



*Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología*

Universidad Nacional Autónoma de México



RELACIONES ENTRE LA DISTRIBUCIÓN DE ASOCIACIONES DE LARVAS  
DE PECES Y LA HIDROGRAFÍA Y CIRCULACIÓN EN EL GOLFO DE CALIFORNIA  
(DICIEMBRE 2002 y AGOSTO 2003)

T E S I S

*que para obtener el grado académico de*

***Doctor en Ciencias***  
***(Biología Marina)***

presenta:

**MARTHA PEGUERO ICAZA**

Directores de Tesis:

DRA. LAURA SÁNCHEZ VELASCO

DR. MIGUEL LAVÍN PEREGRINA

Comité Tutorial:

DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ

DR. EDUARDO SUÁREZ MORALES

México, D.F. 2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mi familia, lo más importante para mí, me acompañan siempre, a donde vaya los  
llevo en mi corazón:*

*Mis hermanos Rubén y Dulce de quienes siempre me siento orgullosa*

*Mi madre Martha, todo un reto en mi vida*

*Mis cuñados Ivonne e Israel, otros hermanos más*

*Mis bellísimos sobrinos Ameyalli y Rubén, alegría de nuestras vidas*

*A mis amigos, parte especial e indispensable  
de la vida, compañía en el camino*

*A Dios*

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento:

A la Dra. Laura Sánchez Velasco por su amistad y por su apoyo, confianza y paciencia para llevar a buen término esta etapa de mi vida profesional. Porque siempre procuró las mejores condiciones durante mi estancia en el CICIMAR-IPN.

Al Dr. Miguel Lavín Peregrina por su apoyo y confianza y por acceder a la codirección del presente trabajo de tesis que enriqueció considerablemente esta investigación.

A los Doctores Raúl Aguirre Gómez y Eduardo Suárez Morales, integrantes del comité tutorial, por su paciencia, apoyo e interés durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Dr. S. Guido Marinone que proporcionó los mapas de corrientes residuales y de trayectoria de partículas basados en su modelo numérico para el Golfo de California. Agradezco su apoyo en la interpretación de estos mapas y su paciencia y dedicación en la escritura del artículo.

Al Dr. Raúl Aguirre Gómez por su apoyo y atento seguimiento durante el desarrollo de la tesis doctoral; así como por su apoyo durante la realización de la estancia académica en el laboratorio de Sistemas de Información Geográfica en el Instituto de Geografía-UNAM. Durante esta estancia se procesaron las imágenes de satélite para obtener los valores numéricos de temperatura y clorofila en las posiciones de las estaciones de muestreo. Así mismo, quiero agradecer su apoyo para obtener la beca complementaria que otorga la Dirección General de Estudios de Posgrado-UNAM.

A los integrantes del Laboratorio de Circulación Costera (CIRCOS) del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, M. en C. Víctor Godínez, M. en C. Carlos Cabrera, y M. en C. Arturo Ocampo por su amable disposición y apoyo durante la estancia académica para el procesamiento de los datos de CTD e imágenes de satélite; en especial por su amistad y disposición constante en la resolución de dudas.

Al CICIMAR-IPN y en particular al Laboratorio de Plancton y Ecología Marina por el espacio y las condiciones propicias para la estancia académica y el trabajo de laboratorio y gabinete. Así mismo externo mi agradecimiento a las siguientes personas en esta institución:

A mis compañeros de laboratorio Patricia Siordia, Soledad Cota, Margarita Rentería, Carlos Avalos, Fernando Contreras, Cristina León, Anell Danell y Emilio Inda; por su amistad y apoyo desde un lápiz, problemas de programas, intercambio de ideas, identificación de organismos, bibliografía, etc.; y por compartir todas las histerias en el proceso de realizar una tesis.

Al M. en C. Marco Sánchez Hidalgo, por su amistad, charlas y consejos que fueron de gran ayuda en este tortuoso pero apasionante proceso.

Al Biol. Mar. Arturo Sánchez Uvera, por su invaluable participación en la separación de todas y cada una de las larvas de peces de cada muestra.

A la Dra. Patricia Jiménez Rosenberg por su amistad, tiempo, paciencia y disposición en la identificación de las larvas de peces; así como al Dr. Gerardo Aceves y el M. en C. Ricardo Saldierna por su apoyo en la identificación.

Al M. en C. Gustavo de la Cruz Agüero, por su desinteresado apoyo en la resolución de dudas e interpretación de los análisis ecológicos.

A los integrantes del jurado de examen, los Doctores Raúl Aguirre Gómez, Eduardo Suárez Morales, César Flores Coto, Laura Sanvicente Añorve y Xavier Chiappa Carrara por sus comentarios y sugerencias que enriquecieron el presente trabajo.

A los miembros de la tripulación del Buque Oceanográfico Francisco de Ulloa, por su atenta, paciente y amable ayuda durante los cruceros en que esta basado este trabajo.

A la coordinación y al personal de servicios escolares del Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM que en todo momento mostraron disposición y apoyo para el buen desarrollo de mi doctorado.

Así mismo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado que ahora me permiten obtener el grado de doctor en ciencias.

A la Dra. Laura Sánchez Velasco a cargo de los proyectos dentro de los cuales se desarrolló el proyecto de tesis:

“Variabilidad espacial de grupos del zooplancton, con énfasis en larvas de peces, en el Golfo de California superior y central y su interacción con el ambiente” (Clave CGPI2003-297).

“Distribución de larvas de peces en el archipiélago central del Golfo de California: Relación con frentes térmicos y con la circulación de mesoescala.” SEP-CONACyT 46349.

Por las becas otorgadas para la continuidad de la investigación de tesis doctoral, expreso mi agradecimiento a los responsables de los siguientes proyectos:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres en el proyecto “Análisis del intercambio entre el océano y la atmósfera mediante mediciones directas y observaciones remotas.” OOC005. CICESE.

Dr. Emilio Beier en el proyecto “Dinámica, termodinámica y producción primaria de la Corriente Costera Mexicana.” CONACyT Ciencia Básica SEP-2003-C02-42941/A1 2004-2007. CICESE Unidad La Paz.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por mi formación profesional de la cual me siento orgullosa.

Un agradecimiento especial al M. en C. Gerardo García Gómez amigo incondicional, por su apoyo en la edición del documento impreso de esta tesis doctoral.

A todas las personas que contribuyeron en mayor o menor medida a la culminación de este proyecto.

## INDICE

	Resumen	
I	Introducción	1
II	Antecedentes	4
	II.1 Abundancia y distribución de larvas de peces y su relación con hidrografía	4
	II.2 Aplicación de imágenes de satélite en ecología del ictioplancton	6
	II.3 Modelos de circulación y trayectoria de partículas aplicados al ictioplancton	8
III	Hipótesis	11
IV	Objetivos	12
V	Área de estudio	13
	V.1 Características fisiográficas y batimétricas	13
	V.2 Circulación general	15
	V.3 Corrientes de marea y mezcla vertical	17
	V.4 Productividad	18
VI	Métodos	19
	VI.1 Trabajo de campo	19
	VI.2 Trabajo de laboratorio	20
	VI.3 Análisis de datos	20
	VI.3.1 Cálculo de parámetros a partir de variables registradas con CTD	20
	VI.3.2 Clasificación numérica y caracterización de grupos	21
	VI.3.3 Distribución horizontal de variables y parámetros hidrográficos	23
	VI.3.4 Gradientes espaciales del ambiente	24
	VI.3.5 Relación cuantitativa entre variables biológicas y ambientales	25
	VI.3.6 Modelo 3D de circulación y trayectorias de partículas	26
VII	Resultados	28
	VII.1 Diciembre 2002	28
	VII.1.1 Larvas de peces	28
	VII.1.1.1 Grupos de estaciones y asociaciones de larvas de peces	30
	VII.1.2 Ambiente	37
	VII.1.2.1 Perfiles verticales	37
	VII.1.2.2 Distribución horizontal de variables y parámetros hidrográficos	39
	VII.1.2.3 Gradientes espaciales del ambiente	44
	VII.1.3 Larvas de peces vs. ambiente	48
	VII.1.3.1 Análisis canónico de correspondencias	48
	VII.1.4 Circulación, permanencia y conectividad	50
	VII.2 Agosto 2003	54
	VII.2.1 Larvas de peces	54
	VII.3.1.1 Grupos de estaciones y asociaciones de larvas de peces	56

	VII.2.2	Ambiente	63	
		VII.3.2.1	Perfiles verticales	63
		VII.3.2.2	Distribución horizontal de variables y parámetros hidrográficos	65
		VII.3.2.3	Gradientes espaciales del ambiente	70
	VII.2.3	Larvas de peces vs. ambiente	74	
		VII.3.3.1	Análisis canónico de correspondencias	74
	VII.2.4	Circulación, permanencia y conectividad	75	
VIII		Discusión	80	
IX		Conclusiones	86	
X		Literatura citada	88	



## **RESUMEN**

El Golfo de California es un complejo y dinámico cuerpo de agua marino, que se considera una región de gran complejidad ecológica por presentar una alta diversidad de peces y gran abundancia de especies de importancia comercial. Se hicieron colectas de zooplancton y datos hidrográficos en el Golfo de California en Diciembre 2002 y Agosto 2003 para describir las asociaciones de larvas de peces y explorar sus relaciones con variables ambientales (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, máximo de fluorescencia, grado de estratificación de la columna de agua y la clorofila superficial). El índice de disimilitud definió tres asociaciones en cada período de estudio que por su ubicación se denominaron, en Diciembre, Norte, Canal-Centro y Sur; y en Agosto, Norte costero, Norte central-Canal y Sur. Estas asociaciones se distribuyeron en áreas con condiciones ambientales diferentes. La afinidad de la mayoría de las especies con las características ambientales de sus áreas de distribución puede interpretarse como indicativo de que el desove ocurrió dentro de estas áreas. Para evaluar cuantitativamente la retención en las áreas de las asociaciones y la conectividad entre ellas, se utilizaron matrices de conectividad calculadas mediante el seguimiento de partículas en campos de corriente mediante un modelo numérico baroclínico tridimensional. Para ambos períodos ocurrió la retención de partículas (hasta un 70%) dentro de las áreas de las asociaciones, en escalas de tiempo de hasta 30 días. Por lo tanto, el análisis lagrangeano revela que las asociaciones persisten por tiempo suficiente para permitir a las larvas de peces permanecer en un ambiente favorable hasta completar su desarrollo. El patrón principal de exportación (20-38% de partículas), ocurre siguiendo el patrón estacional de circulación y es congruente con los gradientes en número de especies y en abundancia larval (de norte a sur en Diciembre y de sur a norte en Agosto).

## **ABSTRACT**

The Gulf of California is a complex and dynamic body of marine water, it is considered a region of great ecological complexity to present a high fish diversity and great species abundance of commercial importance. Fish larvae and hydrographic data collected in the Gulf of California in December 2002 and August 2003 are used to describe larval fish assemblages (LFAs) and to explore their relationships with environmental variables (temperature, salinity, dissolved oxygen, fluorescence maximum, stratification and superficial chlorophyll *a*). The Bray-Curtis dissimilarity index defined three LFAs in every period, distributed in areas with distinctly different environmental conditions. The LFAs were named in December North, Channel-Center and South; and in August Coastal north, Central north-Channel and South. The affinity of most of the species with the environmental characteristics of their areas of distribution could be interpreted as an indication that spawning occurred inside those areas. Particle tracking in current fields from a 3D numerical model and connectivity matrices are used to assess larval retention in the LFA areas. The technique is well suited for seas like the GC that have well defined circulation patterns. On time scales around 30 days, retention (70% of the particles) occurred. Therefore, the Lagrangian analysis revealed that the observed LFAs have a permanency long enough to allow fish larvae to remain in a favorable environment until they develop motility. The main particle export path (less than 20-38 % of the particles) was from north to south, following the seasonal circulation pattern and coinciding with the gradient in species number and larval abundance (from north to south in December and from south to north in August).

## I. INTRODUCCIÓN

El Golfo de California (GC) ocupa una posición muy importante dentro de los mares marginales del Océano Pacífico. La abrupta topografía característica del GC se combina con procesos físicos que lo afectan continuamente como son las mareas, vientos y radiación solar, además de su interacción con el Océano Pacífico. Esta situación resulta en un complejo y dinámico cuerpo de agua marino (Badán-Dangón *et al.*, 1985; Lavín y Marinone, 2003).

Este cuerpo de agua ofrece un ambiente paradójico para aquellos organismos que pueden vivir en sus aguas; por un lado, el GC posee uno de los ambientes más extremos de los mares del mundo, con un intervalo estacional de temperatura superficial que se incrementa de 2°C en la boca hasta 22°C en la cabeza, siendo el intervalo de temperatura anual más amplio de la región del Pacífico Oriental (Moser *et al.*, 1974; Lavín *et al.*, 2003 y Marinone, 2007). Por otro lado, la variación estacional es mayor que la interanual incluso considerando la influencia de eventos como El Niño y La Niña (Robles-Pacheco y Christensen, 1984; McGowan, 1983; Santamaría del Ángel *et al.*, 1994). Además la salinidad en el GC es de 1 a 2 unidades mayor que en aguas de la costa exterior y se incrementa de 1 a 2 unidades de la boca a la cabeza. Así mismo, es bien conocida la variación de hasta 10 m en el nivel de mareas en el GC Norte y Alto Golfo, al igual que su pronunciado mínimo de oxígeno que va de 0.1-0.2 mL/L entre los 400-800 m de profundidad en el sur y centro del GC (Moser *et al.*, 1974; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Lavín *et al.*, 1998).

En contraparte con estas condiciones se registran tasas excepcionalmente altas de productividad primaria (Zeitzschel, 1969), asociadas a eventos tales como surgencias que son generadas por patrones de vientos bien definidos; los fuertes vientos del noroeste causan surgencias a lo largo de la costa continental durante los meses de invierno y principios de primavera y vientos del sureste causan surgencias en la costa peninsular durante los meses del verano (Roden, 1958; Roden y Groves, 1959; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Lavín y Marinone 2003). Así mismo, la circulación característica del Golfo Norte, que consiste de un giro estacional reversible, ciclónico en verano y anticiclónico en invierno (Lepley *et al.*, 1975; Lavín *et al.*, 1997a; Lavín *et al.*, 1997b;

Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone, 2006), las intensas corrientes de marea alrededor de las Islas Ángel de la Guarda (IAG) y Tiburón (IT) y su interacción con los umbrales de la zona, aseguran una continua mezcla vertical del agua y constante aporte de nutrientes a la zona fótica (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Gaxiola-Castro *et al.*, 1978; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Marinone y Lavín, 2003).

Estas condiciones han generado que el GC, se considere una región de gran complejidad ecológica, caracterizándose por presentar una alta diversidad de especies de peces y gran abundancia de especies de importancia comercial (e.g. Cisneros-Mata *et al.* 1997). Entre estas últimas resaltan especies de pelágicos menores como la sardina Monterrey (*Sardinops sagax*), la anchoveta del norte (*Engraulis mordax*) y la macarela (*Scomber japonicus*), las cuales mantienen importantes pesquerías (e.g., Lluch-Belda *et al.*, 1986; Cisneros-Mata *et al.*, 1997), y especies de pelágicos mayores como el barrilete negro (*Euthynnus lineatus*) y la melva y melvera (*Auxis spp.*) que desovan en el Golfo Norte durante los meses de verano y en el Golfo Sur de octubre a diciembre (Moser *et al.*, 1974; Fisher *et al.*, 1995).

Las primeras fases de vida de los peces (huevos y larvas) forman parte del plancton (Margalef, 1977), siendo éstas fases las más sensibles a las variaciones del ambiente (e.g. Ahlstrom y Moser, 1976; Lasker, 1985 y 1987). La vulnerabilidad en los primeros estadios de desarrollo de los peces se ha considerado como un factor determinante en las variaciones del reclutamiento. Por lo que se han desarrollado diversas hipótesis acerca de como influyen las variaciones ambientales en la supervivencia de estas primeras etapas y de como esta supervivencia, a su vez, afecta el reclutamiento. Hort (1914) menciona que la mortalidad por inanición depende de la cantidad y calidad del alimento disponible en el momento de la primera alimentación de las larvas, lo cual regulará en gran medida el tamaño de las poblaciones adultas; Lasker (1981) menciona que la estabilidad de las capas superiores del océano durante la temporada de desove es esencial para la agregación de alimento suficiente y apropiado para la supervivencia de las larvas, Sinclair (1988) señala que los peces seleccionan áreas de desove determinadas por las condiciones físicas en función de la protección de los huevos y larvas.

En este contexto, el área de desove de los peces que habitan esta región están influidos de manera importante por las intensas mareas y la circulación anticiclónica en invierno y ciclónica en verano en el Golfo Norte (Lavín *et al.*, 1997a y Lavín *et al.*, 1997b; Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone, 2006); la presencia de mezcla vertical continua causada por la interacción de las mareas y la abrupta topografía característica de la Región del Archipiélago Medio (RAM) (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Marinone y Lavín, 2003; Filonov y Lavín, 2003), la presencia de surgencias y la formación de giros y filamentos en la zona central del GC (Green-Ruiz e Hinojosa-Corona 1997; Avalos-García *et al.*, 2003; Navarro-Olache *et al.*, 2004). Así mismo estos factores afectan la distribución espacial de sus huevos y larvas y sobre la disponibilidad del alimento. En particular, el efecto de la RAM sobre las poblaciones de larvas de peces que habitan el Golfo Norte y Alto Golfo no ha sido estudiado a detalle.

Dado que el GC presenta dos temporadas climáticas definidas por la estacionalidad de los vientos (del NW durante el invierno y SE durante el verano), por la circulación termohalina en fase con el viento (anticiclónica en invierno con flujo de entrada del lado de la península y ciclónica en verano con flujo de entrada del lado del continente) y por la circulación en el Golfo Norte dominada por un giro estacional reversible (ciclónico de junio a septiembre y anticiclónico de noviembre a abril) (Bray, 1988; Lavín *et al.*, 1997a, Lavín *et al.*, 1997b; Beier, 1997; Lavín y Marinone 2003; Marinone, 2003; Gutiérrez *et al.*, 2004; Marinone, 2006); el presente trabajo plantea conocer la relación entre la distribución de larvas de peces y la variabilidad del ambiente, así como con la circulación, como un primer esfuerzo para el entendimiento del ecosistema pelágico del GC en general. Los muestreos se realizaron en diciembre de 2002 y agosto de 2003, meses representativos de temporadas climáticas diferentes.

## II. ANTECEDENTES

### II.1 ABUNDANCIA Y DISTRIBUCION DE LARVAS DE PECES Y SU RELACION CON LA HIDROGRAFIA

La relación entre la distribución y abundancia de las larvas de peces con las condiciones hidrográficas es de suma importancia debido al carácter meroplanctónico de las larvas de peces que las mantiene a expensas de dichas condiciones. Por ejemplo, en el Mediterráneo Este Somarakis *et al.* (2002) encuentran que la composición taxonómica y la abundancia de las larvas de peces se explican por batimetría encontrando importantes variaciones en las asociaciones entre la costa y la zona oceánica; así mismo, encuentran que los patrones espaciales y temporales de desove juegan un papel clave en la formación de estas asociaciones de larvas. Por otro lado, Okazaki y Nakata (2007) encuentran que en el Mar de China, la formación de frentes termo-salinos y su interacción con la advección en la zona costera, favorecen el transporte de las larvas hacia zonas con disponibilidad de alimento afectando la sobrevivencia de las larvas y Muhling *et al.* (2007) en la costa de Australia, detectan que las asociaciones se distribuyen de acuerdo a gradientes de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en estructuras de mesoescala (giros).

En el Golfo de California, el primer trabajo sobre distribución y abundancia de huevos y larvas de peces fue realizado por Moser y colaboradores en 1974, siendo a la fecha el trabajo más extenso de ictioplancton en esta región; se realizó a partir de siete cruceros oceanográficos como parte del programa California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (CalCOFI). En este trabajo se señala que las especies de larvas de peces más abundantes durante los meses cálidos fueron los mictófidos *Triphoturus mexicanus*, *Diogenichthys laternatus* y *Benthoosema panamense*, así como *Vinciguerria lucetia* (Phosichthyidae) y durante los meses fríos a *Scomber japonicus* (Scombridae) y *Sardinops sagax* (Clupeidae).

La mayoría de los trabajos realizados sobre larvas de peces en el GC han sido sobre aspectos de distribución, abundancia y estimaciones de biomasa reproductora,

principalmente para especies de importancia comercial como es el caso de la sardina japonesa *Etrumeus teres*. Olvera-Limas y Padilla-García (1986) describen que la zona más importante de desove se localiza frente a las costas de Sonora de marzo a abril. Por su parte Green-Ruíz y Acal-Sánchez (1987) indican que el desove es más abundante en la zona central y hacia la costa oriental del GC donde existen temperaturas relativamente frías. Para la macarela *Scomber japonicus*, Martínez-Aguilar y Anda-Montañez (1990) encuentran que la temperatura determina diferentes condiciones de distribución a lo largo del GC donde su principal área de desove se localiza en la zona central frente a las costas de Sonora, el desove ocurre durante el invierno cuando se presentan surgencias lo cual es factor determinante para la alimentación de las larvas; y Esqueda-Escárcega (1995) define su temporada de desove de noviembre a abril. Otra especie de importancia comercial estudiada es la anchoveta del norte *Engraulis mordax*, Cotero-Altamirano y Green-Ruíz (1997) determinan la biomasa reproductora y con apoyo de datos oceanográficos indican que las principales regiones de desove se ubican en la RAM y cerca de Guaymas de enero a febrero. Por otro lado Sánchez-Velasco *et al.* (2000) indican que esta especie desova en la RAM cuando el mar incrementa su temperatura a causa del fenómeno de El Niño, en tanto que desova en todo el GC durante años fríos.

Una especie ampliamente estudiada es la sardina Monterrey (*Sardinops sagax*) para la que Padilla-García (1981) detecta que desova desde noviembre hasta abril y desde Mazatlán en la costa oriental del GC hasta la Isla Tiburón; Olvera-Limas (1981) agrega que las corrientes superficiales son responsables del transporte de larvas y huevos hacia el oeste fuera de las áreas de desove y Olvera-Limas y Padilla-García (1986) que la distribución geográfica de huevos y larvas indica que los adultos efectúan migraciones estacionales a las áreas de alta productividad asociada a la circulación de masas de agua y a las surgencias que favorecen la alimentación y dispersión de las larvas.

Así mismo, Hammann *et al.* (1998) encuentran que la temperatura a la cual *S. sagax* desova ( $18.9^{\circ}\text{C} \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ ), sugiere que el desove de esta especie en el GC está limitado por una fuerte estacionalidad en la temperatura superficial del mar. Esta afirmación coincide con lo que encuentran Sánchez-Velasco *et al.* (2002), quienes observan que a

causa del calentamiento del agua por El Niño, las zonas de desove se restringen a zonas que se mantienen frías de manera constante como la RAM, donde observaron la misma temperatura marcada por Hammann *et al.* (op. cit.).

Por otro lado, entre los trabajos que relacionan la distribución de las larvas con otras condiciones oceanográficas, se encuentra el de Sánchez-Velasco *et al.* (2006), que relacionan las asociaciones de larvas de peces en la Bahía de La Paz con la circulación geostrofica y encuentran que el intercambio de agua entre el GC y la Bahía define la distribución de las larvas en el tiempo. También Sánchez-Velasco *et al.* (2007) relacionan la distribución vertical de las larvas de peces con la estratificación estacional utilizando como medida el parámetro de estabilidad y encuentran que la mayoría de las larvas se ubicaron en la picnoclina, el estrato más estable de la columna de agua.

## II.2 APLICACIÓN DE IMÁGENES DE SATELITE EN ECOLOGIA DEL ICTIOPLANCTON

La aplicación de imágenes de satélite para estudiar aspectos ecológicos en torno a las larvas de peces es de fecha reciente a nivel mundial. Para regiones diferentes al GC, Richards *et al.* (1993) utilizan las imágenes de satélite para ubicar el límite de la Corriente del Lazo en el Golfo de México y encuentran que es una región de alta diversidad de larvas de peces debido a la mezcla de faunas oceánicas tropicales y templadas, así como de especies mesopelágicas, pelágicas y demersales, favorecida por la dinámica del sistema.

Sur *et al.* (1994) utilizan imágenes de temperatura AVHRR y de clorofila (CZCS) como apoyo en la detección de fenómenos de mesoescala en el Mar Negro; concluyen que fenómenos de divergencia superficial de las corrientes provocan surgencias que sirven como mecanismos de dispersión de huevos y larvas de peces y favorecen el florecimiento de fitoplancton asociado a aguas frías.

Stegman y Yoder (1996) utilizan imágenes AVHRR de temperatura superficial del mar y proponen dos posibles mecanismos para el transporte de larvas de peces hacia regiones



costeras en el norte del Golfo de México: uno asociado al influjo de agua cálida del Corriente del Lazo y el otro a una lengua de agua relativamente fría adyacente a la costa.

Sur *et al.* (1996) utilizan imágenes de temperatura AVHRR y de clorofila (CZCS) y datos registrados *in situ*, para caracterizar el impacto de movimientos de mesoescala (filamentos, remolinos, jets) y corrientes de frontera en el transporte y productividad a lo largo de la costa oeste del Mar Negro. Encuentran que estos fenómenos modulan la productividad en esa zona y que las surgencias locales tienen efectos adversos sobre huevos y larvas de peces.

Un trabajo que utiliza datos provenientes de sensores remotos como herramienta directa es el de Platt *et al.* (2003). Analizan la supervivencia de las larvas asociada a florecimientos fitoplanctónicos de primavera, combinando el uso de datos de satélite de color del océano y series de tiempo de registro de reclutamiento. Los resultados indican una relación entre la progresión del florecimiento y la supervivencia de las larvas dado un traslape entre ambas, por lo que un florecimiento temprano implica mayor disponibilidad de alimento en especial para las larvas más pequeñas.

Entre los trabajos que utilizan imágenes de satélite para dilucidar aspectos ecológicos de larvas de peces en el GC, encontramos el de Green-Ruíz e Hinojosa-Corona (1997), en el que analizan la influencia de la temperatura del agua sobre la distribución y abundancia de huevos de *Engraulis mordax*, sobreponiendo los mapas de distribución sobre las imágenes de temperatura superficial AVHRR. Los autores encuentran una relación entre el hábitat de desove de la anchoveta, la temperatura superficial del mar, la retención y transporte de huevos con estructuras finas en los patrones de circulación del agua (frentes, remolinos y plumas); identificando la RAM como un área de retención para esta especie que desova en aguas frías.

Otro trabajo que utiliza imágenes de satélite es el de Hammann *et al.* (1988), en el que los autores utilizan imágenes de clorofila y temperatura para detectar las condiciones oceanográficas y las asocian a la presencia de los organismos en sus diferentes etapas. Proponen un ciclo de vida para *Sardinops sagax* en el que los adultos migran del Alto Golfo hacia la cuenca de Guaymas para desovar en invierno, cuando se registran

surgencias, las corrientes de chorro que se forman en extensión de cabos y promontorios proporcionan el mecanismo de transporte de huevos y larvas hacia la costa de Baja California, donde se concentran los juveniles y las condiciones de verano con vientos del sureste coinciden con la migración de los juveniles hacia las regiones donde se alimentan en la etapa adulta y así completan el ciclo.

Entre los trabajos que utilizan imágenes de satélite (temperatura AVHRR) para obtener una visión sinóptica de la región y verificar variaciones interanuales, se encuentran Sánchez-Velasco y Shirasago (2000) quienes observan que estas diferencias se relacionan con la dieta de larvas de *Scomber japonicus*, reflejadas en la amplitud del espectro de las presas consumidas; Sánchez-Velasco *et al.* (2002) observan que durante El Niño el área de desove de la sardina *Sardinops sagax* se ve alterado debido al calentamiento del agua superficial, efecto que se ve amortiguado por fenómenos de mezcla vertical en la zona de las grandes islas, hacia donde los adultos migran para desovar cuando se presenta el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS); Avalos-García *et al.* (2003) abarcan la zona central del GC donde detectan tres zonas usando temperatura, relacionadas con tres asociaciones de larvas de peces, en la RAM, en la zona oceánica y en la zona nerítica; Sánchez-Velasco *et al.* (2004a) observan cambios interanuales en la distribución y abundancia de las larvas de peces en la zona central del GC asociados con cambios en el desove de las especies como respuesta ante El Niño 97-98 y La Niña 98-99.

### II.3 MODELOS DE CIRCULACION Y TRAYECTORIA DE PARTICULAS APLICADOS AL ICTIOPLANCTON

Recientemente se han utilizado modelos de circulación como base de simulación de trayectoria de partículas como herramienta para relacionar patrones de circulación con la distribución, transporte y retención de huevos y larvas de peces. Usando un modelo de campos de flujo promedio estacionario basado en datos de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) para simular la trayectoria de partículas, Heath *et al.* (1998) representan

la dispersión de huevos y larvas de sardina en la región de la corriente de Kuroshio, encontrando que el factor más importante para la dispersión de huevos y larvas parece ser la interacción entre la distribución espacial de la intensidad de desove y el patrón de la corriente de Kuroshio.

Proctor *et al.* (1998) emplean un modelo bidimensional de circulación como base para la simulación de partículas que también considera la ubicación del desove, la edad de la larva y el tiempo de eclosión. La distribución final de las partículas se compara con la distribución real de las larvas de anguilas en el Mar del Norte con el fin de comprender la gran variabilidad interanual en la distribución. Encuentran que la advección de las larvas lejos de las zonas de desove, afecta el abasto potencial y por tanto el reclutamiento resultante.

Reiss *et al.* (2000) usan un modelo de circulación de la capa superficial inferido por alturas dinámicas, donde la simulación de partículas tiene el fin de evaluar los posibles escenarios de la distribución de las larvas en la plataforma costera de Escocia. Encuentran que la dispersión de las larvas es el resultado de la interacción de la zona del desove, corrientes geostróficas y la batimetría.

Hao *et al.* (2003) usan un modelo baroclínico tridimensional para simular la circulación frontal y el movimiento de partículas con el fin de verificar el efecto de los frentes de marea sobre huevos y larvas de anchoveta en el Mar Amarillo. Encuentran que los frentes de marea y los procesos de circulación que ahí se generan (jets y afloramiento por mezcla) pueden transportar huevos de las áreas vecinas o de capas profundas que, en los giros que se forman por los meandros de las isobatas, quedan retenidos.

Entre este tipo de trabajos para el GC, Calderón-Aguilera *et al.* (2002) exploran la relación entre los patrones de circulación y el reclutamiento de etapas tempranas del camarón azul en el Alto GC; utilizan un modelo baroclínico tridimensional para predecir las corrientes superficiales y observan que favorecen el transporte de las postlarvas hacia y desde diferentes unidades reproductivas.

Marinone *et al.* (2008) utilizan la simulación de trayectoria de partículas con base en un modelo baroclínico tridimensional para el GC Norte durante los meses de verano, cuando varias especies de importancia comercial desovan y forman parte del plancton y encuentran que la hidrodinámica regional explica conectividad por circulación ciclónica, desde el macizo continental a la costa peninsular. Los efectos de las corrientes de marea sobre la dispersión general de las partículas son mínimos y se observa retención en la zona del Alto Golfo.

Si bien el GC ha sido de gran interés científico por la magnitud de sus recursos pesqueros y la complejidad de los procesos físicos y biológicos que en él ocurren, son aún insuficientes los esfuerzos que se han realizado sobre aspectos ecológicos del ictioplancton, particularmente aquellos que intentan explicar la relación de procesos físico-biológicos, donde el conocimiento en este sentido, es prácticamente inexistente. Por lo que el presente trabajo de investigación plantea hipótesis y objetivos como guía en la obtención de resultados que contribuyen a explicar aspectos de la ecología de larvas de peces.

### III. HIPÓTESIS

Dado el carácter meroplanctónico de las larvas de peces, su distribución esta influenciada por las condiciones físicas del ambiente:

- Los procesos hidrográficos que afectan la región de estudio (un giro anticiclónico en invierno y ciclónico en verano en la región norte; los procesos de fuerte y continua mezcla vertical resultado de la combinación de intensas corrientes de marea asociadas a umbrales someros y canales angostos en la región de las islas; y el Canal de Ballenas que se distingue por mantener bajas temperaturas todo el año debido a afloramiento por convergencia) y la batimetría de la zona (el norte somero con amplia plataforma continental, el sur profundo con carácter pelágico y la zona de las grandes islas donde se da la transición entre ambas), generan diversos ambientes que son propicios para el desarrollo de larvas de peces de diferentes especies. Dado lo anterior, se espera encontrar asociaciones de larvas de peces que limiten su distribución a la región de las islas, otros a la región norte del GC y grupos limitados a la región sur.
- La circulación superficial general en el GC (ciclónica en verano y anticiclónica en invierno que se caracteriza por el giro estacional reversible en la zona norte, intensos flujos en los canales angostos de la RAM y giros al sur de las islas e. g. sobre la cuenca de San Pedro Mártir) y sus efectos sobre el carácter meroplanctónico de las larvas de peces, generan dispersión o retención de larvas. Considerando que las larvas tienen una duración promedio de 30 días en el plancton y que el giro estacional reversible atrapa partículas por más de 30 días, se espera que las asociaciones de larvas permanezcan en el área definida por al menos ese periodo de tiempo y que las corrientes entre las islas generen conectividad entre zonas.

#### **IV. OBJETIVOS**

Con base en las hipótesis planteadas se establecieron los siguientes objetivos:

##### *Objetivo General*

Conocer las relaciones entre la distribución de asociaciones de larvas de peces y procesos hidrográficos y de circulación en el Golfo de California (Golfo Norte y archipiélago central) durante periodos con condiciones diferentes (diciembre 2002 y agosto 2003).

##### *Objetivos Particulares*

- Determinar gradientes ambientales (temperatura, salinidad, oxígeno, fluorescencia, clorofila- $a$  y  $\phi$ ), mediante análisis de componentes principales y análisis de discriminantes.
- Conocer la composición y distribución de larvas de especies de peces en el área y épocas analizadas.
- Determinar asociaciones de larvas de peces mediante análisis de clasificación numérica y las especies dominantes en cada asociación por análisis de abundancia-frecuencia.
- Relacionar cuantitativamente la distribución de las asociaciones de larvas de peces con la variación de indicadores ambientales a través del análisis canónico de correspondencias.
- Obtener la circulación general del área de estudio para la capa de 0-10m con el modelo baroclínico tridimensional de Marinone (2003).
- Evaluar la permanencia de las asociaciones de larvas de peces en su área de distribución usando trayectoria de partículas basada en el modelo numérico tridimensional (Marinone, 2003).
- Cuantificar la conectividad entre áreas de distribución de las asociaciones de larvas de peces en un momento dado (15 y 30 días) después de liberar las partículas, por medio de la matriz de conectividad.

## V. ÁREA DE ESTUDIO

El GC es un mar marginal del Océano Pacífico que cubre cerca de 250,000 Km<sup>2</sup>, su límite sur se define por la línea que conecta Cabo San Lucas y Cabo Corrientes (Van Andel, 1964) (Fig. 1).

### V.1 CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS Y BATIMÉTRICAS

La zona norte del GC está separada del resto por dos grandes islas, Ángel de la Guarda y Tiburón, es una zona somera con una profundidad promedio de cerca de 200 m. Contiene algunas cuencas, entre las que se encuentran la Cuenca Delfín (600 m) y la Cuenca Wagner (200 m) (Lavín *et al.*, 1997a). La zona más norteña (Alto Golfo) es muy somera con una profundidad media de ~15 m, está sujeta a fuertes corrientes de marea y su principal característica hidrográfica es que debido a la alta evaporación y baja entrada de agua dulce, es una zona de formación de agua de alta salinidad que comúnmente se encuentra en el fondo de la Cuenca Wagner durante la primavera (Lavín *et al.*, 1998).

Esto contrasta con la batimetría al sur de Tiburón y Ángel de la Guarda, la cual se caracteriza por una serie de cuencas cuya profundidad máxima disminuye hacia dentro del golfo: Cuenca Pescadero (3000 m), Cuenca Farallón (3000m), Cuenca del Carmen (2000 m), Cuenca de Guaymas (2000 m) y Cuenca San Pedro Mártir (1000 m). Una característica batimétrica con consecuencias dinámicas es que, del lado de la península, la plataforma continental es casi inexistente, pero del lado opuesto hay una plataforma continental de unos 30 km de ancho (Lavín *et al.*, 1997a).

La región del archipiélago que incluye las islas más grandes de México (Tiburón y Ángel de la guarda), se caracteriza por umbrales someros y canales angostos que comunican la parte norte y la parte sur del golfo. La comunicación más amplia (tanto por su profundidad como por su anchura) ocurre entre Isla San Lorenzo e Isla San Esteban (Umbral de San Esteban 600 m); en segundo lugar de importancia para el intercambio es el Umbral de San Lorenzo (400 m) en el extremo sur del Canal de Ballenas, menos profundo y muy angosto; y el intercambio más somero ocurre en el umbral entre Isla San Esteban e Isla Tiburón (~200 m) (Lavín y Marinone, 2003).

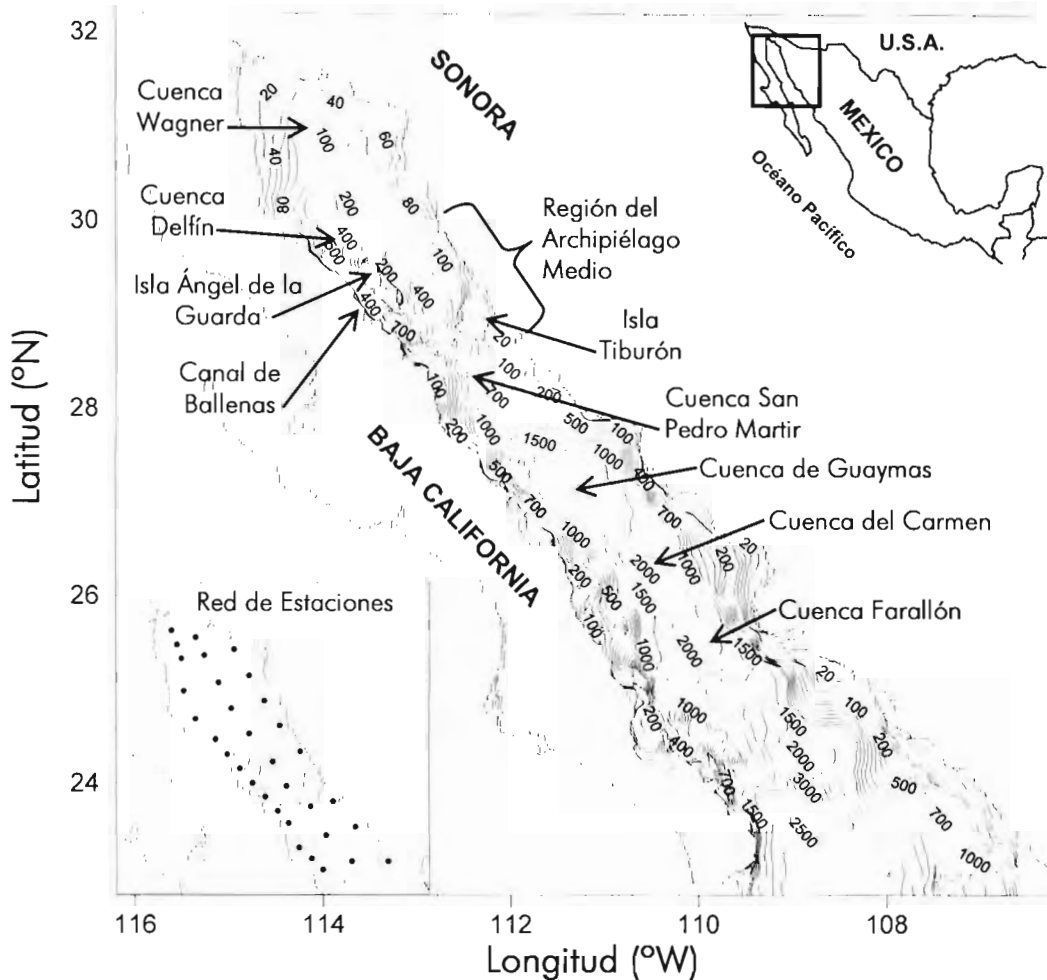


Figura 1. Batimetría del Golfo de California en metros, con nombres de islas y cuencas. El recuadro inferior izquierdo muestra la ubicación de las estaciones de muestreo.

Incluido en la región del archipiélago se encuentra el Canal de Ballenas, entre la península de Baja California y la cadena de islas, es muy profundo (máximo 1600 m), pero tiene umbrales tanto al norte (600 m) como al sur (400 m); esto hace que las condiciones oceanográficas en esta área sean muy especiales. López *et al.* (2006) observan que en ambos umbrales hay flujos de entrada profundos que convergen y para compensar, hay flujo de salida en la superficie que provoca divergencia. Esta notable circulación causa un vigoroso afloramiento, el cual podría ser responsable de la relativa baja TSM, alta productividad y condiciones de mezcla que se encuentran a lo largo del año en el Canal de Ballenas. Por otro lado Marinone (2007) en acuerdo parcial con López *et al.* (op. cit.), menciona que hay flujo de entrada profundo por el umbral sur,



que regresa principalmente por superficie a través del mismo extremo sur y una pequeña fracción fluye fuera a través del extremo norte y entre las islas Ángel de la Guarda y San Lorenzo; el transporte neto en el extremo norte es pequeño y sale del canal por toda la columna de agua. El flujo profundo por el extremo sur es controlado por mareas y suficiente para explicar el afloramiento que mantiene la TSM relativamente más baja.

## V.2 CIRCULACIÓN GENERAL

En el Golfo de California, la circulación y la estructura hidrográfica de las capas superiores, presentan importantes variaciones temporales de forma aproximadamente senoidal con período anual; a esta variación se le llama el ciclo estacional de la circulación y de la estructura termohalina, y se debe a que algunos de los agentes impulsores más importantes del golfo varían con las estaciones del año. Entre ellos se encuentran: el Océano Pacífico, el sistema de vientos y el flujo de calor a través de la superficie. La importancia relativa de estos mecanismos varía entre las diversas regiones del Golfo de California (Lavín y Marinone, 2003).

Bray (1988), Marinone y Ripa (1988) y Ripa y Marinone (1989), utilizando diversas secciones transversales a lo largo del golfo, encuentran una clara señal estacional para el transporte superficial y para el estrés de viento, con flujo de entrada en verano y flujo de salida en invierno y corrientes opuestas en el fondo. Esta circulación está influenciada por flujos de calor y agua dulce en la superficie del mar: el golfo gana calor y la evaporación excede la precipitación en el ciclo anual (Lavín y Organista, 1988; Castro *et al.*, 1994).

Estudios similares, pero en la zona interna de la boca del golfo, realizados por Castro *et al.* (2000), Castro Valdez (2001) y Mascarenhas *et al.* (2003) registran un flujo de salida de agua de alta salinidad (agua del Golfo de California) del lado peninsular y un flujo de entrada de agua menos salina a lo largo de la costa continental. La señal estacional de la velocidad geostrofica consiste de un patrón reversible con flujo de entrada (flujo de salida) en la parte central y flujo de salida (flujo de entrada) principalmente del lado peninsular durante mayo (septiembre).

En consonancia, la circulación superficial de mesoescala en la región norte del Golfo de California está dominada por un giro estacional reversible, ciclónico de junio a septiembre y anticiclónico de noviembre a abril (Lavín *et al.*, 1997b; Beier, 1997; Beier y Ripa, 1999; Carrillo *et al.*, 2002 y Palacios-Hernández *et al.*, 2002). En verano la fuerte estratificación se caracteriza por isolíneas en domo, las cuales indican un centro bajo en la altura dinámica, mientras que en invierno la estratificación es más débil y las isolíneas están deprimidas en el centro de la cuenca, lo cual genera una elevación en la topografía dinámica. El carácter del giro es diferente en ambas temporadas, en verano, el giro es persistente y claramente baroclínico; los agentes forzantes provocando la distribución de la densidad que da origen al giro son el viento, mezcla por marea y el forzamiento a través de la boca del golfo. En invierno, la situación es menos clara: el giro parece ser una mezcla de barotrópico y baroclínico y altamente variable de año a año (Lavín *et al.*, op. cit.).

Además de las observaciones y registros directos, la circulación en el Golfo de California ha sido obtenida mediante modelos. Un modelo numérico no lineal tridimensional de la circulación estacional y termodinámica del GC con topografía real y mezcla vertical y lateral ha sido desarrollado por Marinone (2003). Utiliza como agentes forzantes el viento estacional, el Océano Pacífico, mareas y flujos de calor y agua dulce. Este modelo reproduce la variabilidad anual y semianual del nivel del mar, los balances de calor y sal y la climatología de la TSM. Obtiene el giro estacional reversible en el Golfo Norte y al sur un período ciclónico que ocurre en agosto, mientras que hay dos periodos anticiclónicos en mayo y noviembre. En las capas profundas Marinone (2003) encuentra que la circulación es ciclónica durante el invierno y verano y anticiclónica durante el otoño y la primavera. Respecto a la corriente superficial promedio anual, reproduce una fuerte señal anticiclónica de junio a septiembre y ciclónica de octubre a abril; este modo es asimétrico con fuertes corrientes sobre el lado continental y corrientes débiles sobre el lado de la península. En el Golfo Sur la circulación superficial se debe a ambos, el Océano Pacífico y el viento y presenta una variabilidad semianual.

Basados en este modelo, Gutiérrez *et al.* (2004) realizan un análisis lagrangeano de la circulación utilizando la advección de partículas y encuentran el giro estacional reversible

en la región norte; y en las regiones central y sur del golfo, dos periodos anticiclónicos en mayo y de octubre a noviembre y un período ciclónico durante julio-agosto. El giro principal que aparece sobre el centro de la región norte, en ambos periodos (ciclónico y anticiclónico), atrapa partículas por más de 30 días en un radio de 50 km; en contraste, sobre la zona de la costa continental ocurre un tránsito rápido. El Canal de Ballenas atrapa partículas la mayor parte del año y el intercambio entre la región norte y sur ocurre mayormente a través del canal entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón.

### V.3 CORRIENTES DE MAREA Y MEZCLA VERTICAL

Las corrientes de marea juegan un papel sumamente importante en la física del Golfo de California como agente generador de turbulencia. A su vez la turbulencia, al romper la estratificación, puede generar corrientes que son parte de la circulación, sobre todo si, como en el Golfo de California, la distribución de la energía cinética turbulenta disponible para romper la estratificación presenta fuertes gradientes (Argote *et al.*, 1995).

Las mareas en el Golfo de California son producidas por co-oscilación con las mareas del Océano Pacífico (Filloux, 1973; Ripa y Velázquez, 1993). Como una consecuencia del carácter diferencial de los componentes diurnos y semidiurnos, las mareas en el golfo son mixtas; principalmente semidiurnas en las Zonas Norte y Sur y diurnas en el golfo central. Hay una gran diferencia en el intervalo de mareas entre mareas muertas (0.3 a 1.5 m) y vivas (1.8 a 6 m), especialmente en el Alto Golfo. Las elipses de marea provenientes de modelos barotrópicos están orientadas a lo largo del Golfo (Lavín y Marinone, 2003).

Marinone y Lavín (2003) utilizan un modelo numérico tridimensional para describir mezcla, mareas y flujo residual en el archipiélago central del Golfo de California, encuentran que las corrientes de marea dominan la circulación instantánea, la cual fluye y disminuye dos veces al día con velocidades de hasta 60 m/s. Las corrientes presentan una fuerte modulación quincenal, con corrientes de mareas vivas dos veces mayores que aquellas durante mareas muertas. El flujo de marea sobre las características del fondo (umbrales) genera corrientes de marea internas, las cuales aunque menos energéticas que las corrientes barotrópicas, imprimen su variabilidad espacial sobre el campo de

corriente total; este flujo causa una fuerte mezcla tanto por fricción contra el fondo como en el interior del fluido. La mezcla está modulada por la marea, en las frecuencias diurnas, semidiurnas y quincenales y ocurre sobre y cerca de los umbrales, incluso durante mareas muertas. En los umbrales de San Esteban y San Lorenzo la corriente cercana al fondo causa una estructura vertical que consiste de dos capas en invierno y tres capas en verano. La última consiste de una capa superficial que fluye hacia el Golfo Norte, una capa media con flujo de salida y el flujo de entrada permanente cerca del fondo.

#### V.4 PRODUCTIVIDAD

El GC presenta tasas excepcionalmente altas de productividad primaria (Zeitzschel, 1969). Esta alta productividad es el resultado del transporte eficiente de nutrientes hacia la zona eufótica (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987). Los principales mecanismos de enriquecimiento de nutrientes son la mezcla por mareas y las surgencias costeras. La RAM, delimitada al sur por umbrales, es el área más importante de mezcla debido a la fuerte turbulencia por mareas, el rompimiento de ondas internas y posiblemente saltos hidráulicos (Roden y Groves, 1959; Paden *et al.*, 1993; Lluch-Cota, 2000). El ciclo anual es el periodo dominante de la variabilidad, excepto justo al sur de las grandes islas donde domina el ciclo semianual. Los máximos de primavera y otoño se originan como pulsos de incrementos durante los periodos de transición de 3-4 meses, cuando la circulación general revierte su sentido entre ciclónica durante verano y anticiclónica durante el invierno (Bray, 1988; Beier, 1997). El hecho que el ciclo semianual domine, apoya la hipótesis que los máximos semianuales se producen por el efecto de la mezcla de marea. En la primavera y el otoño, cuando la estratificación termohalina vertical es relativamente débil, la mezcla por mareas con su modulación quincenal y mensual es efectiva bombeando nutrientes hacia la capa superficial y dispara los florecimientos del fitoplancton. Durante el verano la mezcla vertical es suprimida por la fuerte estratificación y el abasto de nutrientes es limitado (Kahru *et al.*, 2004).

## VI. MÉTODOS

El material biológico y los datos físicos se obtuvieron a bordo del Buque Oceanográfico Francisco de Ulloa (CICESE), durante dos cruceros que se realizaron del 7-13 de diciembre 2002 y del 1-6 de agosto 2003, con embarque y desembarque en el puerto de Santa Rosalía, B.C.S., cubriendo una red de 33 y 29 estaciones respectivamente, desde los 27° N hasta los 31° N (Fig. 1). Estos meses fueron seleccionados como representantes de épocas diferentes con base en la circulación superficial de mesoescala en la región norte del GC, dominada por un giro estacional reversible, ciclónico de junio a septiembre (agosto) y anticiclónico de noviembre a abril (diciembre) (Lavín *et al.* 1997b; Beier, 1997; Beier y Ripa, 1999; Carrillo *et al.* 2002 y Palacios-Hernández *et al.* 2002).

### VI.1 TRABAJO DE CAMPO

En cada estación de muestreo de ambos cruceros se obtuvieron perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia utilizando un CTD SB-19 Sea Bird (Conductivity Temperature Depth Profiler). Los datos y su procesamiento son reportados por Sánchez-Velasco *et al.* (2004b) y Peguero-Icaza *et al.* (2005).

Así mismo, para determinar la concentración de clorofila-*a*, en cada estación se tomaron muestras de agua superficial y a la profundidad de máxima concentración indicada por el sensor de fluorescencia del CTD, utilizando botellas Niskin de 5 L. De las muestras recolectadas, se filtraron 1.5 L de agua marina a través de filtros GF/F al vacío (<1/3 atm) y se conservaron en nitrógeno líquido para su posterior procesamiento.

Paralelamente se recolectaron muestras de zooplancton utilizando una red Bongo con un diámetro en la boca de 60 cm y abertura de malla de 505 y 333  $\mu\text{m}$ . Los arrastres fueron oblicuos, desde cerca del fondo a la superficie, o cerca de los 200 m a la superficie cuando la profundidad fue mayor. Estos arrastres se realizaron en trayectoria circular a una velocidad de 2.5 nudos siguiendo la metodología recomendada por Smith y Richardson (1979). El volumen de agua filtrada se calculó usando un flujómetro calibrado colocado en la boca de las redes y cada muestra se fijó en formaldehído al 5% neutralizado con borato de sodio.

## VI.2 TRABAJO DE LABORATORIO

La determinación espectrofotométrica de clorofila se realizó colocando los filtros por 24 hr en 10 mL de acetona al 90% como recomiendan Venrick y Hayward (1984); utilizando las ecuaciones de Jeffrey y Humprey (1975), se calculó la concentración de clorofila expresada como mg *Cl-a*/m<sup>3</sup>.

La biomasa zooplanctónica (mL/1000 m<sup>3</sup>) se estimó de las muestras provenientes de la malla de 333 µm, mediante la técnica de desplazamiento de volumen (Ahlstrom, 1969; Kramer *et al.*, 1972 citados en Smith y Richardson, 1979). Se eligió esta técnica para efectos de comparación en la zona del Pacífico Norte, donde su uso como indicador del comportamiento de la comunidad está muy difundido desde la década de los 40's, principalmente por el programa CalCOFI (Lasker, 1981, 1985, 1987; Ahlstrom, 1969; Brinton *et al.*, 1986).

Posteriormente, de las muestras de la malla de 505 µm de la red bongo, se removieron las larvas de peces y se identificaron (todas y cada una) al nivel taxonómico posible con base en las características merísticas, morfométricas y pigmentarias descritas por Moser *et al.* (1996). Aquellas especies que no se encuentran descritas en la literatura, se determinaron a nivel de género o familia distinguiéndose como morfotipos. Los ejemplares fueron cuantificados en número de individuos por taxa. La abundancia de las larvas se estandarizó a 10 m<sup>2</sup> siguiendo el criterio de Smith y Richardson (1979) y los datos se utilizaron para construir una matriz de abundancia estandarizada por taxa por estación.

## VI.3 ANALISIS DE DATOS

### VI.3.1 Cálculo de parámetros a partir de variables registradas con CTD:

Las variables de temperatura y salinidad registradas utilizando el CTD, fueron usadas para calcular dos parámetros que miden la fuerza de la estratificación o estabilidad:

a) Parámetro de estabilidad local  $E(z) = -\rho^{-1} d\rho / dz$ , la cual mide la estratificación a la profundidad  $z$  y es máximo a la profundidad a la cual la picnoclina es más intensa.

b) Parámetro de estratificación integral  $\phi$  (Simpson, 1981)

$$\phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\rho - \bar{\rho}) g z dz$$

donde  $h$  es la profundidad máxima de integración (200 m en este caso) y  $g$  es la aceleración gravitacional. El parámetro de estratificación  $\phi$  representa la cantidad de trabajo por metro cúbico ( $J/m^3$ ) necesario para mezclar completamente la columna de agua a la profundidad  $h$  y es una medida integral de la estabilidad.

Así mismo, dichas variables se utilizaron para el cálculo de la anomalía geopotencial basado en el método de Pond y Pickard (1983). La anomalía geopotencial es el cambio de energía potencial por unidad de masa, esta cantidad permite estimar la diferencia de altura de las superficies isobáricas entre estaciones, estableciendo la dirección de la corriente, es decir, que si la superficie isobárica dada está inclinada, entonces (en el hemisferio norte), la corriente estará a lo largo de la pendiente en dirección tal que la superficie está más alta del lado derecho. Se graficó a 50 m de profundidad considerando la superficie del mar como referencia, así mismo para complementar la información que brinda este parámetro se graficaron la distribución de la densidad y la temperatura a esa profundidad.

### VI.3.2 Clasificación numérica y Caracterización de grupos:

Con el fin de examinar el efecto de las especies de amplia distribución y alta frecuencia sobre la conformación de grupos de estaciones, se construyeron dos matrices de abundancia estandarizada para cada período de muestreo, una que incluyó todas las especies y otra donde se excluyeron las especies de amplia distribución y frecuencia ( $> 80\%$ ): *Benthosema panamense* y *Engraulis mordax* en diciembre y *B. panamense* en agosto. Sobre ambas matrices se aplicó el Índice de Disimilitud de Bray-Curtis (1957), con el cual es posible considerar las proporciones en abundancias relativas entre las especies en cuestión. Las ventajas de este índice son que no se ve afectado por las estaciones con cero abundancia, además de que es suficientemente robusto para datos marinos dado que otorga mayor peso a las especies abundantes que a las raras (Field, *et al.* 1982):

$$D_{jk} = \frac{\sum |Y_{ij} - Y_{ik}|}{\sum (Y_{ij} + Y_{ik})}$$

donde  $D_{jk}$  es el valor de disimilitud entre las muestras  $j$  y  $k$ ,  $Y_{ij}$  el valor de la especie  $i$  en la muestra  $j$  y  $Y_{ik}$  es el valor de la especie  $i$  en la muestra  $k$ , por lo que la máxima afinidad es cero y la mínima uno. Previo a la aplicación de este índice, los datos de la matriz de abundancia se transformaron de acuerdo a Field *et al.* (1982).

De las matrices de similitud generadas a partir de la aplicación del índice de Bray-Curtis, se construyeron dendrogramas de afinidad utilizando el método de promedios no ponderados (UPGMA). Sobre el dendrograma se selecciona un nivel de corte para definir grupos de estaciones a cuyo conjunto de especies se llamó “asociación” (“assemblage” en inglés); entendiéndose como asociación a la combinación de larvas de diversas especies que coinciden en un determinado tiempo y espacio, en condiciones físico-biológicas similares (Sanvicente, 1990; Cowen *et al.*, 1993; Doyle *et al.*, 1993; McGowen, 1993; Moser y Smith, 1993; Olivar y Shelton, 1993; Richards *et al.*, 1993; Franco-Gordo *et al.*, 2002; Avalos-García *et al.*, 2003; Espinosa-Fuentes y Flores-Coto, 2004).

En cada asociación se obtuvieron descriptores comunitarios: la riqueza específica (número de especies), la diversidad con el índice de Shannon-Wiener, la equidad con el índice de Pielou y la dominancia específica.

El índice de Shannon-Wiener (Ludwig y Reynolds, 1988) toma en cuenta la proporción del número de individuos con respecto al total de especies con la siguiente expresión:

$$H' = -\sum p_i \log_2 p_i$$

en donde  $H'$  es la diversidad en bits/individuos y  $p_i$  representa la proporción del número de individuos de la especie  $i$  con respecto al total ( $n_i/N_i$ ). El índice de Pielou (Pielou, 1975), utiliza la razón entre la diversidad observada ( $H'$ ) y el máximo valor que ésta puede alcanzar en una comunidad donde todas las especies son igualmente abundantes:

$$J' = \frac{H'}{H_{\text{máx}}}$$



donde  $H_{\text{máx}} = \log_2 S$  ( $S$ =número de especies) es la diversidad bajo condiciones de máxima equidad; la equidad ( $J'$ ) decrece hasta cero conforme las abundancias relativas de las especies divergen de la igualdad. Así mismo, con el propósito de obtener mayor información de la diversidad en relación con la equidad de las especies, se obtuvo la dominancia específica (Ludwig y Reynolds, 1988; Brower y Zar, 1977) a partir de la expresión  $D = 1 - J'$  donde  $J'$  corresponde al valor calculado de la equidad; cuando el valor resultante tiende a cero, la dominancia es baja y por el contrario, cuando dicho valor es cercano o igual a uno, la dominancia es alta (Brower y Zar, 1977).

Paralelamente, dentro de cada grupo o asociación se determinó la ubicación jerárquica de las especies utilizando la prueba de Olmstead-Tukey (Sokal y Rohlf, 1985), mediante la cual se analiza gráficamente la abundancia relativa promedio de cada especie, contra el porcentaje de la frecuencia de aparición de cada una. Las especies dominantes serán aquellas cuyos valores de abundancia y frecuencia relativa, rebasen la media aritmética de ambos estimadores.

### *VI.3.3 Distribución horizontal de variables y parámetros hidrográficos:*

Con el fin de visualizar las condiciones ambientales del área de estudio a partir de las variables registradas en campo y los parámetros calculados, se elaboraron mapas de distribución horizontal de temperatura, salinidad y oxígeno (promedio de la columna de 10m), máximo de fluorescencia, clorofila superficial y biomasa zooplanctónica, así como del índice de estratificación  $\phi$ , densidad y anomalía geopotencial. Así mismo, con el fin de conocer la distribución horizontal de la TSM y clorofila registradas por satélite para las estaciones de muestreo, se extrajeron los datos de los archivos originales en formato HDF (Hierarchical Data Format) de tres imágenes diarias correspondientes a las fechas de muestreo y el dato final es un promedio de estos valores. El proceso se realizó utilizando el programa WIM (Windows Image Manager 2003 V. 6.11), durante una estancia en el laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del Instituto de Geografía-UNAM.

#### VI.3.4 Gradientes espaciales del ambiente:

Las matrices de indicadores ambientales correspondientes a cada período de muestreo se construyeron con la concentración de clorofila superficial registrada *in situ*, el promedio de los primeros 10m para la temperatura, salinidad y oxígeno, el valor máximo de la fluorescencia y el valor de  $\phi$  para una columna de 200m o menos de acuerdo a la profundidad de cada estación.

Para definir gradientes ambientales se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre las matrices de los indicadores ambientales para ambos períodos. Este análisis tiene la característica de reducir la información de la totalidad de las variables originales, aprovechando la alta correlación que exista entre ellas, hasta obtener una combinación lineal de los indicadores, conjuntando la mayor parte de esa información original. Tales combinaciones lineales de indicadores se denominan “componentes principales” del conjunto de las  $m$  variables. El ACP es capaz de jerarquizar los  $n$  casos evaluados en función de los valores altos o bajos de las  $m$  variables seleccionadas para la cuantificación en forma simultánea. De esta manera, se pueden identificar los principales gradientes ambientales a los que se podría asociar la variación en la estructura biótica del sistema (García, 1988). Los objetos (estaciones de muestreo), se arreglan con respecto a uno o más ejes coordenados (tantos como variables haya), tales que por su posición relativa a los ejes y de unos con respecto a otros, reflejan al máximo las afinidades determinadas por los descriptores (indicadores ambientales) (Ludwig y Reynolds, 1988). A partir del gráfico de este análisis se seleccionaron grupos de estaciones independientes que se denominaron grupos ambientales., estos grupos se definieron por la cercanía de las estaciones en el gráfico y la distancia apreciable que existe entre los grupos. Estos resultados se compararon con la distribución espacial de las larvas de peces colectadas durante los cruceros y los grupos de estaciones a partir de la matriz de abundancia, en una aproximación de las relaciones existentes entre las especies y su ambiente.

Sobre los grupos ambientales definidos en el ACP para ambos períodos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar diferencias entre las medias de los grupos para cada variable; este análisis evalúa la hipótesis que las diferentes muestras en la comparación tienen la misma media. Adicionalmente, considerando que los grupos a

comparar son mas de dos, se aplicó un procedimiento de comparación múltiple desarrollado por Tukey para determinar igualdad o diferencia entre todos los pares posibles de medias (Daniel, 1983). El nivel de significancia especificado es de  $p=0.05$  para ambos análisis.

Posterior al ACP se aplicó el análisis de función discriminante sobre cada matriz ambiental con el fin de complementar y apoyar la definición de grupos ambientales. Este análisis se utiliza para determinar si los grupos difieren con respecto a la media de una variable y entonces usar esa variable para predecir el número de miembros de un grupo. Si las medias para una variable son significativamente diferentes en diferentes grupos, entonces podemos decir que esa variable discrimina entre grupos (Fisher, 1936). Se trata de extraer un nuevo espacio de menor dimensión tal que, al proyectar la nube de puntos sobre dicho espacio, los puntos correspondientes a un mismo grupo estén próximos entre sí y los correspondientes a distintos grupos estén alejados. Los ejes de este nuevo espacio serán las funciones discriminantes. El número de funciones discriminantes corresponde al mínimo entre el número de grupos menos uno. En este análisis los grupos son determinados *a priori*, por lo que se utilizaron los grupos previamente definidos en el ACP para verificar los grupos ambientales con un segundo análisis.

El software utilizado para estos análisis fue BiodiversityPro (The Natural History Museum and the Scottish Association for Marine Science 1997) y STATISTICA (StatSoft, Inc. 2001. Data analysis software system, versión 6. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com)).

#### VI.3.5 *Relación cuantitativa entre variables biológicas y ambientales:*

Para detectar los patrones de variación en los datos de las especies (descriptores) con respecto al conjunto de indicadores ambientales (parámetros), se utilizó el análisis canónico de correspondencias. El diagrama de ordenación resultante expresa los patrones de variación en la composición de las especies y las principales relaciones entre las especies y cada una de las variables ambientales, combinando técnicas de ordenación indirecta con técnicas de regresión (Jongman *et al.*, 1987). La incorporación de los parámetros ambientales se realiza como parte de la estimación de las coordenadas de las estaciones. Dada la ponderación de las estaciones por las especies, se estiman las nuevas

coordenadas de la estaciones mediante regresión múltiple con respecto a los parámetros. Las nuevas coordenadas a su vez, ponderan las posiciones de las especies, las que de nuevo, generan nuevas coordenadas de estaciones, que entran otra vez a la regresión múltiple contra los parámetros y así sucesivamente, hasta obtener la convergencia apropiada para parar el proceso. Los parámetros de la regresión final en el proceso iterativo, son los coeficientes canónicos de la ordenación, mientras que la correlación múltiple de esta regresión, es llamada la correlación especies-ambiente. El despliegue de resultados es un biplot de los parámetros (indicadores ambientales) como vectores y los elementos elegidos (estaciones) como puntos en el espacio de ordenación. El tamaño de cada vector revela su importancia, mientras que el ángulo de cada vector con respecto a cada eje de ordenación, indica la correlación entre ellos (Ter Braak, 1986; Jongman *et al.*, op. cit.; de la Cruz-Agüero, 1994).

El análisis canónico de correspondencias se realizó con el software ANACOM versión 3 (ANALISIS de COMunidades, Gustavo de la Cruz-Agüero, 1994). Previo al análisis se transformaron los datos de la matriz de abundancia de larvas utilizando raíz cuarta ( $Y_{ij} = X_{ij}^{1/4}$ ), con el objetivo de reducir el peso de las especies abundantes (Field *et al.*, 1982).

#### VI.3.6 Modelo 3D de circulación y Trayectoria de partículas:

Con el fin de evaluar la permanencia de las asociaciones de larvas de peces definidas por el índice de Bray-Curtis a partir de la matriz de abundancia, se utilizó una descripción aproximada de la circulación del GC en el período de los cruceros que se generó usando un modelo baroclínico tridimensional (Marinone, 2003). El modelo tiene un tamaño de malla de 2.5 ' x 2.5 ' (3.9 x 4.6 km) en el horizontal y 12 capas en el vertical (10, 20, 30, 60, 100, 150, 200, 250, 350, 600, 1000 y 4000 m). El forzamiento más importante utilizado por el modelo es el Océano Pacífico, el cual se aplica especificando la variabilidad hidrográfica anual observada en la boca del GC (campos de temperatura y salinidad, principales componentes de la marea M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1; y variaciones del nivel del mar de baja frecuencia). El forzamiento por el patrón monzónico de viento se aplica con una reversión estacional senoidal del estrés de viento

a lo largo del GC. El forzamiento de la marea se aplica como elevaciones de marea en la boca, basadas en armónicos de la marea de datos observados. El forzamiento de flotabilidad se aplica especificando los flujos de calor y humedad. Este modelo ha demostrado dar una descripción aceptable de la circulación promedio y estacional; la circulación estacional reversible observada por Lavín *et al.* (1997a) y Palacios-Hernández *et al.* (2002) en el GC Norte se reproduce muy bien. Para mayores detalles de aplicaciones en el GC ver Gutiérrez *et al.* (2004) y Marinone *et al.* (2008).

Los parámetros de salida del modelo de Marinone (2003) han sido utilizados previamente para describir el movimiento de partículas liberadas en el GC, como una aproximación al transporte de larvas (Marinone, 2006; Marinone *et al.*, 2008). Para el presente estudio, se simuló la liberación de dos mil partículas en la posición de cada estación de muestreo y se rastrearon durante 30 días, que se consideró el máximo de duración del periodo larval. Las trayectorias lagrangeanas tridimensionales (la técnica lagrangeana consiste en seguir una partícula de agua) se deben al campo de velocidad euleriana (la técnica euleriana mide la velocidad del agua desde un punto fijo) más una contribución al azar relacionada a los procesos de difusión de remolinos turbulentos; fueron calculadas siguiendo el esquema de advección/difusión descrito por Visser (1997) y Proehl *et al.* (2005).

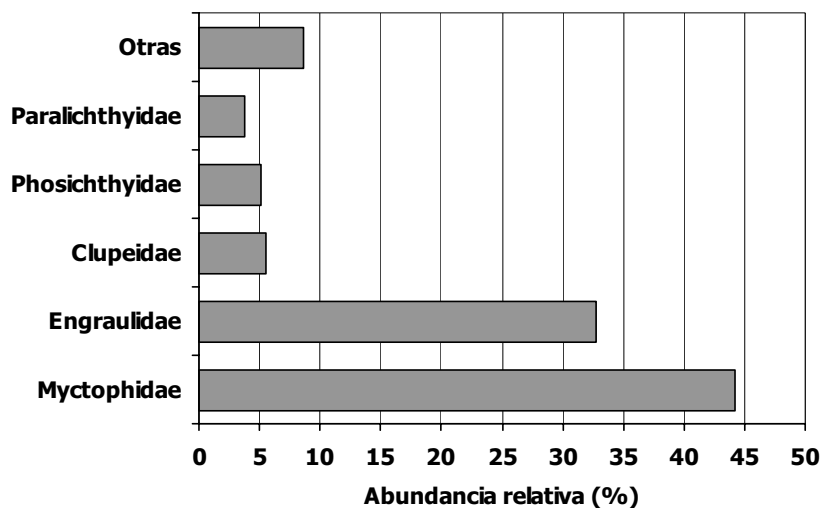
## VII. RESULTADOS

### VII.1 DICIEMBRE 2002

#### VII.1.1 Larvas de peces

Durante diciembre de 2002 se colectaron un total de 3,750 larvas de peces, incluidas en 38 familias y 88 taxa. Las familias más abundantes fueron Myctophidae y Engraulidae con más del 70% de abundancia total; las especies más abundantes fueron *Engraulis mordax* (Engraulidae) y *Benthosema panamense* (Myctophidae), que representaron el 62% de la abundancia total de larvas (Fig. 2). Ambas especies se consideraron de amplia distribución debido a su frecuencia de ocurrencia superior al 80% en el área del estudio (Fig. 3). Estas especies tendieron a mostrar una abundancia máxima entre la Isla Ángel del la Guarda (IAG) y la costa continental, donde altas concentraciones de clorofila y baja temperatura se asociaron a un pequeño aparente remolino en la imagen de clorofila (Fig. 3).

a)



b)

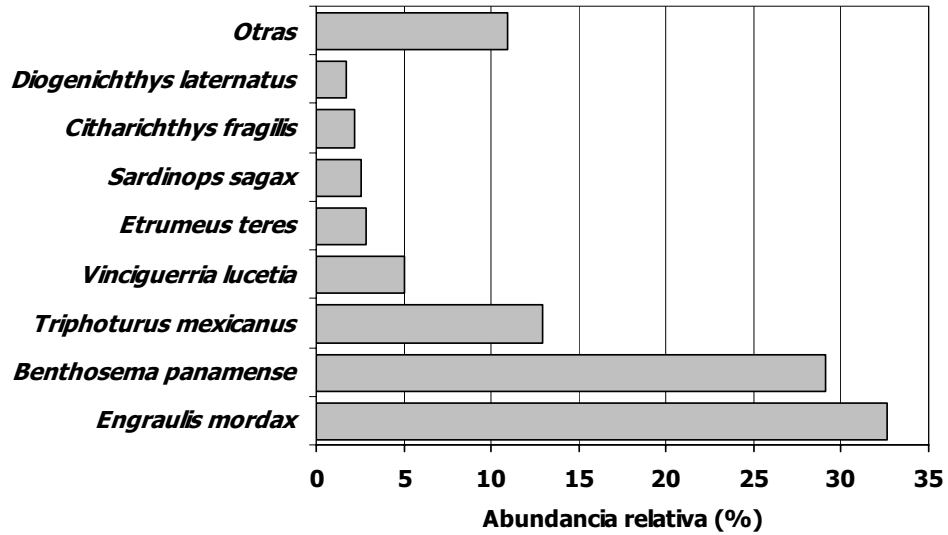
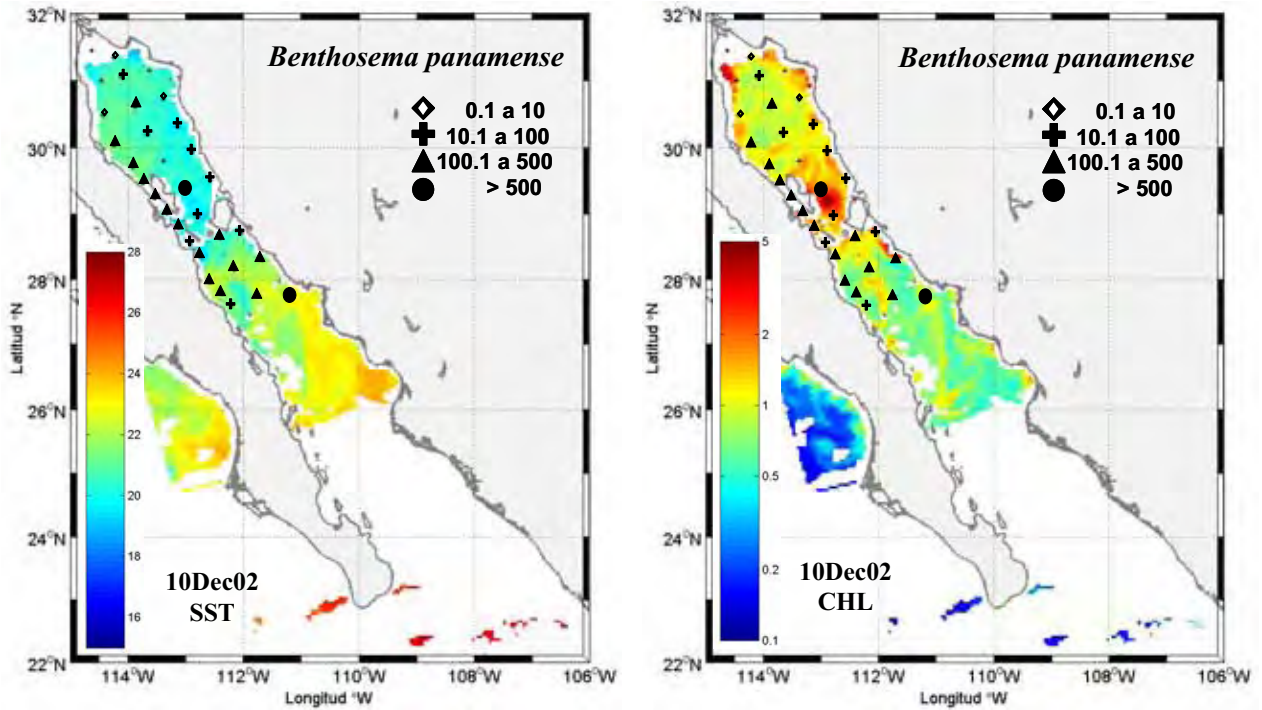


Figura 2. Abundancia relativa por (a) familia y (b) especie, durante el mes de diciembre de 2002. En el rubro "otras" se incluyen 33 familias y 80 especies respectivamente.



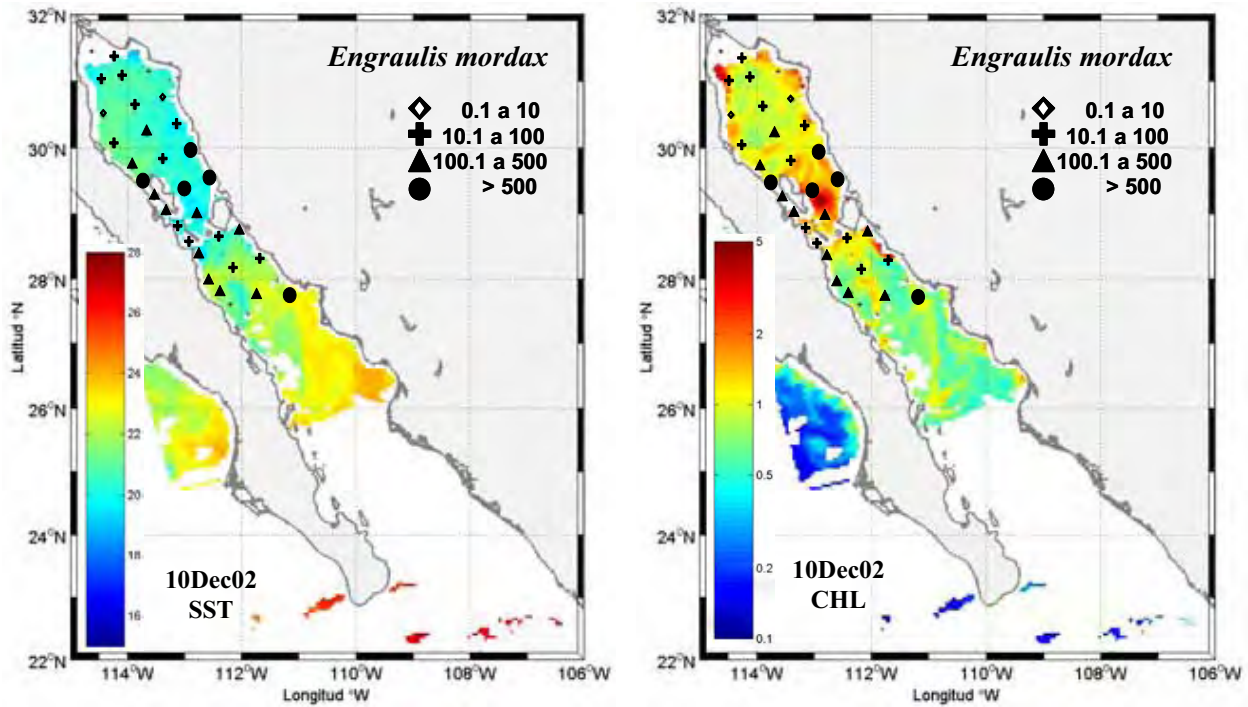


Figura 3. Distribución y abundancia de *Engraulis mordax* y *Benthoosema panamense* sobre imágenes de satélite de temperatura superficial y concentración de clorofila para diciembre 2002.

### VII.1.2 Grupos de estaciones y asociaciones de larvas de peces

De acuerdo al dendrograma, construido a partir de la matriz de disimilitud generada con el índice de Bray-Curtis, se reconocieron tres grupos de estaciones, ya sea incluyendo a las especies de amplia distribución (Fig. 4 a, b) o sin incluirlas (Fig. 4 c, d). La distribución geográfica de los tres grupos es muy similar en ambos casos (Fig. 4). De acuerdo con su ubicación los grupos se denominaron Norte, Canal-Centro y Sur. La distribución de estos grupos se muestra sobrepuesta en imágenes de satélite de temperatura superficial del mar (TSM) y clorofila (CHL) para el 10 de diciembre de 2002 en la figura 5.



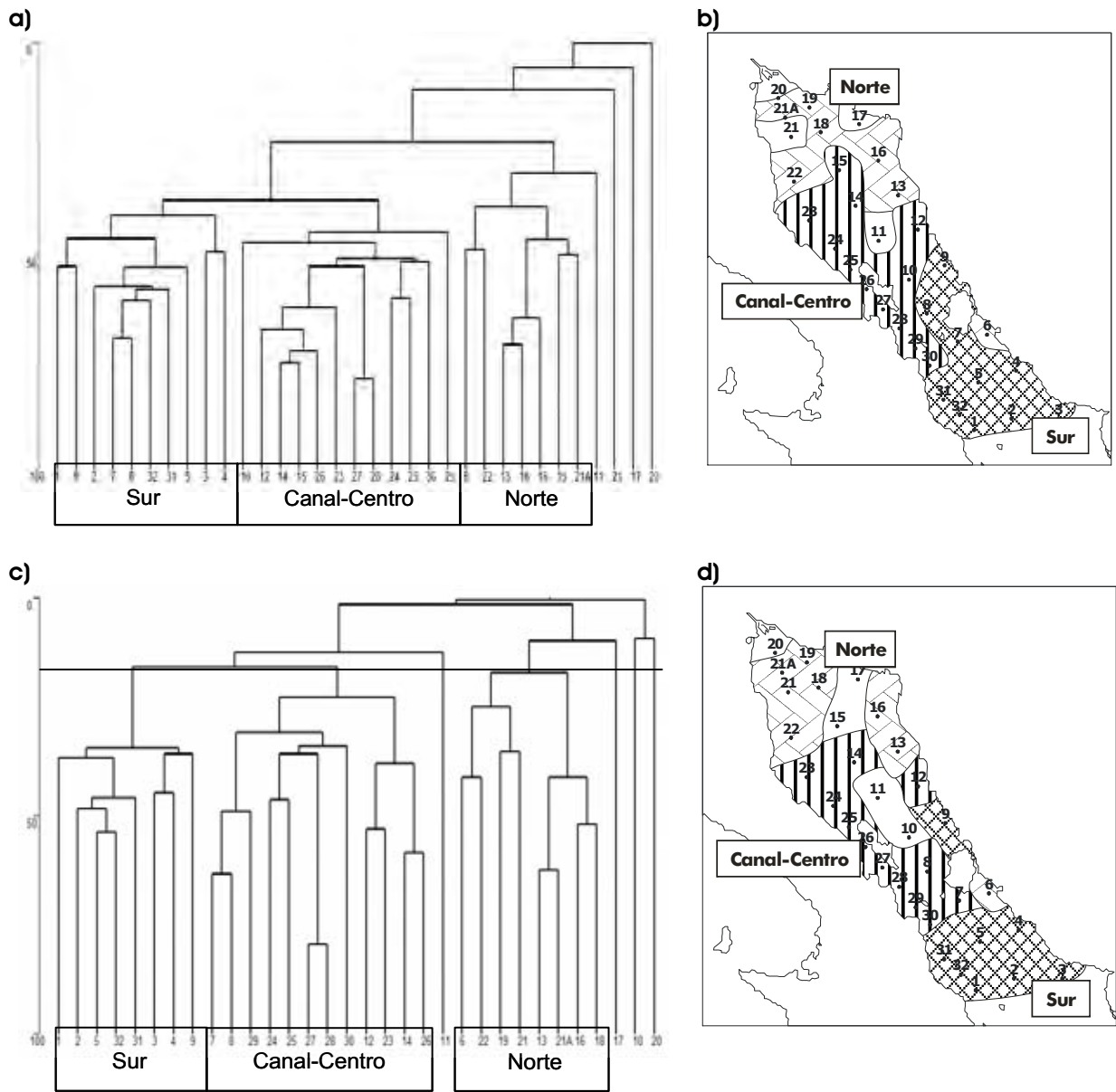


Figura 4. Dendrogramas de grupos de estaciones definidas por el índice de similitud de Bray-Curtis y el método de unión UPGA, y su localización en el Golfo de California durante diciembre 2002. a) y b) Incluyendo las especies de amplia distribución, c) y d) excluyendo las especies de amplia distribución.

El grupo Norte se asoció a una TSM de 21-22 °C y concentración de clorofila >1.5 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 5), presentó la más baja abundancia promedio por grupo (91 orgs/10m<sup>2</sup>) y el más bajo número de taxa (20). Las especies dominantes en este grupo fueron *E. mordax*, *Sardinops sagax* (Clupeidae), ambas especies pelágico-costeras y *B. panamense*, una especie mesopelágica (Tabla 1). Las especies dominantes excluyendo a *B. panamense* y

*E. mordax* (las especies de amplia distribución y frecuencia) fueron *S. sagax*, *Synodus lucioceps* (Synodontidae, demersal) y *S. japonicus* (Scombridae, pelágico-costero) (Tabla 2). Los atributos comunitarios del grupo indican una diversidad intermedia, la más alta equidad y por tanto baja dominancia en relación con los otros grupos (Tabla 3). Los organismos demersales y pelágico-costeros (en particular *S. sagax* y *S. lucioceps*) tienen importante influencia en la definición de este grupo, se localizan en la zona más norteña y somera así como a lo largo de la costa del lado continental (Fig. 6).

Tabla 1. Taxa de larvas de peces dominantes por grupo de estaciones en el Golfo de California durante diciembre 2002 determinado por la prueba de Olmstead-Tukey. X, abundancia promedio (número de larvas por 10 m<sup>2</sup>) y %F, frecuencia de ocurrencia (%) para cada taxón.

Taxón Dominante	Norte <sup>a</sup>		Canal-Centro <sup>b</sup>		Sur <sup>c</sup>	
	X	%F	X	%F	X	%F
<i>Engraulis mordax</i>	44	100	328	100	277	100
<i>Sardinops sagax</i>	15	75			34	30
<i>Benthoosema panamense</i>	7	75	344	100	245	100
<i>Citharichthys fragilis</i>			27	83		
<i>Triphoturus mexicanus</i>					245	100
<i>Vinciguerria lucetia</i>					93	100
<i>Etrumeus teres</i>					33	40
<i>Diogenichthys laternatus</i>					25	50
<i>Scorpaenodes xyris</i>					22	50

<sup>a</sup> Número de taxa 20; número de estaciones 8.

<sup>b</sup> Número de taxa 35; número de estaciones 12.

<sup>c</sup> Número de taxa 64; número de estaciones 10.

Tabla 2. Taxa de larvas de peces dominantes por grupo de estaciones en el Golfo de California durante diciembre 2002 determinado por la prueba de Olmstead-Tukey excluyendo las especies de amplia distribución. X, abundancia promedio (número de larvas por 10 m<sup>2</sup>) y %F, frecuencia de ocurrencia (%) para cada taxón.

Taxón Dominante	Norte <sup>a</sup>		Canal-Centro <sup>b</sup>		Sur <sup>c</sup>	
	X	%F	X	%F	X	%F
<i>Sardinops sagax</i>	15	88			43	38
<i>Synodus lucioceps</i>	4	40				
<i>Scomber japonicus</i>	5	50				
<i>Citharichthys fragilis</i>			35	100		
<i>Triphoturus mexicanus</i>			54	70	245	100
<i>Etropus crossotus</i>			10	58		
<i>Diogenichthys laternatus</i>			15	17	25	40
<i>Vinciguerria lucetia</i>					106	100
<i>Eleotris picta</i>					12	88
<i>Pontinus</i> sp.					12	75
<i>Etrumeus teres</i>					42	38
<i>Scorpaenodes xyris</i>					27	50
<i>Albula</i> sp.					21	38

<sup>a</sup> Número de taxa 20; número de estaciones 8.

<sup>b</sup> Número de taxa 35; número de estaciones 12.

<sup>c</sup> Número de taxa 59; número de estaciones 8.

Tabla 3. Descriptores comunitarios determinados para las tres asociaciones larvales formadas a partir de la matriz de abundancia en diciembre de 2002.

ATRIBUTOS	NORTE	CANAL-CENTRO	SUR
Diversidad <i>bits/indv</i>	3.1326	2.2048	3.3145
Equidad	0.7024	0.4538	0.5588
Dominancia	0.2975	0.5461	0.4411
Riqueza específica	20	35	65

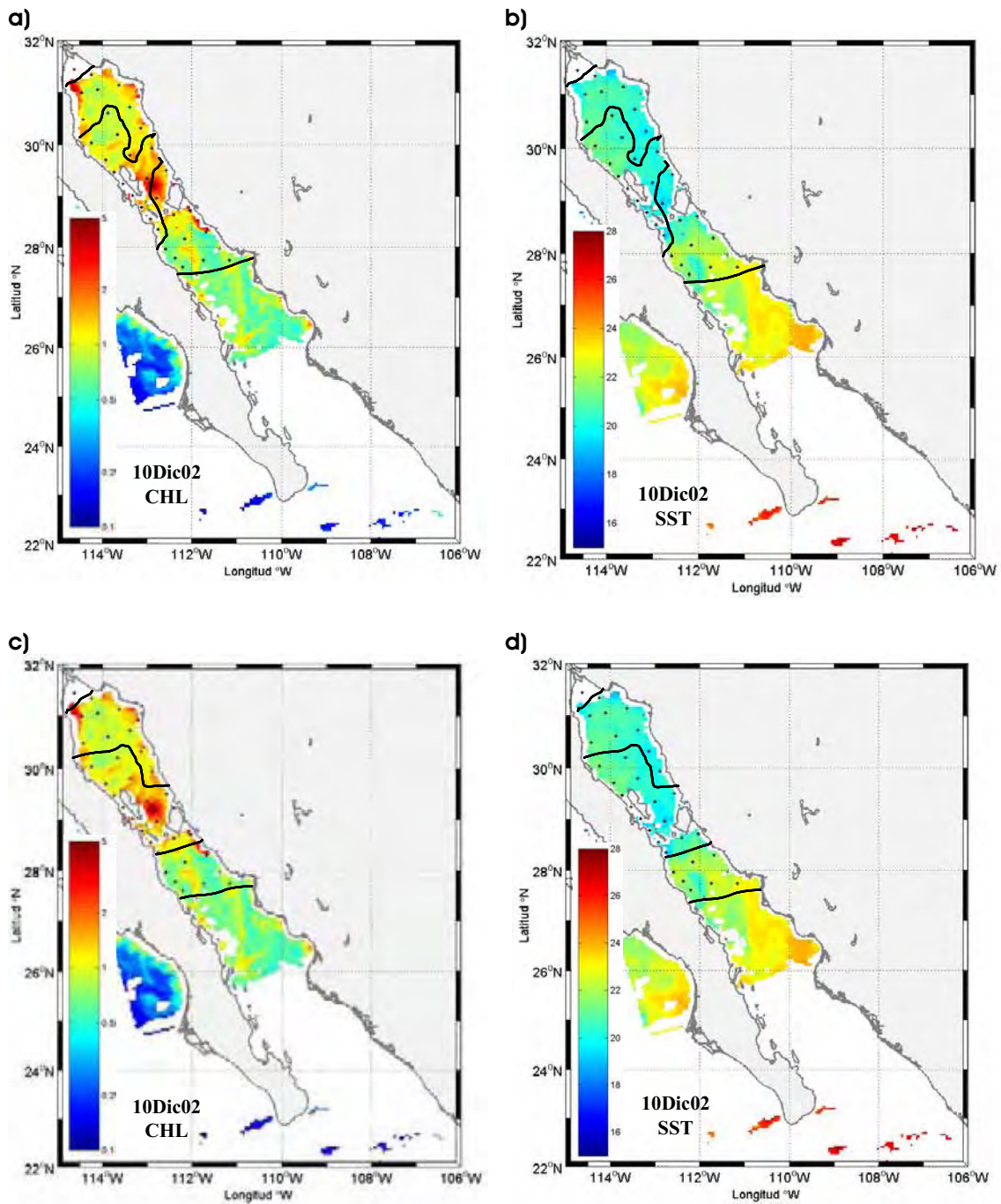


Figura 5. Localización de los grupos de estaciones sobre las imágenes de satélite de temperatura superficial y concentración de clorofila para diciembre 2002. a) y b) incluyendo las especies de amplia distribución, c) y d) excluyendo las especies de amplia distribución.

El grupo Canal-Centro estuvo asociado a la más baja TSM ( $<20^{\circ}\text{C}$ ) y la más alta concentración de clorofila ( $>1.5\text{ mg/m}^3$ ) (Fig. 5). Este grupo presentó una abundancia promedio intermedia ( $767\text{ orgs}/10\text{m}^2$ ) y un número intermedio de taxa (35). *B. panamense*, *E. mordax* y *Citharichthys fragilis* (Paralichthyidae, demersal) fueron las especies dominantes (Tabla 1). Excluyendo a *B. panamense* y *E. mordax*, las especies dominantes fueron *C. fragilis* y *Etropus crossotus* (Paralichthyidae, demersal) y *Triphoturus mexicanus* y *Diogenichthys laternatus* (Myctophidae, mesopelágicos) (Tabla 2). El grupo presentó la diversidad más baja, la equidad más baja y en consecuencia una importante dominancia (Tabla 3). Para este grupo, los organismos demersales son importantes en la definición con la distribución de *C. fragilis* y *E. crossotus* principalmente en la zona de las islas y del lado peninsular (Fig. 6).

El grupo Sur, se asoció a una TSM más cálida, entre  $22$  y  $23^{\circ}\text{C}$ , y las concentraciones más bajas de clorofila,  $<1.5\text{ mg/m}^3$  (Fig. 5). Este grupo presentó la abundancia promedio más alta ( $1105\text{ orgs}/10\text{m}^2$ ) y el mayor número de taxa (65). Las especies dominantes fueron *E. mordax*, *B. panamense*, *T. mexicanus*, *Vinciguerria lucetia* (Phosichthyidae, mesopelágico), *Etrumeus teres* (Clupeidae, epipelágico-costero), *D. laternatus* y *Scorpaenodes xyris* (Scorpaenidae, demersal) (Tabla 1). Las especies dominantes excluyendo a *B. panamense* y *E. mordax* fueron *T. mexicanus* y *V. lucetia*, *S. sagax*, *Pontinus* sp. (Scorpaenidae, demersal), *Albula* sp. (Albulidae, demersal) y *Eleotris picta* (Eleotridae, demersal) (Tabla 2). La Tabla 3 muestra que este grupo presentó la diversidad más alta y una equidad y dominancia intermedias. Los organismos que definen a este grupo son los mesopelágicos (*T. mexicanus* y *V. lucetia*), al estar ubicados en la zona más profunda del área de estudio, asociada a su hábitat característico (Fig. 6).

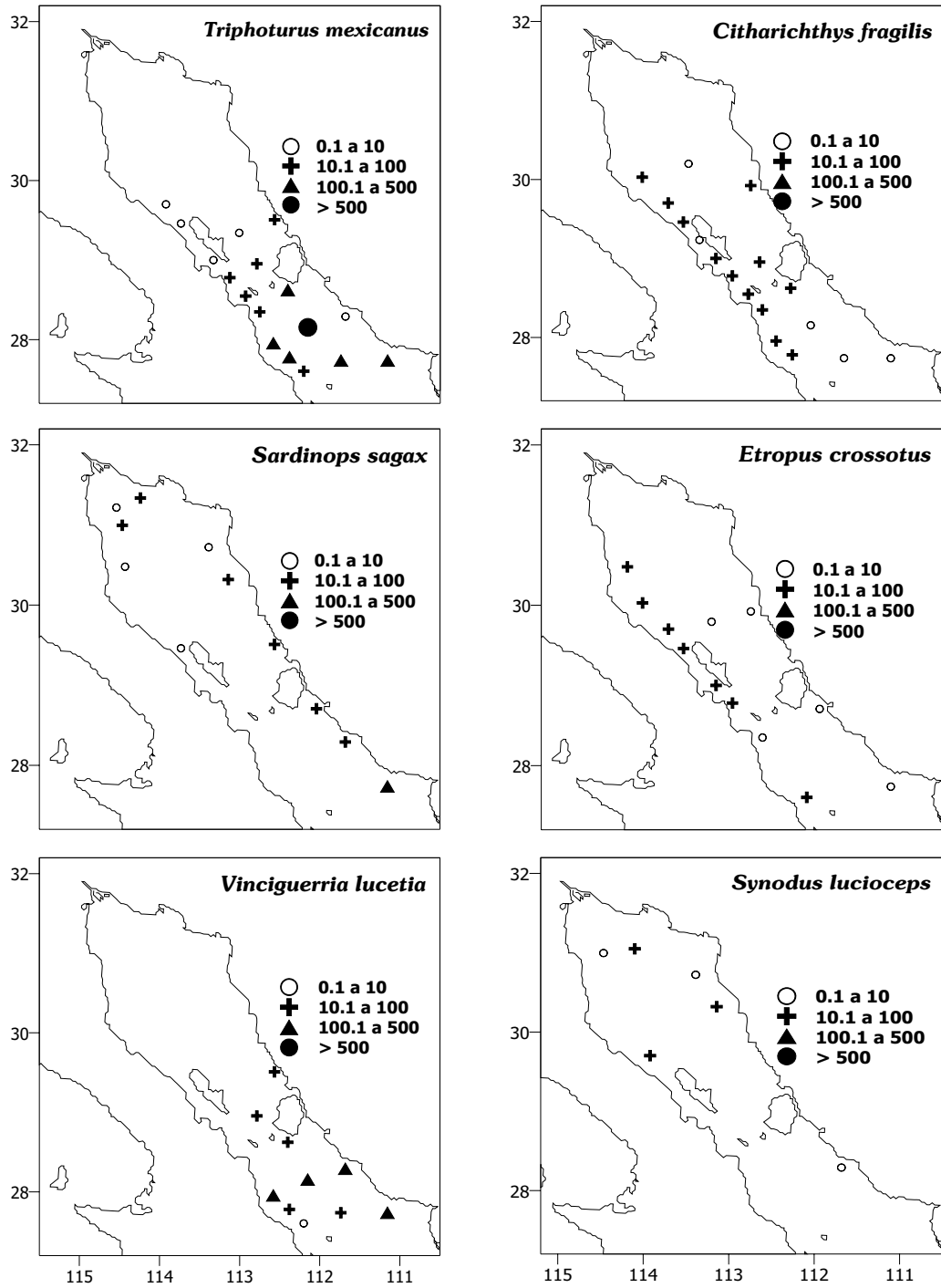
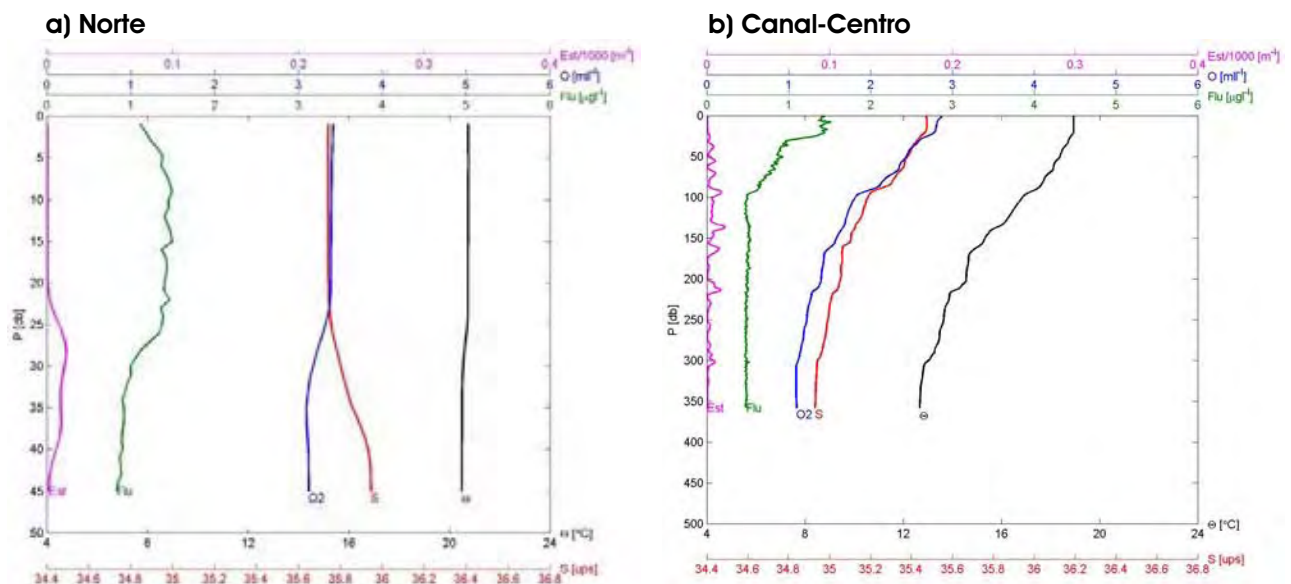


Figura 6. Distribución y abundancia de las principales especies durante diciembre de 2002. La escala indica número de larvas por 10 m<sup>2</sup>.

## VII.1.2 Ambiente

### VII.1.2.1 Perfiles verticales

Se seleccionaron perfiles verticales de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidad, oxígeno disuelto (mL/L), fluorescencia ( $\mu\text{g/L}$ ) y estabilidad ( $\text{m}^{-1}$ ) como representativos de las condiciones ambientales en cada uno de los grupos definidos arriba durante diciembre 2002 (Fig. 7). El grupo Norte se encuentra en una área relativamente somera ( $<120\text{ m}$ ) que incluye la cabecera del golfo y la zona somera rodeando la Cuenca Delfín; las distribuciones verticales en la Estación 22 (Fig. 7a) mostraron una tendencia a la homogeneidad vertical en temperatura, mientras el aumento de salinidad hacia el fondo indica convección vertical y corrientes de gravedad (Palacios-Hernández *et al.*, 2006); el perfil de estabilidad indica condiciones de mezcla en los 20 m superiores y algo de estratificación cerca del fondo como consecuencia de la convección y las corrientes de gravedad. Estas condiciones son típicas de esta área para finales de otoño (Lavín y Marinone, 2003). Esta área presenta los valores más altos de oxígeno disuelto (3.2-3.5 mL/L) y los valores más bajos de fluorescencia ( $<2\ \mu\text{g/L}$ ), probablemente debido a la intensa mezcla causada por las corrientes de marea y la convección vertical. En esta estación,  $\phi = 10\ \text{J/m}^3$ , un valor bajo debido a la poca profundidad y a la estratificación débil.



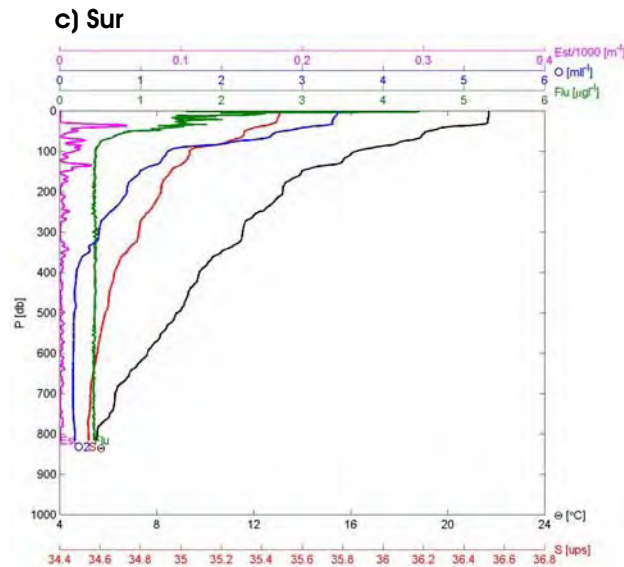


Figura 7. Perfiles verticales seleccionados para cada grupo de estaciones en el Golfo de California durante diciembre 2002. Estabilidad ( $\text{Est}/1000\text{m}^{-3}$ ) Oxígeno ( $\text{ml/L}$ ), Fluorescencia ( $\mu\text{g/L}$ ), Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), Salinidad.

El grupo Canal-Centro está en una zona más profunda (200-500 m) e incluye la parte más profunda de la Cuenca Delfín, la cuenca al este de IAG, y de manera más importante, el Canal de Ballenas (profundidad máxima  $\sim 1,600$  m). La estructura hidrográfica de este último es muy diferente al resto del GC, presenta la TSM más baja del GC y una estratificación intermedia. Los perfiles verticales de la Estación 26 (Fig. 7b), en el Canal de Ballenas, muestran que la temperatura y salinidad disminuyen con la profundidad sin presentar termo o haloclinas fuertes. El perfil de estabilidad  $E(z)$  muestra que la estratificación es débil, con pequeños picos donde el perfil de temperatura presenta saltos. Los valores más altos de fluorescencia ( $1.5\text{-}2.2 \mu\text{g/l}$ ) están en los primeros 50 m. En esta estación,  $\phi = 143 \text{ J/m}^3$ , es un valor intermedio debido a la estratificación ligera, lo cual de acuerdo con López *et al.* (2006), es evidencia de mezcla y convergencia inducida por afloramiento.

El grupo Sur también se encuentra en una zona profunda (450-800 m), pero algo lejos de la RAM tan energética debido a las mareas. Por consiguiente, en los perfiles de la Estación 32 (Fig. 7c) todas las variables están fuertemente estratificadas (debajo de la capa mezclada que abarca unos 40m); los valores de estabilidad en los primeros 200 m

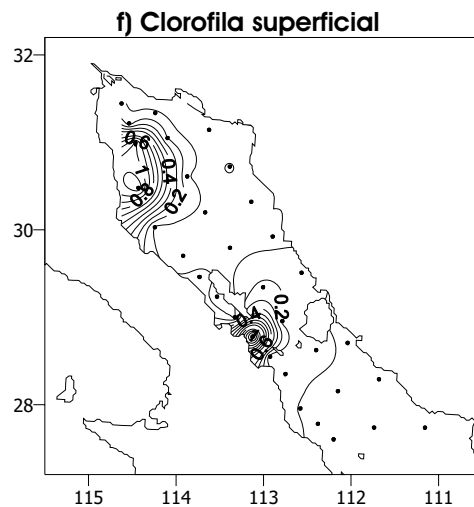
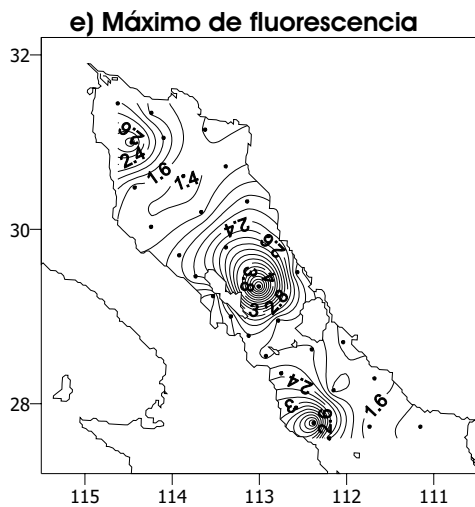
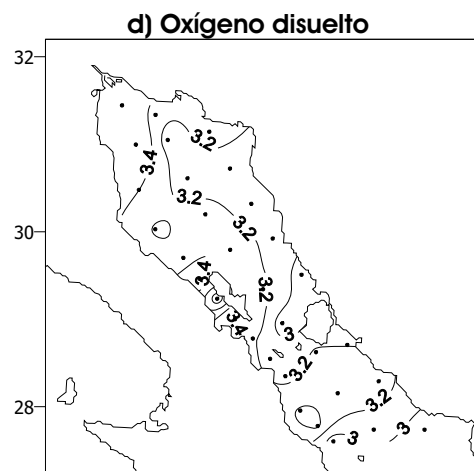
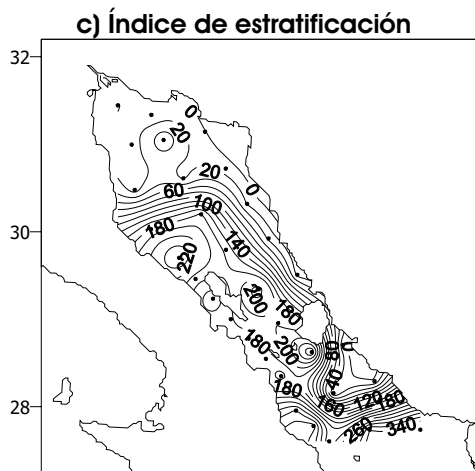
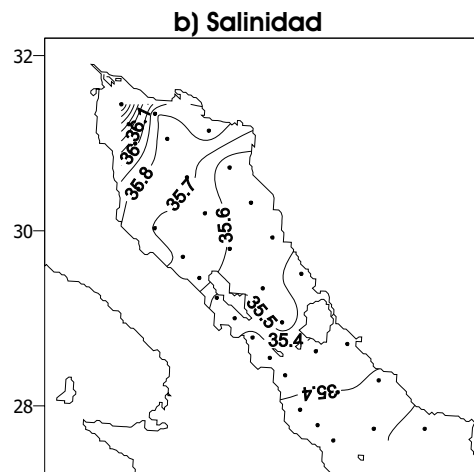
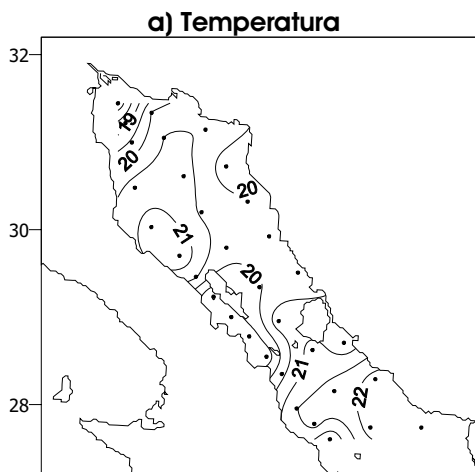


son los más altos del área del estudio con las más intensas termoclina, haloclina y oxiclina. Presenta los valores más altos de fluorescencia (2.2-4.5  $\mu\text{g/l}$ ) de los tres grupos. En esta estación,  $\phi = 310 \text{ J/m}^3$ , refleja las condiciones de fuerte estratificación en el área.

#### *VII.1.2.2 Distribución horizontal de variables y parámetros hidrográficos*

##### *Datos in situ*

La distribución espacial de las variables ambientales registradas en campo se muestra en figura 8, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto como el promedio de los primeros 10m, el máximo de fluorescencia, clorofila superficial y biomasa zooplanctónica. Las temperaturas más bajas ( $<19^\circ\text{C}$ ) se localizaron en la zona central (Fig. 8a), específicamente en el Canal de Ballenas (debido a la mezcla y el afloramiento) y en la cabecera del golfo donde existe una mezcla de la columna de agua; los valores más altos ( $>21^\circ\text{C}$ ) se registraron en las estaciones al sur del área de estudio. La salinidad (Fig. 8b) presentó un gradiente Sur-Norte con intervalo de valores de 35.3 en el sur de las islas a 36.7 en la cabecera del golfo. El parámetro  $\phi$  (Fig. 8c) muestra un gradiente Norte-Sur (acorde también con el aumento de profundidad), con los valores más bajos en las estaciones al norte ( $< 3 \text{ J/m}^3$ ) que indican una columna mezclada y los más altos al sur del área de estudio ( $>310 \text{ J/m}^3$ ), indicando una columna estratificada. La concentración de oxígeno disuelto (Fig. 8d) fue alta en una región muy energética del área de estudio, esto es, en la cabecera del golfo y al sur del Canal de Ballenas ( $> 3.7 \text{ mL/L}$ ); los valores más bajos se registraron en la estación al centro del Canal de Ballenas (2.83 mL/L), debido al afloramiento que ahí ocurre y que provoca la incursión de aguas profundas con menor concentración de oxígeno (Lavín y Marinone, 2003) y en las estaciones al norte de Isla Tiburón (2.86-2.89 mL/L).



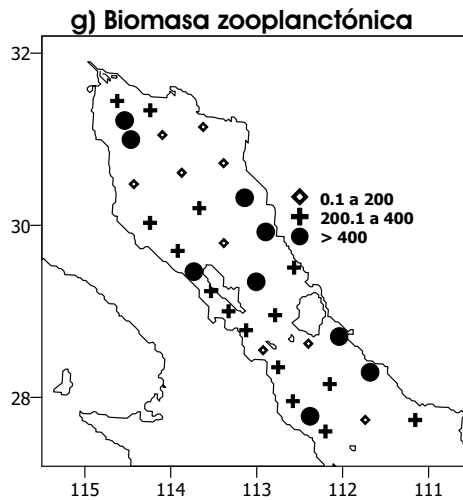


Figura 8. Distribución espacial de las variables ambientales en el área de estudio en diciembre 2002. (a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) Salinidad, (c) Oxígeno disuelto ( $\text{ml/L}$ ), (d)  $\phi$  ( $\text{J/m}^3$ ) a 200 m, (e) Máximo de fluorescencia ( $\mu\text{g/L}$ ), (f) Clorofila superficial ( $\text{mg/m}^3$ ), (g) Biomasa zooplanctónica ( $\text{ml}/1000\text{m}^3$ ).

El máximo de fluorescencia (Fig. 8e) presentó tres zonas de alta concentración, al norte y al sur del área del estudio ( $>3 \mu\text{g/l}$ ) hacia el lado peninsular y al este de IAG ( $>5 \mu\text{g/l}$ ), esta última coincide con el pequeño giro en la imagen de clorofila donde también tiene valores altos; los valores más bajos ( $< 1.4 \text{ mL/l}$ ) se ubicaron en la zona central de la región norte y en una estación al sur en el lado continental.

Las más altas concentraciones de clorofila superficial ( $>1.2 \text{ mg/m}^3$ ) (Fig. 8f) se localizaron en la región norte y al sur de IAG; los valores más bajos ( $<0.07 \text{ mg/m}^3$ ) se encontraron en las estaciones al sur del área de estudio.

La distribución de la concentración de biomasa zooplanctónica presentó los mayores valores al norte hacia el lado peninsular y al este de IAG ( $>1450 \text{ mL}/1000\text{m}^3$ ) donde también se registró un elevado número de larvas de peces; los valores más bajos se encontraron también en la región norte ( $<30 \text{ mL}/1000\text{m}^3$ ) (Fig. 8g). Su distribución es muy similar a la del máximo de fluorescencia.

Los valores de anomalía muestran una circulación anticiclónica general y en la zona norte se observan valores de anomalía geopotencial y densidad ( $\sigma_t$ ) que disminuyen del centro hacia la península que podría indicar la presencia de un giro anticiclónico (Fig. 9).

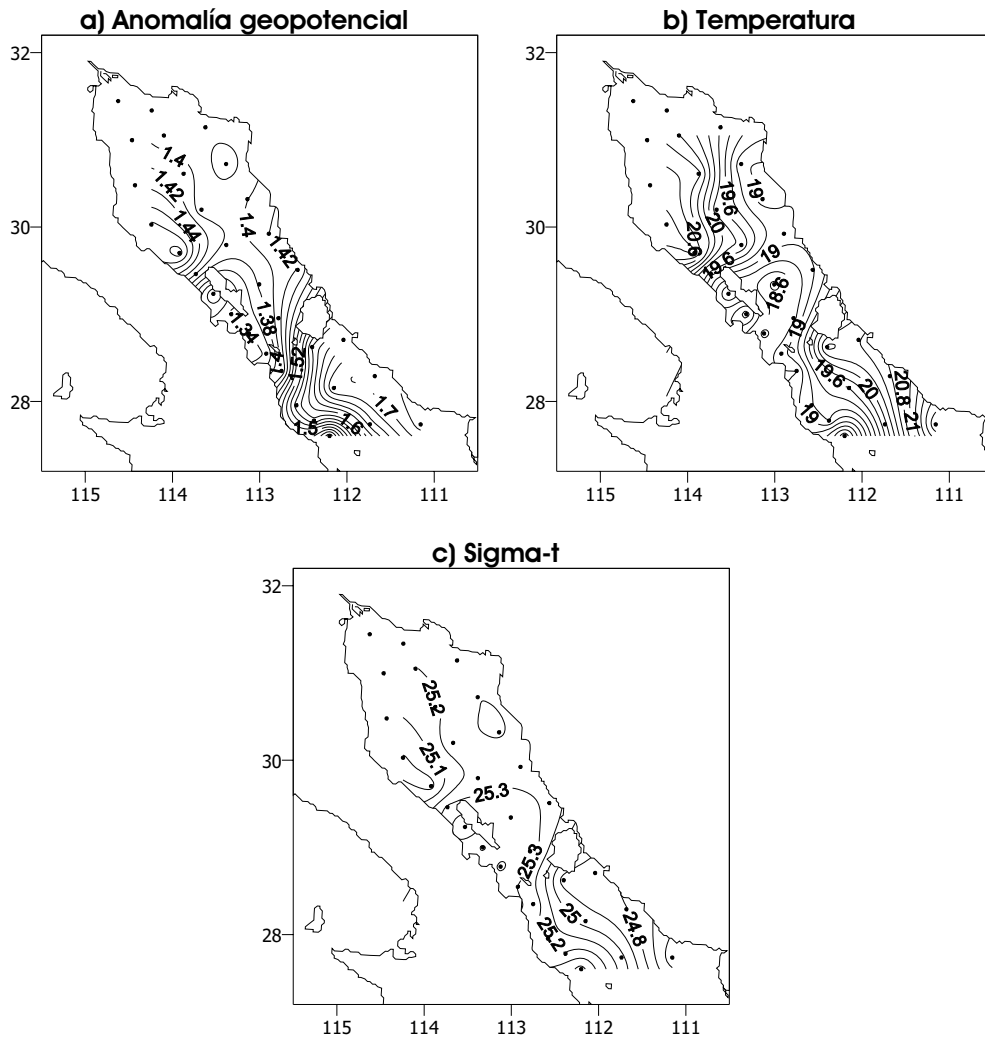


Figura 9. Distribución espacial: (a) anomalía geopotencial ( $m^2/s^2$ ), (b) temperatura ( $^{\circ}C$ ) y (c)  $\sigma_t$  a 50m de profundidad en el área de estudio en diciembre 2002.

### Datos de satélite

La distribución superficial de los valores de temperatura y clorofila extraídos de las imágenes de satélite se muestra en la figura 10. Durante diciembre 2002 los valores mas altos de temperatura ( $23^{\circ}C$ ) se ubicaron al sur del área de estudio y los valores más bajos ( $18^{\circ}C$ ) en la cabecera, con valores también bajos en el Canal de Ballenas ( $19.5^{\circ}C$ ). La distribución superficial de la temperatura de los datos *in situ* (Fig. 8a) como de datos de satélite (Fig. 10) presentan una distribución y un intervalo de valores similar, con un valor de correlación alto ( $r=0.82$ ).

Con respecto a la clorofila en diciembre 2002, los máximos valores ( $>2 \text{ mg/m}^3$ ) se ubicaron en la cabecera, al este de IAG en una estación que coincidió con el pequeño giro y al sur de Isla Tiburón del lado continental y los más bajos al sur de las islas ( $0.5 \text{ mg/m}^3$ ). En forma visual, la distribución de clorofila *in situ* y de satélite coinciden en los puntos de mayor concentración, aunque en conjunto presentan una correlación baja ( $r=0.3$ ). El intervalo de valores de la concentración de clorofila *in situ* ( $0.1\text{-}1.7 \text{ mg/m}^3$ ) y de satélite ( $0.5\text{-}4 \text{ mg/m}^3$ ) varían entre sí; estas diferencias se deben a la parte de la columna de agua que cada medición considera. La muestra *in situ* es sobre los primeros centímetros de la superficie, que en general, por sus condiciones, es pobre en clorofila, en tanto que el sensor del satélite considera hasta la primera profundidad óptica, que está en función del coeficiente de atenuación de la luz difusa (Austin y Petzold, 1981). Si tenemos que la primera profundidad óptica =  $k_d * Z$  ( $k_d$ , coeficiente de atenuación de la luz difusa y  $Z$ , profundidad) y el coeficiente de atenuación de la luz difusa para la región del GC que se incluye en este trabajo es aproximadamente de 0.08 a 0.3 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/level3.pl>), obtenemos que la primera profundidad óptica es 3-12.5 m. De esta forma, la transparencia determinara si el sensor del satélite registra una columna que incluya o no el máximo de clorofila, cuya profundidad varió entre 0.6 y 40 m; reflejándose en el valor resultante y por tanto en la escala de valores, más amplia que la de las mediciones *in situ*.

Al observar la figura 8e, dos valores altos del máximo de fluorescencia coinciden con las regiones de mayor concentración de clorofila en los datos de satélite, al norte en la cabecera y al este de IAG. Por tanto el factor importante a considerar es la distribución general y los puntos de mayor concentración antes que los valores propiamente dichos.

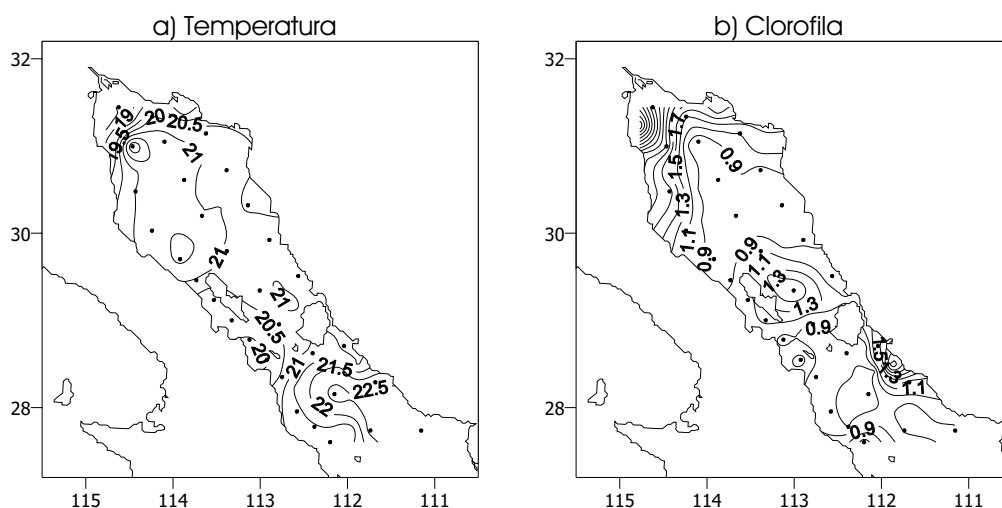


Figura 10. Distribución superficial de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y clorofila ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) para las estaciones de muestreo. Los datos son un promedio de los valores de tres imágenes diarias de MODIS para diciembre de 2002.

### VII.1.2.3 Gradientes espaciales del ambiente

El análisis de componentes principales (ACP) aplicado sobre la matriz de indicadores ambientales para diciembre de 2002 (Fig. 11), muestra en el primer componente un gradiente con salinidad, temperatura, oxígeno y  $\phi$  como las variables que mayormente contribuyen y en el segundo componente un gradiente principalmente de fluorescencia,  $\phi$  y oxígeno (Fig. 11a). El gráfico del análisis (Fig. 11a), sugiere tres grupos de estaciones cuya distribución geográfica (Fig. 11b) es muy similar a la de los grupos de estaciones a partir de la matriz de abundancia. En el grupo 1, (Fig. 11a) a la derecha (estaciones que tendieron a corresponder en área al Grupo Norte, figura 5), se localizan las estaciones con los valores más altos de salinidad (35.7-36.7) y de oxígeno ( $>3.1$  mL/L) y los valores más bajos de temperatura (18.5-20.5 $^{\circ}\text{C}$ ) y  $\phi$  ( $<20$  J/m $^3$ ). El grupo 2 (Fig. 11a), que tendió a corresponder con el grupo Canal-Centro (Fig. 4), es definido principalmente por la distribución de  $\phi$  (Fig. 8c), con valores intermedios (150-200 J/m $^3$ ). En el grupo 2 pueden diferenciarse dos provincias por su temperatura: el Canal de Ballenas y la Cuenca Delfín. El grupo 3 (Fig. 11a), el cual tendió a corresponder con el grupo Sur (Fig. 4), es un grupo de estaciones con los valores más altos de temperatura ( $>21.5^{\circ}\text{C}$ ) y  $\phi$

(>280 J/m<sup>3</sup>); alta fluorescencia (>2.4 µg/l) y baja salinidad (<35.4) y clorofila superficial (<0.3 mg/m<sup>3</sup>).

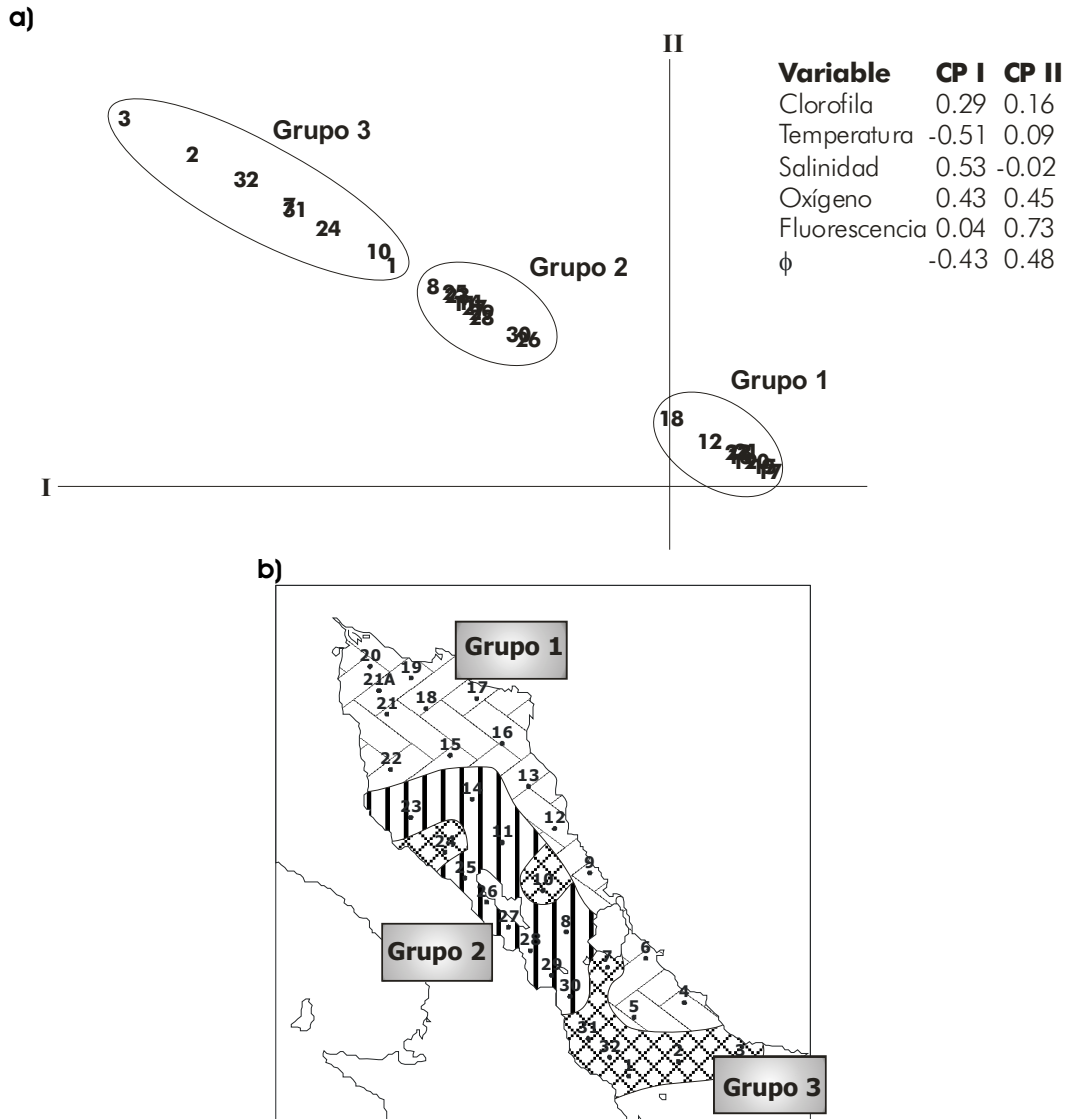


Figura 11. a) Gráfico del análisis de componentes principales y correlación las variables ambientales con cada eje; b) mapa de los grupos ambientales a partir de dicho análisis en el Golfo de California durante diciembre 2002.

El análisis de varianza aplicado a los indicadores ambientales de los grupos de estaciones definido por el ACP, indicó que al menos una de las tres medias era distinta para temperatura, salinidad, oxígeno y  $\phi$ . En tanto que para la clorofila superficial y el máximo de fluorescencia indicó que no hay diferencias significativas entre las medias de los tres grupos (Tabla 4). La prueba de Tukey aplicada posterior a la ANOVA, para

determinar diferencias entre los posibles pares de medias, indica que los grupos ambientales 1 y 2 presentan medias diferentes para temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y  $\phi$ , indicadores para los que también son diferentes las medias entre los grupos 1 y 3. Así mismo, los grupos 2 y 3 difieren únicamente en  $\phi$ , indicador para el cual todas las medias (de los tres grupos) son diferentes (Tabla 5).

Tabla 4. Resultados de la ANOVA de una vía aplicada a los indicadores ambientales de los tres grupos definidos por el ACP en diciembre de 2002.

	Hipótesis	<i>p</i>	Decisión Estadística
CLOROFILA SUP	H <sub>0</sub> : $\mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$ H <sub>a</sub> : no todas las $\mu_j$ son iguales	0.5293	No rechazar H <sub>0</sub> dado que 0.5293 > 0.01
TEMPERATURA	H <sub>0</sub> : $\mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$ H <sub>a</sub> : no todas las $\mu_j$ son iguales	0.0001	Rechazar H <sub>0</sub> dado que 0.0001 < 0.01
SALINIDAD	H <sub>0</sub> : $\mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$ H <sub>a</sub> : no todas las $\mu_j$ son iguales	0.0009	Rechazar H <sub>0</sub> dado que 0.0009 < 0.01
OXIGENO	H <sub>0</sub> : $\mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$ H <sub>a</sub> : no todas las $\mu_j$ son iguales	0.000003	Rechazar H <sub>0</sub> dado que 0.000003 < 0.01
MAX. FLUORES.	H <sub>0</sub> : $\mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$ H <sub>a</sub> : no todas las $\mu_j$ son iguales	0.2589	No rechazar H <sub>0</sub> dado que 0.2589 > 0.01
$\phi$	H <sub>0</sub> : $\mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$ H <sub>a</sub> : no todas las $\mu_j$ son iguales	0.0000	Rechazar H <sub>0</sub> dado que 0.0000 < 0.01



Tabla 5. Resultados de la prueba de Tukey de comparación múltiple entre medias de cada uno de los indicadores ambientales registrados para cada grupo ambiental definido por el ACP en diciembre de 2002.

	Hipótesis	<i>p</i>	Decisión Estadística
CLOROFILA SUP	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.9977	No rechazar $H_0$ dado que $0.9977 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.5420	No rechazar $H_0$ dado que $0.5420 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.6112	No rechazar $H_0$ dado que $0.6112 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
TEMPERATURA	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.8902	No rechazar $H_0$ dado que $0.8902 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
SALINIDAD	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.0088	Rechazar $H_0$ dado que $0.0088 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.0025	Rechazar $H_0$ dado que $0.0025 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.7505	No rechazar $H_0$ dado que $0.7505 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
OXIGENO	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.0004	Rechazar $H_0$ dado que $0.0004 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.1953	No rechazar $H_0$ dado que $0.1953 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
MAX. FLUORES.	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.9157	No rechazar $H_0$ dado que $0.9157 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.2308	No rechazar $H_0$ dado que $0.2308 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.4523	No rechazar $H_0$ dado que $0.4523 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
$\phi$	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		

El análisis discriminante aplicado sobre la matriz de indicadores ambientales con los grupos definidos en el ACP, indica que las estaciones pertenecen a los grupos asignados, además muestra que el indicador que mejor discrimina a los grupos es  $\phi$ , señalado por el valor de lambda muy cercano a cero (Fig. 12).

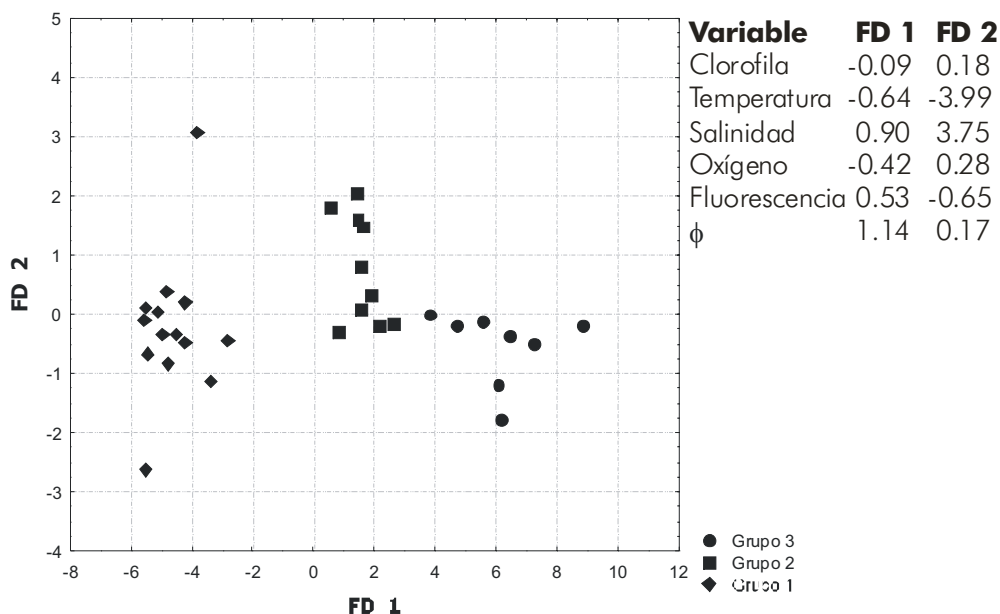


Figura 12. Gráfico del análisis de discriminantes de los grupos ambientales para diciembre 2002. Aparece también la contribución de cada variable a cada función discriminante

### VII.1.3 Larvas de peces vs. Ambiente

#### VII.1.3.1 Análisis canónico de correspondencias

El biplot originado a partir del análisis canónico de correspondencias (ACC) se presenta en la figura 13, los ejes de ordenación I y II están señalados, los vectores representan los indicadores ambientales, la longitud del vector indica su importancia relativa y el ángulo de separación entre los ejes de ordenación y los vectores indica el grado de correlación entre ellos. De este modo los indicadores de mayor importancia en la ubicación de las estaciones en el espacio de ordenación son clorofila y salinidad. Sobre el gráfico se señalan los grupos de estaciones que previamente se formaron con el dendrograma a partir de la matriz de disimilitud donde se considera únicamente la abundancia de las especies, a diferencia del ACC que incluye tanto la matriz de abundancia de larvas como la matriz de indicadores ambientales. En el cuadrante inferior

derecho, el grupo Norte se define por valores altos de salinidad y oxígeno, valores bajos de  $\phi$  y las menores abundancias de larvas; a la izquierda del gráfico sobre el eje I, se ubica el grupo Sur que se distingue por valores altos de  $\phi$ , valores bajos de oxígeno y clorofila y la mayor abundancia; las estaciones del grupo Canal-Centro aunque coinciden con el eje II, se separan en el Canal de Ballenas y en la zona central de la región de estudio, al este y norte de IAG. Las estaciones del canal se distinguen por valores altos de fluorescencia, clorofila superficial y  $\phi$  y las estaciones del centro por valores altos de temperatura y salinidad y bajos de fluorescencia. Las estaciones del grupo Canal-Centro presentan especies similares con abundancias similares y por tanto se unen en el dendrograma, en tanto que en el ACC la separación indica diferencias ambientales, sin embargo, al observar la distribución de los grupos con respecto al eje I, este grupo se ubica en medio de los otros dos, indicando condiciones ambientales intermedias.

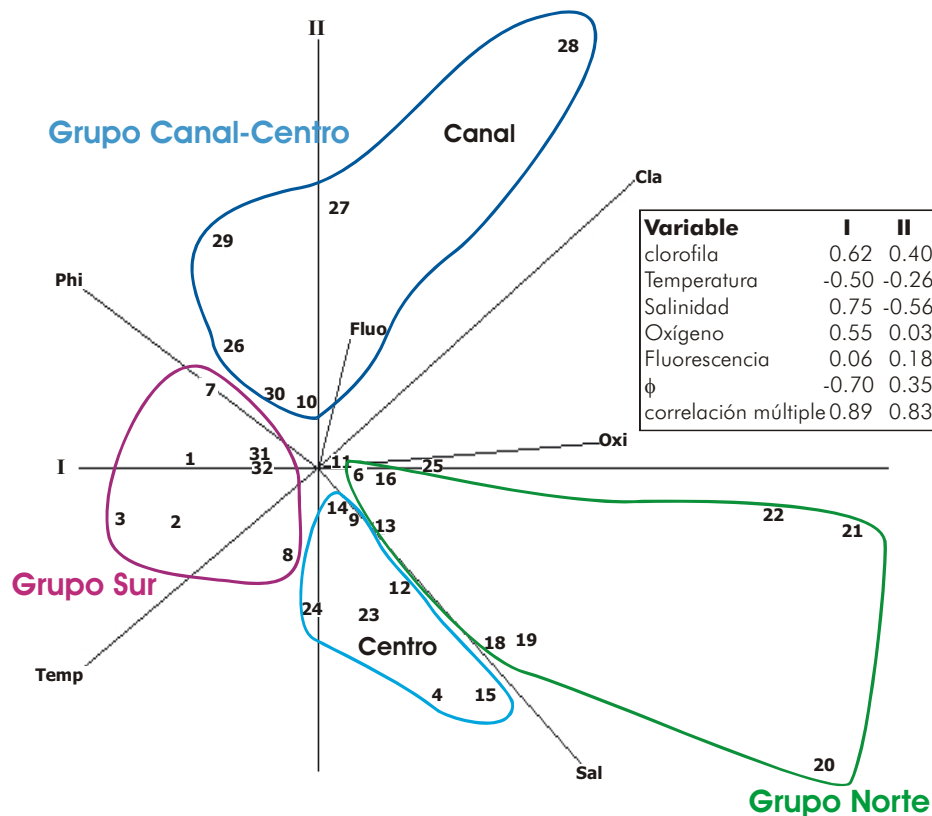


Figura 13. Gráfico del ACC durante diciembre 2002. En el recuadro aparece el nivel de correlación de cada variable con cada eje de ordenación así como la correlación múltiple.

#### VII.1.4 Circulación, permanencia y conectividad

La distribución de la corriente residual (filtrando las frecuencias de mareas y mayores) en el norte del GC proveniente del modelo numérico para el 9 de diciembre de 2002 (Fig. 14), es representativa de la circulación superficial durante el crucero: anticiclónica en general, con un giro anticiclónico principal en el centro de la región norte del área de estudio (al norte de las grandes islas). Este patrón de circulación incluye un flujo hacia el norte del lado peninsular bordeando las Cuencas Delfín y Wagner y una corriente muy fuerte hacia el sureste, paralela al macizo continental. Esta corriente vira al oeste en el área al este de IAG y se divide en dos ramas: una regresa al NW hacia el giro anticiclónico principal y el otro fluye al SE para formar un flujo global fuera de la región norte (siendo esta zona de divergencia donde se forma el pequeño giro que es visible en la imagen de clorofila con valores altos). Tanto el giro anticiclónico principal como el flujo exterior son parte del patrón estacional de circulación del GC como es descrito (e. g.) por Lavín y Marinone (2003).

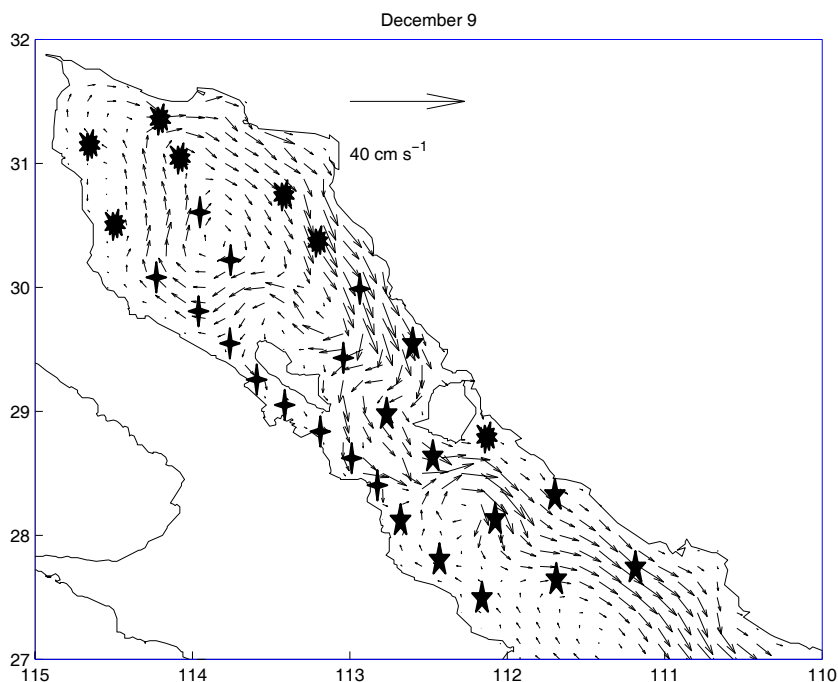


Figura 14. Vectores de campos de corriente para la primera capa del modelo (0-10 m) para diciembre 9 de 2002, con localización de grupos de estaciones (● Norte, + Canal-Centro y ★ Sur).

El giro anticiclónico justo al sur de la RAM, sobre la Cuenca de San Pedro Mártir, es un rasgo persistente que también se ha detectado en el flujo geostrófico promedio (Mateos *et al.*, 2006). El flujo superficial en el Canal de Ballenas es débil hacia el SE, y algo más fuerte cerca del extremo sur, donde es influenciado por la rama hacia el sur descrita.

Con el objetivo de detectar la permanencia y patrones de transporte, es necesaria una descripción lagrangeana de la circulación. El campo de corriente euleriano instantáneo durante diciembre fue usado para simular el movimiento de partículas inertes. Las trayectorias de las partículas liberadas en cada estación se muestran en la figura 15, separados por grupos de estaciones. Se muestran las trayectorias entre el día 1 y el día 15 en la columna izquierda, y aquéllos entre día 16 y día 30 en el derecho. La conectividad entre las áreas en un momento dado (ej.,  $t = 15$  días) después de liberar las partículas es cuantificado por la matriz de conectividad  $C_t(i,j)$ , donde  $i$  está dada en la vertical y representa el área de liberación y  $j$  en la horizontal y representa la posición de las partículas después de  $t$  días. Las matrices de conectividad que corresponden a la figura 16 se dan en la Tabla 6; por ejemplo,  $C_{30}(2,3)=18.9$  significa que después de 30 días el 18.9% de las partículas liberadas en el área del Canal-Centro se encontraran en el área Sur. La diagonal principal representa el porcentaje de las partículas que permanecen en su área de origen después del tiempo declarado.

Las trayectorias de las tres estaciones más norteñas del grupo Norte (Fig. 15 a, b) muestran permanencia en la cabecera del golfo debido al flujo débil, aunque después de 30 días el flujo anticiclónico global las acarreará hacia el lado continental, donde algunas partículas han entrado al rápido flujo costero con dirección sureste al final del periodo de simulación. Las partículas liberadas en el lado este mostraron un rápido desplazamiento al sureste que se retarda al norte y oeste de Isla Tiburón donde se observa una zona de retención. Al final del periodo, algunas de las partículas en esta zona de retención han escapado hacia el flujo principal: algunas se movieron al norte hacia el giro principal y algunas continuaron lentamente hacia el sur, siguiendo el patrón de circulación descrito arriba. Después de 15 (30) días, 64 (56)% de las partículas permanecen en el área (Tabla 6), y después de 30 días más partículas del Norte se encuentran en el Sur (26%) que en

el área del Canal-Centro (14%), indicando mayor conectividad entre las áreas Norte y Sur que entre las áreas Nortes y Canal-Centro.

Tabla 6. Matrices de conectividad  $C_T$  (% de partículas liberadas) correspondiente a las trayectorias en la Fig. 16 para diciembre 2002. El eje vertical representa el área de partida y el horizontal el área de arribo después de 15 y 30 días de liberación.

<b>Posición después de 15 días</b> →	<b>(1) Norte</b>	<b>(2) Canal-Centro</b>	<b>(3) Sur</b>
(1) Norte	64.1	15.3	18.6
(2) Canal-Centro	6.8	70.9	20.2
(3) Sur	0	4.8	79.5

<b>Posición después de 30 días</b> →	<b>Norte</b>	<b>Canal-Centro</b>	<b>Sur</b>
(1) Norte	51.9	17.13	28.5
(2) Canal-Centro	9.8	67.2	20.6
(3) Sur	0	10.5	70.0

Las partículas liberadas en las estaciones del grupo Canal-Centro (Fig. 15 c, d) muestran permanencia en los primeros 15 días para la mayoría de los sitios, excepto cerca del continente debido a la corriente costera. El área de mayor retención es el Canal de Ballenas debido a las corrientes residuales débiles. Las partículas liberadas en las estaciones al norte del Canal de Ballenas son afectadas por el giro anticiclónico principal y muestran alguna dispersión. Después de 30 días, el efecto del patrón de circulación se vuelve más aparente (Fig. 15 d), con retención en el giro anticiclónico principal, en el Canal de Ballenas y en el giro de San Pedro Mártir. Las matrices de conectividad (Tabla 6) muestran que esta área es muy retentiva, con  $\sim 70\%$  de las partículas permaneciendo en el área después de 30 días, 20% van al área Sur y sólo 9% se mueven al área Norte.

Las trayectorias de las partículas liberadas en las estaciones que corresponden al grupo Sur muestra permanencia durante los primeros 15 días para la mayoría de las estaciones (Fig. 15 e), excepto para aquellas frente a la costa continental al sur de Isla Tiburón, las cuales fueron alejadas por la corriente costera con dirección sureste. Las partículas liberadas sobre la cuenca San Pedro Mártir y sobre el lado peninsular permanecen en la cercanía de las áreas de liberación después de 30 días. Después de 30 días (Fig. 15 f), la mayoría de las partículas liberadas al norte y oeste de Isla de Tiburón permanecen en el

área, aunque algunas pasaron al norte hacia el giro anticiclónico y unas pocas fueron sacadas del Golfo Norte por la circulación. La Tabla 6 muestra que 80 (73)% de las partículas permanecen en el área después de 15 (30) días, y que sólo 5(9)% se movió al área Canal-Centro en los mismos periodos de tiempo.

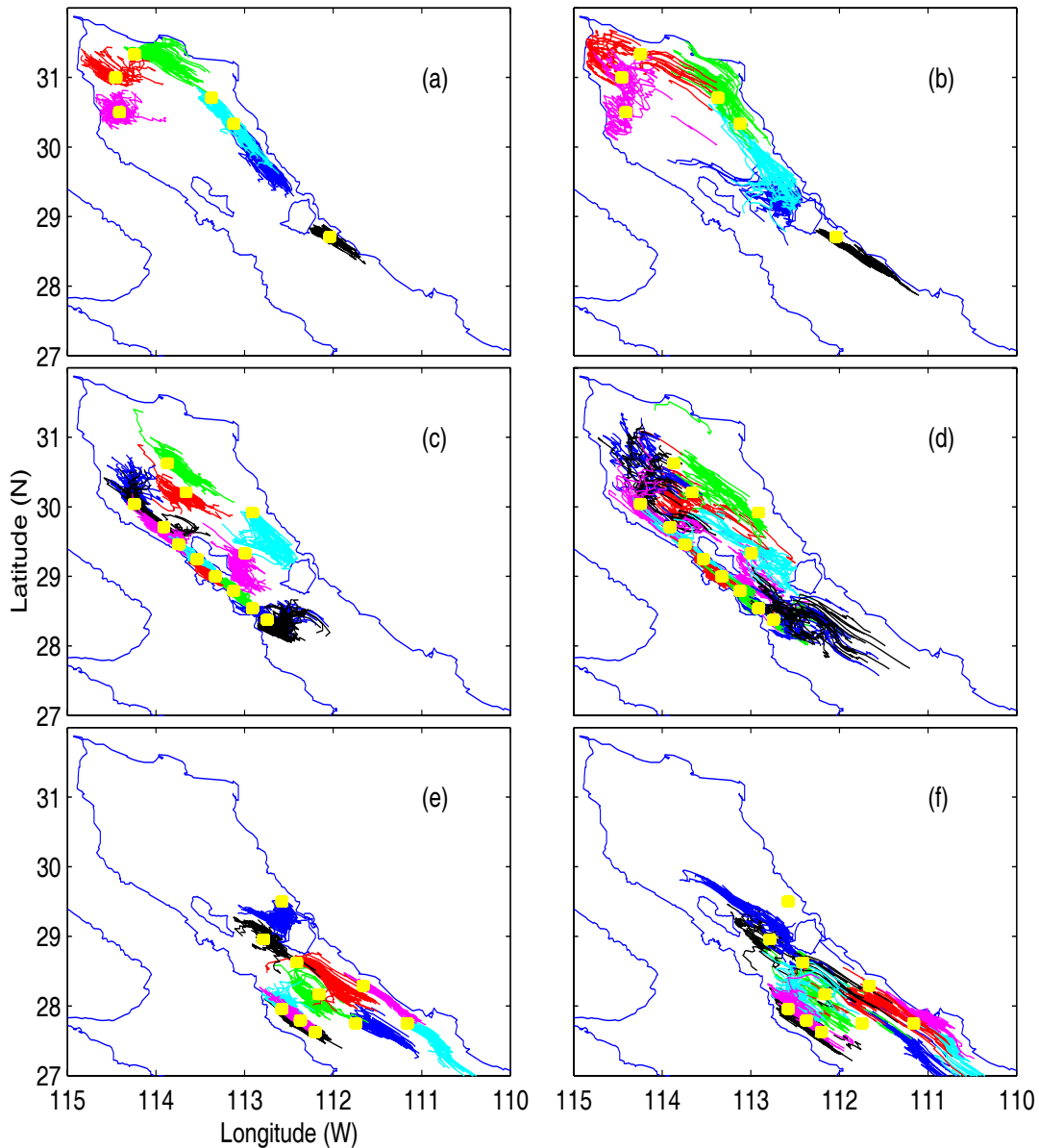


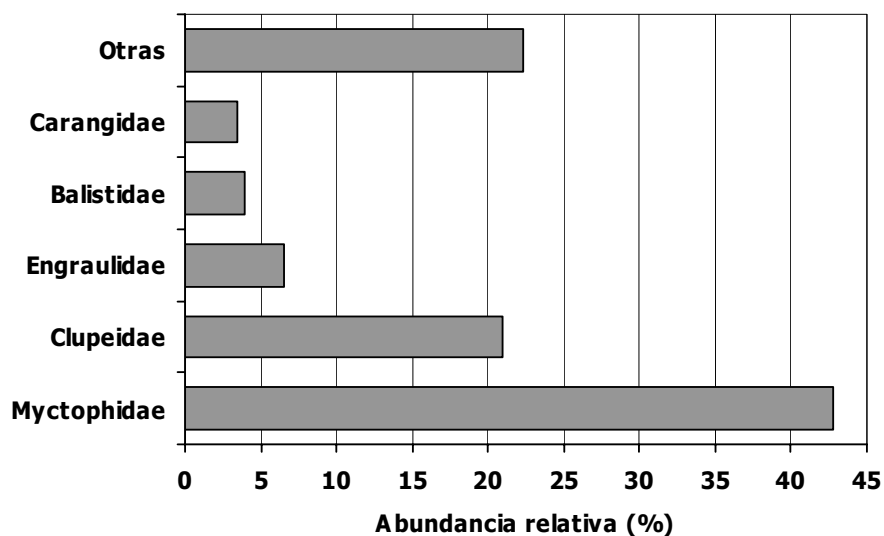
Figura 15. Trayectorias de partículas liberadas en las estaciones de los diferentes grupos, calculadas de los campos de corrientes del modelo numérico para diciembre de 2002. (a) Grupo Norte para los días 1-15, (b) ídem para los días 16-30; (c) Grupo Canal-Centro para los días 1-15, (d) ídem para los días 16-30; (e) Grupo Sur para los días 1-15, (f) ídem para los días 15-30. Para mayor claridad, únicamente se grafican las trayectorias de cada 50 partículas de las 2000 liberadas en cada estación. La posición de las partículas se gráfica cada 24 horas.

## VII.2 AGOSTO 2003

### VII.2.1 Larvas de peces

Para agosto de 2003 se obtuvieron un total de 18,267 larvas de peces, abundancia considerablemente mayor con respecto a diciembre; se ubicaron en 195 unidades taxonómicas de 56 familias, el doble de la riqueza que se encontró en diciembre. Las familias más abundantes fueron Myctophidae y Clupeidae con más del 60% de la abundancia total, así mismo, las especies más abundantes fueron *Benthosema panamense* (Myctophidae) y *Opisthonema libertate* (Clupeidae) que representaron >50% de la abundancia total (Fig. 16). Se consideró a *B. panamense* como la especie de amplia distribución debido a su frecuencia de ocurrencia (>80%) durante este período. *B. panamense* se distribuyó ampliamente en el área de estudio con bajas abundancias únicamente en la cabecera del golfo y entre las grandes islas donde se registran valores relativamente bajos de temperatura y altos de clorofila. La segunda especie *O. libertate* se distribuyó a lo largo del lado continental hasta la cabecera del golfo con valores bajos de temperatura y relativamente altos de clorofila (Fig. 17).

a)





b)

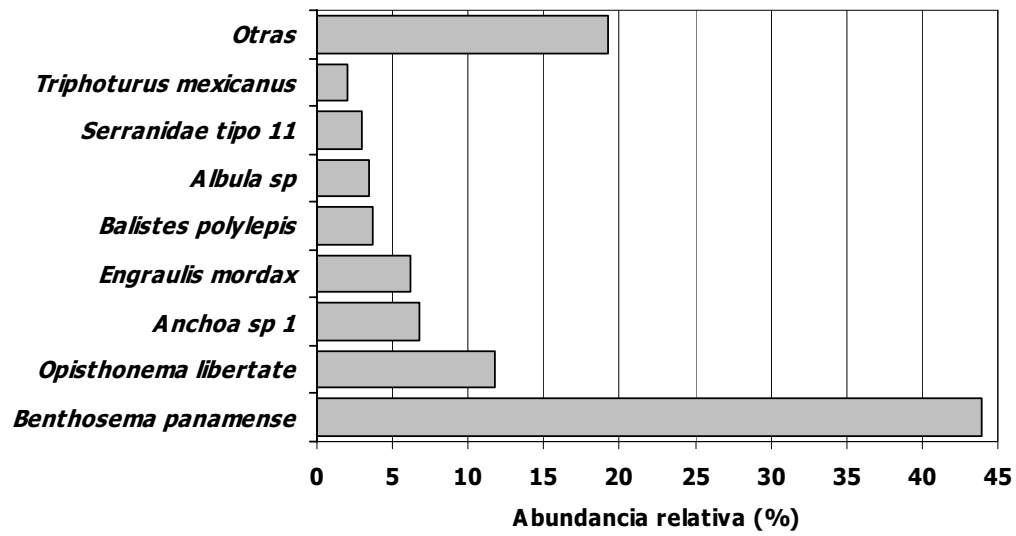
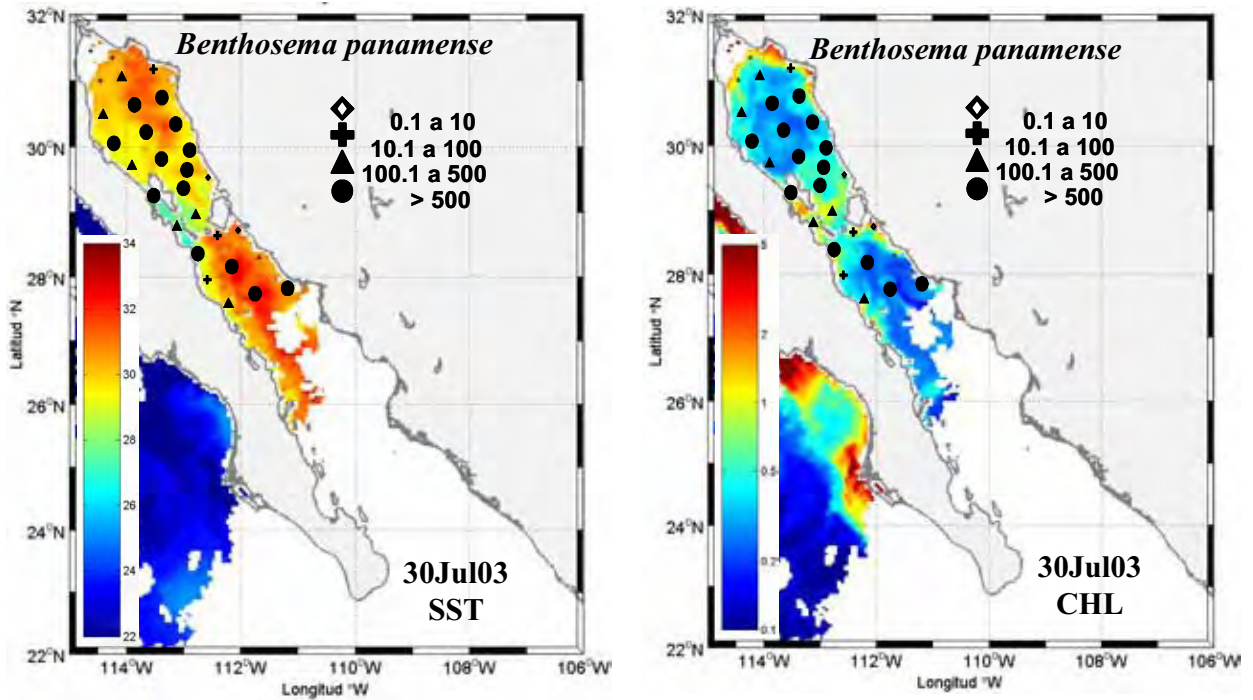


Figura 16. Abundancia relativa por (a) familia y (b) especie, durante el mes de agosto de 2003. En el rubro “otras” se incluyen 51 familias y 187 especies respectivamente.



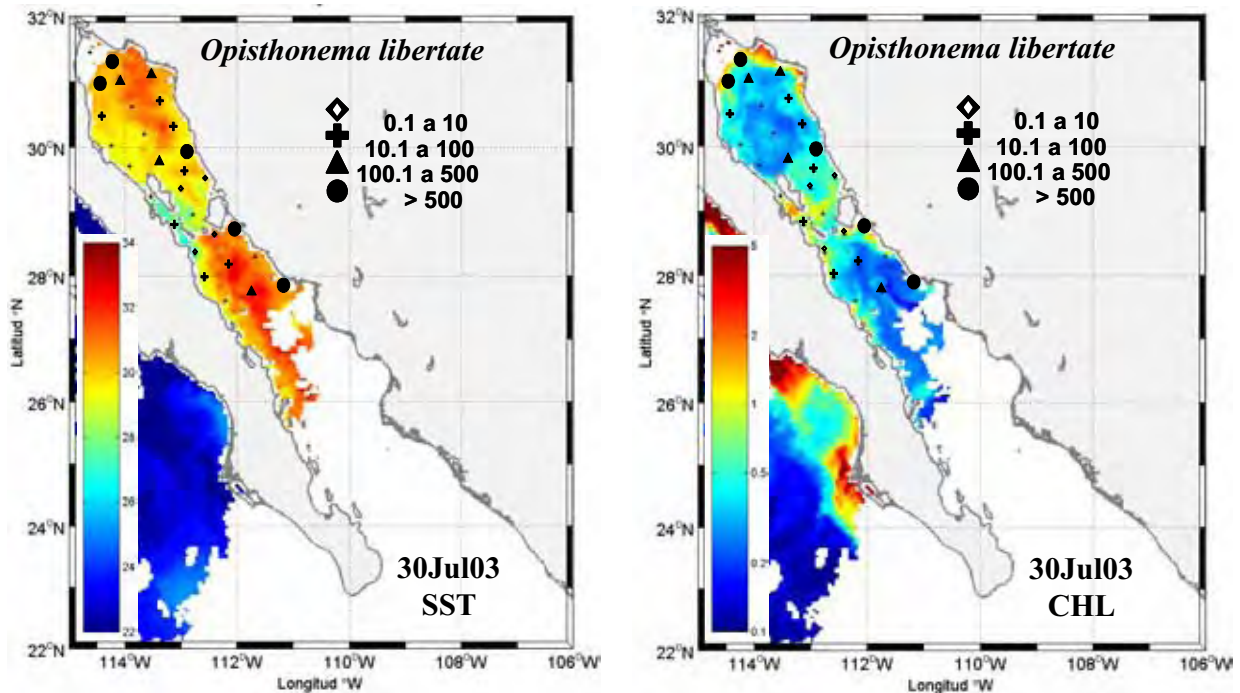


Figura 17. Distribución y abundancia de *Benthosema panamense* y *Opisthonema libertate* sobre imágenes de satélite de temperatura superficial del mar y concentración de clorofila para el 30 de julio 2003.

### VII.2.2 Grupos de estaciones y asociaciones de larvas de peces

El dendrograma originado a partir de la aplicación del índice de disimilitud de Bray-Curtis a la matriz de abundancia, definió tres grupos de estaciones tanto si se incluyó (Fig. 18 a, b) o no (Fig. 18 c, d) a la especie de amplia distribución (*B. panamense*). Para la matriz que incluyó a todas las especies y de acuerdo a su ubicación geográfica, los grupos se denominaron Norte costero, Norte central-Canal y Sur. La ubicación de estos grupos aparece sobrepuesta en imágenes de satélite de TSM y clorofila (CHL) (30 de julio de 2003) en la figura 19.

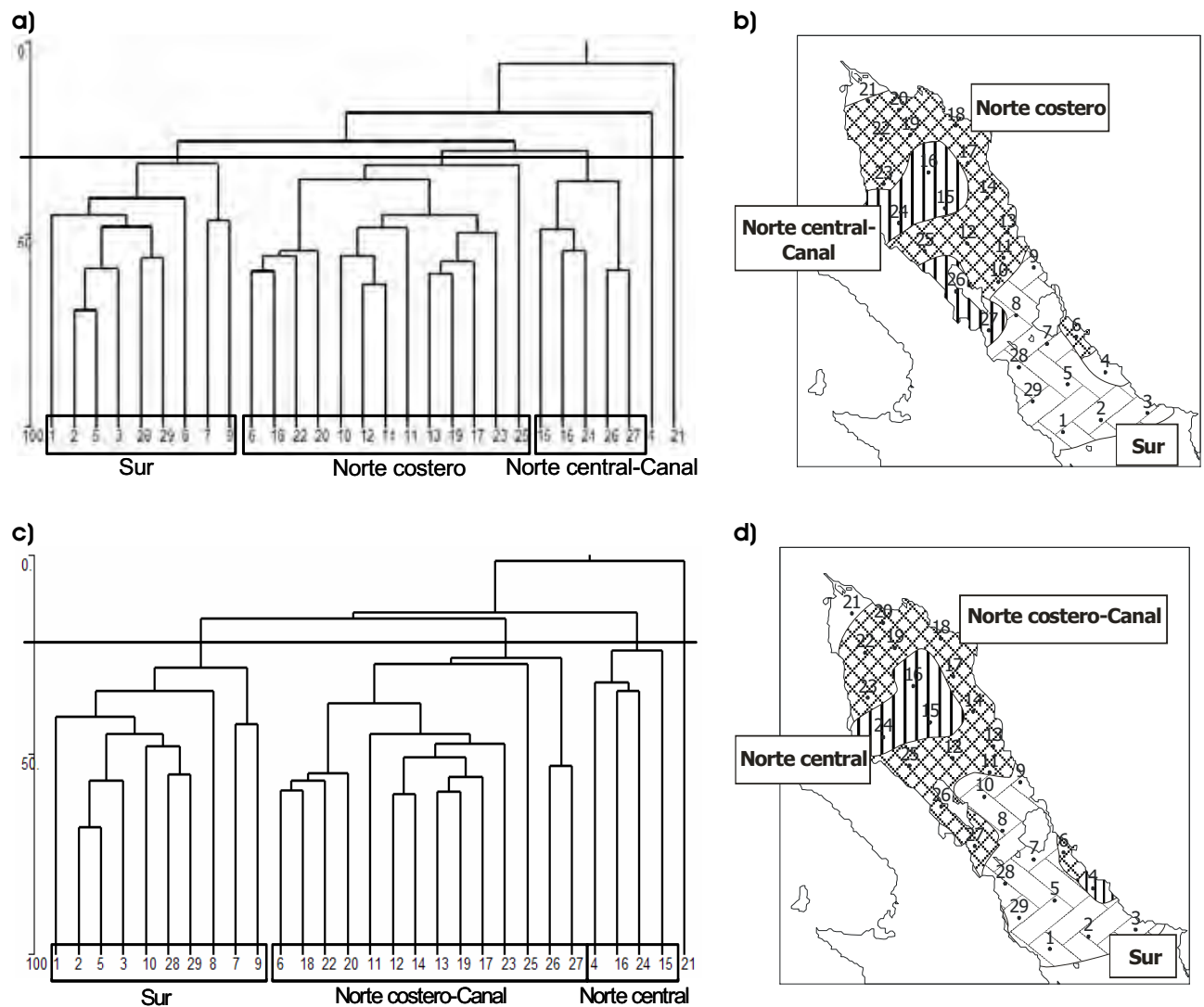


Figura 18. Dendrogramas de grupos de estaciones definidos por el índice de disimilitud de Bray-Curtis usando el método aglomerativo UPGA, y su localización en el Golfo de California durante agosto 2003. a) y b) Incluyendo las especies de amplia distribución, c) y d) excluyendo las especies de amplia distribución.

El grupo Norte costero se asoció a una TSM de 29-31°C y una concentración de clorofila 0.2-0.7 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 19), presentó la abundancia de larvas promedio por grupo más alta (> 3,000 orgs/10m<sup>2</sup>) y un número intermedio de taxa (62). Las especies dominantes en este grupo fueron *B. panamense* (mesopelágico), *O. libertate* (pelágico-costero), *Engraulis mordax* (Engraulidae, pelágico-costero), *Balistes polylepis* (Balistidae, costero-demersal) y *Albula* sp. (Albulidae, costero-demersal) (Tabla 7). Las especies que

dominaron al excluir del análisis a *B. panamense* fueron *O. libertate*, *Anchoa* sp. 1 (Engraulidae, epipelágico), *E. mordax*, *B. polylepis*, *Albula* sp., *Symphurus williamsi* (Cynoglossidae, costero-demersal), *Trichiurus nitens* (Trichiuridae, bentopelágico), *Oligoplites saurus inornatus* (Carangidae, costero-demersal) y Eleotridae tipo 1 (Eleotridae, demersal) (Tabla 8). Los atributos comunitarios de grupo son la diversidad más alta, una alta equidad y la más baja dominancia. Los organismos que mejor definen a este grupo son aquellos cuya distribución y abundancia ocurre principalmente del lado continental y hacia el norte hasta la cabecera del golfo, de hábitos pelágico-costero y demersales, en particular *E. mordax*, *Albula* sp. y *B. polylepis* (Fig. 20).

Tabla 7. Taxa de larvas de peces dominantes por grupo de estaciones en el Golfo de California durante agosto 2003 determinado por la prueba de Olmstead-Tukey. X, abundancia promedio (número de larvas por 10 m<sup>2</sup>) y %F, frecuencia de ocurrencia (%) para cada taxón.

Taxón Dominante	Norte costero <sup>a</sup>		Norte central-Canal <sup>b</sup>		Sur <sup>c</sup>	
	X	%F	X	%F	X	%F
<i>Bentosema panamense</i>	1005	85	907	100	907	100
<i>Opisthonema libertate</i>	574	92			110	78
<i>Engraulis mordax</i>	332	85			13	33
<i>Balistes polylepis</i>	158	85			64	78
<i>Albula</i> sp.	141	85			74	89
<i>Triphoturus mexicanus</i>					156	89
<i>Syacium ovale</i>					33	89
<i>Selar crumenophthalmus</i>					24	67
<i>Auxis</i> sp. 1					32	89
Gobiidae tipo 12					23	67
<i>Vinciguerria lucetia</i>					70	78
<i>Eucinostomus gracilis</i>					10	67
<i>Caranx sexfasciatus</i>					9	89
<i>Anguilliformes</i> tipo 1					9	89
<i>Xenistius californiensis</i>					20	56
<i>Caranx caballus</i>					17	67

<sup>a</sup> Número de taxa 62; número de estaciones 13.

<sup>b</sup> Número de taxa 24; número de estaciones 5.

<sup>c</sup> Número de taxa 65; número de estaciones 9.

Tabla 8. Taxa de larvas de peces dominantes por grupo de estaciones en el Golfo de California durante agosto 2003 determinado por la prueba de Olmstead-Tukey excluyendo las especies de amplia distribución. X, abundancia promedio (número de larvas por 10 m<sup>2</sup>) y %F, frecuencia de ocurrencia (%) para cada taxón.

Taxón Dominante	Norte costero <sup>a</sup>		Norte central-Canal <sup>b</sup>		Sur <sup>c</sup>	
	X	%F	X	%F	X	%F
<i>Opisthonema libertate</i>	534	86			99	80
<i>Anchoa</i> sp. 1	345	36				
<i>Engraulis mordax</i>	308	79				
<i>Balistes polylepis</i>	146	71			59	80
<i>Albula</i> sp.	131	79			66	80
<i>Oligoplites saurus inornatus</i>	43	64				
<i>Symphurus williamsi</i>	44	43				
<i>Eleotridae</i> tipo 1	42	71				
<i>Trichiurus nitens</i>	43	43				
<i>Auxis</i> sp. 1			17	100	30	90
<i>Auxis</i> sp. 2			17	75		
<i>Triphoturus mexicanus</i>					143	90
<i>Syacium ovale</i>					30	80
<i>Selar crumenophthalmus</i>						
Gobiidae tipo 12					22	70
<i>Vinciguerria lucetia</i>					63	70
<i>Caranx sexfasciatus</i>					23	60
<i>Xenistius californiensis</i>					18	60
<i>Caranx caballus</i>					16	60

<sup>a</sup> Número de taxa 62; número de estaciones 14.

<sup>b</sup> Número de taxa 23; número de estaciones 4.

<sup>c</sup> Número de taxa 65; número de estaciones 10.

Tabla 9. Descriptores comunitarios determinados para las tres asociaciones larvales formadas a partir de la matriz de abundancia en agosto de 2003.

ATRIBUTOS	NORTE COSTERO	NORTE CENTRAL-CANAL	SUR
Diversidad <i>bits/indv</i>	3.6784	0.5618	3.5807
Equidad	0.5383	0.1134	0.5022
Dominancia	0.4616	0.8856	0.4977
Riqueza específica	114	31	140

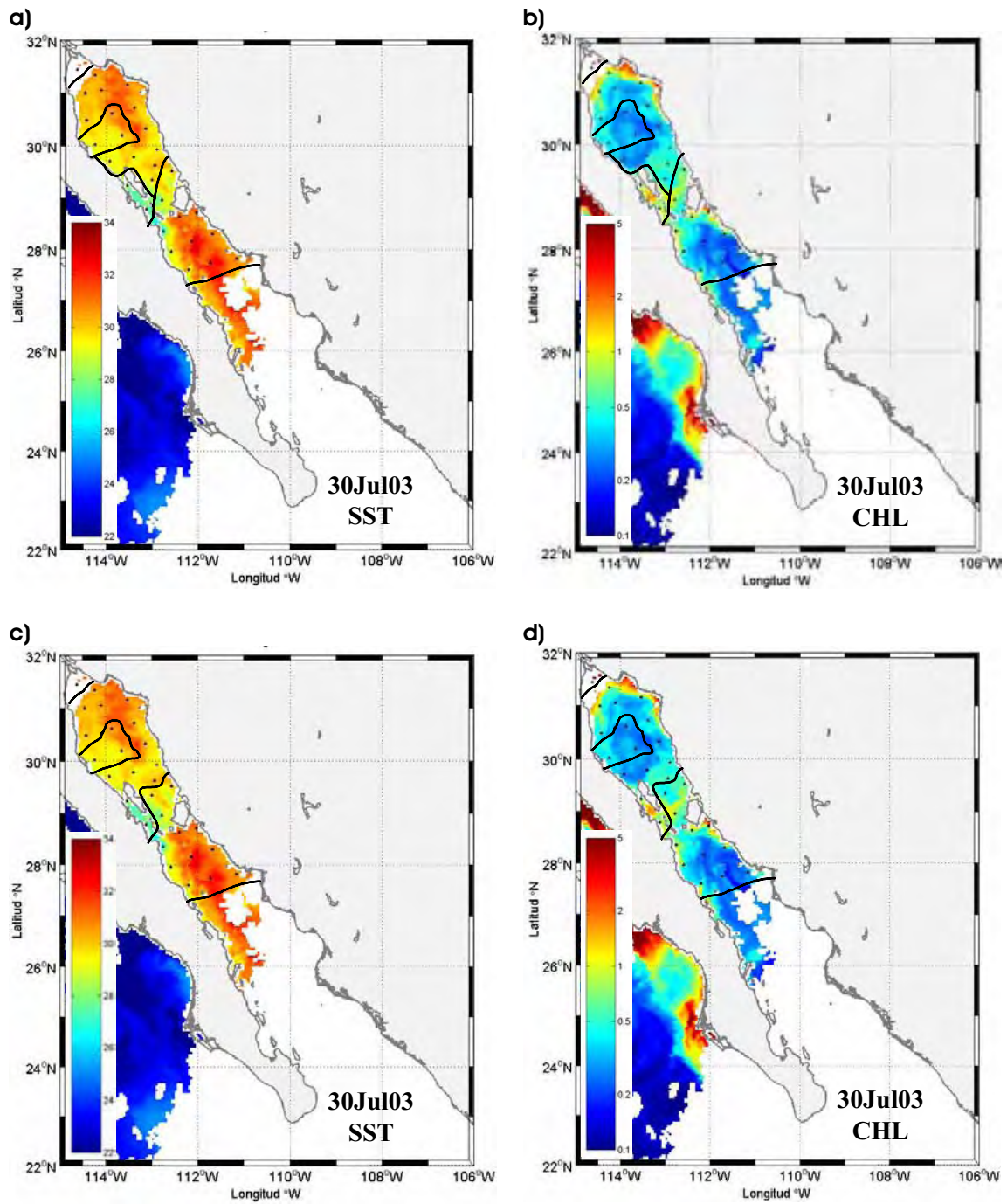


Figura 19. Localización de los grupos de estaciones sobre imágenes de satélite de temperatura superficial del mar y concentración de clorofila para agosto 2003. a) y b) incluyendo las especies de amplia distribución, c) y d) excluyendo las especies de amplia distribución.

El grupo Norte central-Canal estuvo asociado a los valores más bajos de TSM (27-30°C) y a valores de clorofila de 0.2-1.2 mg/m<sup>3</sup>) (Fig. 19) siendo éste el intervalo más amplio en los tres grupos. Este grupo presentó una abundancia promedio intermedia (>2,000 orgs/10m<sup>2</sup>) y el más bajo número de taxa (24). *B. panamense* fue la especie dominante en este grupo (Tabla 7) y las especies que dominaron al excluir la especie de amplia distribución fueron *Auxis* sp. 1 y *Auxis* sp. 2 (Scombridae, pelágico) (Tabla 8). Este grupo presentó una muy baja diversidad y equidad, así como una alta dominancia debido al reducido número de especies y la alta abundancia de *B. panamense* (Tabla 9). Es evidente, al observar la distribución de las principales especies dominantes, que es una zona con baja presencia de larvas de peces (Fig. 20).

El grupo Sur presentó los valores más altos de TSM (31-32°C) y valores de clorofila de 0.2-0.8 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 19). Este grupo presentó la abundancia promedio por grupo más baja (1,700 orgs/10m<sup>2</sup>) y el más alto número de taxa (65). Las especies dominantes en este grupo fueron *B. panamense*, *Triphoturus mexicanus* (Myctophidae, mesopelágico), *O. libertate*, *Albula* sp., *Vinciguerria lucetia* (Phosichthyidae, mesopelágico), *B. polylepis*, *Syacium ovale* (Paralichthyidae, demersal), *Auxis* sp. (Scombridae, pelágico), *Caranx sexfasciatus*, (Carangidae, costero-demersal) *Selar crumenophthalmus* (Carangidae, costero-demersal), Gobiidae tipo 12 (demersal), *Xenistius californiensis* (Haemulidae, demersal), *Caranx caballus* (Carangidae, pelágico-costero), *E. mordax*, *Eucinostomus gracilis* (Gerreidae, demersal) y Anguilliformes tipo 1 (demersal) (Tabla 7). Las especies que dominaron excluyendo a *B. panamense* fueron *T. mexicanus*, *O. libertate*, *Albula* sp., *V. lucetia*, *B. polylepis*, *Auxis* sp. 1, *S. ovale*, *C. sexfasciatus*, *S. crumenophthalmus*, Gobiidae tipo 12, *X. californiensis* y *C. caballus* (Tabla 8). Los atributos comunitarios en este grupo presentaron valores intermedios con respecto a los otros grupos (Tabla 9). Este grupo, al igual que en diciembre, estuvo definido principalmente por los organismos mesopelágicos (*T. mexicanus* y *V. lucetia*) que tienen sus mayores abundancias principalmente al sur del área de estudio (Fig. 20).

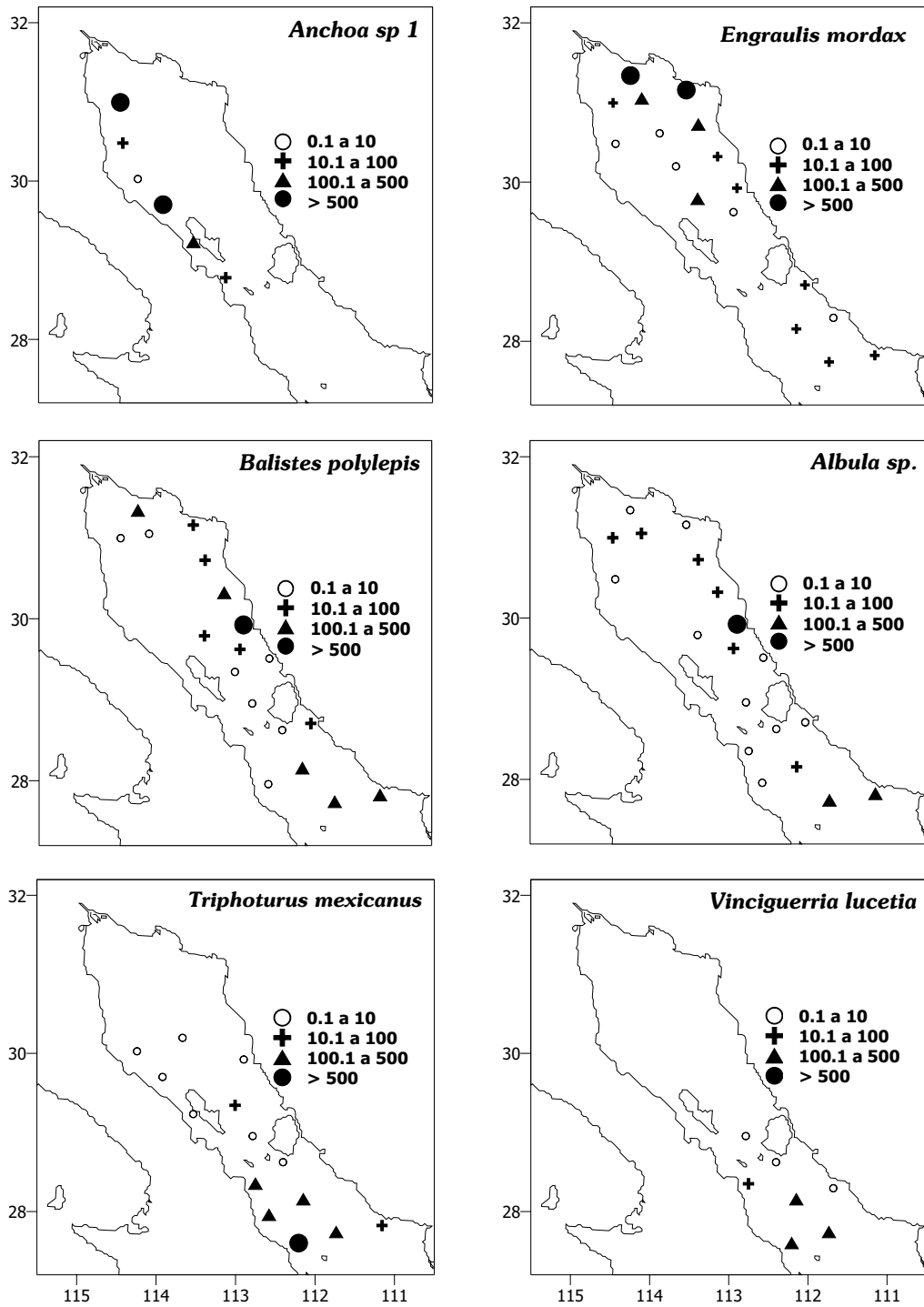


Figura 20. Distribución y abundancia de las principales especies durante agosto de 2003. La escala indica número de larvas por 10 m<sup>2</sup>.

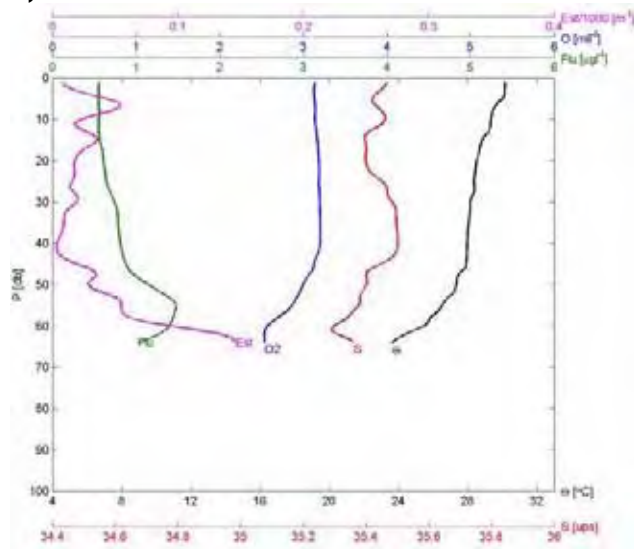


## VII.2.2 Ambiente

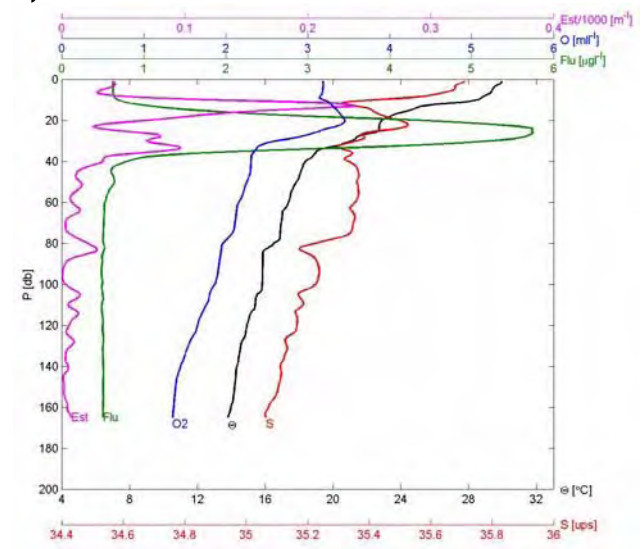
### VII.2.2.1 Perfiles verticales

Para el mes de agosto de 2003 también se seleccionaron tres perfiles verticales de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidad, oxígeno ( $\text{mL/L}$ ), fluorescencia ( $\mu\text{g/L}$ ) y estabilidad ( $\text{m}^{-1}$ ), como representativos de las regiones ocupadas por los grupos de estaciones definidos (Fig. 21). El grupo Norte costero se ubicó en una zona relativamente somera ( $<120\text{m}$ ) que abarca la cabecera del golfo rodeando la Cuenca Wagner y la zona al NE de Isla Ángel de la Guarda; la distribución vertical en la estación 17 (Fig. 21a) muestra una disminución gradual de la temperatura con la profundidad y una oxiclina después de los 40 m. El perfil de estabilidad muestra valores más altos en los primeros metros y en el fondo; un valor bajo de  $\phi=87.46 \text{ J/m}^3$  debido a la poca profundidad y débil estratificación. Entre los 30 y 45 m hay un ligero aumento de salinidad, tal vez debido a convección vertical. Esta zona presenta los valores más altos de temperatura ( $24\text{-}30^{\circ}\text{C}$ ) y salinidad (35.5), así como los valores más bajos de fluorescencia ( $<1 \mu\text{g/l}$ ), debido probablemente a su condición somera.

a) Norte costero



b) Norte central



c) Sur

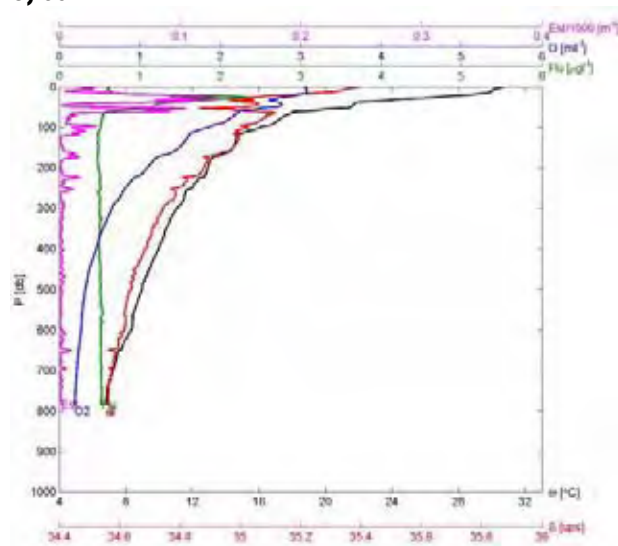


Figura 21. Perfiles verticales seleccionados para cada grupo de estaciones en el Golfo de California durante agosto 2003. Estabilidad ( $\text{Est}/1000\text{m}^{-1}$ ) Oxígeno ( $\text{ml/l}$ ), Fluorescencia ( $\mu\text{g/l}$ ), Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), Salinidad.

El grupo Norte central-Canal abarca una zona que incluye la región central de la zona norte hacia la costa peninsular (100-200 m) y el Canal de Ballenas (500-1300 m de profundidad). La distribución vertical de la estación 15 (Fig. 21b) muestra los valores más altos de estabilidad entre los 10 y 20 m por arriba de los cuales se encuentra la delgada capa mezclada, la temperatura presenta un perfil estratificado, en tanto que los perfiles de oxígeno y salinidad presentan picos o saltos. Un valor alto de  $\phi = 488.5 \text{ J/m}^3$  indica una columna de agua estratificada. En esta zona encontramos valores intermedios de temperatura ( $14\text{-}31 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y los mayores valores de fluorescencia ( $>5 \mu\text{g/l}$ ), así como la salinidad superficial más alta de 35.7. En esta estación, el pico de máxima fluorescencia coincide con un pico de salinidad alta (35.5) y el pico de máximo de oxígeno (3.5 mL/L) en la zona de la termoclina; además de coincidir con el centro de la región del giro ciclónico característico de la temporada.

El grupo Sur se ubica en una zona profunda (300-1500 m), al sur de la RAM y muestra una columna estratificada con el valor más alto de  $\phi = 825 \text{ J/m}^3$  (mayor incluso con respecto a diciembre de 2002), la distribución vertical en la estación 5 presenta los menores valores de oxígeno ( $<3 \text{ mL/l}$ ) y salinidad ( $<35.4$ ), con termoclina, haloclina y

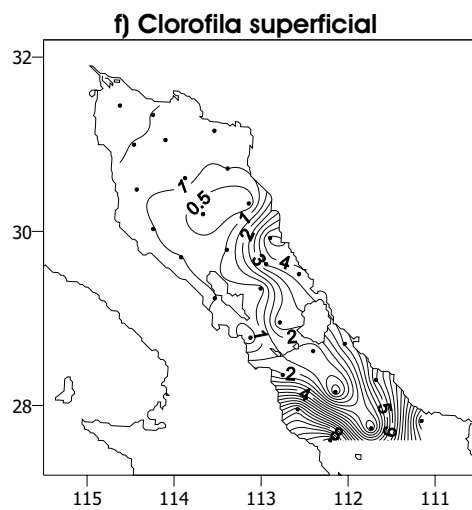
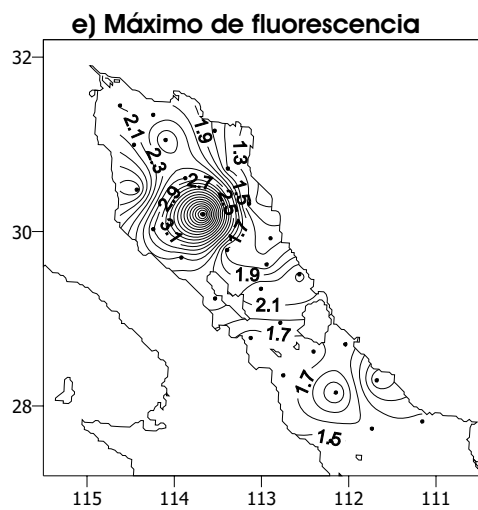
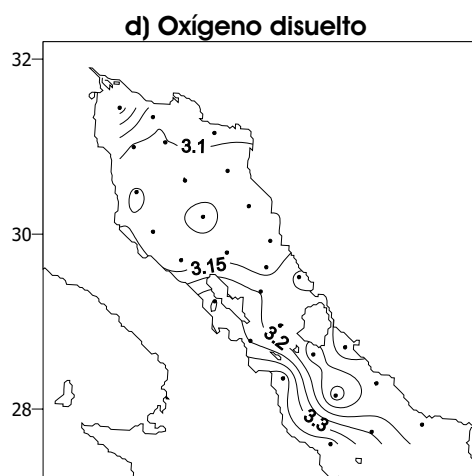
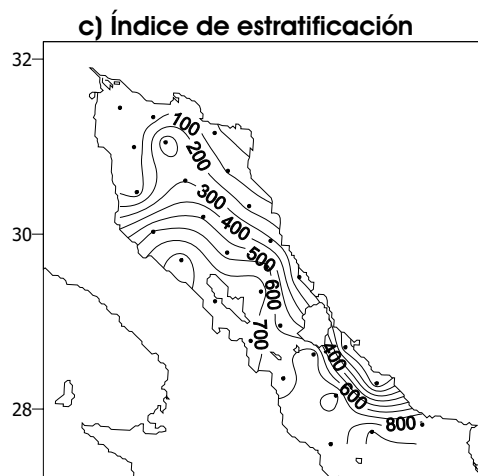
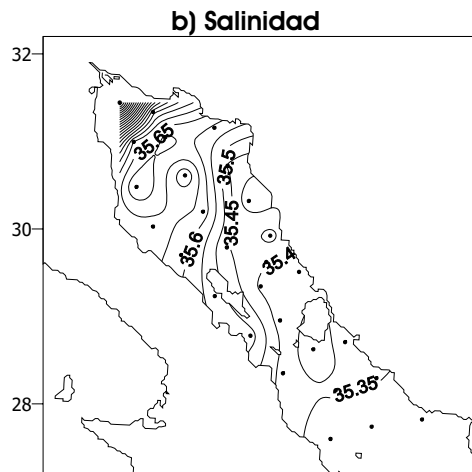
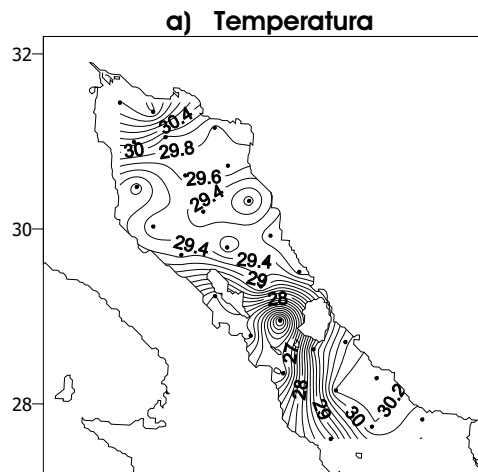
oxiclina marcadas entre los 20 y 50 m que coinciden con los mayores valores de estabilidad ( $0.12 \text{ m}^{-1}$ ) y valores altos de fluorescencia ( $2.5 \mu\text{g/l}$ ) (Fig. 21c).

### VII.2.2.2 Distribución horizontal de variables y parámetros hidrográficos

#### *Datos in situ*

La distribución de las variables ambientales registradas en agosto 2003 se muestra en la figura 22; la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto como el promedio de los primeros 10m, el máximo de fluorescencia, clorofila superficial y biomasa zooplanctónica. Los menores valores de temperatura ( $25\text{-}26^\circ\text{C}$ ) se encontraron entre las grandes islas, característica por la cual resalta (López et al., 2006; Marinone 2007); los mayores valores ( $30\text{-}31.4^\circ\text{C}$ ) se ubicaron en la cabecera del golfo y al sur de Isla Tiburón (zonas que por ser someras fácilmente se calientan) y una zona de temperatura relativamente homogénea ( $\approx 29.5^\circ\text{C}$ ) en el centro de la región norte (Fig. 22a). La salinidad (Fig. 22b) y el índice de estratificación  $\phi$  (Fig. 22c) presentan gradientes con sentido similar al que se presentó en diciembre, la primera de Sur-Norte con valores de 35.3 a 36.8 y el segundo mostró valores altos ( $750\text{-}915 \text{ J/m}^3$ ) hacia el sur y del lado peninsular y valores bajos ( $6\text{-}52 \text{ J/m}^3$ ) hacia el norte del área de estudio con valores también bajos ( $11 \text{ J/m}^3$ ) en la zona central de esta región. Sin embargo, el intervalo de valores de  $\phi$  es más amplio que en diciembre, en este caso la estratificación de la columna de agua va de débil a fuertemente estratificada. La concentración de oxígeno (Fig. 22d) mostró su mayor valor ( $>3 \text{ mL/l}$ ) del lado peninsular desde Isla Ángel de la Guarda y al sur de ésta; los valores más bajos ( $<3.1 \text{ mL/l}$ ) se encontraron en la cabecera del golfo y en el centro de la región norte ( $3.1 \text{ mL/l}$ ), presentando una distribución asociada a la temperatura, es decir, valores bajos de oxígeno coinciden con valores altos de temperatura y viceversa.

El máximo de fluorescencia (Fig. 22e) presentó los valores más altos ( $>3 \mu\text{g/l}$ ) en la zona central de la región norte y los valores más bajos ( $<1.4 \mu\text{g/l}$ ) hacia el lado continental tanto al norte como al sur del área de estudio.



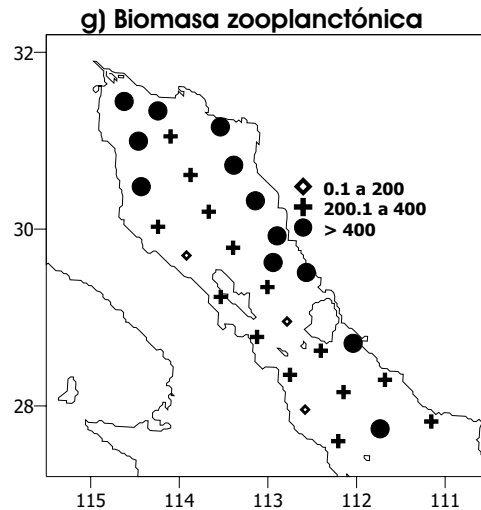


Figura 22. Distribución espacial de las variables ambientales en el área de estudio en agosto 2003. (a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) Salinidad, (c) Oxígeno disuelto ( $\text{ml/L}$ ), (d)  $\phi$  ( $\text{J/m}^3$ ) a 200 m, (e) Máximo de fluorescencia ( $\mu\text{g/L}$ ), (f) Clorofila superficial ( $\text{mg/m}^3$ ), (g) Biomasa zooplanctónica ( $\text{ml}/1000\text{m}^3$ ).

Los más altos valores de concentración de clorofila superficial ( $>7 \text{ mg/m}^3$ ), se localizaron al este de IAG del lado continental y al sur del área de estudio; los valores más bajos ( $<2 \text{ mg/m}^3$ ) se localizaron en el centro de la región norte (Fig. 22f).

La concentración de la biomasa zooplanctónica presentó los mayores valores ( $>700 \text{ mL}/1000 \text{ m}^3$ ) a lo largo del lado continental hasta la cabecera del golfo y entre las islas y los valores mas bajos ( $< 500 \text{ mL}/1000 \text{ m}^3$ ) del lado peninsular, desde el norte de la IAG hasta el sur del área de estudio (Fig. 22g).

Así mismo, la aproximación de la circulación a partir de los valores de la anomalía geopotencial, temperatura y  $\sigma_t$  a 50 m se muestra en la figura 23. Se observa una circulación ciclónica general con el giro ciclónico característico ubicado al norte de las grandes islas, claramente distinguible tanto por las anomalías geopotenciales como por la distribución de la temperatura y la densidad ( $\sigma_t$ ), que describen un patrón circular en la misma posición. El giro se ubica en la zona que coincide con la señalada para el registro *in situ* descrito en la sección anterior y que se caracteriza por ser una región de estratificación débil, baja concentración de oxígeno, un máximo de fluorescencia importante y pobre en clorofila superficial (Fig. 22)

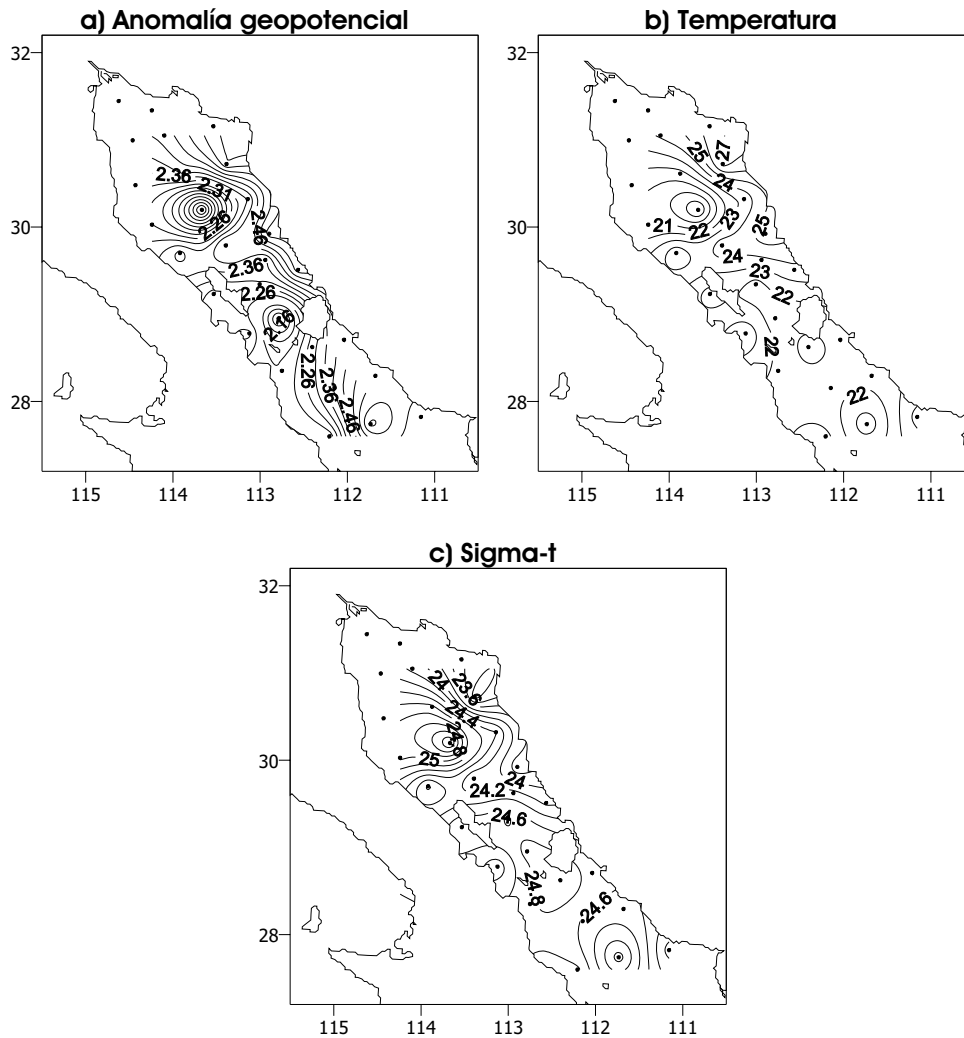


Figura 23. Distribución espacial: (a) anomalía geopotencial (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>), (b) temperatura (°C) y (c)  $\sigma_t$  a 50m de profundidad en el área de estudio en agosto 2003.

### *Datos de satélite*

En la figura 24 se muestra la distribución superficial de temperatura y clorofila extraídas de las imágenes de satélite. Durante agosto de 2003, la temperatura presenta los valores más altos en la cabecera del golfo y al sur del área de estudio (31-32 °C) y los valores más bajos en el Canal de Ballenas (28.5°C) (Fig. 24). La correlación entre la temperatura *in situ* (Fig. 22) y la que registra el satélite es alta ( $r=0.78$ ); con una diferencia de 3°C en la zona inferior del intervalo de valores, esta diferencia se debe a

que en las mediciones *in situ* se está considerando el promedio de la columna de los primeros 10 m, en tanto que el satélite registra sólo los primeros centímetros, así que la temperatura se ve atenuada por las capas inferiores que contemplan los 10m y que presentan una temperatura menor.

Para la clorofila en agosto de 2003, los mayores valores ( $>1.4 \text{ mg/m}^3$ ) se ubican en la cabecera del golfo y al sur de IAG del lado peninsular y los menores en el resto del área de estudio (Fig. 24). Los valores *in situ* ( $1-11.5 \text{ mg/m}^3$ ) (Fig. 22f) y de satélite ( $0.2-4 \text{ mg/m}^3$ ) presentaron un nivel de correlación baja ( $r=0.08$ ); el registro *in situ* es mayor que el de satélite por un sesgo causado por tres valores altos ( $>3.5 \text{ mg/m}^3$ ) registrados al sur del área de estudio, el resto presenta valores bajos ( $< 4 \text{ mg/m}^3$ ), similares a los valores registrados por el satélite. La profundidad a la que se encontraron los máximos de fluorescencia en agosto (11-54 m), es mayor que en diciembre por lo que la primera profundidad óptica (3-12.5 m) a la que el sensor del satélite registra (Austin y Petzold, 1981), no incluye estos máximos. Lo cual explica la similitud entre los valores de clorofila superficial y la clorofila del sensor del satélite.

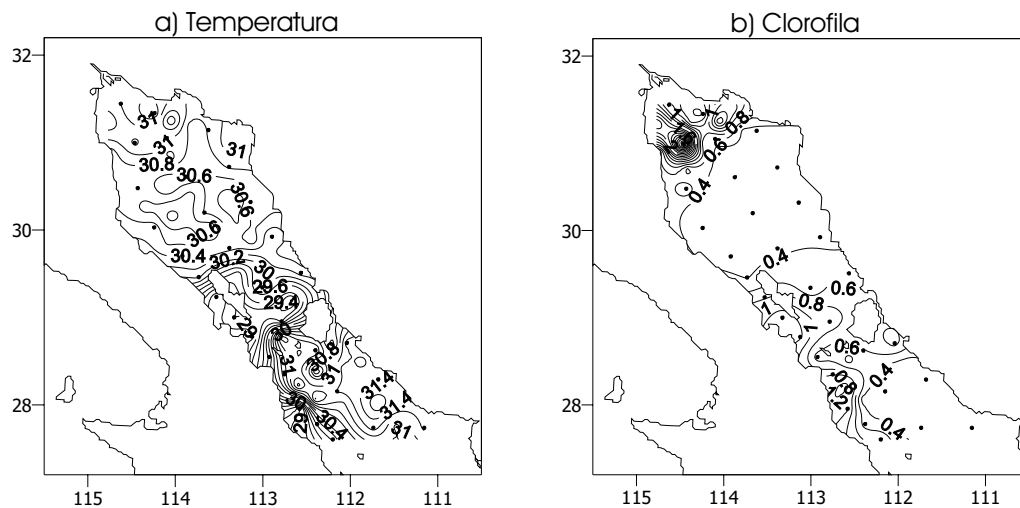


Figura 24. Distribución superficial de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y clorofila ( $\text{mg/m}^3$ ) para las estaciones de muestreo. Los datos son un promedio de los valores de tres imágenes diarias de MODIS para agosto de 2003.

### VII.2.2.3 Gradientes espaciales del ambiente

El análisis de componentes principales (ACP) aplicado a la matriz de indicadores ambientales en agosto de 2003 (Fig. 25), indica que las variables con mayor contribución al primer componente son oxígeno, salinidad y temperatura y al segundo componente son fluorescencia, clorofila superficial y  $\phi$  (índice de estratificación). El gráfico del análisis sugiere tres grupos de estaciones (Fig. 25a); la distribución geográfica de estos grupos ambientales es similar a los grupos de estaciones de la matriz de abundancia (Fig. 25b). El grupo 1 (Fig. 25a) presenta los valores más altos de temperatura ( $>29.7^{\circ}\text{C}$ ), salinidad ( $>35.58$ ) y clorofila superficial ( $>2 \text{ mg/m}^3$ ) y los menores valores de oxígeno ( $<3.1 \text{ mL/l}$ ), de máximo de fluorescencia ( $< 2.15 \mu\text{g/L}$ ) y  $\phi$  ( $<180 \text{ J/m}^3$ ); el grupo 2 (Fig. 25a), está definido principalmente por la distribución de  $\phi$  (Fig. 22c) presentando valores intermedios ( $296\text{-}634 \text{ J/m}^3$ ) y el grupo 3 (Fig. 25a), son las estaciones con los más bajos valores de temperatura ( $<29.5^{\circ}\text{C}$ ), salinidad ( $<35.44$ ) y clorofila superficial ( $<1.2 \text{ mg/m}^3$ ) y los más altos de oxígeno ( $>3.2 \text{ mL/l}$ ), de máximo de fluorescencia ( $> 2.3 \mu\text{g/L}$ ) y  $\phi$  ( $>650 \text{ J/m}^3$ ).

El análisis de varianza aplicado sobre los indicadores ambientales de los grupos definidos por el ACP para agosto de 2003, indica que al menos una media es diferente para  $\phi$  y para el resto de los indicadores (clorofila superficial, temperatura, salinidad, oxígeno y máximo de fluorescencia) indicó que no hay diferencias significativas entre las medias de los tres grupos (Tabla 10). La prueba de Tukey, aplicada posterior al ANOVA, para determinar diferencias entre los posibles pares de medias, indica que los tres grupos tienen medias diferentes para  $\phi$  (Tabla 11).



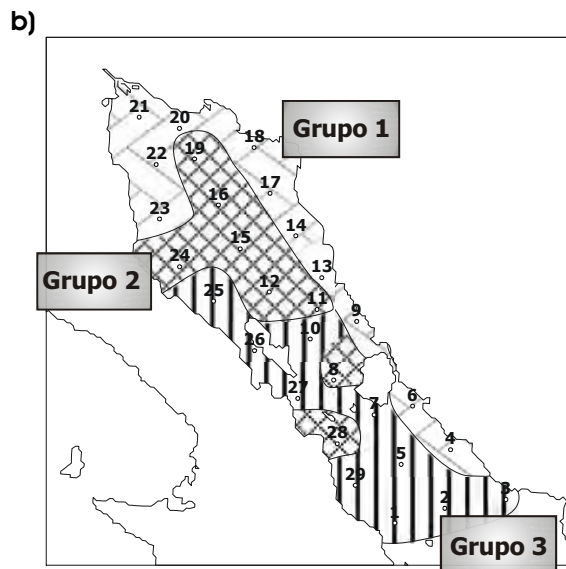
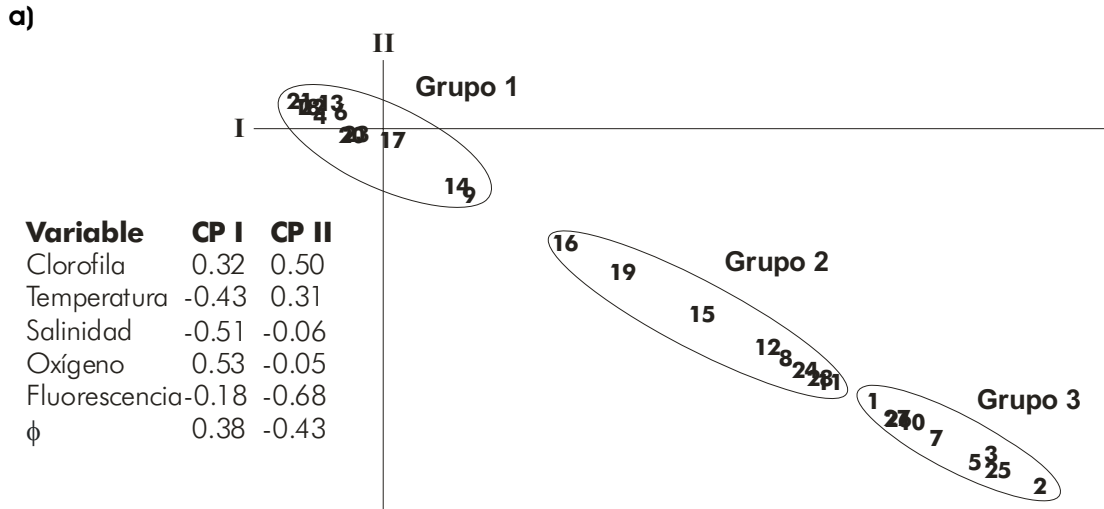


Figura 25. a) Gráfico del análisis de componentes principales y correlación las variables ambientales con cada eje; b) mapa de los grupos ambientales a partir de dicho análisis en el Golfo de California durante agosto 2003.

Tabla 10. Resultados de la ANOVA de una vía aplicada a los indicadores ambientales de las tres grupos definidos por el ACP en el mes de agosto de 2003.

	<b>Hipótesis</b>	<b>p</b>	<b>Decisión Estadística</b>
CLOROFILA SUP	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.5999	No rechazar $H_0$ dado que $0.5999 > 0.01$
	$H_a: \text{no todas las } \mu_j \text{ son iguales}$		
TEMPERATURA	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.0800	No rechazar $H_0$ dado que $0.0800 > 0.01$
	$H_a: \text{no todas las } \mu_j \text{ son iguales}$		
SALINIDAD	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.2395	No rechazar $H_0$ dado que $0.2395 > 0.01$
	$H_a: \text{no todas las } \mu_j \text{ son iguales}$		
OXIGENO	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.2153	No rechazar $H_0$ dado que $0.2153 > 0.01$
	$H_a: \text{no todas las } \mu_j \text{ son iguales}$		
MAX. FLUORES.	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.1665	No rechazar $H_0$ dado que $0.1665 > 0.01$
	$H_a: \text{no todas las } \mu_j \text{ son iguales}$		
$\phi$	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.0000	Rechazar $H_0$ dado que $0.0000 < 0.01$
	$H_a: \text{no todas las } \mu_j \text{ son iguales}$		

Tabla 11. Resultados de la prueba de Tukey de comparación múltiple entre medias de cada uno de los indicadores ambientales registrados para cada grupo ambiental definido por el ACP en agosto de 2003.

	Hipótesis	<i>q</i>	Decisión Estadística
CLOROFILA SUP	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.9973	No rechazar $H_0$ dado que $0.9973 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.6256	No rechazar $H_0$ dado que $0.6256 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.6824	No rechazar $H_0$ dado que $0.6824 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
TEMPERATURA	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.0868	No rechazar $H_0$ dado que $0.0868 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.2013	No rechazar $H_0$ dado que $0.2013 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.8972	No rechazar $H_0$ dado que $0.8972 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
SALINIDAD	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.6897	No rechazar $H_0$ dado que $0.6897 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.2106	No rechazar $H_0$ dado que $0.2106 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.6520	No rechazar $H_0$ dado que $0.6520 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
OXIGENO	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.7417	No rechazar $H_0$ dado que $0.7417 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.1892	No rechazar $H_0$ dado que $0.1892 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.5622	No rechazar $H_0$ dado que $0.5622 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
MAX. FLUORES.	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.1543	No rechazar $H_0$ dado que $0.1543 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.8501	No rechazar $H_0$ dado que $0.8501 > 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.3873	No rechazar $H_0$ dado que $0.3873 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		
$\phi$	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 2}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 2}$		
	$H_0: \mu_{GPO 1} = \mu_{GPO 3}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 1} \neq \mu_{GPO 3}$		
	$H_0: \mu_{GPO 2} = \mu_{GPO 3}$	0.0001	Rechazar $H_0$ dado que $0.0001 < 0.01$
	$H_a: \mu_{GPO 2} \neq \mu_{GPO 3}$		

El análisis de discriminantes para agosto 2003 (Fig. 26), aplicado también sobre la matriz de indicadores ambientales, confirma la definición de los grupos obtenidos previamente con el ACP e indica que la variable que contribuye más a la discriminación de los grupos es, al igual que en diciembre,  $\phi$  (índice de estratificación) indicado por el valor de lambda cercano a cero.

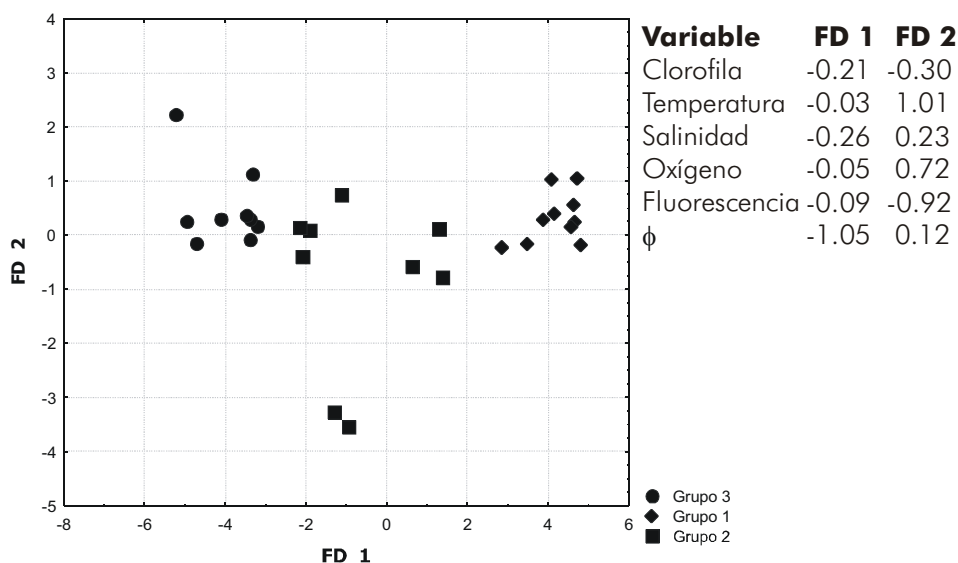


Figura 26. Gráfico del análisis de discriminantes con los grupos ambientales para agosto 2003. Aparece también la contribución de cada variable a cada función discriminante.

### VII.2.3 Larvas de peces vs. ambiente

#### VII.2.3.1 Análisis canónico de correspondencias

El biplot originado a partir del análisis canónico de correspondencias (ACC) para agosto 2003 se presenta en la figura 27, al igual que en diciembre de 2002 se señalan los ejes de ordenación I y II y los vectores representan los indicadores ambientales. Los indicadores de mayor importancia en la ubicación de las estaciones son temperatura y salinidad. En el gráfico se señalan los grupos de estaciones que previamente se formaron a partir de la matriz de disimilitud generada por el índice de Bray-Curtis. Del centro hacia el lado derecho, el grupo Norte costero se define por condiciones de alta temperatura y salinidad, bajos valores de oxígeno, del máximo de fluorescencia y de clorofila superficial y la mayor abundancia de larvas de los tres grupos; en el cuadrante superior izquierdo se ubica el grupo Norte central-Canal que se distingue por valores altos de salinidad y  $\phi$  y

los más altos de máximo de fluorescencia, con una abundancia intermedia; las estaciones del grupo Sur en la parte inferior del gráfico con condiciones de valores altos de clorofila superficial y temperatura y bajos de salinidad, con la menor abundancia de larvas en este mes. A diferencia de diciembre, el Canal de Ballenas se mantiene unido al resto de las estaciones del grupo (zona central) indicando condiciones similares tanto en abundancia de larvas como ambientales.

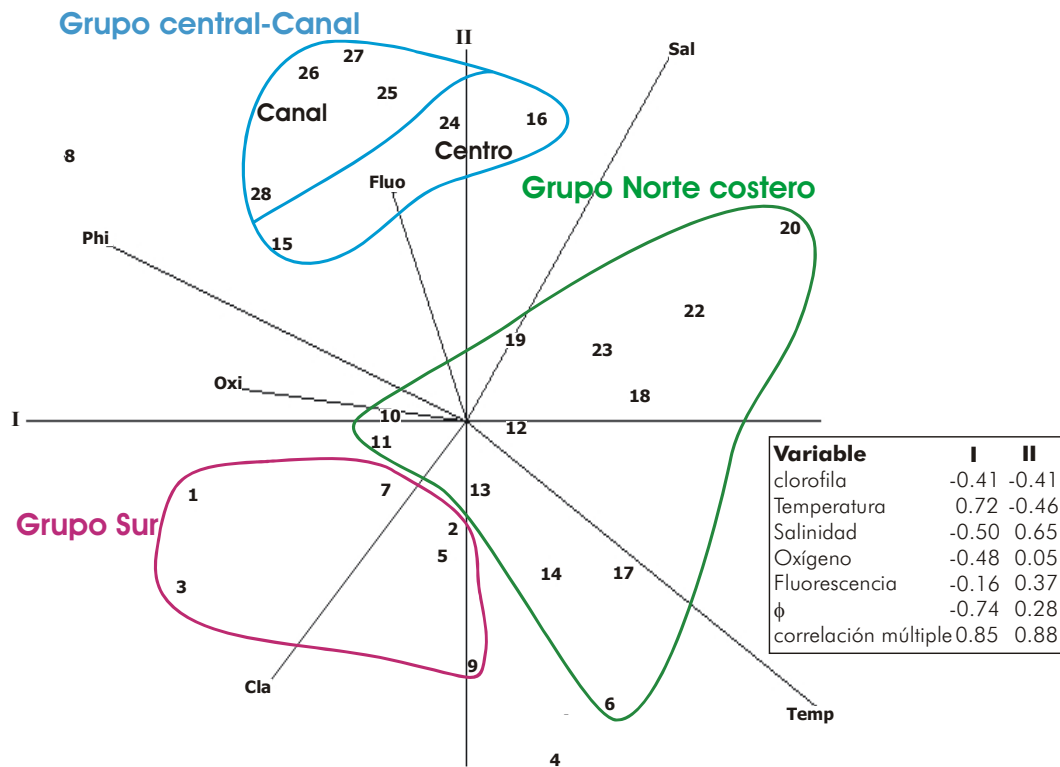


Figura 27. Gráfico del ACC durante agosto 2003. En el recuadro aparece el nivel de correlación de cada variable con cada eje de ordenación así como la correlación múltiple.

#### VII.2.4 Circulación, permanencia y conectividad

El mapa de vectores de corrientes residuales generado por el modelo para el 3 de agosto de 2003 (Fig. 28), muestra que la circulación general presenta dirección norte con el giro ciclónico principal en la zona norte. Se observa un fuerte flujo paralelo al lado continental en dirección norte que cruza entre las grandes islas, sigue por el lado continental hacia la cabecera del golfo, donde siguiendo la costa y rodeando la Cuenca

Wagner, gira hacia el sur del lado peninsular. El flujo del lado peninsular es de menor intensidad, al norte de la Isla Ángel de la Guarda vira hacia el este donde se encuentra con el flujo principal para formar el giro ciclónico que es parte de la circulación estacional previamente reportada para el GC (Lavín *et al.*, 1997). En el Canal de Ballenas el flujo es débil.

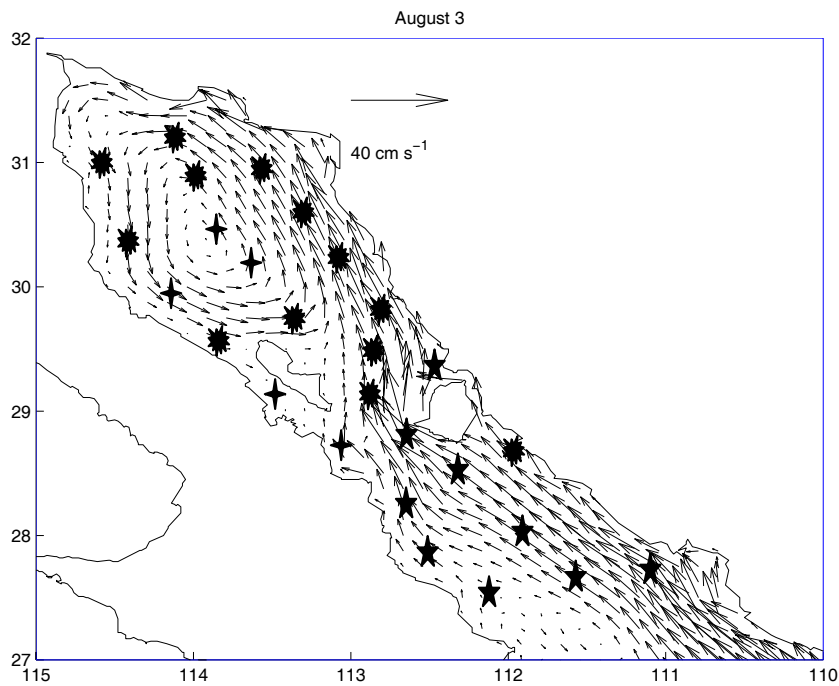


Figura 28. Vectores de campos de corrientes para la primera capa del modelo (0-10 m) para agosto 3 de 2003, con localización de los grupos de estaciones (● Norte costero, + Norte central-Canal y ★ Sur).

Con el objetivo de detectar posibles patrones de transporte y permanencia de larvas de peces se simuló el movimiento de partículas inertes mediante campo de corriente euleriano instantáneo. Las trayectorias de las partículas liberadas en cada estación se muestran en la figura 29 separadas por grupos de estaciones. Se muestran las trayectorias entre el día 1 y 15 en la columna izquierda, y entre los días 16 y 30 en el derecho. La conectividad entre las áreas en un momento dado después de liberar las partículas es cuantificado por la matriz de conectividad  $C_i(i,j)$ . Las matrices de conectividad que corresponden a la figura 29 se dan en la Tabla 12, donde la diagonal principal representa el porcentaje de las partículas que permanecen en su área de origen después del tiempo declarado.

Las partículas del grupo Norte costero (Fig. 29 a, b), permanecen en la zona de liberación en los primeros 15 días, posteriormente, entre los 16 y 30 días, se mantienen en la circulación ciclónica general. Las partículas liberadas en las estaciones del lado continental se desplazan rápidamente en la corriente de mayor intensidad con dirección norte; en la zona más norteña se presentan corrientes residuales débiles que atrapan partículas; las corrientes son menos intensas del lado peninsular y provocan acumulación de partículas al norte de la Cuenca Delfín. Las partículas liberadas en las estaciones al este de IAG, una parte pasan al grupo Sur y otra entra a la zona central de la circulación ciclónica principal (grupo Norte central-Canal) al final de la simulación, estableciendo conectividad del 20% y 8% respectivamente. La matriz de conectividad, indica que después de 30 días el 69% de las partículas permanecen dentro de la región, siendo la región con mayor retención (Tabla 12).

Tabla 12. Matrices de conectividad  $C_T$  (% de partículas liberadas) corresponden a las trayectorias en la Fig. 30 para agosto 2003. El eje vertical representa el área de partida y el horizontal el área de arribo después de 15 y 30 días de liberación.

<b>Posición después de 15 días →</b>	<b>(1) Norte costero</b>	<b>(2) Norte central-Canal</b>	<b>(3) Sur</b>
(1) Norte costero	78.44	15.10	4.19
(2) Norte central-Canal	28.00	58.06	9.84
(3) Sur	15.76	3.86	54.85
<b>Posición después de 30 días →</b>	<b>Norte costero</b>	<b>Norte central-Canal</b>	<b>Sur</b>
(1) Norte costero	69.12	20.12	8.09
(2) Norte central-Canal	38.16	43.62	14.82
(3) Sur	18.04	3.16	43.31

Las partículas liberadas en las estaciones del grupo Norte central-Canal (Fig. 29 c, d) entran rápidamente a la circulación ciclónica en los primeros 15 días, después las partículas entran a la circulación ciclónica principal describiendo la trayectoria circular al dirigirse hacia el este y luego al norte al llegar a la IAG. De las partículas liberadas en el Canal de Ballenas, algunas escapan al sur de las que una parte sigue y otra es desviada

al norte para entrar a la circulación ciclónica; la mayoría de las partículas ahí liberadas permanecen en el canal mostrando que esta zona funciona como área de retención debido a las corrientes residuales débiles. Las partículas que se liberan en la estación que coincide con el centro del giro permanecen en esa zona aparentemente dando vueltas. La matriz de conectividad indica que al final de la simulación el 44% de las partículas permanecen en esa zona, además que presenta una conectividad alta con el grupo Norte costero a donde pasó el 38% de las partículas indicando que el giro podría estar acumulando larvas del centro hacia los bordes y conectividad moderada con el grupo Sur con el 15% (Tabla 12).

Para el grupo Sur (Fig. 29 e, f) sólo la mitad de las partículas permanecen dentro del área en los primeros 15 días; las liberadas en las estaciones al norte de Isla Tiburón rápidamente entran al flujo intenso del lado continental desplazándose al norte hasta la cabecera del golfo al final de la simulación. Las partículas liberadas en las estaciones del lado peninsular al sur de IAG se dirigieron al sur, algunas incluso salieron del área de estudio quedando al final de la simulación sólo el 43% de las partículas dentro de la zona de este grupo. En esta zona permanecieron el 55% de las partículas en las primeras dos semanas de simulación y al final el 43%; presentó mayor conectividad con el grupo Norte costero (18%) y casi nula (3%) con el Norte central-Canal (Tabla 12).



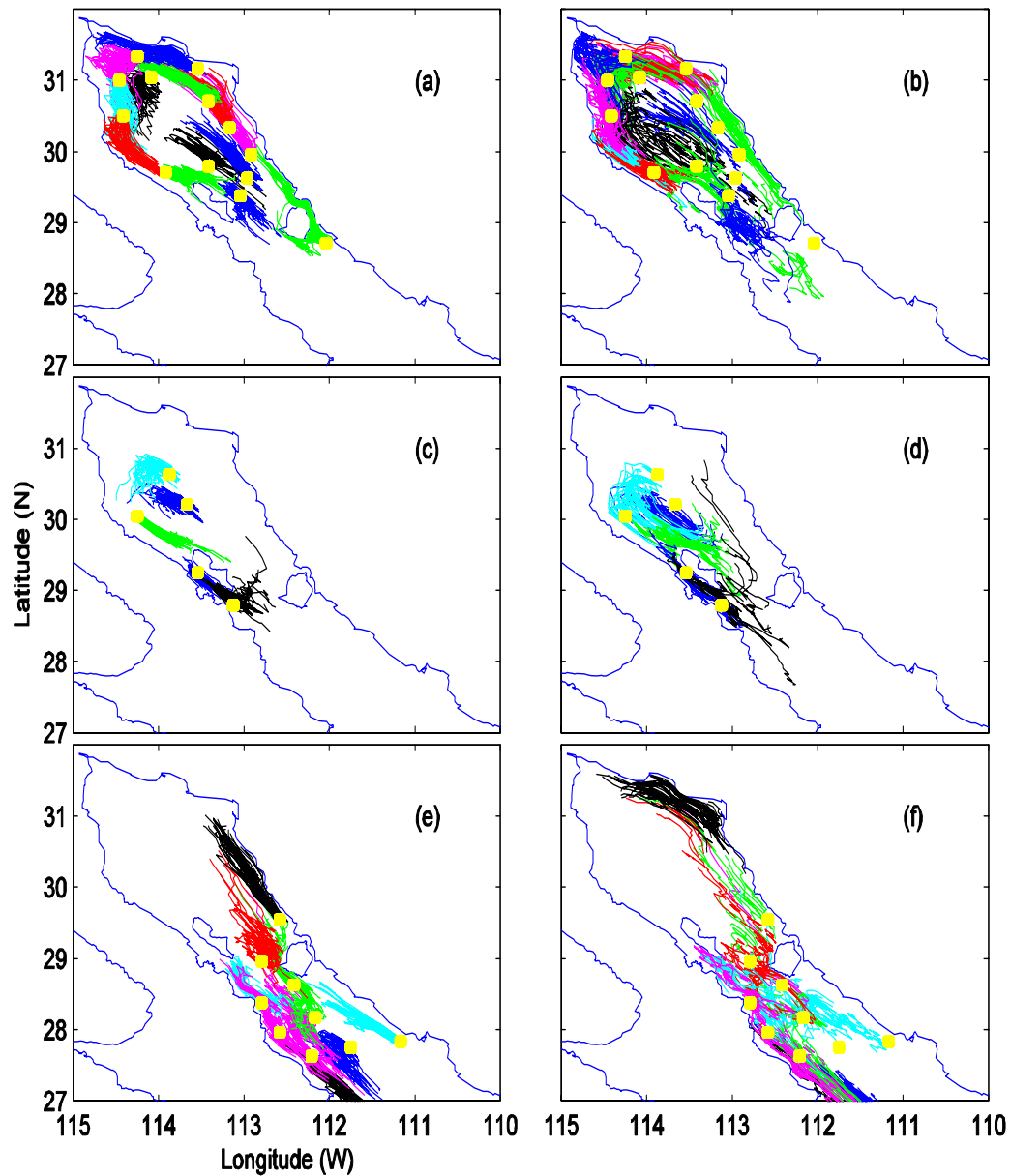


Figura 29. Trayectoria de las partículas liberadas en las estaciones de los diferentes grupos, calculadas a partir de los campos de corrientes producidos por el modelo tridimensional para agosto 2003. (a) Grupo Norte costero para los días 1-15, (b) ídem para los días 16-30; (c) Grupo Norte central-Canal para los días 1-15, (d) ídem para los días 16-30; (e) Grupo Sur para los días 1-15, (f) ídem para los días 15-30. Para mayor claridad, solo se muestran las trayectorias de cada 50 partículas liberadas en cada estación. La posición de las partículas se grafica cada 24 horas.

## VIII. DISCUSIÓN

El planteamiento de Iles y Sinclair (1982) y Sinclair (1988) que las condiciones ambientales influyen sobre la distribución de las larvas de peces debido a su carácter meroplanctónico, nos llevó a esperar encontrar tres asociaciones de larvas de peces correspondientes a las tres regiones principales en el área de estudio, definidas por los procesos hidrográficos que las afectan: la zona norte, la zona de las islas y la región al sur de éstas. Nuestros resultados mostraron tres asociaciones en ambos períodos de muestreo, para diciembre 2002 Norte, Canal-Centro y Sur; y para agosto 2003 Norte costero, Norte central-Canal y Sur, coincidentes con las regiones previamente identificadas. La asociación de larvas de peces (ALP) más consistente en área y extensión fue la ALP Sur, presente en ambos períodos.

Estas asociaciones se ubicaron con respecto a los gradientes ambientales definidos por las variables físicas registradas, siendo principalmente la salinidad y la estratificación los indicadores con mayor correlación ( $>0.65$ ) en ambos períodos, adicionalmente la temperatura en agosto también presenta alta correlación. Los gradientes de estos indicadores variaron latitudinalmente, la salinidad de sur a norte y la estratificación en sentido opuesto de norte a sur. Esta variación del ambiente hidrográfico estuvo acorde con el hábitat de los adultos de las especies predominantes: costero-demersales y pelágico-costeros al norte; mesopelágicos al sur y una mezcla de los anteriores en la zona central, esto último nos lleva a suponer que es una zona de transición. Es posible que la coincidencia entre el hábitat de las especies y las condiciones ambientales en que se encontraron a sus respectivas larvas, se deba a que el desove ocurrió dentro de las áreas de distribución de las asociaciones de larvas de peces.

Entre diciembre y agosto podemos distinguir que para el primero, el factor con mayor correlación fue la salinidad (0.75) y para el segundo fueron la estratificación y la temperatura ( $>0.70$ ). Aunque en ambos períodos el gradiente de salinidad tuvo valores muy similares y el mismo sentido, en agosto el intervalo de valores de estratificación fue más amplio y los valores de temperatura más altos (Fig. 22), haciendo que estos factores tomaran mayor peso en la distribución de las larvas que en diciembre donde la estratificación fue menor (Fig. 8). Esto se refleja en la distribución de la abundancia con

respecto a la distribución de la estratificación, es decir, considerando el intervalo de cada período, en diciembre las estaciones de mayor abundancia de larvas coinciden con los mayores valores de estratificación (200-340 J/m<sup>3</sup>), mientras que en agosto coinciden con valores intermedios de estratificación (100-400 J/m<sup>3</sup>). En ambos períodos los valores de estratificación son similares, sin embargo, la amplitud de su distribución es mayor en diciembre, por tanto podemos sugerir que es un factor limitante para la distribución de las larvas de peces.

La temperatura es un indicador que se ha utilizado tradicionalmente para relacionarlo con factores como el área y época de desove (e.g. Martínez-Aguilar y Anda-Montañez, 1990; Green-Ruiz e Hinojosa-Corona, 1997; Hammann *et al.*, 1998), la alimentación y disponibilidad de alimento para las larvas (e.g. Sánchez-Velasco y Shirasago, 2000) y la distribución de huevos y larvas de peces (e.g. Sánchez-Velasco *et al.*, 2000; Sánchez-Velasco *et al.*, 2002; Avalos-García *et al.*, 2003; Sánchez-Velasco *et al.*, 2004a; Aceves-Medina *et al.*, 2004). Estos autores coinciden en que la temperatura es un indicador ambiental importante para las larvas de peces, si bien en el presente trabajo encontramos alta correlación entre la abundancia y distribución de las larvas y la temperatura, la mayor correlación la encontramos con la estratificación de la columna de agua y la salinidad. Esto podría indicar que, como describió Lasker (1978), la concentración adecuada de partículas alimenticias para las larvas es favorecida por condiciones oceanográficas estables; acorde con trabajos que encuentran que la mayor densidad y diversidad taxonómica de larvas de peces coincide con la zona de mayor estabilidad de la columna de agua (Sánchez-Velasco *et al.*, 2007).

Por otro lado, respecto a la circulación superficial en el Golfo de California, esperábamos que generara dispersión y retención de las larvas de peces de forma que las asociaciones permanecieran dentro del área geográfica de su distribución y que adicionalmente, las corrientes generaran conectividad entre zonas. Encontramos que en ambos periodos, un alto porcentaje de las partículas liberadas en la simulación, en las estaciones correspondientes a cada asociación, permanecieron dentro de las áreas de su liberación por 30 días a pesar de ser advectadas dentro de su área de distribución.

Entre las zonas que favorecen la retención de partículas y por tanto de larvas, contribuyendo a la persistencia de las asociaciones, se encuentran el Alto Golfo y el Canal de Ballenas debido a las corrientes residuales débiles que presentan; el giro en la zona norte que en ambos períodos actúa reteniendo partículas en su circulación, así como el giro ciclónico sobre la cuenca de San Pedro Mártir detectado en diciembre que también retiene partículas.

En relación con trabajos en el GC que analizan circulación y aplican también el modelo 3D baroclínico de Marinone (2003) sobre dispersión de larvas planctónicas; Calderón-Aguilera *et al.* (2002) analizan la influencia de las corrientes superficiales simuladas por el modelo sobre el transporte y el reclutamiento de larvas de camarón azul en el Alto Golfo durante el verano, encontrando que las corrientes favorecen la advección de las larvas desde unidades reproductivas en el lado continental hacia el lado peninsular. Así mismo, Marinone *et al.* (2007) usando el mismo modelo, simulan la trayectoria de partículas en el Golfo Norte durante el verano, partiendo desde zonas de desove establecidas previamente en la literatura y encuentran que la hidrodinámica regional explica la conectividad ciclónica costera dominada por flujos residuales, excepto en el Alto Golfo donde las corrientes residuales son débiles.

Ambos trabajos señalan el efecto de las corrientes en la dispersión de las larvas, en contraste con el presente trabajo en el que encontramos una importante retención de las partículas (50-70%) y por ende de las larvas de peces dentro de las zonas de las asociaciones. Esto puede explicarse con la diferencia de escalas espacio-temporales, el área de estudio de los trabajos de Calderón-Aguilera *et al.* (2002) y Marinone *et al.* (2007) es reducida con respecto a la estudiada aquí, es decir, la zona que ellos manejan, está incluida dentro de la asociación al norte de nuestra área de estudio. Por tanto, hay registro de dispersión larvaria por corrientes superficiales, sin embargo, en este trabajo consideramos fronteras de retención a mesoescala definidas por límites ambientales que no son percibidos por los trabajos mencionados y que por tanto, explican que de acuerdo a nuestros resultados, las larvas de peces permanecen dentro de las fronteras de cada asociación larvaria hasta por lo menos 30 días.

Así mismo, además de mostrar retención de partículas dentro de las fronteras de cada asociación, las matrices de conectividad indican también un flujo de partículas y por lo tanto posiblemente de larvas fuera de dichas fronteras (20% en diciembre y hasta 38% en agosto). Este flujo ocurre principalmente de norte a sur en diciembre y de sur a norte en agosto, coincidiendo con la dirección de las corrientes predominantes de mayor intensidad y el gradiente de número de especies y abundancia de larvas que presentó mayores valores al sur del área de estudio en diciembre y al norte en agosto. Esto podría implicar que las especies que desovan exclusivamente en el área de la asociación sur y cuyos adultos no incursionan al norte de las grandes islas, como los mesopelágicos *V. lucetia*, *D. laternatus*, o los cóngridos *Bathycongrus macrurus* entre otros, es posible que sus larvas no sean dispersadas hacia la región norte del golfo, al menos en épocas con condiciones hidrográficas y de circulación como las que se presentaron en diciembre 2002.

En agosto de 2003 se observó un flujo importante de partículas del centro del giro ciclónico hacia la periferia (38%), coincidiendo con la baja diversidad de especies encontrada en las estaciones del centro de la circulación ciclónica. Una vez en la periferia del giro, el 70% de las partículas permanecerán ahí por un lapso de 30 días. Estos resultados están acorde con los de Gutiérrez *et al.* (2004) que utilizan otro modelo de circulación para simular la trayectoria de partículas y encontraron que el giro en el centro del golfo norte retiene partículas por 30 días. Por lo tanto las larvas de peces al sur del área de estudio podrán ser dispersadas hacia la circulación ciclónica y permanecerán ahí por ese lapso de tiempo.

De manera general, esta situación observada en el Golfo de California en ambos periodos de estudio, está en concordancia con observaciones en otras partes del mundo; resalta el trabajo de Heath *et al.* (1998) quienes utilizando un modelo de dispersión de partículas, representando la dispersión de huevos y larvas de sardina (*Sardinops melanostictus*) en la Corriente del Kuroshio, observan que la variabilidad de la corriente afecta directamente la dispersión larval y el subsiguiente reclutamiento; Reiss *et al.* (2000), quienes analizan relaciones entre la distribución espacial de larvas de sardina *Clupea harengus* y la merluza *Merluccius billinearis*, con la dispersión y retención de

partículas inertes y las corrientes geostróficas en la plataforma de Escocia, encuentran que la retención de larvas de peces se debe a las características hidrográficas resultado de procesos físicos que limitan la advección o difusión, en particular de la interacción del flujo geostrófico con la batimetría. Del mismo modo, Hinrichsen *et al.* (2003) en el Mar Báltico, un mar semi-cerrado similar al Golfo de California, mencionan que la dispersión larvaria esta en relación con la variabilidad de los patrones de vientos locales y la circulación, afectando también la tasa de encuentro entre presa y depredador.

Recopilando las ideas vertidas en esta discusión sobre las relaciones entre la distribución de larvas de peces y los procesos oceanográficos a diferentes escalas temporales y espaciales y en áreas geográficas con diferentes regímenes estacionales, podemos señalar que las asociaciones de larvas de peces se distribuyen en áreas de hábitats planctónicos bien definidos, acordes con el hábitat de desarrollo de los adultos y cuyas fronteras varían en concordancia con los patrones hidrográficos y de circulación. Así mismo, podemos señalar, como postularon Iles y Sinclair (1982) y Sinclair (1988), que el efecto de retención por procesos físicos sobre los productos de desove de los peces son la base para el éxito de supervivencia de la población larvaria, pudiendo ser dispersados después de hasta 30 días como se observó en este trabajo, a zonas de crianza y reclutamiento en donde el alimento según dichos autores, sería un factor de mayor importancia que los procesos físicos de retención.

Si bien en este trabajo, no conocemos la edad de cada larva ni se ubica con exactitud el área e intensidad del desove de cada especie, el hecho de que nuestros resultados muestran retención de partículas promedio de más del 70% hasta por 30 días dentro de las fronteras físicas de cada asociación larvaria y que más del 85% de los organismos analizados en este trabajo se encontraron en etapa preflexión-flexión, permite considerar que la retención larvaria a mesoescala, observada en este trabajo, está en concordancia con el planteamiento de Reiss *et al.* (2000) que indica que la retención es el resultado de la interacción del área de desove, el flujo geostrófico y la batimetría y su efecto es mayor sobre las larvas más pequeñas.

Por lo tanto, si consideramos el alto porcentaje de partículas que permanecen dentro de cada asociación, la relación entre la abundancia y la riqueza de especies con la dirección del flujo predominante, que la conectividad en dirección opuesta a este flujo es prácticamente nula (0% en diciembre y 8% en agosto), que por la edad de las larvas es posible que los adultos hayan desovado dentro de las áreas de las asociaciones y la coincidencia entre las condiciones ambientales en que se encontraron las larvas y el hábitat de los adultos; los resultados sugieren que los procesos asociados a la circulación general superficial del Golfo de California, favorecen la permanencia de las larvas de peces en áreas favorables para su desarrollo y durante el tiempo suficiente para su posterior reclutamiento a las poblaciones.

Este trabajo y sus respectivos resultados representan una importante aproximación al entendimiento del sistema pelágico del Golfo de California, sin embargo, para apuntar a resultados más precisos, es necesario contar con mayor detalle en la información. Por lo tanto sugerimos como líneas adicionales de investigación, conocer época y área de desove de las especies, determinar las tasas de mortalidad de larvas para conocer aproximadamente cuantas pueden llegar a etapa juvenil, incluir en el análisis más parámetros o variables biológicos como densidad de alimento, densidad de depredadores, nutrientes, productividad, así como más parámetros físicos (profundidad de la termoclina, profundidad de la capa mezclada, profundidad de la picnoclina, velocidades geostroficas) que permitan identificar que otros factores ambientales afectan la distribución y abundancia de las larvas de peces. Así mismo, hacer trabajos con experimentos finos dirigidos a las diferentes etapas de desarrollo larvario y estudiar mas a fondo el efecto de los procesos en la dispersión-retención de los organismos, en relación con el área del desove y el área con condiciones optimas para el reclutamiento como indicadores del éxito reproductivo y poblacional.

## IX. CONCLUSIONES

El análisis de las larvas de peces y los datos hidrográficos obtenidos en el Golfo de California en diciembre 2002 y agosto 2003, mostró que las áreas geográficas ocupadas por las asociaciones de larvas de peces definidas por el Índice de disimilitud de Bray-Curtis (en Diciembre: Norte, Canal-Centro y Sur; y en Agosto: Norte costero, Norte central-Canal y Sur) fue similar a las áreas ocupadas por los grupos ambientales definidos por los gradientes hidrográficos y el ACP. Esta coincidencia en áreas geográficas, permite considerar la existencia de fronteras hidrográficas bien establecidas entre las asociaciones de larvas de peces en ambos periodos. Lo cual se confirma con el hecho de que la mayoría de las especies de cada asociación larvaria mostró afinidad con las características ambientales de las correspondientes áreas geográficas.

En particular, la integración de los datos biológicos (abundancia de larvas de peces) y los datos ambientales (registro *in situ*) en un análisis cuantitativo de las relaciones entre ellos, permitió identificar que el índice de estratificación es un parámetro que determina la distribución de los organismos con mayor peso que la temperatura, parámetro típicamente utilizado. Este parámetro es indicador de condiciones en la columna de agua tales como densidad, estabilidad y circulación, condiciones con efecto directo sobre organismos planctónicos; por lo tanto se recomienda se incluya en trabajos de ecología junto con otros indicadores ambientales importantes en la región de estudio elegida.

El análisis lagrangeano, mediante el seguimiento numérico de las trayectorias de partículas en las áreas de cada asociación larvaria, y los resultados obtenidos mediante matrices de conectividad, mostraron que hasta un 70% de las partículas quedaron retenidas dentro de las fronteras de cada asociación durante 30 días en ambos periodos. Por lo tanto el análisis lagrangeano permite suponer que las larvas de peces podrían permanecer en el mismo ambiente, si es favorable para su desarrollo, hasta por 30 días sin ser exportadas a zonas adyacentes por las corrientes.

El porcentaje de partículas exportadas del área de cada asociación, indica una ruta de dispersión entre las áreas de distribución de las asociaciones larvarias. Esta coincide con la dirección del flujo principal de la circulación, de norte a sur en Diciembre y de sur a



norte en Agosto, y concuerda con el gradiente en número de especies y abundancia larval. Lo anterior muestra patrones de exportación inversos entre Diciembre y Agosto, los cuales están estrechamente ligados a los patrones de circulación estacional predominantes en cada época.

En el futuro, será interesante integrar a los modelos de circulación la abundancia de los organismos planctónicos, su comportamiento, así como un número importante de variables y parámetros ambientales, que permita tener el escenario ideal para analizar tanto relaciones finas de los organismos con su ambiente, como el papel que juegan dentro del ecosistema y dar un paso más en el desarrollo de la ecología del ictioplancton.

## X. LITERATURA CITADA

- Aceves-medina, G., S.P.A. Jiménez-Rosenberg, A. Hinojosa-Medina, R. Funes-Rodríguez, R.J. Saldierna-Martínez y P.E. Smith. (2004). Fish larvae assemblages in the Gulf of California. *Journal of Fish Biology* **65**: 832-847.
- Ahlstrom, E.H. (ed). (1969). Recommended procedures for measuring the productivity of plankton standing stock and related oceanic properties. 5. Sampling zooplankton to determine biomass. National Academy of Sciences. Washington. 47-59 p.
- Ahlstrom, E.H. y H.G. Moser. (1976). Eggs and larvae of fishes and their role in systematic investigations and in fisheries. *Reviste Travail Institute de Peches Maritime* **40** (3-4): 379-398.
- Álvarez-Borrego, S., J.A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M.J. Acosta-Ruíz y R.A. Schwartzlose. (1978). Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* **5**: 53-71.
- Álvarez-Borrego, S y J.R. Lara-Lara. (1991). The physical environment and primary productivity of the Gulf of California, in *The Gulf and Peninsular Province of the California*, edited by J.P. Dauphin y B.R.T. Simoneit, *AAPG Memoir* **47**: 555-567.
- Álvarez-Borrego, S y R.A. Schwartzlose. (1979). Masas de agua del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, **6** (1-2): 43-63.
- Argote M. L., A. Amador, M. F. Lavín y J. R. Hunter. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* **100**: 16103-16118.
- Austin, R.W. y Petzold, T.J. (1981). The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the coastal zone color scanner. En: *Oceanography from space*, J.F.R. Coger (Ed.). Plenum Press, New York, 239-256.
- Avalos-García, C., L. Sánchez-Velasco y B. Shirasago. (2003). Larval fish assemblages in the Gulf of California and their relation to hydrographic variability (Autmn 1997- Summer 1998). *Bulletin of Marine Science* **72** (1): 63-76.
- Badán-Dangón, A., C.J. Koblinsky y T. Baumgartner. (1985). Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta* **8**: 13-22.
- Badán-Dangón, A., C.E. Dorman; M.A. Merrifield y C.D. Winant. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* **96**: 16,877-16,896.

- 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 P. Ripa. (1999). Seasonal gyres in the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* **29**: 302-311.
- Bray, J.R. y J.T. Curtis. (1957). An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs* **27**: 325-349.
- Bray, N.A. (1988). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* **93**: 4993-5020.
- Brinton, E.; A. Fleminger y D. Siegel-Causey. (1986). The temperate and tropical planktonic biotas of the Gulf of California. *CalCOFI Report* **27**: 228-266.
- Brower, J.E. y J.H. Zar. (1977). Field and laboratory methods for general ecology. W.M.C. Brown Company. Iowa. 194 pp.
- Calderón-Aguilera, L.E., S.G. Marinone, y E.A. Aragón-Noriega. (2002). 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.E., M. F. Lavín, y E. Palacios-Hernández. (2002). Seasonal evolution of the geostrophic circulation in the northern Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **54**: 157-173.
- Castro, R.; M.F. Lavín y P. Ripa. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* **99**: 3249-3261.
- Castro, R.; A.S. Mascarenhas; R. Durazo y C.A. Collins. (2000). Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, México. *Ciencias Marinas* **26**: 561-583.
- Castro-Valdez, R. (2001). Variabilidad termohalina e intercambios de calor, sal y agua en la entrada al Golfo de California. Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, México. 121 pp.
- Cisneros-Mata, M.A., M.O. Nevárez-Martínez, M.A. Martínez-Zavala, J.P. Santos-Molina, A. Godínez-Cota y G. Montemayor-López. (1997). Sinopsis de la pesquería de pelágicos menores del Golfo de California de 1991/92 a 1995/96. Instituto Nacional de la Pesca CRIP Guaymas, México, 89 pp.
- Cotero-Altamirano, E. y Y. Green-Ruíz. (1997). Spawning biomass of the northern anchovy (*Engraulis mordax*) in the Gulf of California during 1991. *CalCOFI Report* **38**: 171-179.

- Cowen, R.K.; J.A. Hare y M.P. Fahay. (1993). Beyond hydrography: can physical processes explain larval fish assemblages within the middle Atlantic Bight? *Bulletin of Marine Science* **53** (2): 567-587.
- Daniel, W. (1983). Bioestadística, base para el análisis de las ciencias de la salud. 5ª. UTEHA. México. 878 pp.
- De La Cruz-Agüero. G. (1994). ANACOM: Sistema para el análisis de comunidades. Ver 3.0. Manual del Usuario. CICIMAR-IPN. La Paz. 99 pp.
- Doyle, M.J.; W.W. Morse y A.W. Kendall. (1993). A comparison of larval fish assemblages in the temperate zone of the Northeast Pacific and Northwest Atlantic Oceans. *Bulletin of Marine Science* **53** (2): 588-644.
- Espinosa-Fuentes M.L. y C. Flores-Coto. (2004). Cross-shelf and vertical structure of ichthyoplankton assemblages in continental shelf waters of the Southern Gulf of Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **59**: 333-352.
- Esqueda-Escarcega, G.M. (1995). Spatial and temporal distribution of *Scomber japonicus* larvae in the Sea of Cortez (1984-1988). *Scientia Marina* **59** (3-4): 391-397.
- Field, J.G., K.R. Clarke y R.M. Warwick. (1982). A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns. *Marine Ecology Progress Series* **8**: 37-52.
- Filonov, A.E. y M.F. Lavín. (2003). Internal tides in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* **108** (C5), 3151, doi:10.1029/2002JC001460.
- Filloux, J.H. (1973). Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. *Nature* **243**: 217-221.
- Fisher, R. A. (1936). *Statistical Methods for Research Workers* (6th). Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Fisher, W., F. Krupp, W. Schneider, D. Sommer, K.E. Carpenter y V.H. Niem. (1995). Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca: Pacífico Centro-Oriental. Vol. III, NORAD. 1811 pp.
- Franco-Gordo, C.; E. Godínez-Domínguez y E. Suárez-Morales. (2002). Larval fish assemblages in waters off the central Pacific coast of Mexico. *Journal of Plankton Research* **24** (8): 775-784.
- García, A. (1988). Generalidades del análisis de cumulos y del análisis de componente principales. Instituto de Geografía UNAM, México. 29 pp.
- Gaxiola-Castro, G., S. Álvarez-Borrego y R.A. Schwartzlose. (1978). Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* **5**: 25-40.

- Green-Ruíz, Y. y D. Acal-Sánchez. (1987). Distribución y abundancia de larvas de peces y estimación de la biomasa desovante de *Etrumeus teres* en el Golfo de California durante abril de 1985. *Ciencias Marinas* **13** (3): 69-96.
- Green-Ruiz, Y. y A. Hinojosa-Corona. (1997). Study of the spawning area of the Northern anchovy in the Gulf of California from 1990 to 1994, using satellite images of sea surface temperatures. *Journal of Plankton Research* (8): 957-968.
- Gutiérrez, O.Q., S.G. Marinone y A. Parés-Sierra. (2004). Lagrangian surface circulation in the Gulf of California from a 3D numerical model. *Deep-Sea Research II* **51**: 659-672.
- Hammann, M.G., T.R. Baumgartner y A. Badán-Dangón. (1988). Coupling of the pacific sardine (*Sardinops sagax caeruleus*) life cycle with the Gulf of California pelagic environment. *CalCOFI Report* **29**: 102-109.
- Hammann, M.G., M.O. Nevarez-Martínez y Y. Green-Ruíz. (1998). Spawning habitat of the pacific sardine (*Sardinops sagax* in the Gulf of California: Eggs and larval distribution 1956-1957 and 1971-1991. *CalCOFI Report* **39**: 169-179.
- Hao, W., S. Jian, W. Ruijing, L. Wang y L. Yi'an. (2003). Tidal fronts and the convergence of anchovy (*Engraulis japonicus*) eggs in the Yellow Sea. *Fisheries Oceanography* **12** (4/5): 434-442
- Heath, M., H. Zenitani, Y. Watanabe, R. Kimura y M. Ishida. (1998). Modelling the dispersal of larval japanese sardine, *Sardinops melanosticus*, by the Kuroshio Current in 1993 and 1994. *Fisheries Oceanography* **7**: 335-346.
- Hinrichsen, H.H., C. Möllmann y J.O. Schmidt. (2003). Dependency of larval fish survival on retention/dispersion in food limited environments: the Baltic Sea as a case study. *Fisheries Oceanography* **12**: 425-433.
- Hort, J. (1914). Fluctuations in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research. *Rapporte Programme V Reunion Conseil International pour l'Exploration de la Mer* **20**: 1-228.
- Iles, T.D. y M. Sinclair. (1982). Atlantic herring: stock discreteness and abundance. *Science* **215**: 627-633.
- Jeffrey, S.W. y G.F. Humphrey. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochimie and Physiologie der, Pflanzen* **167**: 191-194.
- Jongman, R.H., C.F.G. ter Braak y O.F.R. van Tongeren. (1987). Data analysis in community and landscape ecology. Pudoc, Wageningen. 299 pp.

- Kahru, M., S.G. Marinone, S.E. Lluch-Cota, A. Parés-Sierra y B. Greg-Mitchell. (2004). Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO. *Deep Sea Research* **2**(51):139-146.
- Kramer, D., M.J. Kalin, E. G. Stevens, J.R. Thrailkill y J.R. Zweifel. (1972). Collecting and processing data on fish eggs and larvae in the California Current region. *NOAA Technical Report NMFSC.*, 370 pp.
- Lasker R. (1978). The relation between oceanographic conditions and larval anchovy food in the California Current: identification of factors contributing to recruitment failure. *Rapp. P. -V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* **173**: 212-230.
- Lasker, R. (1981). Factors contributing to variable recruitment of the northern anchovy (*Engraulis mordax*) in the California Current: contrasting years, 1975 through 1978. *Conseil International pour l'Exploration de la Mer* **178**: 375-388.
- Lasker, R. (1985). An egg production method for estimating spawning biomass of pelagic fish: application to the northern anchovy, *Engraulis mordax*. *United States Departament Commerce NOAA Technical Report NMFS* **36**: 99 pp.
- Lasker, R. (1987). Use of fish eggs and larvae in probing some major problems in fisheries and aquaculture. *American Fisheries Society Symposium* **2**: 1-2.
- Lavín, M.F. y S. Organista. (1988). Surface heat flux in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* **93**: 14033-14038.
- Lavín, M.F., R. Durazo, E. Palacios, M.L. Argote y L. Carillo. (1997a). Lagrangian observations of the circulation in the Northern Gulf of California. *Journal of Phisycal Oceanography* **27** (10): 2298-2305.
- Lavín, M.F., E. Beier y A. Badán. (1997b). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. En M.F. Lavín, editor, *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Monografía No. 3, *Unión Geofísica Mexicana*, 141-171 p.
- Lavín, M.F., V.M. Godínez y L.G. Alvarez. (1998). Inverse-estuarine features of the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **47**: 769-795.
- Lavín, M.F. y S.G. Marinone. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. En Velasco, O.; J. Sheimbaum y J.J. Ochoa (editores) *Nonlinear processes in the goeophysical fluid dynamics*. Kluwer Academia Publishers, Dordrecht, Holanda, ISBN 1-4020-1589-5, 173-204.
- Lavín, MF.; E. Palacios-Hernández y C. Cabrera. (2003). Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. *Geofísica Internacional* **42** (3): 363-375.

- Lepley, L.K., S.P. Vonder Haar, J.R. Hendrickson y G. Calderón-Riveroll. (1975). Circulation in the Northern Gulf of California from orbital photographs and ship investigations. *Ciencias Marinas* **2**: 86-93.
- López, M., J. Candela y M.L. Argote. (2006). Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California? *Geophysical Research Letters* **33**: L11603, doi:10.1029/2006GL025908.
- Lluch-Cota, S.E. (2000). Coastal upwelling in the Eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta* **23**: 731-740.
- Lluch-Belda, D., F.J. Magallón y R.A. Schwartzlose. (1986). Large fluctuations in the sardine fishery in the Gulf of California: Possible causes. *CalCOFI Report* **27**: 136-140.
- Ludwig, J.A. y J.F. Reynolds. (1988). *Statistical ecology*. John Wiley and Sons. U.S.A. 377 pp.
- Margalef, R. (1977). *Ecología*. Omega. Barcelona. 280 pp.
- Marinone, S.G. y P. Ripa. (1988). Geostrophic flow in the Guaymas Basin, central Gulf of California. *Continental Shelf Research* **8**: 159-166.
- 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. y M.F. Lavín. (2003). Residual flow and mixing in the large islands region of the Central Gulf of California. En Velasco, O.; J. Sheimbaum y J.J. Ochoa (editores) *Nonlinear processes in the geophysical fluid dynamics*. Kluwer Academia Publishers, Dordrecht, Holanda, ISBN 1-4020-1589-5, 173-204.
- Marinone, S.G. (2006). A numerical simulation of the two- and three-dimensional lagrangian circulation in the northern Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **68**: 93-100.
- Marinone, S.G. (2007). A note on “Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California?” *Geophysical Research Letters* **4**: L02607, doi:10.1029/2006GL028589.
- Marinone, S.G., M.J. Ulloa, A. Parés-Sierra, M.F. Lavín y R. Cudney-Bueno. (2008). Connectivity in the northern Gulf of California from particle tracking in a three-dimensional numerical model. *Journal of Marine Systems* **71**: 149-158.
- Martínez-Aguilar, J. y J.A. Anda-Montañez. (1990). Estimación de la biomasa reproductora de *Scomber japonicus* en el Golfo de California, marzo 1981. *Ciencia Pesquera* (7): 17-34.

- Mascarenhas, Jr., A.S.; R. Castro; C.A. Collins y R. Durazo. (2003). Seasonal variations of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, México. *Journal of Geophysical Research* **109** (C7), C07008, doi:10.1029/2003JC002124.
- Mateos, E., S.G. Marinone y M.F. Lavín. (2006). Role of tides and mixing in the formation of an anticyclonic gyre in San Pedro Mártir Basin, Gulf of California. *Deep Sea Research II* **53**: 60-76. doi:10.016/j.dsr2.2005.07.010.
- McGowan, J.A. (1983). El Niño and biological production in the California Current. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter* **21**: 23.
- McGowan, G.E. (1993). Coastal ichthyoplankton assemblages, with emphasis on the southern California Bight. *Bulletin of Marine Science* **53** (2): 692-722.
- Moser, H.G., E.H. Ahlstrom, D. Kramer y E.G. Stevens. (1974). Distribution and abundance of fish eggs and larvae in the Gulf of California. *CalCOFI Report* **17**: 112-128.
- Moser, H.G. y P. Smith. (1993). Larval fish assemblages and oceanic boundaries. *Bulletin of Marine Science* **53**(2): 28-289.
- Moser H.G. (editor) (1996). The early stages of fishes in the California Current region. *CalCOFI Atlas* No. 33. Allen Press, Inc., Lawrence, Kansas, 1505 p.
- Muhling, B.A., L.E. Beckley y M.O. Olivar. (2007). Ichthyoplankton assemblage structure in two meso-scale Leeuwin Current eddies, eastern Indian Ocean. *Deep Sea Research II* **54**: 113-1128.
- Navarro-Olache, L.F., M.F. Lavín, L.G. Alvarez-Sánchez y A. Zirino. (2004). Internal structures of SST features in the central Gulf of California. *Deep Sea Research II* **51**: 673-687.
- Okasaki, Y. y H. Nakata. (2007). Effect of the mesoscale hydrographic features on larval fish distribution across the shelf break of East China Sea. *Continental Shelf Research* **27**: 1616-1628.
- Olivar, M.P. y P.A. Shelton. (1993). Larval fish assemblages in the Benguela Current. *Bulletin of Marine Science* **53** (2): 450-474.
- Olvera-Limas, R.M. (1981). Estimación de Biomasa Reproductora de *Sardinops sagax caeruleus*, en la Costa Oriental del Golfo de California enero de 1976. *Ciencia Pesquera* **1**: 27-34.
- Olvera-Limas, R.M y M.A. Padilla-García. (1986). Evaluación de la población de Sardina japonesa (*Etrumeus teres*) y monterrey (*Sardinops sagax*) en el Golfo de California. *Ciencia Pesquera* **5**:1-15.



- Paden, C.A., C.D. Winant, y M.R. Abbott. (1993). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, 2, Surface heat flux, *Journal of Geophysical Research* **98**: 20,091-20, 103.
- Padilla-Garcia, M.A. (1981). Biomasa de sardina (*Sardinops sagax*) y merluza (*Merluccius productus*), febrero 1977. *Ciencia Pesquera* (1): 35-43.
- Palacios-Hernández, E., E. Beier, M.F. Lavín y P. Ripa. (2002). The effect of winter mixing on the circulation of the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* **32**: 705-728.
- Palacios-Hernández, E., L. Carrillo, M.F. Lavín, L. Zamudio y A. García-Sandoval. (2006). Hydrography and circulation in the Northern Gulf of California in the winter of 1994-95. *Continental Shelf Research* **26**: 82-103. doi: 10.1016/j.csr.2005.09.005.
- Pegau, W.S.; E. Boss y A. Martínez. (2002). Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters* **29** doi: 10.1029/2001GL014076.
- Peguero-Icaza, M., V.M. Godínez-Sandoval y L. Sánchez-Velasco. (2005). Datos hidrográficos del Golfo de California. Campaña Oceanográfica GOLCA-0212. (7 al 13 de diciembre de 2002). Informe Técnico. Serie Oceanografía Física. CICESE. 48 pp.
- Pielou, E.C. (1975). *Ecological diversity*. John Wiley and Sons, New York. 385 pp.
- Platt, T., C. Fuentes-Yaco y K.T. Frank. (2003). Marine ecology: spring algal bloom and larval fish survival. *Nature* **423**: 398-399.
- Pond, S y G. Pickard. (1983). *Introductory dynamical oceanography*. Pergamon Press. 2a. Oxford. 329 pp.
- Proehl, J.A., D.R. Lynch, D.J. McGillicuddy y J.R. Ledwell. (2005). Modeling turbulent dispersion on the North Flank of Georges Bank using lagrangian particle methods. *Continental Shelf Research* **25**: 875-900.
- Proctor, R., P.J. Wright y A. Everitt. (1998). Modelling the transport of larval sandeels on the north-west european shelf. *Fisheries Oceanography* **7** (3/4): 347-354.
- Reiss, C.S., Panteleev, G., Taggart, C.T., Sheng, J. y Young, B. (2000). Observation on larval fish transport and retention on the Scotian Shelf in relation to geostrophic circulation. *Fisheries Oceanography* **9**: 195-213.
- Richards, W.J., M.F. McGowan, T. Leming, J.T. Lamkin y S. Kelley. (1993). Larval fish assemblages at the Loop Current boundary in the Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science* **54** (2): 475-537.

- Ripa, P. y S.G. Marinone. (1989). Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the Central Gulf of California, as inferred from historical data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **115**: 887-913.
- Ripa, P. y G. Velázquez. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California. *Geofísica Internacional* **32**: 41-56.
- Robles-Pacheco, J.M. y N. Christensen. (1984). Effects of the 1982-1983 El Niño on the Gulf of California. *EOS Transactions, American Geophysical Union* **64**: 5-6.
- Roden, G.I. (1958). Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science* **12**: 21-45.
- Roden, G.I. y G.W. Groves. (1959). Recent oceanographic Investigations in the Gulf of California. *Journal of Marine Research* **18** (1): 10-35.
- Romero Centeno R. D. L. (1995). Comportamiento de los campos hidrográficos y flujos de calor y masa en el Canal de Ballenas. Tesis de Maestría, Departamento de Oceanografía Física, CICESE, Ensenada, B.C., México. 126 pp.
- Sánchez-Velasco L., B. Shirasago, M.A. Cisneros-Mata y C. Avalos-García. (2000). Spatial distribution and its relation to the El Niño 1997-1998. *Journal of Plankton Research* **22**(8): 1611-1618.
- Sánchez-Velasco, L. y B. Shirasago. (2000). Larval feeding of Scombridae species in the Gulf of California and its relation to temperature and chlorophyll satellite data. *Pacific Science* **54**(2):127-136.
- Sánchez-Velasco L., E. Valdez-Holguín, B. Shirasago y M.A. Cisneros-Mata. (2002). Changes in the spawning environment of *Sardinops caeruleus* in the Gulf of California during El Niño 1997-1998. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **54**: 207-217.
- Sánchez-Velasco L., C. Avalos-García, M. Rentería-Cano y B. Shirasago. (2004a). Fish larvae abundance and distribution in the central Gulf of California during strong environmental changes (1997-1998 el Niño and 1998-1999 La Niña). *Deep-Sea Research* **11**(51):711-722.
- Sánchez-Velasco, L., V.M. Godínez, B. Shirasago y M. Peguero-Icaza. (2004b). Datos hidrográficos del Golfo de California: Campaña Oceanográfica GOLCA0308 (del 1 al 7 de agosto del 2003). Comunicaciones Académicas, Serie Oceanografía Física. CICESE. 44 pp.
- Sánchez-Velasco L., E. Beier, C. Avalos-García y M.F. Lavín. (2006). Larval fish assemblages and geostrophic circulation in Bahía de La Paz and the surrounding southwestern region of the Gulf of California. *Journal of Plankton Research* **28**: 1-18.

- Sánchez-Velasco, L., S.P.A. Jiménez-Rosenberg y M. F. Lavín. (2007). Vertical distribution of fish larvae and its relation to water column structure in the Southwestern Gulf of California. *Pacific Science* **61** (4): 533-548.
- Santamaría-del-Ángel, E., S. Alvares-Borrego y F.E. Müller-Karger. (1994). The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research* **99** (C4): 7423-7431.
- Sanvicente, L.E. (1990). Comunidades ictioplanctónicas en el suroeste del Golfo de México. Tesis de Maestría. ICMYL-UNAM. México. 58 pp.
- Simpson, J.H. (1981). The shelf-sea fronts: implications of their existence and behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **302**: 531-546.
- Sinclair, M. (1988). Marine population: an essay on population regulation and speciation. Washington Grant Program University of Washington Press, Seattle. 252 pp.
- Smith P.E. y S.L. Richardson. (1979). Técnicas modelo para prospección de huevos y larvas de peces pelágicos. FAO. *Documentos Técnicos de Pesca*. 175 p.
- Smith, K.A. y I.M. Suthers. (1999). Displacement of diverse ichthyoplankton assemblages by a coastal upwelling event on the Sydney shelf. *Marine Ecology Progress Series* **176**: 49-62.
- Sokal, R.R. y F.J. Rohlf. (1985). Biometría. Blume. Barcelona. 587 pp.
- Somarakis, S., P. Drakopoulos y V. Filippou. (2002). Distribution and abundance of larval fish in the northern Aegean Sea-eastern Mediterranean in relation to early summer oceanographic conditions. *Journal of Plankton Research* **24**: 339-357.
- Stegmann, PM y J.A. Yoder. (1996). Variability of sea-surface temperature in the South Atlantic Bight as observed from satellite: Implications for offshore-spawning fish. *Continental and Shelf Research* **16** (7): 843-861.
- Sur, H.I., E.Oezsoy y U. Uenlueata. (1994). The boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea. *Progress in Oceanography* **33** (4): 249-302.
- Sur, H.I., E.Oezsoy Y.P. Ilyin & U. Uenlueata. (1996). Coastal/deep ocean interactions in the Black Sea and their ecological/environmental impacts. *Journal of Marine Systems* **7** (2-4): 293-320.
- Ter Braak, C.J.F. (1986). Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* **67** (5): 60-71.

- Valdez-Holguín, J.E. y R. Lara-Lara (1987). Productividad primaria del Golfo de California. Efectos del evento de El Niño 1982–1983. *Ciencias Marinas* **13**: 34–50.
- Van Andel, T.H. (1964). Recent marine sediments of the Gulf of California, in *Marine Geology of the Gulf of California: A symposium*, edited by T.H. Van Andel and G.G. Shor, Jr. *Memories of American Association of Petroleum Geologists* **3**: 216-310.
- Venrick, E. y T. Hayward. (1984). Determining chlorophyll on the 1984 CALCOFI surveys. *CalCOFI Report* **25**: 74-79.
- Visser, A.W. (1997). Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column. *Marine Ecology Progress Series* **158**: 275-281.
- Zeitzchel, B. (1969). Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* **3**: 201-207.