticiclónico en la porción sur (diámetro=56 km), con una menor concentración de clorofila-*a* en su centro que en su borde (0.35–0.61 mg chl m<sup>-3</sup>).

Para el 19 de agosto de 2001 (Fig. 3g) el remolino anticiclónico de la porción central alcanzó la costa de Baja California y originó dos plumas, una de la porción norte hacia la porción central (longitud=50 km) y otra, con mayor concentración de clorofila-*a*, al Norte de Puertecitos (longitud=30 km). Desde este día, y hasta el 26 de agosto el remolino ciclónico de la porción central mantuvo la misma orientación en su eje mayor (Oeste-Este), lo que hizo que su influencia hacia el Norte disminuyera. En la porción sur la circulación fue anticiclónica del 8 al 26 de agosto, la cual fue fortalecida por la sucesión de dos remolinos anticiclónicos.

El 28 de agosto (Fig. 3h) el patrón de clorofila-*a* comenzó a cambiar, debido al movimiento del remolino ciclónico de la porción central. En la porción norte la masa de agua con alta concentración de clorofila-*a* (>2 mg chl m<sup>-3</sup>) retrocedió hasta la altura de San Felipe (Fig. 1). En la porción central el eje mayor del remolino ciclónico comenzó a girar ciclónicamente y continuó girando hasta el 11 de septiembre de 2001. Esto

aumentó su influencia en la parte Norte. Lo que en esta imagen se observó con la formación de una pluma con concentración de clorofila-*a* media, proveniente de Bahía San Jorge, que cruzó casi todo el AGC (longitud=124 km). Además, el cambio de posición del remolino ciclónico provocó la extensión en dirección Noreste de una pluma de 93 km de longitud originada en la costa Este de la Isla Ángel de la Guarda (Fig. 3h). En la porción sur a partir de esta fecha y hasta el 31 de agosto la circulación fue ciclónica y estuvo caracterizada por una masa de agua con baja concentración de clorofila-*a* proveniente de la porción central.

El 30 de agosto de 2001 (Fig. 3i) la rotación del eje mayor del remolino ciclónico provocó que la masa de agua con alta concentración de clorofila-*a* avanzara desde San Felipe hasta Puertecitos en sólo tres días (propagación=40 km d<sup>-1</sup>). Asimismo, la pluma con concentración de clorofila-*a* media mencionada en la imagen anterior incrementó la concentración en su base y se dispersó en la forma de un hongo después de chocar con la costa de Baja California. En la porción sur, como ya se mencionó, la circulación fue ciclónica en este día.

El 1 de agosto de 2002 (Fig. 3j) ocurrió otro remolino anticiclónico de Sonora hacia Baja California (diámetro=47 km), junto con un remolino ciclónico en la porción central (diámetro=102 km). Contrario a otros veranos, este remolino ciclónico tuvo concentraciones de clorofila-*a* mayores en su centro y menores en su borde (0.65–0.38 mg chl m<sup>-3</sup>). Áreas sin datos como las que se observan en la porción norte y en la porción central fueron muy frecuentes en la porción sur, lo que dificultó el análisis de la circulación entre las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón.

En la porción sur, la circulación estuvo regida del 14 al 20 de septiembre (Fig. 3k) por un remolino ciclónico que al parecer fue originado al Sur de 29°N. Una circulación similar ocurrió del 12 al 19 de septiembre de 1998 con un remolino ciclónico que tuvo una mayor concentración de clorofila-*a* en su interior (dato no mostrado). Por el contrario, en las imágenes mostradas anteriormente siempre que hubo una circulación clara ésta fue producto de la influencia de la porción central.

Del 24 al 30 de septiembre de 2002 (Fig. 3l) ocurrió otro fenómeno que no fue observado en ningún otro verano, la propagación de una pluma originada en la costa de Sonora, a la altura de Cabo Tepoca (Fig. 1), y que el 28 de septiembre llegó a la costa de Baja California. El primer efecto de su arribo fue la formación de una pluma de menor tamaño y mayor concentración de clorofila-*a*. Posteriormente, conforme el resto

de la pluma chocó con la costa, se produjo un incremento en la concentración de clorofila-*a* del área, así como un incremento en el tamaño de la pluma recién formada (tal como se observa en la figura 3l). Durante su desarrollo y conforme se acercó a la Isla Ángel de La Guarda la pluma se enrolló anticiclónicamente. Este fenómeno fue observado en dos ocasiones más, el 23 de septiembre de 1998 y el 03 de agosto de 2001 (datos no mostrados). En la porción sur, del 27 al 30 de septiembre la circulación fue ligeramente anticiclónica debido a la influencia de un remolino ciclónico proveniente de la porción central y que se desplazó hacia el Sureste, adyacente a la costa de Sonora (Fig. 3l).

En la última imagen de verano (Fig. 3m), se observó la fase final de una pluma. Ésta se originó en la porción norte el 15 de septiembre, y gradualmente evolucionó en un meandro y finalmente en el hongo que se observa en esta imagen. En la porción central se formó otra pluma que se extendió en dirección Oeste al Norte de Cabo Tepoca (Fig. 1), similar a la observada en la figura 3d. En la porción sur la circulación fue anticiclónica del 15 al 21 de septiembre, y estuvo relacionada con un remolino ciclónico proveniente de la porción central, similar a la imagen anterior (Fig. 3l). Del 27 al 30 de septiembre se formó la pluma más larga observada en este trabajo (longitud~200 km), que se extendió desde la Isla Tiburón hasta la parte central del AGC y que aparentemente estuvo relacionada con la entrada de una masa de agua del Sur de 29°N.

#### **4.1.2. Invierno**

En invierno las estructuras más frecuentes fueron también los remolinos (anticiclónicos y ciclónicos), plumas y hongos, sin embargo su número fue menor al de verano (Tabla 2). También fueron menores su dimensión, duración, y propagación comparadas con el verano. Lo anterior estuvo asociado con una circulación superficial heterogénea, en la cual hubo una importante variabilidad mensual e interanual. En total se identificaron 26 remolinos, 17 plumas y 9 hongos (Tabla 2), 18 de estos remolinos fueron ciclónicos y sólo 4 fueron anticiclónicos. En 4 ocasiones no fue posible definir su rotación debido a su corta duración (1 día) o a su diámetro pequeño (11 km). La vida media de los remolinos ciclónicos (2.41 días) fue menor que la de los remolinos anticiclónicos (17.75 días). Este último valor, sin embargo, estuvo sesgado por el bajo

número de remolinos anticiclónicos observados y por el hecho de que uno de ellos fue particularmente longevo (55 días). Si se considera sólo a los otros tres remolinos anticiclónicos su longevidad promedio se reduce a 5.33 días, que sigue siendo mayor que la de los remolinos ciclónicos. En cuanto a su rotación y propagación promedio, tanto remolinos ciclónicos como anticiclónicos presentaron valores similares, 13 y 4 km d<sup>-1</sup>. Comparados con el verano estos valores fueron 19% y 45% más bajos. El diámetro promedio de los remolinos anticiclónicos en invierno (49 km) fue similar al de verano, sin embargo los remolinos ciclónicos (23 km) fueron 54% más pequeños que en verano. Los hongos tuvieron una longitud, duración y propagación promedio de 32 km, 2 días y 3 km d<sup>-1</sup>, estos valores fueron similares a los de verano excepto el de propagación que fue 63% menor en invierno. Por su parte, las plumas mostraron una duración promedio (4 días) similar a la de verano, pero una longitud promedio (95 km) 18% mayor.

Las imágenes en la figura 4 proporcionan un panorama del complejo patrón de circulación superficial en invierno. El 8 de marzo de 1998 (Fig. 4a) la mayor parte del AGC mostró concentraciones de clorofila-*a* baja (0.01–1 mg chl m<sup>-3</sup>), con el mínimo al Noroeste de la Isla Ángel de La Guarda. En contraste, concentraciones altas (>2.6 mg chl m<sup>-3</sup>) se presentaron al Noroeste de la Isla Tiburón, en porciones de la costa Norte de Sonora y al Norte del AGC, en la región comprendida desde el Delta del Río Colorado hasta una línea imaginaria entre Puertecitos y la punta Noroeste de Bahía Adair (Fig. 1).

Esta última zona fue la única que distinguió del resto, por la constante presencia de concentraciones altas de clorofila-*a*, y por lo tanto fue denominada como porción norte para el invierno. En esta misma imagen, al Noroeste de Isla Ángel de La Guarda, inició una breve circulación anticiclónica que fue identificada gracias a la trayectoria de dos plumas generadas en las costas de Baja California y Sonora. Esta circulación se mantuvo hasta el 10 de marzo. Más al Sur, entre las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón, se formó un gradiente de baja-alta concentración de clorofila-*a* el cual permaneció desde el 2 hasta el 10 de marzo, seis días más que la circulación anticiclónica al Noroeste.

**FIGURA 4.** Imágenes de concentración de clorofila-a del AGC para 12 días de febrero y marzo de 1998 a 2003. En cada imagen se muestran también las isóbatas de 40, 100 y 250 m, los vectores de viento disponibles del día correspondiente y el valor de correlación espacial entre la clorofila-a y la magnitud del viento. (\*\*= $p < 0.05$ ). En a) se muestra la división de la porción norte.

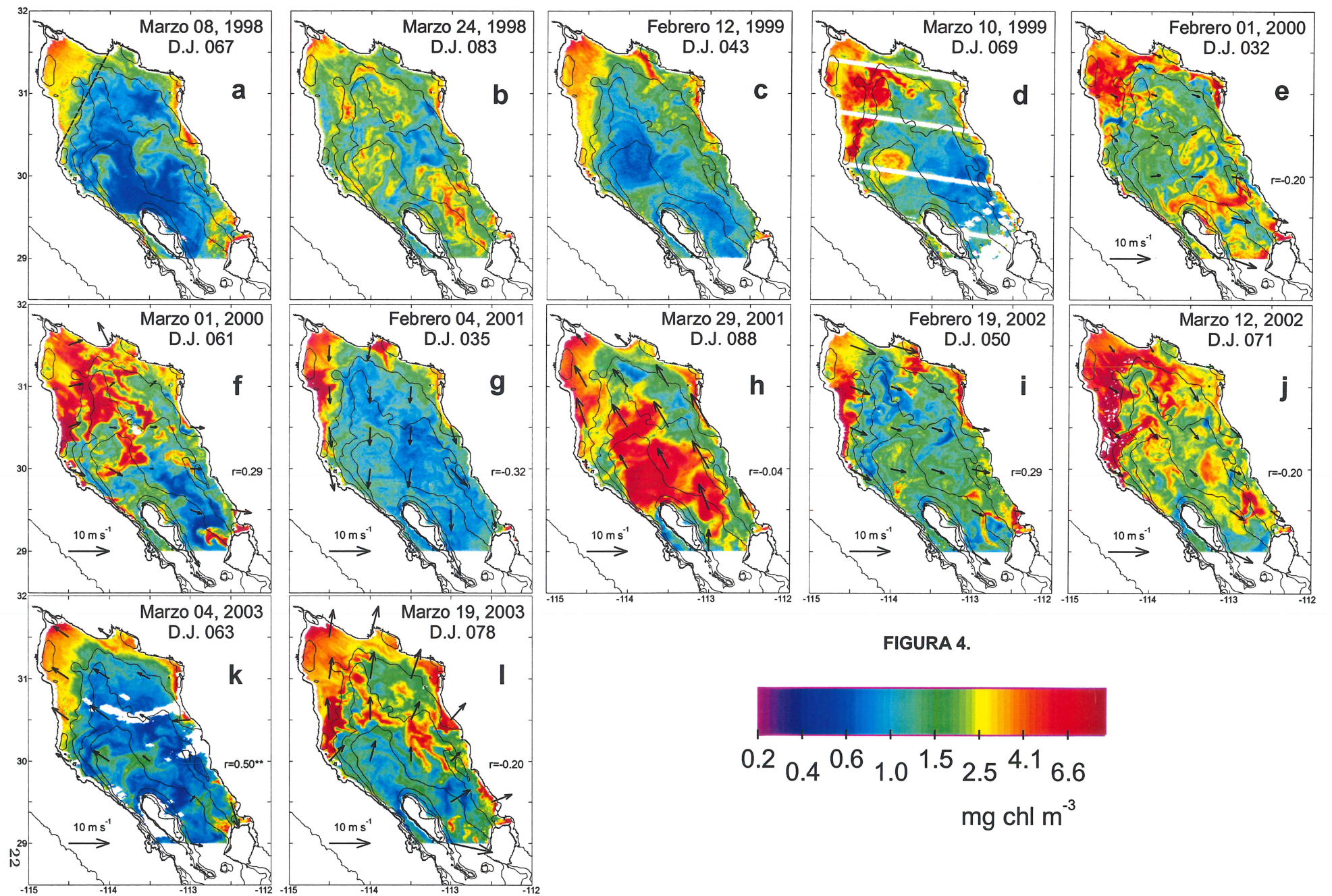


FIGURA 4.

Días después, el 20 de marzo, inició una circulación ciclónica al Noroeste de Ángel de La Guarda que se mantuvo hasta el 26 de marzo. Esta vez dicha circulación formó un remolino ciclónico (diámetro=62 km) que pudo ser observado durante dos días (Fig. 4b). Al Este de la Isla Ángel de La Guarda se formó una pluma (longitud=138 km) con valores altos de concentración de clorofila-*a* y un remolino anticiclónico más pequeño (diámetro=24 km), entre la pluma y la costa de Sonora, con valores de concentración de clorofila-*a* más bajos en su centro que en su borde (0.99–1.78 mg chl m<sup>-3</sup>). La duración de este remolino fue de ocho días. Al comparar esta imagen con la anterior se observa que la concentración de clorofila-*a* incrementó en casi toda el área hacia finales de marzo, excepto en la región al Noreste de la Isla Ángel de La Guarda.

En la imagen del 12 de febrero de 1999 (Fig. 4c) se observaron concentraciones bajas de clorofila-*a* tanto al Noroeste como al Este de la Isla Ángel de La Guarda. Estas masas de agua coincidieron con las zonas más profundas del AGC, que son, Cuenca Tiburón, Cuenca Delfín y Cuenca Wagner (Fig. 1). Al Noroeste de Ángel de La Guarda se observó además un remolino anticiclónico bien definido que, en este día, tuvo concentraciones bajas en su centro y mayores en su borde (diámetro máximo=85 km). La duración de este remolino fue de 55 días. Por otro lado, la pluma más larga en esta imagen se generó en Bahía Adair (longitud=53 km), con concentraciones de alrededor de 8.13 mg chl m<sup>-3</sup>. Sin embargo el área con la mayor extensión de aguas ricas en clorofila-*a* se observó en la porción norte (Fig. 4c).

En la imagen del 10 de marzo de 1999 (Fig. 4d) continúa observándose el remolino anticiclónico al Noroeste de la Isla Ángel de La Guarda, sin embargo su concentración de clorofila-*a* fue ahora mayor en el centro y menor en el borde. Es importante mencionar que no fue sino hasta el 28 de febrero que el gradiente de concentración de clorofila-*a* del remolino anticiclónico comenzó a invertirse. Del 17 al 31 de marzo la concentración de clorofila-*a* en el centro del remolino continuó siendo mayor a la de su borde pero con un gradiente menor. La pluma principal en esta imagen tuvo una longitud de 135 km y se extendió en dirección Noreste desde el Norte de San Luis Gonzaga (Fig. 4d). Esta pluma ocurrió de manera intermitente, y con diferente magnitud, durante este invierno. En contraste, las concentraciones más bajas del AGC ocurrieron la mayor parte del tiempo al Noreste de la Isla Ángel de La Guarda.

Para el 1 de febrero de 2000 (Fig. 4e), y en general para todo el invierno, la circulación general no estuvo dominada por una estructura en particular. En esta

imagen el Norte y el Sur del AGC estuvieron dominados por parches con alta concentración de clorofila-*a*. Mientras que en la parte central ocurrieron meandros con concentración de clorofila-*a* media (1.1–2.5 mg chl m<sup>-3</sup>) y algunos parches con concentración de clorofila-*a* baja. Al Suroeste de Bahía Adair ocurrió el mayor remolino de toda la imagen (diámetro=21 km) el cual tuvo concentraciones bajas de clorofila-*a* en su interior y una rotación indefinida.

El 1 de marzo de 2000 (Fig. 4f) las estructuras más sobresalientes fueron un remolino ciclónico ubicado al Noroeste de la Isla Ángel de La Guarda (diámetro=46 km) que en general tuvo concentraciones de clorofila-*a* menores en su centro comparadas con su borde (0.83–4.84 mg chl m<sup>-3</sup>). Y una pluma (longitud=76 km) originada en la costa Noroeste de la Isla Tiburón, con concentraciones de 10 mg chl m<sup>-3</sup>. Ambas estructuras tuvieron una duración de tan sólo 3 días. Para esta imagen la concentración de clorofila-*a* fue visiblemente alta en el Norte y baja en el Sur del AGC. Con la excepción de algunos días, el patrón para este invierno fue el mismo.

El 4 de febrero de 2001 (Fig. 4g) la concentración de clorofila-*a* en casi todo el AGC fue baja, y fue así desde el 2 hasta el 15 de febrero, sin la presencia de un remolino bien definido. Las mayores concentraciones de clorofila-*a* ocurrieron en un parche frente a San Felipe y en una pluma que cubrió la mitad de Bahía Adair (Fig. 1). Las imágenes disponibles permitieron observar esta pluma sólo los días 2 y 4 de febrero. Fue en este último día cuando alcanzó sus mayores concentraciones, 27.23 y 5.96 mg chl m<sup>-3</sup> en el interior de la bahía y en la punta de la pluma.

En la segunda mitad de este invierno, el 11 de marzo de 2001, se generó un parche con alta concentración de clorofila-*a* al Noroeste de la Isla Ángel de La Guarda, que gradualmente incrementó su tamaño hasta cubrir la parte central del AGC el 29 de marzo (Fig. 4h). Este parche se mantuvo estático hasta el 25 de marzo, posteriormente se desplazó ligeramente hacia el Este.

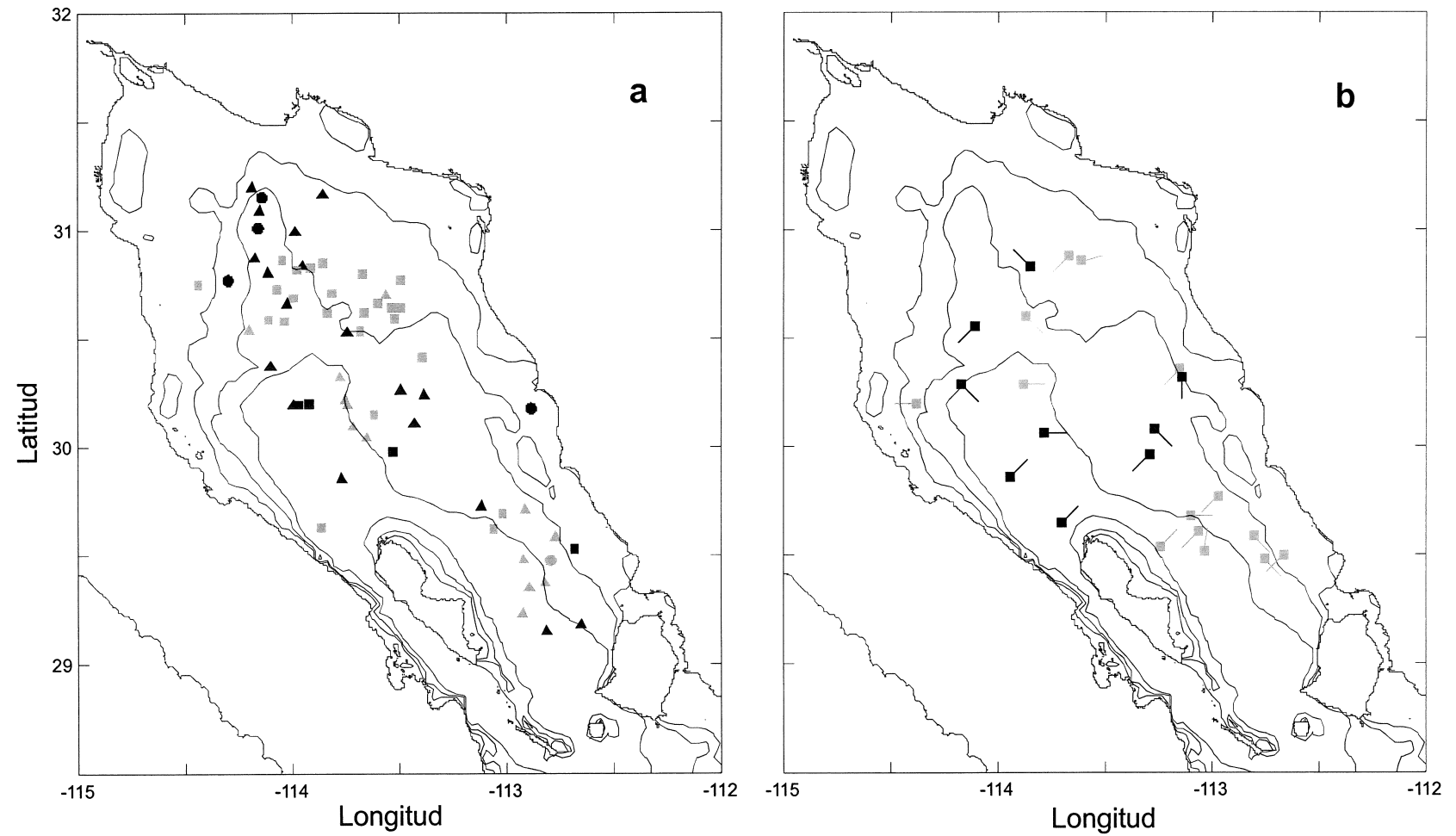
El 19 de febrero de 2002 (Fig. 4i), en la parte central del AGC, se observó un meandro de aproximadamente 130 km de longitud junto con algunos parches de alta y baja concentración de clorofila-*a*. Al Sur del AGC, Noroeste de la Isla Tiburón, ocurrió una pluma o frente (con forma de U) con alta concentración de clorofila-*a* que tuvo concentraciones medias y bajas en las aguas adyacentes al Noroeste y Sureste. Antes de desaparecer este frente se propagó durante tres días en dirección Noroeste (8.86 km d<sup>-1</sup>).

En la imagen del 12 de marzo de 2002 (Fig. 4j) se observó un jet frente a Puertecitos (longitud=80 km) y un hongo (longitud=15 km) alineado con el jet anterior. Ambas estructuras se generaron el 10 de marzo, el hongo sin embargo presentaba una orientación Sureste (perpendicular a la que se observa en la Figura 4j). Lo que indica que el flujo del jet fue tan intenso como para girar, en un día, al hongo 90° en sentido ciclónico. Al Norte de estas dos estructuras se observó una zona con concentración de clorofila-*a* menor a la predominante en la porción norte, y que coincide con la ubicación de Cuenca Wagner (Fig. 1). Del 12 al 17 de marzo esta zona permaneció con concentraciones bajas (de hasta 0.86 mg chl m<sup>-3</sup>), a pesar de que en la masa de agua circundante los valores de 10 mg chl m<sup>-3</sup> eran comunes. Al Noroeste de la Isla Tiburón se presentó otra zona con un fuerte gradiente de concentración de clorofila-*a* (0.92–5.56 mg chl m<sup>-3</sup>) pero que permaneció bien definida sólo durante este día.

El 4 de marzo de 2003 (Fig. 4k) la concentración de clorofila-*a* fue baja en todo el AGC excepto en sus esquinas, esto es, la porción norte, Bahía Adair, Bahía San Jorge y el Norte de la Isla Tiburón (Fig. 1). Las dos estructuras más grandes en esta imagen fueron una pluma con concentración de clorofila-*a* media al Noroeste de la Isla Ángel de La Guarda. Que se generó el 27 de febrero y que gradualmente incrementó su tamaño hasta convertirse en un parche con alta concentración de clorofila-*a* el 7 de marzo. Y otra pluma con concentración de clorofila-*a* alta en la costa Noroeste de la Isla Tiburón.

Del 17 al 31 de marzo se observó una ligera circulación anticiclónica en todo el AGC, sin embargo, no se observó la formación de un remolino anticiclónico al Noroeste de la Isla Ángel de La Guarda. El 19 de marzo de 2003 (Fig. 4l), como en algunas otras ocasiones, las máximas concentraciones de clorofila-*a* no ocurrieron en la porción norte sino frente a Puertecitos y frente a la costa de Sonora. En contraste, las concentraciones más bajas ocurrieron al Este y al Noroeste de la Isla Ángel de La Guarda.

Por último, se muestran las posiciones de origen (o primera detección) de los 64 remolinos y los 23 hongos observados en este trabajo (Fig. 5). En donde se observa que la formación de remolinos estuvo concentrada en la parte central del AGC y entre las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón, en zonas con profundidades mayores a 40 m (Fig. 5a). En ambas regiones los remolinos ocurrieron indistintamente en verano e invierno, anticiclónicos y ciclónicos. Los hongos muestran una distribución similar a la



**FIGURA 5.** Posición inicial de los 64 remolinos (a) y los 23 hongos (b) observados en las imágenes de concentración de clorofila-a de 1998 a 2003. En (a) se muestran los remolinos anticiclónicos (■), remolinos ciclónicos (▲) y los remolinos sin rotación definida (●), para la temporada de invierno (negro) y verano (gris). En (b) se muestra la posición de los hongos de invierno (negro) y verano (gris), la línea unida a cada cuadro indica la orientación de la base del hongo. Se muestran también las isóbatas de 40, 100 y 250 m.

de los remolinos, con la excepción de que entre la Isla Ángel de La Guarda y la costa de Sonora sólo se observaron hongos durante verano (Fig. 5b).

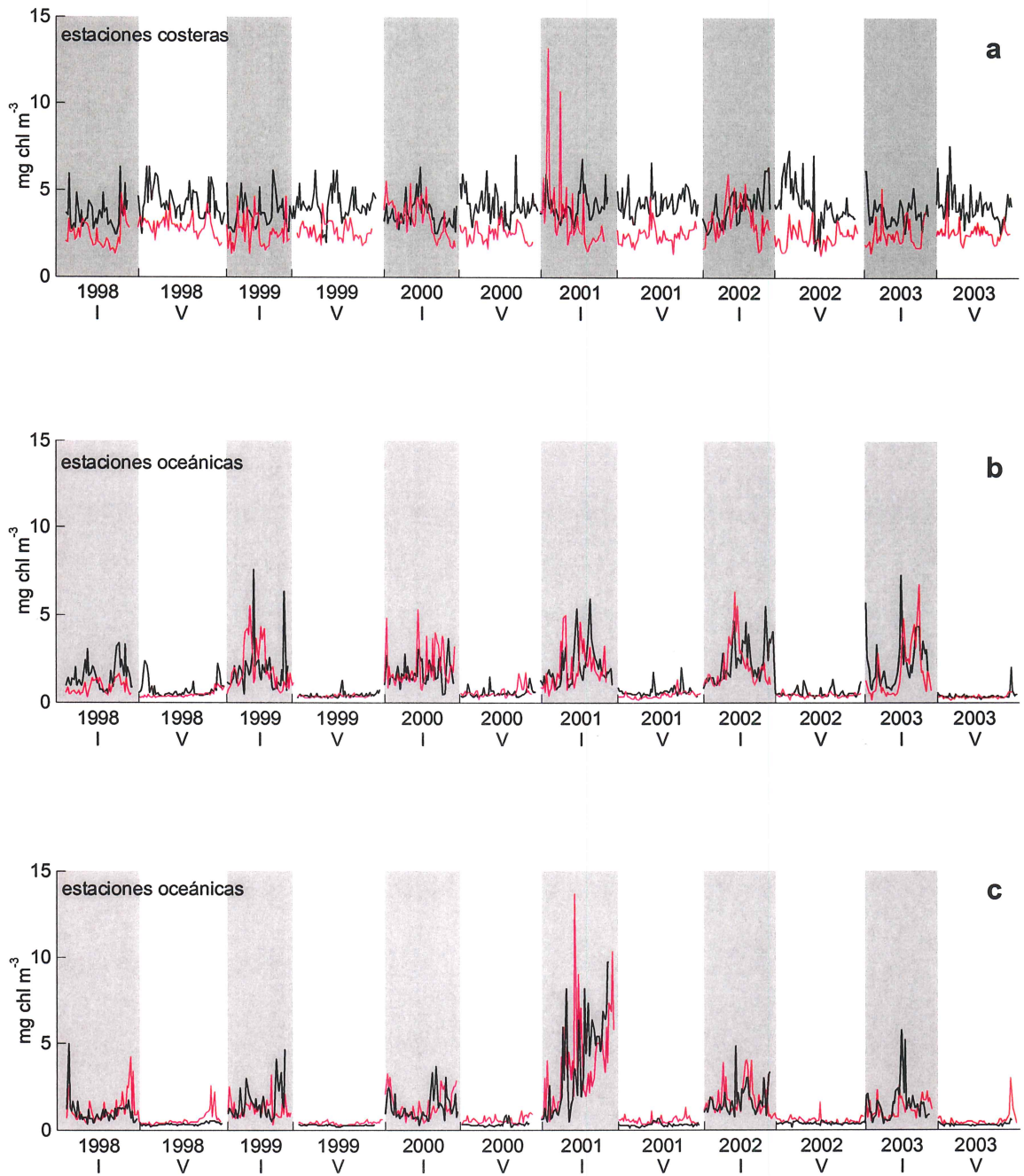
#### 4.2. Concentración de clorofila-a

La dispersión en los valores de concentración de clorofila-a mostró una diferenciación anual y espacial. Con valores máximos en invierno, particularmente en 2001 y 2002, y las estaciones 2, 3, 4 y 16 como las más variables. Las menores dispersiones ocurrieron en verano, especialmente en las estaciones 6 a 11, 13 y 14.

Para facilitar su descripción se agruparon por parejas aquellas estaciones que tuvieron patrones más similares entre sí. Junto con esta agrupación se realizó una prueba de bondad de ajuste de la que resultó que las parejas 1-5, 9-10 y 11-14 fueron significativamente similares ( $p < 0.05$ ).

Las estaciones 1 y 5 (Fig. 6a) presentaron las concentraciones de clorofila-a más constantes entre invierno y verano. Principalmente la estación 1 cuya mediana fue de  $3.94 \text{ mg chl m}^{-3}$  para toda la serie, mayor que la de la estación 5 ( $2.51 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). La estación 5 tuvo concentraciones mayores en invierno que en verano sólo para los años 2000 a 2002 (Fig. 6a), estas concentraciones fueron mayores en el mes de febrero y disminuyeron en marzo. Las concentraciones máximas, en febrero de 2001, alcanzaron los  $13.18 \text{ mg chl m}^{-3}$ , sin embargo esta estación en pocas ocasiones excedió los  $5 \text{ mg chl m}^{-3}$ .

Las estaciones 9 y 10 también tuvieron gran parte de sus concentraciones por debajo de los  $5 \text{ mg chl m}^{-3}$  pero con una señal anual bien definida (Fig. 6b). Con mínimos en verano, de aproximadamente  $0.22 \text{ mg chl m}^{-3}$ , y máximos en invierno. Las concentraciones de clorofila-a en invierno presentaron diferencias de más de un orden de magnitud, con los valores más bajos para la estación 10 en 2003 ( $0.09 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) y los más altos para la estación 9 en 1999 ( $7.59 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). En la estación 9, de 2001 a 2003 las concentraciones en marzo fueron mayores que en febrero. En la estación 10 (Fig. 6b) el patrón fue un poco más complicado, con 1999 como el único año con concentraciones mayores durante febrero que durante marzo, 2000 y 2003 con valores mayores en marzo y menores en febrero, y sin diferencias claras entre febrero y marzo para 1998, 2001 y 2002.

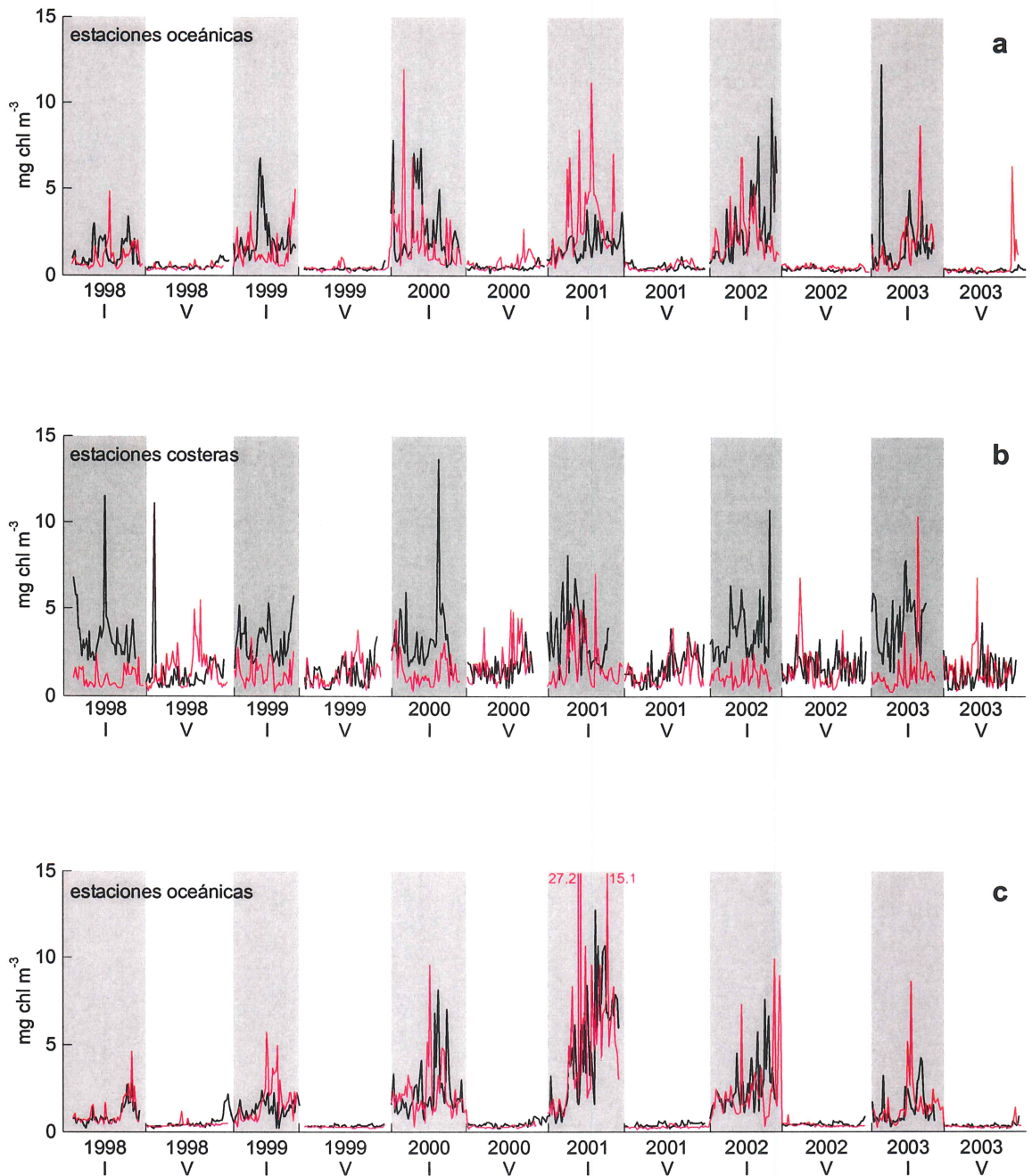


**FIGURA 6.** Series de tiempo obtenidas de las imágenes de concentración de clorofila-a para los meses de febrero-marzo (invierno, I) y agosto-septiembre (verano, V). a) datos diarios para las estaciones 1 (línea negra) y 5 (línea roja); b) estaciones 9 (negro) y 10 (rojo); c) estaciones 11 (negro) y 14 (rojo). Se indica si se trata de estaciones “costeras” u “oceánicas”.

La principal diferencia de las estaciones 11 y 14 (Fig. 6c) con la pareja anterior fue un máximo ocurrido en el invierno de 2001. Durante el verano los cambios en la concentración de clorofila-*a* fueron prácticamente nulos comparados con el invierno, con concentraciones de aproximadamente  $0.39 \text{ mg chl m}^{-3}$  para ambas estaciones. Los valores entre febrero y marzo fueron menos desiguales, con sólo cuatro años con un incremento en la concentración de clorofila-*a* hacia el mes de marzo, dos para la estación 11 (2000 y 2001) y dos para la estación 14 (1998 y 2001). Durante el máximo de 2001 la mediana de ambas estaciones fue de  $3.34 \text{ mg chl m}^{-3}$ , con el máximo para la estación 14 ( $13.65 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). En esta misma estación, durante 1998, ocurrió la menor diferencia entre las medianas de invierno y verano (i.e.  $0.47 \text{ mg chl m}^{-3}$ ).

En las estaciones 6 y 13 (Fig. 7a) los máximos invernales fueron mayores a los de las estaciones anteriores, con 4 y 5 de los 6 años disponibles con valores mayores a  $5 \text{ mg chl m}^{-3}$  para las estaciones 6 (1999–2000, 2002–2003) y 13 (1999–2003). 1998 fue el año con las concentraciones de invierno más bajas para ambas estaciones, con una mediana de tan sólo  $0.94 \text{ mg chl m}^{-3}$  (estación 6) y  $0.70 \text{ mg chl m}^{-3}$  (estación 13). En la estación 6 la mediana de la concentración de clorofila-*a* presentó dos máximos invernales, el primero en 2000 ( $1.84 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) y el segundo en 2002 ( $2.08 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). Mientras que la estación 13 presentó sólo uno en 2001 ( $2.34 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). Incrementos claros en la concentración de clorofila-*a* de febrero a marzo fueron observados en 2002 para la estación 6 y en 1999, 2001 y 2003 para la estación 13 (Fig. 7a). Decrementos de febrero a marzo sólo ocurrieron en 2000 para la estación 13. Al igual que en estaciones anteriores, el verano mostró concentraciones bajas ( $\sim 0.35 \text{ mg chl m}^{-3}$ ), con el único valor mayor a  $5 \text{ mg chl m}^{-3}$  ocurrido en la estación 13 a finales de septiembre de 2003.

La concentración de clorofila-*a* en la estación 12 (Fig. 7b) fue mayor a la de las estaciones anteriores, principalmente en verano. Su mediana de invierno fue de  $3.15 \text{ mg chl m}^{-3}$ , mientras que la de verano fue de  $1.3 \text{ mg chl m}^{-3}$ . El máximo de verano fue de  $11.09 \text{ mg chl m}^{-3}$  y ocurrió en agosto de 1998. En invierno todos los años tuvieron concentraciones mayores a  $5 \text{ mg chl m}^{-3}$ , la máxima fue de  $13.65 \text{ mg chl m}^{-3}$  y ocurrió en marzo de 2000. Dado que las concentraciones de verano fueron ahora mayores, fue posible ver un incremento en sus valores hacia el mes de septiembre en los años 2000 y 2001 (Fig. 7b). En cambio para invierno se observó un decremento en la concentración de clorofila-*a* de febrero a marzo únicamente para 2001.

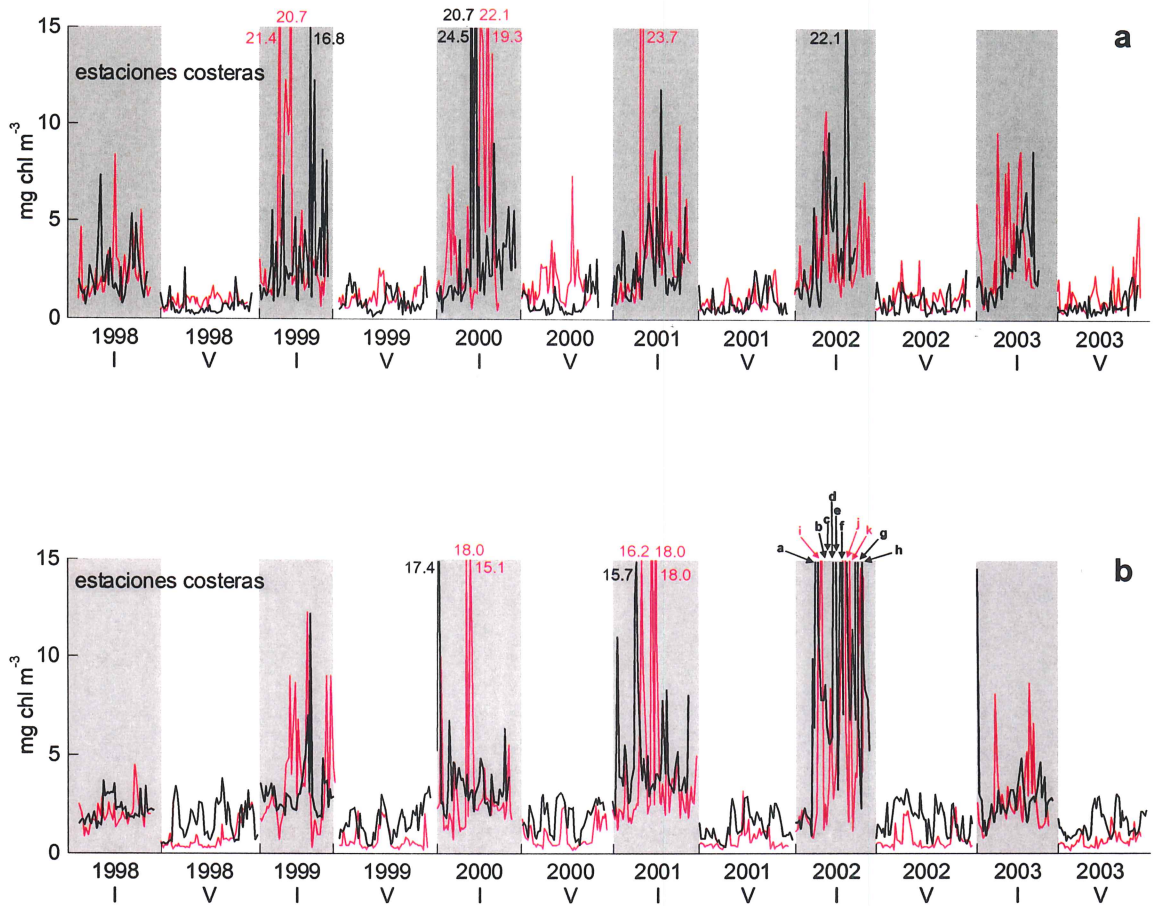


**FIGURA 7.** Series de tiempo obtenidas de las imágenes de concentración de clorofila-a para los meses de febrero-marzo (invierno, I) y agosto-septiembre (verano, V). a) datos diarios para las estaciones 6 (línea negra) y 13 (línea roja); b) estaciones 12 (negro) y 15 (rojo); c) estaciones 7 (negro) y 8 (rojo). Se indica si se trata de estaciones “costeras” u “oceánicas”.

La estación 15 mostró un patrón contrario al resto de las estaciones, con concentraciones mayores en verano y menores en invierno. Esto se vio reflejado en el hecho de que cuatro de los seis años disponibles (1998, 2000, 2002 y 2003) tuvieron una mediana de verano mayor a la de invierno. Particularmente en 1998 donde la diferencia fue de  $0.39 \text{ mg chl m}^{-3}$  (Fig. 7b). Solamente en 2001 la mediana de invierno ( $1.3 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) fue mayor a la de verano ( $1.1 \text{ mg chl m}^{-3}$ ), y en 1999 el valor fue el mismo para ambas ( $1.06 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). La mediana de los seis inviernos ( $1.06 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) fue menor que la de los seis veranos ( $1.17 \text{ mg chl m}^{-3}$ ), sin embargo, los mayores picos en la concentración de clorofila-a se observaron en invierno, el mayor de ellos fue de  $10.35 \text{ mg chl m}^{-3}$  y ocurrió en marzo de 2003 (Fig. 7b).

La mediana de los seis inviernos para las estaciones 7 y 8 fue de  $1.52$  y  $1.59 \text{ mg chl m}^{-3}$  (Fig. 7c). Este valor se ajusta mejor a las condiciones de 1998-1999 y 2003 puesto que los valores más altos de ambas estaciones ocurrieron entre los años 2000 y 2002, con los máximos para el año 2001. En el invierno de 2001 la mediana alcanzó los  $3.8$  y  $4.07 \text{ mg chl m}^{-3}$  para la estación 7 y 8 (Fig. 7c). Además, se observó un incremento en las concentraciones de clorofila-a de febrero a marzo, para ambas estaciones, principalmente en 1998 y 2001. A principios de marzo de 2001, la estación 8 tuvo una de las concentraciones de clorofila-a más altas para todas las estaciones ( $27.23 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). Las concentraciones de clorofila-a de verano en ambas estaciones volvieron a tener un patrón despreciable comparado con el de invierno, a excepción de un pico de  $2.19 \text{ mg chl m}^{-3}$  ocurrido a finales de septiembre de 1998 en la estación 7 (Fig. 7c).

En invierno la mediana de la concentración de clorofila-a para la estación 4 (Fig. 8a) incrementó gradualmente de 1998 ( $1.84 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) a 2002 ( $2.60 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) y disminuyó ligeramente en 2003 ( $2.39 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). En la estación 16 el incremento ocurrió desde 1998 ( $1.87 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) hasta 2003 ( $2.94 \text{ mg chl m}^{-3}$ ), pero a través de una serie de incrementos y decrementos. Durante invierno y verano la mediana de la estación 16 ( $2.52$  y  $0.88 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) fue mayor que la de la estación 4 ( $2.25$  y  $0.61 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) para los seis años muestreados. Sin embargo el pico máximo de concentración de clorofila-a ocurrió en la estación 4 a principios de marzo de 2000 ( $24.55 \text{ mg chl m}^{-3}$ ). En el verano concentraciones mayores a  $5 \text{ mg chl m}^{-3}$  ocurrieron en la estación 16 durante septiembre de 2000 y 2003 (Fig. 8a).



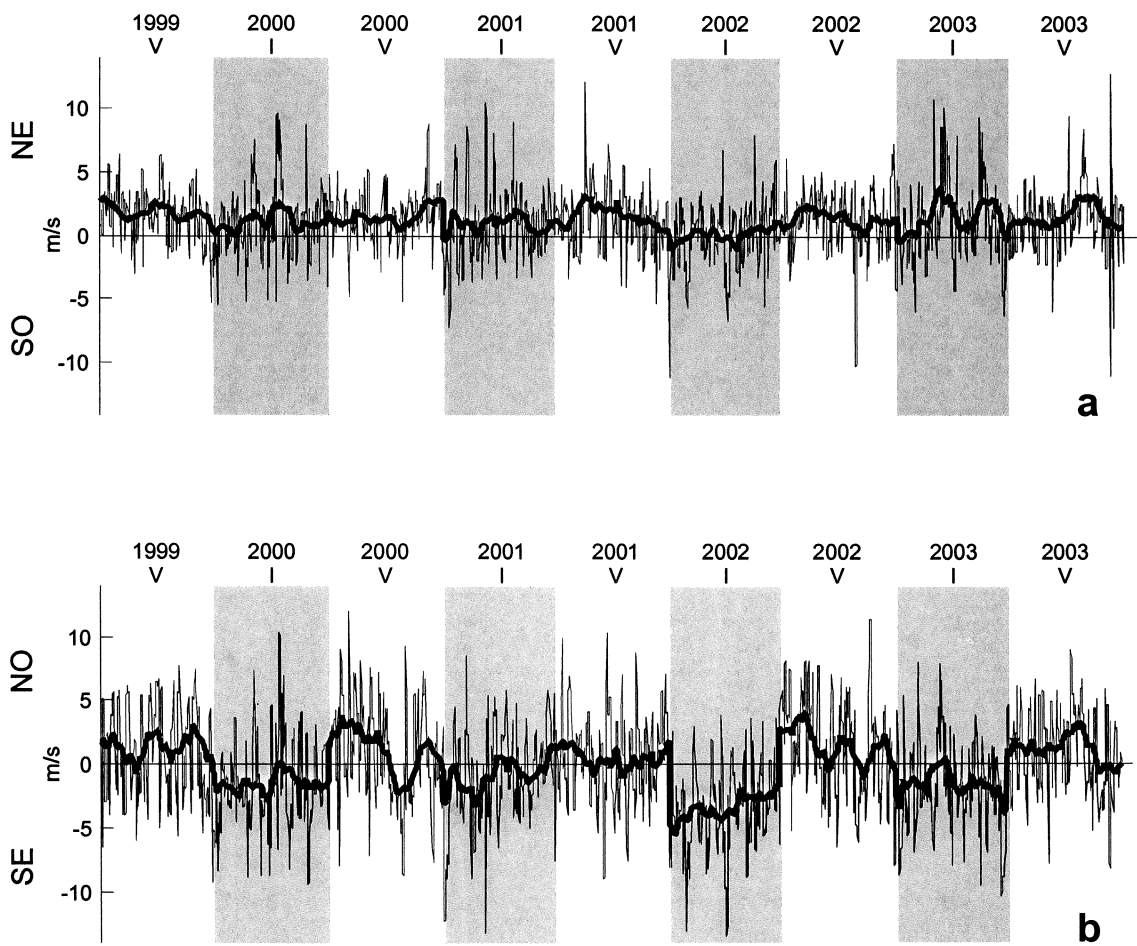
**FIGURA 8.** Series de tiempo obtenidas de las imágenes de concentración de clorofila-a para los meses de febrero-marzo (invierno, I) y agosto-septiembre (verano, V). a) datos diarios para las estaciones 4 (línea negra) y 16 (línea roja); b) estaciones 2 (negro) y 3 (rojo). Se indica si se trata de estaciones "costeras" u "oceánicas". Los máximos de las estaciones 2 y 3 son: a=28.2, b=22.9, c=23.7, d=23.7, e=22.8, f=22.1, g=26.3, h=19.3, i=16.2, j=28.2, k=20.0 mg chl m<sup>-3</sup>.

La tendencia a incrementar los valores de concentración de clorofila-*a* de febrero a marzo se observó en la estación 4 para los años 1999, 2000, 2002 y 2003, y en la estación 16 para los años 2000 a 2002. Para el verano sólo en 2000 (estación 4) y en 2003 (estación 16) se observó un incremento claro en las concentraciones de clorofila-*a* a finales de septiembre.

Las estaciones 2 y 3 (Fig. 8b) presentaron la mediana invernal más alta de todas las estaciones en el año 2002, con una concentración de 7.08 mg chl m<sup>-3</sup> para la primera y de 3.74 mg chl m<sup>-3</sup> para la segunda. Los valores del resto de los inviernos para la estación 2 fueron mayores a los de la estación 3, y como consecuencia la mediana de los seis inviernos de la primera fue mayor que la de la segunda (3.07 y 2.41 mg chl m<sup>-3</sup>). Así también, la mediana de los seis veranos de la estación 2 fue tres veces mayor que la de la estación 3 (1.5 y 0.46 mg chl m<sup>-3</sup>). Una diferencia importante considerando que se trata de estaciones adyacentes (Fig. 1). La mediana de invierno de la estación 2 incrementó de 1998 a 2002 (2.01 a 7.08 mg chl m<sup>-3</sup>), con un decremento del 62% para 2003 (2.65 mg chl m<sup>-3</sup>). Para la estación 3 (Fig. 8b) no hubo un incremento continuo, sino dos máximos, uno en 1999 y otro en 2002. El pico máximo de concentración de clorofila-*a* ocurrió en ambas estaciones, de manera simultánea, a mediados de marzo de 2002 (28.18 mg chl m<sup>-3</sup>).

#### 4.3. Viento

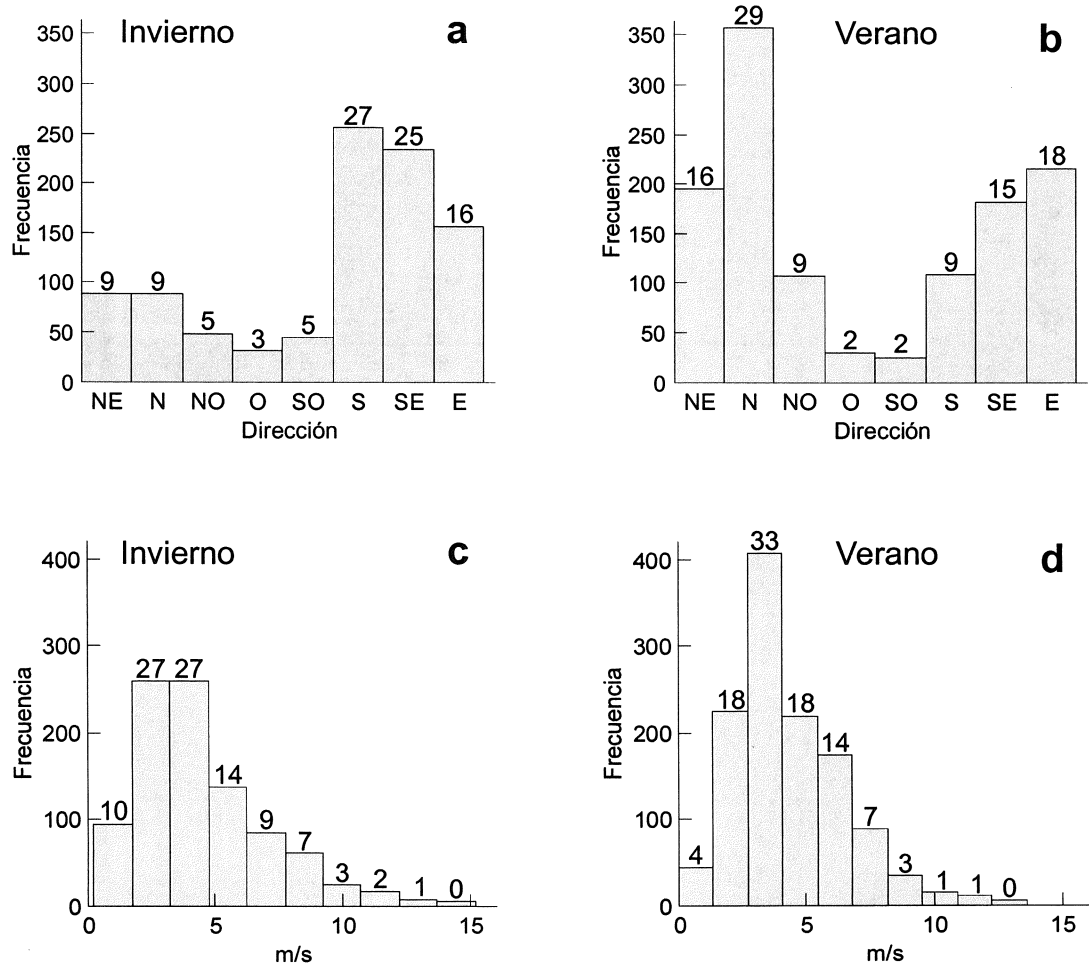
Por convención oceanográfica la dirección del viento siempre será referida hacia donde éste se dirige. La componente del viento perpendicular ( $u'$ ) y a lo largo ( $v'$ ) del GC tuvieron patrones distintos. La componente  $u'$  (Fig. 9a) presentó la mayor parte del tiempo una dirección Noreste (NE), mientras que la componente  $v'$  (Fig. 9b) tuvo un patrón más variable entre las direcciones Noroeste (NO) y Sureste (SE). Los valores promedio durante invierno para la componente  $u'$  fluctuaron entre 0.11 y 1.22 m s<sup>-1</sup>, con máximos y mínimos de 10.7 y -7.27 m s<sup>-1</sup> (ocurridos en febrero de 2003 y 2001) (Fig. 9a). Mientras que en verano el promedio estuvo entre 1.63 y 1.35 m s<sup>-1</sup>, con máximos y mínimos de 12.75 y -11.12 m s<sup>-1</sup> (ocurridos a finales de septiembre de 2003 y 2001). En la serie filtrada de la componente  $u'$  se observó que durante el verano no existen valores negativos (dirección Suroeste, SO). Durante el invierno estos fueron un poco más frecuentes, especialmente en 2002.



**FIGURA 9.** Promedio espacial de las 16 estaciones de muestreo para la componente a)  $u'$  (perpendicular al GC) y b)  $v'$  (a lo largo del GC) del viento. Para los meses de febrero-marzo (invierno, I) y agosto-septiembre (verano, V). La línea delgada es la serie original con datos cada 6 horas, la línea gruesa es la serie filtrada con un promedio corrido de 10 días.

Para la componente  $v'$  los valores promedio en invierno fluctuaron entre  $-3.33$  y  $-1.0 \text{ m s}^{-1}$  con máximos y mínimos de  $10.3$  y  $-13.6 \text{ m s}^{-1}$  (a principios de marzo de 2000 y 2002) (Fig. 9b). En verano los valores promedio fueron de  $0.67$  y  $1.41 \text{ m s}^{-1}$ , con máximos y mínimos de  $12.02$  y  $-9.3 \text{ m s}^{-1}$  (ocurridos en agosto de 2000 y septiembre de 1999). En la serie filtrada de la componente  $v'$  se observó que durante invierno predominaron los vientos SE. Sin embargo, por periodos cortos de tiempo ocurrieron vientos NO, excepto en 2002, cuando ocurrió un marcado predominio de los vientos SE (Fig. 9b). Durante el verano las condiciones se invierten, predominan los vientos NO. Sin embargo, la frecuencia y duración de vientos opuestos (SE) es mayor que en invierno y ocurre durante los cinco años muestreados. En la componente  $v'$  la señal periódica fue más clara que en la componente  $u'$ , especialmente en los veranos de 1999 y 2002 en donde el patrón fue prácticamente idéntico, tres crestas con un periodo de 17.5 días (Fig. 9b).

Junto con las series de tiempo se utilizaron los histogramas de la dirección, magnitud y componentes del viento para analizar cuantitativamente las diferencias entre invierno-verano, componentes  $u'$  y  $v'$  y las magnitudes más frecuentes. En los histogramas de dirección del viento (Fig. 10a,b) se observó que en invierno la frecuencia más alta correspondió a vientos con dirección S. Mientras que en verano el viento más frecuente fue en dirección N. Sin embargo, en ambas épocas se presentó una distribución bimodal, en donde el segundo máximo correspondió en invierno a las direcciones NE–N y en verano a la dirección E. Con el propósito de determinar la contribución al patrón de viento superficial de las direcciones SE y NO durante invierno y verano se consideraron los acimutes  $270^\circ$ – $315^\circ$  y  $90^\circ$ – $135^\circ$  como vientos hacia la boca y hacia la cabeza del GC. Para los inviernos de 2000 a 2003 (Fig. 10a) los vientos más frecuentes fueron del S (27% del total), en tanto que el segundo máximo estuvo dominado por vientos del NE–N (9% para cada uno). En esta época la frecuencia de vientos NO (5%) fue cinco veces menor que aquella del SE (25%). Los vientos del Oeste fueron los menos frecuentes (3%) en este periodo. Para los veranos de 1999 a 2003 el patrón cambió (Fig. 10b), ahora con los vientos del N como los más frecuentes (29%) y los vientos del E como los segundos más importantes (18%). Por su parte los vientos del NO y SE mantuvieron el mismo patrón de invierno, pero ahora los primeros fueron sólo dos veces menos frecuentes que los últimos (9% y 15%). En este periodo los vientos del SO fueron los menos frecuentes (2%).



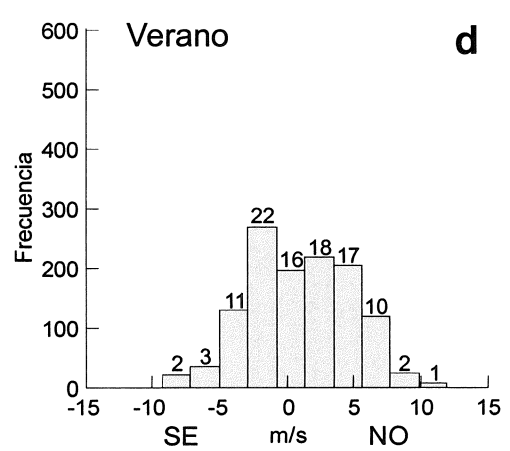
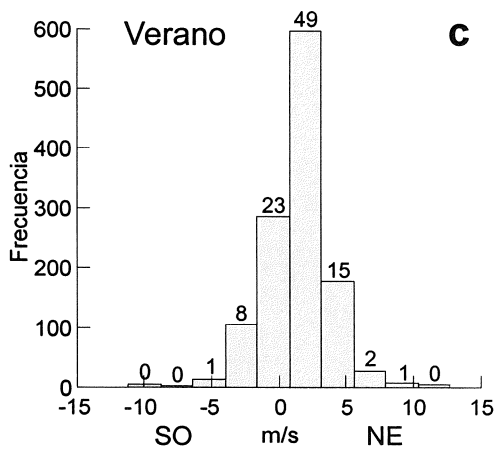
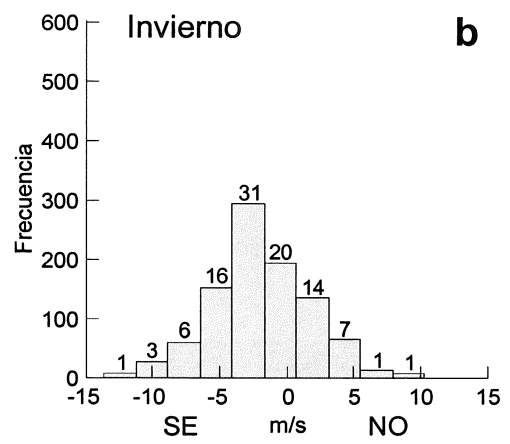
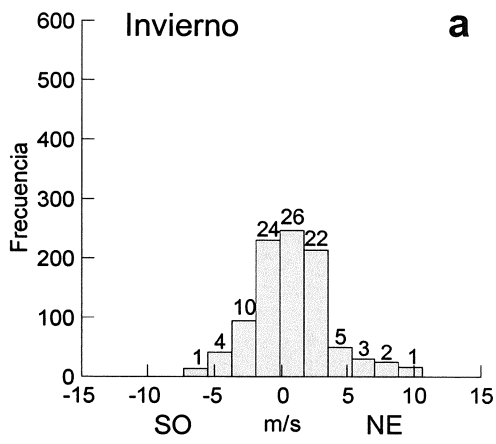
**FIGURA 10.** Histogramas de la dirección (a, b) y magnitud (c, d) del viento para los meses de febrero-marzo (invierno 2000-2003) y agosto-septiembre (verano 1999-2003). La dirección indica hacia donde sopla el viento. Se muestran los porcentajes de cada intervalo de clase.

En los histogramas de magnitud del viento (Fig. 10c,d) se observó que en verano los valores de  $3 \text{ m s}^{-1}$  fueron particularmente frecuentes (33% del total). Mientras que vientos con una intensidad de  $15 \text{ m s}^{-1}$  ( $54 \text{ km h}^{-1}$ ) ocurrieron solamente en invierno. Por otro lado los vientos intensos ( $>11 \text{ m s}^{-1}$ ) en verano fueron dos veces menos frecuentes que en invierno. Lo anterior contribuyó al hecho de que la magnitud promedio del viento en invierno haya sido ligeramente mayor que en verano ( $4.43$  y  $4.31 \text{ m s}^{-1}$ ).

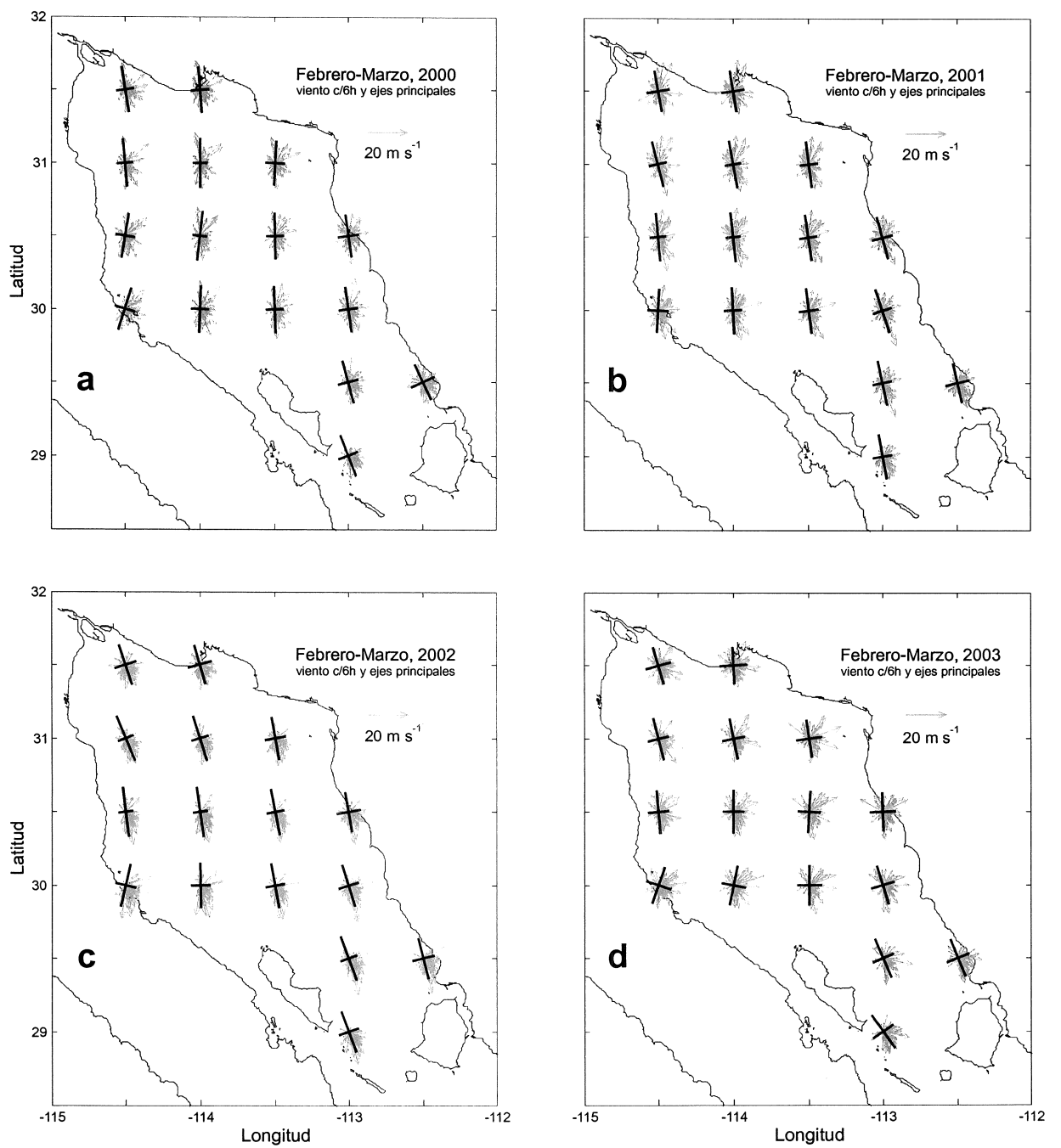
En los histogramas por componente se observó que en invierno (Fig. 11a) el valor más frecuente para la componente  $u'$  fue  $0.81 \text{ m s}^{-1}$  (dirección NE) y representó el 26% del total de dicha componente. Seguida por la magnitud  $-0.98 \text{ m s}^{-1}$  (SO) con un 24% del total. Juntas constituyeron el 50% de los vientos para la componente  $u'$ . Considerando todas las magnitudes se obtiene que la dirección NE (61%) fue dos veces más frecuente que la dirección SO (39%). En el verano esta componente presentó el mismo patrón (Fig. 11c), con las magnitudes de  $2.0$  y  $-0.38 \text{ m s}^{-1}$  (NE y SO) como las más frecuentes (49% y 23%), sólo que ahora ambas constituyeron el 72% del viento para la componente  $u'$ . La proporción considerando a todas las magnitudes se conservó (i.e. dos veces más frecuente la dirección NE sobre la dirección SO).

En la componente  $v'$  de invierno (Fig. 11b) las velocidades  $-2.85$  y  $1.93 \text{ m s}^{-1}$  constituyeron el 45% del viento a lo largo del AGC (31% y 14%). Esto coincide con la proporción considerando a todas las magnitudes, esto es, que los vientos SE fueron tres veces más frecuentes que los NO (77% y 23%). Para el verano la situación fue distinta (Fig. 11d). La frecuencia máxima correspondió a vientos SE ( $-1.84 \text{ m s}^{-1}$ ; 22% del total) y la segunda a vientos NO ( $2.43 \text{ m s}^{-1}$ ; 18%). La relación general, por el contrario, mostró que los vientos NO fueron dos veces más frecuentes que los SE (63% y 37%).

La variabilidad espacial en la dirección del viento fue representada por los ejes principales de cada estación para invierno y verano (Figs. 12 y 13). Para poder determinar la importancia de la variabilidad a lo largo de un eje respecto al otro se utilizó el cociente eje mayor/eje menor. Con esta relación fue posible categorizar cada estación durante invierno y verano. En total se formaron tres grupos para invierno (1:1, 2:1, 3:1) y cinco para verano (1:1–5:1). Para determinar la dirección del eje mayor se establecieron los intervalos:  $0^\circ$  a  $44.9^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $89.9^\circ$  y  $90^\circ$  a  $134.9^\circ$  como direcciones: NE–SO, N–S y NO–SE.

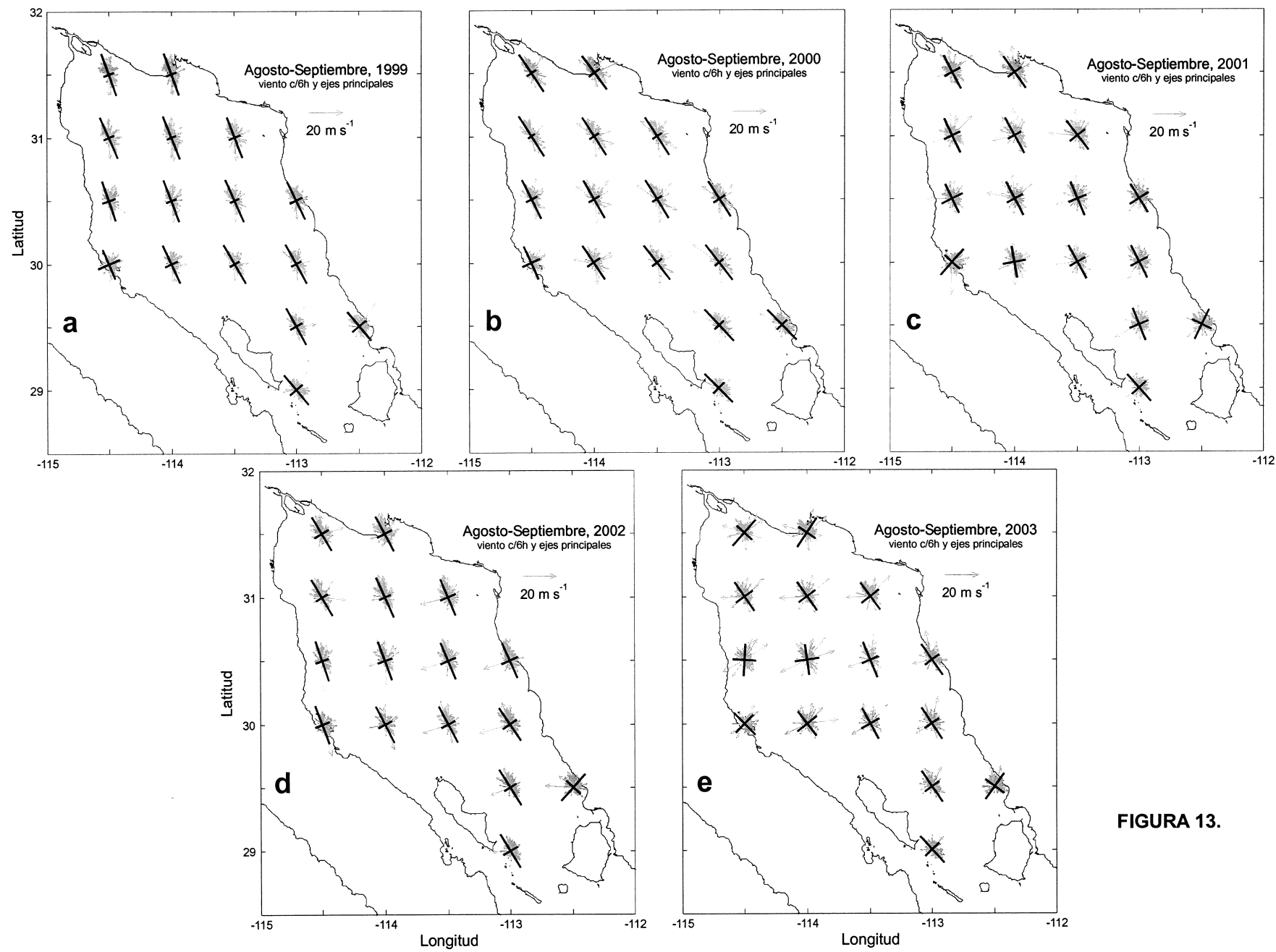


**FIGURA 11.** Histogramas de la componente  $u'$  (a, c) y  $v'$  (b, d) del viento para los meses de febrero-marzo (invierno 2000-2003) y agosto-septiembre (verano 1999-2003). Se muestran también los porcentajes de cada intervalo de clase.



**FIGURA 12.** Ejes principales y vectores del viento superficial para las 16 estaciones del AGC durante febrero-marzo de 2000 (a), 2001 (b), 2002 (c) y 2003 (d). Tanto los ejes principales como los vectores de viento están referidos al Norte geográfico.

**FIGURA 13.** Ejes principales y vectores del viento superficial para las 16 estaciones del AGC durante agosto-septiembre de 1999 (a), 2000 (b), 2001 (c), 2002 (d) y 2003 (e). Tanto los ejes principales como los vectores de viento están referidos al Norte geográfico.



**FIGURA 13.**

En los inviernos de 2000 a 2003 (Fig. 12a–d) el eje mayor tuvo, en general, dos veces mayor variabilidad que el eje menor para todas las estaciones, excepto en 2003 (Fig. 12d) cuando la relación fue 1:1 prácticamente para todo el AGC (13 estaciones). La dirección del eje mayor para todas las estaciones fue N–S, a excepción de la estación 4 en donde fue principalmente NE–SO y en la estación 8 que presentó esa misma dirección sólo para el invierno de 2003 (Fig. 12d). En orden ascendente, las estaciones 7 y 3 tuvieron la máxima variabilidad para su eje mayor, seguidas por las estaciones 6 y 2. Las cuatro, en mayor o menor magnitud, presentaron una relación 3:1 la mayor parte del tiempo. Las siguientes cuatro estaciones con la mayor variabilidad en su eje mayor fueron la 10, 11, 8 y 13 con una relación principalmente de 2:1. La estación con la menor desproporción entre sus ejes fue la 16, con una relación 1:1 para todos los años. Las otras siete estaciones presentaron relaciones entre 2:1 y 1:1.

Para el verano promedio, el eje mayor tuvo también el doble de variabilidad respecto al eje menor. Sin embargo esta cifra no es representativa, puesto que la variación entre años y la contribución de las otras categorías fueron muy importantes. Los primeros dos años fueron los que mostraron la máxima variabilidad en el eje mayor (Fig. 13a,b). En 1999 la proporción principal fue 4:1 (presente en el 50% de las estaciones), seguida por las categorías 3:1 (31%), 2:1 (13%) y 1:1 (6%). El año 2000 fue el único en el que se observó una relación 5:1 (estación 2, orientación NO–SE), sin embargo las relaciones principales fueron la 3:1 (44%) y la 4:1 (31%). En el año 2001 (Fig. 13c) la variabilidad en el eje mayor disminuyó considerablemente, con la relación 1:1 presente en el 62% de las estaciones y el resto con una proporción 2:1. En 2002 (Fig. 13d) las relaciones dominantes fueron la 2:1 (69%) y la 3:1 (25%). Y finalmente en 2003 (Fig. 13e) se observó el mínimo de toda la serie, con las relaciones 1:1 y 2:1 presentes en el 75% y el 25% de las estaciones.

En orden ascendente, la mayor proporción de variabilidad para el eje mayor se encontró en las estaciones 6, 2, 10 y 13. Mientras que la menor desproporción entre los ejes se presentó en la estación 4. La dirección del eje mayor de 1999 a 2002 fue principalmente N–S (88%, 63%, 69%, y 94% de las estaciones), en 2003 sólo el 44% de las estaciones presentó esta dirección. La dirección NO–SE fue la segunda en orden de importancia y se presentó en 1999 (estaciones 15 y 16), 2000 (estaciones 5, 11 y 13-16), 2001 (estaciones 5, 9 y 15) y 2003 (estaciones 4, 6, 8, 9, 12 y 15). Por

último, la dirección NE–SO ocurrió solamente en los años 2001 (estaciones 4 y 16), 2002 (estación 16) y 2003 (estaciones 1, 5 y 16).

Se eligió la magnitud  $20 \text{ m s}^{-1}$  ( $72 \text{ km h}^{-1}$ ) como la escala para todos los mapas de viento porque fueron sólo tres los eventos que presentaron velocidades mayores a ésta. Todos ellos ocurrieron en verano y en los alrededores de la estación 4, y fueron eliminados únicamente al momento de elaborar la figura 13, no para el análisis de los datos. Estos eran vientos provenientes de la península de Baja California con una dirección E–NE. El primero ocurrió el 23 de septiembre de 1999 con vientos de  $20 \text{ m s}^{-1}$  sólo para la estación 4. El segundo ocurrió el 17 de agosto de 2001 con vientos de 22, 23 y  $36 \text{ m s}^{-1}$  para las estaciones 3, 8 y 4. Y el tercero se presentó el 1 de septiembre de 2003, con vientos de  $21 \text{ m s}^{-1}$  sólo para la estación 4. Contrario al caso anterior, hubo dos ocasiones, también para el verano, en las que el viento fue siempre menor a  $10 \text{ m s}^{-1}$  ( $36 \text{ km h}^{-1}$ ). La primera de ellas en 1999 para la estación 11 y la segunda en 2001 para la estación 15. En estos casos se realizó un ajuste para igualar su escala con la del resto de las estaciones, pero sólo al momento de elaborar la figura 13.

#### 4.4. Correlación

Se realizaron un total de 144 correlaciones entre las series de tiempo de concentración de clorofila-a y la magnitud del viento de las 16 estaciones para cinco de los seis años muestreados (1999–2003). Sólo 25 de estas correlaciones (17%) fueron significativas ( $p < 0.05$ ), con correlaciones que estuvieron entre  $|0.2|$  y  $|0.5|$  (Tabla 4). De las 25 correlaciones, 10 fueron negativas y 15 positivas. La mayor parte de estas correlaciones ocurrieron entre el verano de 1999 y el verano de 2001 (84%). Del invierno de 2002 al verano de 2003 hubo sólo 4 correlaciones significativas.

Su tendencia muestra que la mayor parte de las correlaciones en verano fueron positivas (80%), mientras que en invierno la mayor parte fueron negativas (80%). Las estaciones que tuvieron al menos dos correlaciones significativas fueron la 2, 3, 6, 7, 8, 10 y 11 (Fig. 1), cada una con 5, 4, 2, 2, 2, 2 y 3 correlaciones, positivas y negativas. Las estaciones 9, 12, 13 y 15 fueron las únicas que no presentaron correlaciones significativas en ningún año.

**TABLA 4.** Correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ) entre las series de tiempo de concentración de clorofila-a y magnitud del viento, para 12 estaciones del AGC (I=invierno; V=verano).

Estaciones	1999		2000		2001		2002		2003	
	V	I	V	I	V	I	V	I	V	
1		0.35								
2	0.52		0.39		0.38		-0.31	0.27		
3	0.40				-0.36	0.32				0.29
4			0.33							
5		0.39								
6	0.59	0.39								
7	0.46				-0.44					
8	0.33				-0.48					
10					-0.31	-0.28				
11					-0.45	0.40			-0.35	
14					-0.32					
16	-0.31									

Se usaron correlaciones lineales sin desfase en todos los casos. Las estaciones 9, 12, 13 y 15 no tuvieron correlaciones significativas.

La correlación espacial mostró una tendencia similar a la de la correlación temporal, sólo 67 de las 364 correlaciones realizadas fueron significativas (18%), y el 70% de ellas ocurrieron en verano (Tabla 5). De las correlaciones significativas ocurridas cada verano, en promedio el 90% fueron positivas, con valores que oscilaron entre 0.50 y 0.79 (las correlaciones negativas oscilaron entre -0.62 y -0.82). Durante cada invierno las correlaciones fueron negativas y positivas en la misma proporción (50%), las primeras con correlaciones entre -0.52 y -0.68, y las últimas entre 0.50 y 0.83.

**TABLA 5.** Número de correlaciones espaciales significativas ( $p < 0.05$ ) para el AGC.

Años	Invierno	Verano	Totales
1999		6	6
2000	9	8	17
2001	2	9	11
2002	3	15	18
2003	6	9	15
<b>Totales</b>	20	47	67

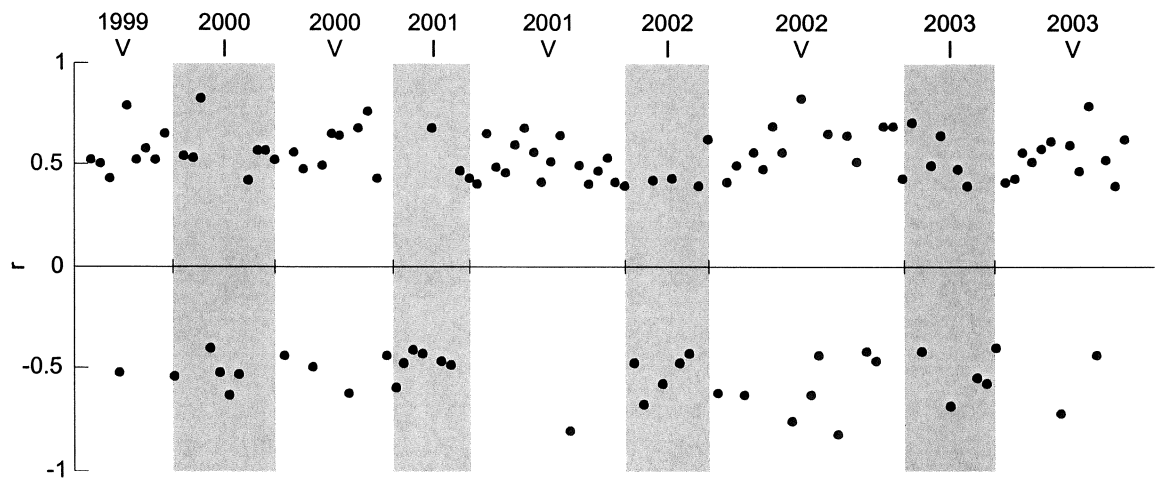
Se usaron correlaciones lineales sin desfase en todos los casos.

Esta tendencia se mantiene aún si se consideran todas las correlaciones que fueron mayores a |0.4| (Fig. 14). En verano las correlaciones positivas fueron tres veces más frecuentes que las negativas, y en invierno las correlaciones positivas y negativas fueron en promedio igualmente frecuentes.

## 5. Discusión

En las imágenes de concentración de clorofila-*a* de verano (Fig. 3) se observa que el patrón de circulación del AGC es principalmente ciclónico en la porción central del AGC, poco definido en la porción norte y sumamente variable entre las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón. En la porción norte las elevadas concentraciones de clorofila-*a* dificultan el reconocimiento de un patrón de circulación. Lo único que se observa es el intercambio de agua que la porción norte tiene con las aguas más profundas de la porción central. El intercambio ocurre alrededor de la isóbata de 40 m, tanto en invierno como en verano. En profundidades menores la mezcla por marea se intensifica (Argote *et al.* 1995) e incrementa la resuspensión de material del fondo (e.g. sedimentos y nutrientes) lo que provoca un predominio de concentraciones altas de clorofila-*a* en estas zonas. La turbidez y el consumo por organismos bentónicos son factores importantes en las zonas someras, ya que disminuyen la disponibilidad de luz e incrementan el pastoreo de organismos en la columna de agua (Cloern 1991). Lo que limita la existencia de altas densidades de fitoplancton. Ambos factores pueden ser la principal explicación del por qué no se observaron concentraciones mayores a 10 mg chl m<sup>-3</sup> en las estaciones más someras, en donde la disponibilidad de nutrientes no es un factor limitante (Hernández-Ayón *et al.* 1993).

Entre las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón la circulación es muy variable, sin duda porque esta es una zona con una intensa mezcla vertical, producida entre otras cosas por la interacción de la marea y las ondas internas con la batimetría (Argote *et al.* 1995; García-Silva y Marinone 2000; Salas-de-León *et al.* 2003). En las imágenes de concentración de clorofila-*a* se observa que esta zona es influenciada por la formación de frentes, grandes plumas originadas en la costa de las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón, y por remolinos provenientes de la parte Norte o Sur del GC.



**FIGURA 14.** Serie de tiempo de la correlación espacial. Cada punto representa la correlación lineal sin desfase entre la concentración de clorofila-*a* y la magnitud del viento para las 16 estaciones de un día. Se muestran todas aquellas correlaciones mayores a |0.4|.

La sucesión de estas estructuras modifica constantemente el patrón de circulación superficial, el cual se conserva por lapsos que van de 4 a 19 días.

En la porción central es donde se observa el mayor número de estructuras de mesoescala (remolinos anticiclónicos, remolinos ciclónicos, plumas y hongos). La intensa circulación en esta área promueve un intercambio de masas de agua entre ambas costas que sin duda debe desempeñar un papel importante en el transporte de material suspendido. Un ejemplo de esto lo constituye el transporte de larvas de peces o crustáceos desde los sitios de desove hacia sus sitios de crianza (Calderon-Aguilera *et al.* 2003; Marinone *et al.* 2004b). La propagación de remolinos anticiclónicos de la costa de Sonora hacia Baja California (Fig. 3c) y de remolinos ciclónicos de Baja California hacia Sonora (Fig. 3b) es otro rasgo de la circulación que debe contribuir de manera significativa con el transporte de material orgánico e inorgánico entre ambas costas. Al igual que el transporte ocasionado por plumas (Fig. 3l). La formación de este tipo de remolinos anticiclónicos es mucho más frecuente que la de remolinos ciclónicos, puesto que en este trabajo sólo se observó la formación de un remolino ciclónico en septiembre de 1998 (Fig. 3b).

A partir de datos hidrográficos (Lavín *et al.* 1997; Palacios-Hernández *et al.* 2002; Carrillo *et al.* 2002) se ha observado que los remolinos ciclónicos formados en el AGC, durante verano, alcanzan una profundidad de 80 m, una rotación promedio de  $0.35 \text{ m s}^{-1}$  ( $30.24 \text{ km d}^{-1}$ ) y que producen un levantamiento de las isotermas e isopicnas. Generalmente un levantamiento de la termoclina es asociado con un aumento en la concentración de nutrientes en superficie (Fiedler 2002; Vaillancourt *et al.* 2003), una disminución en la temperatura superficial (Schmitz y Vastano 1975) y un consecuente aumento en la abundancia de fitoplancton (Fiedler 2002; Vaillancourt *et al.* 2003). Sin embargo esto no ocurre en el GC durante verano. Pegau *et al.* (2002) discuten la presencia de remolinos anticiclónicos con altas concentraciones de clorofila-*a*, y remolinos ciclónicos con bajas concentraciones de clorofila-*a* en la parte sur del GC. Este patrón (inverso al tradicionalmente esperado) lo explican al mencionar que los remolinos anticiclónicos se forman con agua proveniente de la costa Este del GC (rica en clorofila-*a*). Mientras que los remolinos ciclónicos lo hacen con agua de la costa Oeste (pobre en clorofila-*a*). El patrón de los remolinos del AGC (anticiclónicos y ciclónicos) es un poco distinto, pues la poca profundidad es un factor ausente en el Sur del GC. Los grandes remolinos ciclónicos de la porción central del AGC están

asociados con bajas concentraciones de clorofila-*a*, de tal forma que es posible utilizarlas como indicadores de la presencia de estos remolinos. Tal como ocurrió a finales de septiembre de 2000 (Fig. 3e). Cuando un incremento en la clorofila-*a* al Norte del AGC estuvo asociado con un desplazamiento del remolino ciclónico hacia el Sur y con una reducción en su radio de influencia.

El hecho de que los valores aquí obtenidos para la circulación de verano en el AGC sean muy similares a los obtenidos mediante mediciones *in situ* (Lavín *et al.* 1997; Palacios-Hernández *et al.* 2002; Carrillo *et al.* 2002) es un estímulo para continuar con el uso de imágenes de color del océano para complementar el estudio de la circulación superficial del GC. Dado que proveen una cobertura espacial y temporal que no puede ser obtenida mediante cruceros oceanográficos, anclajes o boyas de deriva y que su costo es considerablemente menor.

Se ha reportado que durante los meses de agosto y septiembre existe una surgencia más intensa en la costa Este del GC que en su costa Oeste (Pegau *et al.* 2002). Este escenario no puede ser explicado utilizando la asumción de que en verano la única dirección del viento es hacia el NO (Badan-Dangon *et al.* 1991; Beier 1997; Beier y Ripa 1999; Lavín y Marinone 2003; Marinone *et al.* 2004a). Es necesario considerar la importancia de otras direcciones del viento, como la SE y la S (Fig. 10b), para poder explicar las surgencias reportadas.

Durante invierno la circulación es en general más lenta, sin un patrón definido año con año (Fig. 4). Este escenario contrasta con lo reportado anteriormente, esto es, que la circulación durante invierno es dominada de manera permanente por un remolino anticiclónico (Beier 1997; Lavín *et al.* 1997; Palacios-Hernández *et al.* 2002; Carrillo *et al.* 2002). Este remolino presenta una profundidad de 140 m, una rotación promedio de  $0.35 \text{ m s}^{-1}$  ( $30.24 \text{ km d}^{-1}$ ), provoca un hundimiento de las isopícnas y su presencia está delimitada por la isóbata de 100 m (Palacios-Hernández *et al.* 2002). En las imágenes de concentración de clorofila-*a* sólo observa la presencia de un remolino anticiclónico con esas dimensiones en el invierno de 1999 (Fig. 4c,d). Sin embargo éste presenta una rotación promedio de  $15.51 \text{ km d}^{-1}$  ( $0.18 \text{ m s}^{-1}$ ), la mitad de lo previamente reportado. En 1998 ocurre una circulación anticiclónica seguida de un remolino ciclónico (Fig. 4a,b), en la misma área y de dimensiones similares, pero ambos de corta duración (3 días para la primera y 7 días para el último).

De acuerdo con lo observado en las imágenes de invierno de seis años (1998-2003) parece que la formación del remolino anticiclónico reportado anteriormente (Beier 1997; Lavín *et al.* 1997; Palacios-Hernández *et al.* 2002; Carrillo *et al.* 2002) es en verdad un rasgo de la circulación del AGC. Sin embargo éste no aparece en todos los inviernos. Hay ocasiones en que una circulación anticiclónica aparece sólo por periodos de tiempo corto (Fig. 4a,l) y, en un menor número de ocasiones, una circulación ciclónica puede ser observada (Fig. 4b,f). Sin embargo la mayoría de las imágenes muestran que, a diferencia del verano, no existe un sentido general para la circulación en invierno (Fig. 4). Pero hay años en los que este remolino anticiclónico se genera, bien definido, y con una duración mayor a 55 días (Fig. 4c,d).

La frecuencia y duración de los remolinos muestran una clara relación con la época del año. En la circulación ciclónica de verano las estructuras de mesoescala más frecuentes son los remolinos anticiclónicos (Tabla 2), sin embargo los remolinos de mayor duración son los ciclónicos (Tabla 3). Lo contrario ocurrió en invierno, en donde los remolinos más frecuentes son los ciclónicos pero los de mayor duración son los remolinos anticiclónicos. En contraste, la relación entre la rotación de los remolinos y su concentración de clorofila-*a* no está bien definida. En verano la mayoría de los remolinos ciclónicos observados (46%) muestran una diferencia mínima ( $<0.3 \text{ mg chl m}^{-3}$ ) entre la concentración de clorofila-*a* de su centro y de su borde. Sólo el 38% de los remolinos ciclónicos muestra un gradiente mayor a  $0.3 \text{ mg chl m}^{-3}$ , con la clorofila-*a* más alta en su centro. En los remolinos anticiclónicos el 63% muestra un gradiente de concentración de clorofila-*a* mínimo, mientras que el 33% muestra una mayor concentración de clorofila-*a* en su centro que en su borde. En invierno la mayoría de los remolinos ciclónicos (83%) tienen una mayor concentración de clorofila-*a* en su centro que en su borde. El 17% restante tiene una menor concentración de clorofila-*a* en su centro que en su borde. Mientras que la mayoría de los remolinos anticiclónicos (75%) tienen una concentración de clorofila-*a* menor en su centro que en su borde, el otro 25% no presenta un gradiente de concentración de clorofila-*a* significativo. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que el patrón anterior considera la concentración de clorofila-*a* dentro del remolino para un sólo día, y que en varias ocasiones se observó que los remolinos presentan grandes cambios en la concentración de clorofila-*a* con el tiempo. Tal como se observa en el remolino anticiclónico generado en el invierno de 1999 (Fig. 4c,d), el cual tuvo concentraciones

de 0.55 mg chl m<sup>-3</sup> durante la primera mitad de su vida, y posteriormente alcanzó concentraciones de 4.5 mg chl m<sup>-3</sup>.

Hasta el momento no existe una explicación precisa para el mecanismo de formación de los remolinos formados en el AGC, sin embargo, estos podrían ser uno de los mecanismos a través de los cuales las ondas atrapadas a la costa disipan su energía (Merrifield y Winant 1989; Merrifield 1992; Martínez y Allen 2004a; Martínez y Allen 2004b).

Las series de tiempo de concentración de clorofila-*a* confirman el predominio de la variabilidad anual en casi todo el AGC, mínima en verano y máxima en invierno. La excepción son el Delta del Río Colorado (estaciones 1 y 5; Fig. 6a) y entre las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón (estación 15; Fig. 7b). En la primera región los valores de verano son similares a los de invierno, y en la segunda la concentración de clorofila-*a* es mayor en verano que en invierno. Las estaciones 1 y 5 se encuentran en la porción más Norte (y somera) del AGC (Fig. 1). En esta zona la amplitud de la marea es de hasta 5 m y provoca una constante resuspensión de sedimentos. Esto hace que los nutrientes en la columna de agua de esta región se encuentren en altas concentraciones durante todo el año (Hernández-Ayón *et al.* 1993). Y por lo tanto permiten que las concentraciones de fitoplancton se mantengan sin cambios significativos entre invierno y verano. La estación 15 se encuentra en una zona donde ocurre una importante mezcla vertical generada por la presencia de ondas internas y corrientes de marea durante todo el año (Simpson *et al.* 1994; Gaxiola-Castro *et al.* 2002). Esta mezcla vertical permite que haya nutrientes disponibles para el crecimiento del fitoplancton tanto en invierno como en verano, similar a las estaciones 1 y 5. El hecho de que la concentración de clorofila-*a* sea mayor en verano que en invierno podría estar relacionado con el hecho de que la estratificación en verano es mayor (Argote *et al.* 1995; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2001). Lo que reduce las variaciones en intensidad de luz a las que es sometido el fitoplancton por la mezcla vertical, y que se traduce en un mayor crecimiento (Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro 1988; Gaxiola-Castro *et al.* 1995).

Por otro lado la concentración de clorofila-*a* mostró, en general, un incremento de inicios de febrero hacia finales de marzo, lo cual podría estar relacionado con el aumento de la radiación solar hacia finales del invierno (Castro *et al.* 1994). Aunado a

una mayor disponibilidad de nutrientes, producto de la baja estratificación y de una capa de mezcla más profunda (Argote *et al.* 1995; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2001; Palacios-Hernández *et al.* 2002). Esta misma respuesta se observa en la mayoría de las imágenes de concentración de clorofila-*a* de invierno (Fig. 4).

Existe también una diferencia entre las estaciones oceánicas y costeras, la cual es más clara en verano. En las oceánicas (estaciones: 6-11, 13 y 14; Fig. 1) la concentración de clorofila-*a* es mínima (Fig. 7a), mientras que en las costeras (estaciones: 1-5, 12, 15 y 16; Fig. 1) la concentración de clorofila-*a* muestra sus valores mayores (Fig. 8b). Las bajas concentraciones de verano son una consecuencia de una mayor estratificación de la columna de agua (Argote *et al.* 1995; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2001). Sin embargo, la poca profundidad del AGC permite que un mayor número de fenómenos oceanográficos (surgencias, mezcla por marea, ondas internas) sean capaces de incrementar la concentración de nutrientes en la capa superficial. En invierno una menor estratificación (Argote *et al.* 1995; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2001) permite la presencia de concentraciones mayores a 10 mg chl m<sup>-3</sup> en casi todas las estaciones, pero sobre todo en las estaciones 2, 3, 4, y 16 (estaciones costeras; Fig. 8). En donde las concentraciones entre 1999 y 2002 frecuentemente fueron mayores a 15 mg chl m<sup>-3</sup>. Estas estaciones (excepto la estación 16) se encuentran por arriba de la isóbata de 40 m, adyacentes a la costa de Baja California (Fig. 1). La estación 12 se encuentra también por arriba de los 40 m de profundidad, adyacente a la costa de Sonora, pero no presenta concentraciones tan altas como las estaciones anteriores. Es posible que esto se deba a su lejanía con el Delta del Río Colorado.

Para el AGC la isóbata de 40 m desempeñó la función de límite de la plataforma continental. Ya que en la mayoría de las imágenes SeaWiFS la masa de agua con alta concentración de clorofila-*a* cubrió la parte Norte, desde la línea de costa hasta este límite (Figs. 3 y 4). Otra muestra de esto se observa en la costa de Baja California en donde dicha isóbata parece haber funcionado como una frontera entre agua profunda (rica en nutrientes) y agua superficial (bien iluminada). Lo que promovió en ocasiones la formación de plumas con alta concentración de clorofila-*a*, como las que se observaron el 10 y el 19 de marzo de 1999 y 2003 (Fig. 4d,l).

Las series de tiempo y las imágenes de concentración de clorofila-*a* demuestran que el patrón general de surgencias tradicionalmente aceptado para el GC

(i.e. surgencias intensas durante invierno en la costa de Sonora y surgencias moderadas durante verano en la costa de Baja California) no corresponde para el AGC. Por el contrario, el AGC responde del mismo modo en ambas costas, con alta concentración de clorofila-*a* en invierno y baja en verano. La propagación de estructuras de mesoescala de una costa hacia la otra puede contribuir a esto, al facilitar el intercambio de masas agua entre ambas costas. Por otro lado, las concentraciones de clorofila-*a* en la costa Norte de Baja California son generalmente mayores a las de la costa Norte de Sonora, posiblemente por la presencia del Delta del Río Colorado.

Las series de tiempo de viento muestran que las velocidades de la componente  $v'$  (a lo largo del GC) son en general mayores a las velocidades de la componente  $u'$  (perpendicular al GC), tanto en invierno como en verano. Sin embargo los valores de esta última no son tan pequeños como para poder despreciar la variabilidad del viento perpendicular al AGC (Fig. 9). El viento sobre el AGC no muestra sólo una dirección dominante en invierno y verano, sino dos: S y N-NE en invierno; N y E en verano (Fig. 10a,b). Este escenario indica un patrón de viento bimodal que no se ajusta al esquema de circulación atmosférica que se ha considerado tradicionalmente. En donde el viento sopla por seis meses hacia la cabeza del GC (NO) y por seis meses hacia la boca del mismo (SE) (Badan-Dangon *et al.* 1991; Beier 1997; Lavín y Marinone 2003; Marinone *et al.* 2004a), en donde la componente  $u'$ , perpendicular al GC, ha sido despreciada.

El predominio del viento bimodal es mayor en verano cuando la relación entre las direcciones S-SE-E y N-NE-NO es 1:1 (Fig. 10b), mientras que en invierno la relación se inclina hacia el primer grupo con una proporción 3:1 (Fig. 10a). Si se considera solamente la importancia de las direcciones NO y SE obtenemos que la frecuencia de vientos NO es baja durante verano e invierno (<10% del total), mientras que los vientos SE no son los más frecuentes en invierno (25%) ni en verano (15%).

La variabilidad diaria parece jugar un papel tan importante como el de la variabilidad anual, puesto que las inversiones en los valores de las componentes  $u'$  y  $v'$  es un fenómeno frecuente. En promedio, la componente  $v'$  en invierno muestra inversiones cada 48 h, mientras que en verano ( $v'$ ) y en la componente  $u'$  las inversiones ocurren cada 24 h.

Espacialmente la dirección del viento es más homogénea en invierno. Con la región frente a San Felipe y Puertecitos (estaciones 2, 3, 6 y 7) como la más dominada por vientos S (Fig. 12). Y la región frente a San Luis Gonzaga (estaciones 4 y 8) como la única en la que predominan los vientos NE. La región al Norte de la Isla Tiburón (estación 16) es la más variable en cuanto a la dirección del viento. Durante verano se presenta un predominio de vientos N-NO en una franja que cruza el AGC, delimitada por las estaciones 2, 6, 10 y 13 (Fig. 13). La mayor variabilidad en la dirección del viento ocurre en la región frente a San Luis Gonzaga (estación 4) y al Norte de la Isla Tiburón (estación 16). En el resto del AGC la variabilidad en la dirección del viento es mayor en verano que en invierno.

De particular importancia es el hecho de que el viento NE predomina en la región de San Luis Gonzaga, tanto en invierno como en verano (al Norte de la Isla Tiburón esta dirección predomina sólo durante verano). Este tipo de viento es comúnmente identificado en la costa Este de Baja California como "Weste", viento intenso que sopla durante un día del interior de la península hacia el GC. Este viento es consecuencia de depresiones en la topografía de la península que canalizan e intensifican la magnitud del viento y ocurren de mediados de marzo a mediados de julio (José Arce com. pers.<sup>3</sup>). Ejemplo de estos "Westes" son los tres ocurridos en los veranos de 1999, 2001 y 2003, en donde el mayor de ellos (17 de agosto de 2001) tuvo una duración de 12 h y fue suficientemente intenso como para modificar el campo de viento de las estaciones 3 y 8 (50 km mar adentro). Al Norte de la Isla Tiburón este fenómeno no ocurre, sin embargo la configuración costera adyacente a la estación 16 pudiera ser la responsable de modificar el campo de viento local (Fig. 13d).

Tradicionalmente el viento sobre el GC ha sido explicado como un efecto del gradiente de presión asociado con los centros de alta y baja presión que se ubican sobre la región en invierno y verano (Badan-Dangon *et al.* 1991). Estos generan viento en dirección S (invierno) y N (verano) que al ingresar al GC es orientado hacia el SE y el NO debido a la presencia de la orografía local, que en la península alcanza alturas mayores a 700-1000 m y en el macizo continental excede los 1500 m (Bray 1988; Merrifield y Winant 1989; Badan-Dangon *et al.* 1991). Y además debido a la diferencia en el coeficiente de arrastre, el cual es menor sobre el agua y por lo tanto ofrece menor

---

<sup>3</sup> José Arce es miembro de la flota de pesca deportiva de Bahía de Los Ángeles, B.C.

resistencia al paso del viento, comparado con la tierra (Badan-Dangon *et al.* 1991). Sin embargo al observar la topografía de Baja California, adyacente al AGC, es claro que existen al menos tres depresiones en su topografía con alturas que oscilan entre los 300 y 600 m (Fig. 1). Y que es a través de ellas que episodios de viento intenso ("Westes") ingresan al AGC, con lo cual se modifica el patrón de viento superficial. Esto es una evidencia de que el AGC no se encuentra tan aislado de la influencia del Océano Pacífico como ha sido supuesto (Bray 1988; Merrifield y Winant 1989; Badan-Dangon *et al.* 1991). Esto es evidente si se considera que los vientos E ocupan el segundo y tercer lugar de importancia en verano e invierno (Fig. 10a,b).

La mayoría de los datos de viento en el GC corresponden a mediciones realizadas en la costa o sobre islas, son pocos aquellos que corresponden a vientos medidos sobre la superficie del mar. Mucha de esta información ha sido utilizada para estudiar la dinámica del Monzón de Norteamérica, el cual es un fenómeno atmosférico de gran escala que ocurre de julio a septiembre sobre el Suroeste de Estados Unidos y el Noroeste de México (Douglas *et al.* 1993; Adams y Comrie 1997). En el GC el Monzón de Norteamérica es detectado en la forma de los denominados "Gulf Surges" (Frentes del Golfo). Que consisten en un incremento y un cambio repentino en la dirección del viento hacia el N-NO, acompañado de un descenso de la temperatura y un incremento abrupto en el punto de rocío (Stensrud *et al.* 1997). En promedio se ha observado que estos Frentes del Golfo tienen una periodicidad de 10 días (Fuller y Stensrud 2000; Douglas y Leal 2003). Periodo similar al de los pulsos de viento NO (17.5 días) observados en la componente  $v'$  durante los veranos de 1999 y 2002 (Fig. 9b).

Con el conocimiento de la presencia del Monzón de Norteamérica en el AGC es posible dar una mejor interpretación a la variabilidad en la dirección del viento (Fig. 10b). Las direcciones E, NE, SE y S ocurren en casi el 60% de las ocasiones, es decir cuando el Monzón se relaja. Y las direcciones N y NO representan las ocasiones cuando el Monzón se intensifica (38% del total). Combinando esto con el histograma de la componente  $v'$  (Fig. 11d) tenemos que durante el periodo en el que el Monzón se relaja las velocidades hacia la boca del GC son en su mayor parte bajas ( $\sim -1.8 \text{ m s}^{-1}$ ), en cambio cuando el Monzón se intensifica las velocidades hacia su cabeza oscilan entre bajas y altas ( $\sim 0.3$  a  $4.6 \text{ m s}^{-1}$ ).

Sin embargo, lo más relevante de este último histograma es su excepcional semejanza con aquel publicado por Bordoni *et al.* (2004; su Fig. 4). En el que utilizaron datos de QuikSCAT del Sur del GC para los meses de junio a septiembre de 1999 a 2003 y en donde el resultado fue idéntico para la componente a lo largo del GC ( $v$ ). Una distribución bimodal, con la frecuencia máxima en las velocidades negativas, alrededor de  $-1.5 \text{ m s}^{-1}$  (hacia la boca del GC), y el segundo máximo en las velocidades positivas, alrededor de  $3 \text{ m s}^{-1}$  (hacia la cabeza del GC). El máximo positivo lo explican como Frentes del Golfo, pulsos de viento N que son canalizados hacia el interior del GC y que se propagan a lo largo de él. El máximo negativo lo consideran como "background flow" (viento de fondo), el cual puede ser diferenciado del viento asociado con los Frentes del Golfo. Lo anterior podría implicar que, en el verano, no existe una diferencia significativa en la componente a lo largo del GC entre sus porciones Norte y Sur. A pesar del efecto causado por el viento a través de depresiones en la orografía del Norte de Baja California y la presencia de las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón. Factores que de acuerdo con Bordoni *et al.* (2004) complican la dinámica atmosférica del AGC en comparación con la región Sur del GC.

La correlación lineal sin desfase entre la magnitud del viento y la concentración de clorofila-*a* tuvo correlaciones significativas, pero estas fueron pocas. Sólo el 17% y el 18% de las correlaciones temporales y espaciales realizadas fueron significativas. El valor de su correlación también fue bajo tanto temporal (entre  $|0.2|$  y  $|0.5|$ ) como espacialmente (entre  $|0.5|$  y  $|0.8|$ ). Sin embargo las correlaciones significativas muestran una estructura. La mayor parte de las correlaciones positivas ocurren en verano y las correlaciones negativas en invierno (Tabla 4).

Si se agrupan todas las estaciones que tuvieron al menos dos correlaciones significativas (estaciones 2, 3, 6, 7, 8, 10 y 11) se observa que éstas delimitan la porción Oeste del AGC (Fig. 1). Y que adyacente a la costa de Sonora cuatro estaciones no tuvieron ninguna correlación significativa (estaciones 9, 12, 13 y 15). La porción Oeste del AGC sería entonces el área en donde la asociación entre la circulación superficial y el viento es mayor. La cual coincide con la posición del remolino ciclónico generado en invierno por el esfuerzo del viento en el modelo numérico de Martínez y Allen (2002; su Fig. 8a), en el que también se utilizaron datos del sensor QuikSCAT.

Una posible explicación para la poca correlación entre la concentración de clorofila-*a* y la magnitud del viento es la existencia de forzamientos remotos, los cuales pueden ser generados en la parte Sur del GC o fuera de él, como en el caso de ondas atrapadas a la costa (Merrifield y Winant 1989; Merrifield 1992; Martínez y Allen 2004a; Martínez y Allen 2004b). Dos evidencias de esta baja correlación son, el hecho de que solamente se identificó la formación de tres plumas como una consecuencia del viento, dos en invierno (Fig. 4g,l) y una en verano. Y que la rápida formación de una pluma de gran extensión (Fig. 4j; frente a Puertecitos) coincida con vientos moderados y desfavorables a su formación (SO y SE).

Por último, la principal diferencia que tiene este trabajo es el uso de una escala de muestreo espacial (1 km) y temporal (6 h) pequeña para el análisis de la circulación superficial oceánica y atmosférica. Con esto y con una base de datos que cubre seis años fue posible cuantificar la existencia de una variabilidad significativa en la dirección del viento, la existencia de distintos regímenes de circulación oceánica durante verano e invierno, y que el sentido de la circulación en el AGC no muestra una relación evidente con la dirección del viento.

## 6. Conclusiones

De acuerdo con lo observado en las imágenes de concentración de clorofila-*a* y los datos de viento de invierno y verano, para los años de 1999 a 2003, el sentido de la circulación del AGC no muestra una relación evidente con la dirección del viento.

La circulación oceánica de verano es ciclónica, y tiene una velocidad promedio de 21.46 km d<sup>-1</sup>. Además, en cada verano se observaron en promedio 6 remolinos, 3 plumas y 2 hongos con dimensiones de entre 16 y 133 km. Estas estructuras de mesoescala sin duda juegan un papel importante en la dinámica del AGC.

La circulación oceánica de invierno presenta una gran variabilidad interanual y carece de un patrón principal. En su lugar se observa la mayor parte del tiempo la interacción de un conjunto de celdas, de menor tamaño y duración, que en ocasiones generan breves flujos anticiclónicos y ciclónicos. 1999 fue el único año en el que se observó una circulación anticiclónica (15.51 km d<sup>-1</sup>), de menor extensión que la de verano, y cuya duración fue mayor a 55 días. En cada invierno se observaron en promedio 4 remolinos, 3 plumas y 2 hongos con dimensiones de entre 7 y 156 km.

El patrón de viento tiene al menos dos direcciones principales en invierno (Sur, Norte y Noreste) y en verano (Norte y Este). Sin embargo ninguna de ellas alcanza una frecuencia mayor al 30% por sí misma. Es necesario considerar al menos cuatro direcciones para explicar el 78% de la variabilidad de la dirección del viento en invierno y en verano.

Existe una diferencia en la respuesta de la concentración de clorofila-*a* entre la zona costera (estaciones 1-5, 12, 15 y 16) y el mar abierto (estaciones 6-11, 13 y 14), con concentraciones mayores en la primera y menores en la última. Esto es más evidente en verano. Las únicas excepciones son la zona entre las Islas Ángel de La Guarda y Tiburón, con concentraciones de clorofila-*a* mayores en verano y menores en invierno. Y el Delta del Río Colorado y Bahía Adair, en donde la concentración de clorofila-*a* se mantiene constante durante invierno y verano.

No se observó una respuesta desfasada en la surgencia costera de Baja California y Sonora. En ambas costas se observaron concentraciones de clorofila-*a* máximas en invierno y mínimas en verano. Esto confirma que en invierno y en verano ocurren vientos hacia la cabeza y hacia la boca del GC para promoverlas.

## 7. Referencias

- Adams, D.K. y Comrie, A.C., (1997). The North American monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(10), 2197-2213.
- Álvarez-Borrego, S. y Gaxiola-Castro, G., (1988). Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton. *Continental Shelf Research*, 8, 37-47.
- Álvarez-Borrego, S. y Lara-Lara, J.R., (1991). The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. En: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, American Association of Petroleum Geology Memoir 47, 555-567.
- Argote, M.L., Amador, A., Lavín, M.F., Hunter, J.R., (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 100(C8), 16103-16118.
- Badan-Dangon, A., Dorman, C.E., Merrifield, M.A., Winant, C.D., (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 96(C9), 16877-16896.
- Beier, E., (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27, 615-632.
- Beier, E. y Ripa, P., (1999). Seasonal gyres in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 305-311.
- Bordoni, S., Ciesielski, P.E., Johnson, R.H., McNoldy, B.D., Stevens, B., (2004). The low-level circulation of the North American Monsoon as revealed by QuikSCAT. *Geophysical Research Letters*, 31, L10109, doi:-10.1029/2004GL020009.
- Bray, N.A., (1988). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93(C5), 4993-5020.
- Calderon-Aguilera, L.E., Marinone, S.G. y Aragón-Noriega, E.A., (2003). Influence of oceanographic processes on the early life stages of the blue shrimp (*Litopenaeus stylirostris*) in the upper Gulf of California. *Journal of Marine Systems*, 39, 117-128.
- Carrillo, L., Lavín, M.F., Palacios-Hernández, E., (2002). Seasonal evolution of the geostrophic circulation in the northern Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 157-173.
- Castro, R., Lavín, M.F., Ripa, P., (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 99(C2), 3249-3261.
- Chin, T.M., Milliff, R.F., Large, W.G., (1998). Basin-scale high-wavenumber sea surface wind fields from multiresolution analysis of scatterometer data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(3), 741-763.
- Cloern, J. E., (1991). Tidal stirring and phytoplankton bloom dynamics in an estuary. *Journal of Marine Research*, 49, 203-221.
- Doney, S.C., Glover, D.M., McCue, S.J., Fuentes, M., (2003). Mesoscale variability of Sea-viewing Wide-Field-of-View Sensor (SeaWiFS) satellite ocean color: global patterns and spatial scales. *Journal of Geophysical Research*, 108(C2), 3024, doi:-10.1029/2001JC000843.

- Douglas, M.W., Maddox, R.A., Howard, K., Reyes, S., (1993). The Mexican monsoon. *Journal of Climate*, 6, 1665-1677.
- Douglas, M.W. y Leal, J.C., (2003). Summertime surges over the Gulf of California: aspects of their climatology, mean structure, and evolution from radiosonde, NCEP reanalysis, and rainfall data. *Weather and Forecasting*, 18, 55-74.
- Duxbury, A.C., Duxbury, A.B., Sverdrup, K.A., (2000). An Introduction to the World's Oceans. 6a. Edición. McGraw-Hill. 528 p.
- Fiedler, P.C., (2002). The annual cycle and biological effects of the Costa Rica Dome. *Deep-Sea Research I*, 49, 321-338.
- Flessa, K.W. y Téllez-Duarte, M.A., (2001). Taxonomic status and distribution of the bivalve mollusk *Mulinia coloradoensis* in the Gulf of California. Center for Biological Diversity and Defenders of Wildlife.
- Fuller, R.D., y Stensrud, D.J., (2000). The relationship between tropical easterly waves and surges over the Gulf of California during the North American Monsoon. *Monthly Weather Review*, 128, 2983-2989.
- García, C.A.E. y Robinson, I.S., (1989). Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential coastal zone color scanner satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 94, 12681-12691.
- García-Silva, G. y Marinone, S.G., (2000). Tidal dynamics and energy budget in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 26(2), 323-353.
- Gaxiola-Castro, G., García-Córdova, J., Valdez-Holguín, J.E., Botello-Ruvalcaba, M., (1995). Spatial distribution of chlorophyll a and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 15(9), 1043-1059.
- Gaxiola-Castro, G., Álvarez-Borrego, S., Nájera-Martínez, S., Zirino, A.R., (2002). Internal waves effect on the Gulf of California phytoplankton. *Ciencias Marinas*, 28(3), 297-309.
- Hammann, G., Nevarez-Martínez, M.O., Green-Ruíz, Y., (1998). Spawning habitat of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California: egg and larval distribution 1956-1957 and 1972-1991. *CalCOFI Reports*, 39, 169-179.
- Hernández-Ayón, J.M., Galindo-Bect, M.S., Flores-Báez, B.P., Álvarez-Borrego, S., (1993). Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 37, 593-602.
- Hidalgo-González, R. M. y Álvarez-Borrego, S., (2001). Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica Acta*, 24(1), 19-28.
- Kitano, K., (1975). Some properties of the warm eddies generated in the confluence zone of the Kuroshio and Oyashio Currents. *Journal of Physical Oceanography*, 5, 245-252.
- Lavín, M.F. y Organista, S., (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93(C11), 14033-14038.

- Lavín, M.F., Gaxiola-Castro, G., Robles, J.M., Richter, K., (1995). Winter water masses and nutrients in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 100(C5), 8587-8605.
- Lavín, M.F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M.L., Carrillo, L., (1997). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27, 2298-2305.
- Lavín, M.F. y Marinone, S.G., (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. En: *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. O.U. Velasco Fuentes *et al.* (Eds). Kluwer Academic Publishers. Países Bajos. 173-204.
- Lepley, L.K., Vonder Haar, S.P., Hendrickson, J.R., Calderon-Riveroll, G., (1975). Circulation in the northern Gulf of California from orbital photographs and ships investigations. *Ciencias Marinas*, 2(2), 86-93.
- Lluch-Cota, S.E., (2000). Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*, 23(6), 731-740.
- Marinone, S.G., (2003). A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 108(C10), 3325, doi:-10.1029/2002JC001720.
- Marinone, S.G., Parés-Sierra, A., Castro, R., y Mascarenhas, A., (2004a). Correction to "Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California". *Geophysical Research Letters*, 31, L10305, doi:-10.1029/2004GL020064.
- Marinone, S.G., Gutiérrez, O.Q., Parés-Sierra, A., (2004b). Numerical simulation of larval shrimp dispersion in the northern region of the Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 60(4), 611-617.
- Martínez, J.A. y Allen, J.S., (2002). A modeling study of the atmospherically-forced mesoscale circulation in the Gulf of California. *Sometido a Journal of Physical Oceanography*
- Martínez, J.A. y Allen, J.S., (2004a). A modeling study of coastal-trapped wave propagation in the Gulf of California. Part I: response to remote forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 34(6), 1313-1331.
- Martínez, J.A. y Allen, J.S., (2004b). A modeling study of coastal-trapped wave propagation in the Gulf of California. Part II: response to idealized forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 34(6), 1332-1349.
- Merrifield, M.A. y Winant, C.D., (1989). Shelf circulation in the Gulf of California: A description of the variability. *Journal of Geophysical Research*, 94(C12), 18133-18160.
- Merrifield, M.A., (1992). A comparison of long coastal-trapped wave theory with remote-storm generated wave events in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 22, 5-18.
- Morrow, R., Fang, F., Fieux, M., Molcard, R., (2003). Anatomy of three warm-core Leeuwin current eddies. *Deep-Sea Research II*, 50, 2229-2243.
- Müller-Karger, F.E. y Fuentes-Yaco, C., (2000). Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 105(C1), 1271-1284.

- O'Reilly, J. E. y 24 coautores., 2000. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum. 2000-206892, Hooker, S.B., Firestone, E.R. (eds.), NASA Goddard Space Flight Center, Vol. XI, p. 49.
- Paden, C.A., Abbott, M.R., Winant, C.D., (1991). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, 1. Sea surface temperature variability. *Journal of Geophysical Research*, 96(C10), 18337-18359.
- Paden, C.A., Winant, C.D., Abbott, M.R., (1993). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, 2. Surface heat flux. *Journal of Geophysical Research*, 98(C11), 20,091-20,103.
- Palacios-Hernández, E., Beier, E., Lavín, M.F., Ripa, P., (2002). The effect of the seasonal variation of stratification on the circulation of the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 32, 705-728.
- Pegau, W.S., Boss, E., Martínez, A., (2002). Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 29(9), doi:-10.1029/2001GL014076.
- Roden, G.I., (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, 12(1), 21-45.
- Salas-de-León, D.A., Carbajal-Pérez, N., Monreal-Gómez, M.A., Barrientos-MacGregor, G., (2003). Residual circulation and tidal stress in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 108(C10), 1-13.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., Müller-Karger, F.E., (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*, 99(C4), 7411-7421.
- Schmitz, J.E. y Vastano, A.C., (1975). Entrainment and diffusion in a Gulf Stream cyclonic ring. *Journal of Physical Oceanography*, 5, 93-97.
- Simpson, J.H., Souza, A.J., Lavín, M.F., (1994). Tidal mixing in the Gulf of California. En: *Mixing and Transport in the Environment*. K.J., Beven, P.C., Chatwin, J.H., Millbank, (Eds.). John Wiley and Sons Ltd, Londres. 169-182.
- Smith, R.C. y Baker, K.S., (1985). Spatial and temporal patterns in pigment biomass in Gulf Stream warm-core ring 82B and its environs. *Journal of Geophysical Research*, 90(C5), 8859-8870.
- Soto-Mardones, L., Marinone, S.G., Parés-Sierra, A., (1999). Time and spatial variability of sea surface temperature in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(1), 1-30.
- Stensrud, D.J., Gall, R.L., Nordquist, M.K., (1997). Surges over the Gulf of California during the Mexican Monsoon. *Monthly Weather Review*, 125, 417-437.
- Svenjkovsky, J., (1988). Surface flow estimation from advanced very high resolution radiometer and coastal zone color scanner satellite imagery: a verification study. *Journal of Geophysical Research*, 93, 6735-6743.

- Vaillancourt, R.D., Marra, J., Seki, M.P., Parsons, M.L., Bidigare, R.R., (2003). Impact of a cyclonic eddy on phytoplankton community structure and photosynthetic competency in the subtropical North Pacific Ocean. *Deep-Sea Research I*, 50, 829-847.
- Van Aken, H.M., van Veldhoven, A.K., Veth, C., de Ruijter, W.P.M., van Leeuwen, P.J., Drijfhout, S.S., Whittle, C.P., Rouault, M., (2003). Observations of a young Agulhas ring, Astrid, during MARE in March 2000. *Deep-Sea Research II*, 50(1), 167-195.