



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



DISTRIBUCIÓN DE LARVAS DE PECES EN EL SISTEMA DE FRENTES DE LA PARTE SUR DE LA CORRIENTE DE CALIFORNIA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN MANEJO
DE RECURSOS MARINOS.

PRESENTA

AMELIA DE LA O NAVARRETE

LA PAZ, B.C.S., Noviembre 2015.

DEDICATORIA

A mis abuelitos †

María de Jesús Riestra Ozuna, Miguel De la O Galeana y Nicasia Rendón Vázquez, que me dieron una niñez muy feliz.

A mis padres

Aidé Navarrete Rendón y Miguel De la O Riestra. Por sus consejos y ejemplo de salir adelante, realizar lo que a uno le gusta y sobre todo, por todo el amor y cariño que me han dado todos estos años, que han dedicado en criarme y formarme en una persona de bien, Gracias!

A mis hermanos

María, Claudia, Miguel e Iver por su apoyo moral, económico y emocional pero sobre todo por ser mis hermanos y saber que siempre cuento con ustedes.

A mis dos hermosos sobrinos

Aidé Inaí y José Pablo Miguel, que son la alegría de la familia.

Dios se manifiesta a nosotros en primer lugar a través de la vida del universo, en segundo lugar a través del pensamiento humano. La primera manifestación se llama naturaleza, la segunda arte.

Víctor Hugo

(1802-1885) Novelista francés.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional, por aceptarme en el programa de Maestría, y darme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación.

A la Beca CONACYT por darme el apoyo económico, para mi manutención y estadía durante el programa de maestría. Al proyecto CONACYT No 20140138: “Influencia del ambiente en la distribución de las larvas de peces en aguas del Pacífico Noroccidental de México”, a cargo del Profe René Funes Rodríguez.

Al programa Investigaciones Mexicanas de la corriente de California (IMECOCAL), por las bases de datos prestadas, para la realización de este trabajo de investigación.

A los programas interinstitucionales BEIFI y COFAA, por los apoyos económicos, durante la estancia de maestría y los congresos, que han enriquecido enormemente mi formación académica-cultural.

Al proyecto SIP 20151268: “Estimación de la abundancia relativa de la sardina *Sardinops sagax* en el sistema de la corriente de California utilizando registros históricos de captura de carnada viva de los barcos atuneros de carnada”, a cargo del Profe. Rubén Rodríguez Sánchez.

A mis directores un agradecimiento especial, por darme un poco de sus conocimientos, consejos, regaños, y dirección en este trabajo de investigación. Pero sobre todo por apoyarme a lo largo de estos dos años. Profe. René y Profe. Rubén.

Al comité revisor, por sus sugerencias que fueron de mucha ayuda en la realización de este trabajo, así como por sus asesorías en ciertos temas: Profa. Sofía, Profe. Eduardo y Profe. Rogelio y un agradecimiento especial a la Profa. Sofía por brindarme la ayuda, con el programa para el manejo de las imágenes satelitales.

A las personas que me ayudaron con la logística de la realización de la tesis, desde el proceso de identificación de las larvas hasta los análisis estadísticos, así como, con el

manejo del programa WIM; Ulianov, Hideki, José y Eduardo.

A mis Amigos y compañeros de la maestría: Ney, Mirtha, Marijo, Marisol, Ari, Francisco, Erick, Maray, Gemma, Sury, Charly, Emma, Luis, Marc, Colombo, Lalo, José por compartir nuestras angustias de estrés maestral y los buenos momentos de desestrés que pasamos.

A mis amigos que conocí en la Paz, y los que ya conocía, que me han ayudado, apoyado así como darme motivación para echarle ganas y seguir en el camino del posgrado: Chabelita, Lety, Kitty, Fredy, Araceli, Efraín, Chio, Hamid, Zulleth, Aldo, Elvira, Miguel, Francis y Francisco.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS.....	vi
GLOSARIO	ix
RESUMEN.....	0
ABSTRACT	1
I. INTRODUCCIÓN	2
II. ANTECEDENTES.....	5
ÁREA DE ESTUDIO.....	7
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
V. OBJETIVOS.....	10
General	10
Específicos	10
VI. JUSTIFICACIÓN.....	10
VII. MATERIALES Y MÉTODOS	12
Análisis de laboratorio.....	12
Información ambiental y composición de las imágenes satelitales.....	14
Análisis de Cocientes.....	17
VIII.RESULTADOS.....	19
IX. DISCUSIÓN	34
Sistema de frentes.....	34
Distribución de larvas en el sistema de frentes.....	38
X. CONCLUSIONES	41
XI. RECOMENDACIONES	41
XII. BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXO 1	50
ANEXO 2	53

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Área de estudio y plan básico de estaciones del programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California).

Fig. 2. Diferentes tamaños de cuadrantes en los que se exploró la relación entre el índice de frentes y abundancia de larvas de peces: a) $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, b) $1^\circ \times 1^\circ$ y c) $2^\circ \times 2^\circ$.

Fig. 3. Ejemplo de imagen resultante con los frentes de temperatura caracterizados como líneas de contorno utilizando ventanas de 32×32 píxeles.

Fig. 4. Frentes resultantes para la primavera de 2006, utilizando diferentes combinaciones de imágenes semanales de TSM: a) Combinación 1: (S1, ZN), (S2, ZS); b) Combinación 2: (-S1; ZN), (S1; ZS); y c) Combinación 3: (-S1+S1, ZN), (S1+S2, ZS).

Fig. 5. Área de estudio mostrando los 9 unidades de área (cuadrantes de $2^\circ \times 2^\circ$) utilizados para los análisis estadísticos de este trabajo.

Fig. 5.1. Variación estacional de las frecuencias frontales (invierno, primavera y verano) de 2006; $H_{(0.05, 2)} = 0.211$ $p = 0.94$.

Fig. 5.2. Variación estacional de las frecuencias frontales (invierno, primavera y verano) de 2007; $H_{(0.05, 2)} = 0.6032$ $p = 0.73$.

Fig. 5.3. Variación estacional de las frecuencias frontales entre años de 2006 y 2007; $H_{(0.05, 2)} = 0.2152$ $p = 0.89$.

Fig. 5.4. Variación inter-estacional de las frecuencias frontales (invierno; $H_{(0.05, 2)} = 0.4995$ $p = 0.47$).

Fig. 5.5. Variación inter-estacional de las frecuencias frontales (primavera; $H_{(0.05, 2)} = 2.3879$ $p = 0.12$).

Fig. 5.6. Variación inter-estacional de las frecuencias frontales (verano; $H_{(0.05, 2)} = 3.6043$

$p=0.05763$).

Fig. 6. Caracterización de los frentes de temperatura en 2006 y 2007. Invierno(a,b).

Fig. 6.1. Caracterización de los frentes de temperatura en 2006 y 2007. Primavera (c,d).

Fig. 6.2. Caracterización de los frentes de temperatura en 2006 y 2007. Verano (e, f).

Fig. 7. Distribución de *Sardinops sagax* en 2006 y 2007. Invierno (a, b). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

Fig.7.1. Distribución de *Sardinops sagax* en 2006 y 2007. Primavera (c, d). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación, y los puntos las estaciones muestreadas.

Fig. 7.2. Distribución de *Sardinops sagax* en 2006 y 2007. Verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación, y los puntos las estaciones muestreadas.

Fig. 8. Distribución de *Engraulis mordax* en 2006 y 2007. Invierno (a, b), primavera (c, d) y verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

Fig. 9. Distribución de *Trachurus symmetricus* en 2006 y 2007. Invierno (a, b), primavera (c, d) y verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

Fig. 10. Distribución de *Diogenichthys laternatus* en 2006 y 2007. Invierno (a, b), primavera (c, d) y verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

Fig. 11. Distribución de *Vinciguerria lucetia* en 2006 y 2007. Invierno (a, b), primavera (c, d) y verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los

puntos las estaciones muestreadas.

Fig. 12. Línea de cociente para la abundancia de *Sardinops sagax* (línea roja) respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

Fig. 13. Línea de cociente para la abundancia de *Engraulis mordax* (línea roja) respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

Fig. 14. Línea de cociente para la abundancia de *Trachurus symmetricus* (línea roja) respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

Fig. 15. Línea de cociente para la abundancia de *Diogenichthys laternatus* (línea roja) respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

Fig. 16. Línea de cociente para la abundancia de *Vinciguerria lucetia* (línea roja) respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

GLOSARIO

Frente de temperatura: Área de convergencia entre dos masas de agua de distintas características fisicoquímicas.

Corriente de California: Es una corriente oceánica con una componente prevaleciente hacia el ecuador; entre las latitudes 48° y 23° norte a lo largo de la costa occidental de América, caracterizada por un flujo superficial (0-200m) y debido a su origen subártico, posee una salinidad reducida (32.5-33.8) con temperaturas frías (10°-20°C).

Índice de frecuencia frontal (IFF): Valor relativo que puede variar entre 0 y 1. Indica la cantidad de píxeles que ocupa un frente de temperatura en relación al número total de píxeles dentro de un área marina analizada (en este trabajo idealmente en cuadrantes de 2° x 2°) en una imagen satelital de la temperatura superficial del mar.

Índice de abundancia promedio (IAP): Cociente que resulta de dividir el número total de larvas contabilizadas de una especie particular entre el número de estaciones de muestreo realizadas dentro de un área definida (en este trabajo idealmente en cuadrantes de 2° x 2°).

Convergencia: En el océano se le denomina al punto en que confluyen dos masas de agua.

Masa de agua: Agua oceánica con características definidas por un rango de salinidad y temperatura.

Epipelágico: Se le denomina al ambiente que se encuentra en los primeros 200 m de profundidad en el océano y por consiguiente a los organismos que habitan en ese rango de profundidad.

Mesopelágico: Se le denomina al ambiente que se encuentra de los 200 y 1000 m de profundidad en el océano, y por ende a los organismos que habitan en ese rango de profundidad.

Advección: Transporte horizontal de partículas (e. g. larvas de peces) por acción del movimiento de las corrientes marinas en el océano.

RESUMEN

Los frentes oceánicos son áreas de convergencia entre dos masas de agua de distintas características fisicoquímicas. Estos sistemas son considerados zonas de alta productividad biológica que funcionan como zonas de agregación, reproducción, desove y alimentación de diversas especies marinas. El objetivo de este estudio fue evaluar espacialmente la relación de estos procesos oceanográficos a nivel regional (parte sur de la corriente de California) en la distribución de larvas de peces cuyos adultos pertenecen a los hábitats: epipelágico (*Sardinops sagax*, *Engraulis mordax* y *Trachurus symmetricus*); y mesopelágico (*Diogenichthys laternatus* y *Vinciguerria lucetia*). Para el análisis se utilizó la información de seis cruceros realizados en 2006 y 2007 (primavera, verano e invierno). La detección de los frentes se realizó en imágenes satelitales de temperatura superficial del mar con una resolución temporal de ocho días y espacial de 4x4 km del sensor Aqua-MODIS, a través del algoritmo de detección de borde. El valor del índice de frecuencia de frentes (IFF) osciló entre 0.002 y 0.09 dentro de los nueve cuadrantes de 2° x 2° en que se subdividió la parte sur de la corriente de California. Mediante el análisis de cocientes se identificaron las preferencias del hábitat para cada una de las especies caracterizado exclusivamente por la frecuencia de frentes. Las especies epipelágicas mostraron preferencia por un hábitat caracterizado por una frecuencia de frentes mediana y alta (~0.04-0.05 y 0.08 IFF). No obstante, *V. lucetia*; ocurrió preferentemente con valores intermedios (0.04-0.05 IFF) y *Diogenichthys laternatus* en un amplio rango de frecuencias frontales (0.01-0.07 IFF). Por lo cual se concluye que los sistemas de frentes funcionan como sitios de agregación y muy probablemente, contribuyen a una mayor supervivencia larval.

ABSTRACT

Ocean fronts are areas of convergence between two bodies of water that have different physicochemical characteristics. These systems are considered areas of high biological productivity that function as aggregation zones, breeding, spawning and feeding of various marine species. The aim of this study is to evaluate the spatial relationship of these oceanographic processes at regional level (Southern California Current portion) in the distribution of fish larvae whose adults belong to habitats: epipelagic (*Sardinops sagax*, *Engraulis mordax* and *Trachurus symmetricus*); and mesopelagic (*Diogenichthys laternatus* and *Vinciguerria lucetia*). The analysis of the data was used, from six cruises taken in 2006 and 2007 (spring, summer and winter). The detection of fronts was performed in satellite images of sea surface temperature with a time resolution of eight days of Aqua-MODIS sensor with a spatial resolution of 4x4 km, through the edge detection algorithm. The value of the frequency index fronts (IFF) ranged between 0.002 and 0.09 in the nine quadrants of 2° x 2° in the southern part of the California Current was subdivided. An Analysis of Quotient was realized to identify habitat preferences for each of the species characterized by the frequency exclusively identified fronts. The epipelagic species show a preference for a habitat characterized by medium and high frequency fronts (IFF ~ 0.04-0.05 and 0.08). However, *V. lucetia*; preferably it occurred with intermediate values (~0.04-0.05 IFF) and *Diogenichthys laternatus* in a wide range of frequencies front (IFF 0.01 to 0.07). Therefore it is concluded that the systems function as fronts aggregation sites and likely contribute to increased larval survival.

I. INTRODUCCIÓN

Los frentes oceánicos son zonas donde los gradientes horizontales de las propiedades del agua son más pronunciados (temperatura, salinidad, nutrientes, etc.). Los frentes separan zonas amplias con diferentes masas de agua (Belkin, 2002). Son notables por ser lugares en los que la energía mecánica del sistema físico puede ser accesible para aumentar la energía trófica disponible para los organismos y en ellos, se producen patrones significativos en los hábitats de los organismos marinos. La importancia de los frentes en el ecosistema radica en el hecho de que cualquier frente distintivo que persiste sobre un periodo de tiempo significativo debe estar asociado con una zona de convergencia. Dentro de ésta, la distribución de las partículas de alimento tienden a concentrarse y los organismos al alimentarse aumentan la ingesta de calorías por unidad de energía, los gastos energéticos para alimentarse son menores en comparación con el resto del océano que carece de este mecanismo de concentración (Bakun, 2006). Por ejemplo, la amplia atracción de muchos tipos de peces por objetos flotantes que derivan en el océano ha sido señalada como una aparente respuesta adaptativa a los aspectos deseables de los frentes (Bakun, 2006).

La costa occidental de Baja California (COBC) es reconocida por tener la mayor concentración y persistencia de frentes de temperatura de todo el Pacífico noroeste, condición debida a la mezcla de agua fría de la corriente de California (CC) y su encuentro con la contracorriente de California cálida (Etnoyer *et al.*, 2004). Éstos frentes superficiales son caracterizados por un gradiente de temperatura elevado, donde la productividad biológica alta es atribuida a una agregación de la densidad, que resulta de una productividad primaria y secundaria también alta (Etnoyer *et al.*, 2006).

La importancia de los frentes es evidente por su productividad, pero también son importantes en la concentración de peces pelágicos, mamíferos marinos y otros organismos, hasta objetos de deriva (Etnoyer *et al.*, 2004; 2006) A su vez, los frentes oceánicos detectados en superficie, están relacionados con una extensión vertical de poco más de 1km por lo que el movimiento y la estructura del frente puede influir en la

distribución de los organismos que se encuentran en estas zonas (et. it. larvas de peces; Belkin, 2002).

La variabilidad hidrográfica determina el enriquecimiento de nutrientes, la disponibilidad de alimento y la retención de larvas de peces (Sinclair, 1988; Bakun, 1997; Agostini & Bakun, 2002). En relación a lo anterior, se ha postulado que el número de los stocks y la localización geográfica en sus respectivos sitios del desove, es determinado por la ubicación y extensión de áreas de retención geográficamente estables (Iles & Sinclair, 1982). También se ha propuesto que el éxito de una población dependerá de la habilidad de sus larvas de permanecer agregadas los primeros meses de vida (Sinclair, 1988) y donde, la variabilidad en la mortalidad durante el desarrollo inicial de sus larvas, es el resultado de la disponibilidad diferencial del alimento (Hjort, 1914; Cushing, 1975).

Entre otras fuentes de variación, la distribución de larvas y estructura de las asociaciones de especies ha sido relacionada con la variabilidad estacional o interanual de procesos oceánicos como giros y corrientes, donde se establecen comparaciones entre la riqueza de especies y abundancia entre el norte y sur de la COBC (Jiménez-Rosenberg *et al.*, 2007, 2008). Además de cambios en la abundancia de larvas de peces que pudieran coincidir con períodos de estabilidad relativa de la columna de agua, antes de desencadenarse las intensas surgencias costeras (Loeb *et al.*, 1983a y b). Aunado a ésta dinámica, se agregan cambios importantes en la distribución de las especies asociadas con el evento de calentamiento El Niño Oscilación del Sur (ENSO) (Jiménez-Rosenberg *et al.*, 2010; Funes-Rodríguez *et al.*, 2011).

En el sistema de la corriente de California, la inestabilidad del flujo costero, una contracorriente cálida, la geometría de la línea de costa y el patrón de vientos estacional, desencadenan surgencias costeras, así como giros de mesoescala. A su vez, estos dos últimos procesos modulan la formación de frentes de temperatura superficiales y de clorofila. (Soto-Mardones *et al.*, 2004; Durazo & Baumgartner, 2002; Perez-Brunius *et al.*, 2007; Kahru *et al.*, 2012). Sobre la base de la importancia de los

frentes aquí descrita, como sitios de alta productividad biológica y retención de larvas de peces, surge el interés por explorar su relación con la distribución y abundancia de larvas de peces en el sistema de frentes que se desarrolla en la COBC.

Cabe mencionar que si bien se han realizado trabajos que buscan relacionar la influencia de los frentes de temperatura en diversas especies de larvas de peces, estos se han enfocado a una escala local (frente individual) y durante un periodo corto, limitado por la disponibilidad de barco para realizar el estudio (Danell-Jiménez *et al.*, 2009, Sánchez-Velasco *et al.*, 2012, Inda-Díaz *et al.*, 2014). Generalmente en esos trabajos se menciona que los adultos buscan el hábitat preferencial para alimentarse y desovar (Scales *et al.*, 2014; Nieto *et al.*, 2015). Además, que los frentes podrían funcionar en la distribución de las larvas como barreras, mientras que para otras no son un impedimento para su distribución (Inda-Díaz *et al.*, 2014).

Sin embargo, la relación entre la distribución de las larvas de peces y los sistemas de frentes, no han sido estudiados en una escala regional y en su variabilidad estacional. Por lo que explorar esta relación es importante e ilustrativa, ya que las larvas de peces están asociadas a la variabilidad estacional, y a eventos interanuales (El Niño y La Niña) que afectan el rango de distribución de las especies (Funes-Rodríguez *et al.*, 2002; 2011). De esta manera, su estudio busca abrir una nueva línea en la investigación del ictioplancton para relacionar el efecto de los frentes de temperatura en la distribución y abundancia de larvas de peces.

II. ANTECEDENTES

La caracterización de patrones de frentes de temperatura mediante el uso de la percepción remota se ha llevado a cabo para grandes ecosistemas marinos, como es la corriente de California (Belkin, 2009). En este ecosistema se presenta un patrón cuasi-estacional que incrementa conforme avanza las estaciones del año, relacionado con el esfuerzo de vientos y su máxima intensificación en primavera y verano en el extremo sur de la corriente de California. En ella, la longitud de los frentes pasa de ser desordenada y caótica hasta ocupar extensiones longitudinales de poco más de 1000 km y es así, como los estudios físico-biológicos pueden ser relacionados con los patrones de frentes de temperatura (Belkin, 2009).

Otros estudios se han enfocado en la parte estadística de los frentes con la finalidad de ver si estos son significativos en la variabilidad estacional y a largo plazo (Kharu *et al.*, 2012). En estos estudios se ha descrito que la frecuencia frontal de la temperatura superficial del mar (TSM) está positivamente correlacionada con la frecuencia mensual y estacional, al contrario de la variabilidad anual. La variabilidad en la frecuencia frontal de la TSM es influenciada por el gradiente de temperatura de gran escala, mientras que a escalas menores es evidente la influencia del índice de surgencia costero.

En la climatología de las variables hidrográficas de la Península de Baja California, se describe una capa homogénea con temperaturas y salinidades relativamente menores que le da un carácter subártico durante la primera mitad del año y durante la segunda mitad, sólo la región al norte de Punta Eugenia (28°N) mantiene características subárticas, en tanto que la región sureña recibe el aporte de un flujo de aguas tropicales y subtropicales que resultan de un debilitamiento de los vientos del noroeste (Durazo, 2015). Además, la zona de estudio es dominada por meandros y giros en balance geostrofico y se presentan dos mecanismos de generación de giros: el primero asociado a la geometría de la línea de costa; y el segundo, como producto de la corriente de California, fría y por la contracorriente profunda de California que

proviene del sur (Soto-Mardones *et al.*, 2004)

Los estudios relacionados para encontrar la funcionalidad de la actividad frontal con los organismos para el área de la COBC, han sido escasos. No obstante, en el sistema frontal del noroeste del Pacífico, se presenta una concentración persistente de frentes de temperatura >8 meses/año y concentra la mayor cantidad de frentes (>0.2 km/km²), por lo que las funciones de estos hábitats son relacionadas con la distribución de diferentes organismos como: la ballena azul (*Balaenoptera musculus*), el pez espada (*Xiphias gladius*) y el marlín rayado (*Tetrapturus audax*) (Etnoyer *et al.*, 2004),

Las asociaciones de vertebrados marinos con los frentes oceánicos en interfaces físicas (e. g., transición entre masas de agua) han sido utilizadas para relacionar la migración o forrajeo de las especies, haciendo de estos sitios candidatos para su conservación. Tres puntos clave de importancia ecológica deberán ser considerados para describir y estudiar las asociaciones como son: la accesibilidad, la predictibilidad espacio-temporal y la productividad relativa del frente asociado al forrajeo del hábitat (Scales *et al.*, 2014). Por ejemplo, las localidades de pesca del albacora (*Thunnus alalunga*) al noreste del Pacífico están fuertemente influenciadas por la TSM y la clorofila, así como de la distancia de la costa al frente (Nieto *et al.*, 2015).

La temperatura tiene un fuerte impacto en la fisiología de los peces por lo que juega un papel clave en el hábitat de desove de la sardina. Es así que distintos estudios sugieren que la temperatura funciona como un proxy para delinear muchos de los factores ambientales que modulan directamente la distribución de la sardina (Fiedler, 1983; Jacobson & McCall, 1995; Rodríguez-Sánchez *et al.*, 2002).

Actualmente, los estudios sobre el área de desove de los peces, han utilizado combinaciones de variables oceánicas para conocer y predecir los cambios estacionales e interanuales en el hábitat de desove de la sardina y la anchoveta (Checkley *et al.*, 2000, Weber & McClatchie, 2010, Reiss *et al.*, 2008, Zwolinsky *et al.*, 2011, Lynn, 2003; Fiedler, 1983) y recientemente se ha relacionado a variables

oceánicas (altura dinámica) con el hábitat de desove de pelágicos menores (Asch & Checkley, 2013), donde las variables ambientales (altura dinámica) están relacionadas directa o indirectamente a la mayoría de los predictores del hábitat del desove. Por lo que similar a este trabajo de tesis, las propuestas de investigación sobre el hábitat del desove han cambiado.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la parte sur de la corriente de California localizada frente a la costa occidental de la Península de Baja California, México (Fig. 1). La corriente de California presenta características de ecosistema de frontera oriental, los cuales son considerados como las regiones más productivas del mundo, ya que sustentan un gran porcentaje de las pesquerías mundiales (Belkin, 2009, Chavéz & Messié, 2009). La circulación oceánica es representada por un periodo bien definido en primavera cuando la influencia de la corriente de California es máxima, seguido del verano cuando la lengüeta de la corriente de California se desplaza hacia mar abierto, mientras que al sur de Punta Eugenia, se produce una mezcla entre el agua subártica que proviene del norte y subtropical en verano-otoño (Durazo *et al.*, 2010). Asimismo, la transición entre aguas predominantemente frías de la corriente de California y la mezcla entre agua subártica y subtropical al sur de Punta Eugenia (Durazo *et al.*, 2010), separa regímenes biológicos entre California y la zona sur de Baja California (Moser *et al.*, 1987; 1993).

La circulación estacional frente a Punta Eugenia, consiste de dos giros o meandros ciclónicos separados, y que cuando ambos giros son evidentes, las líneas de corriente indican que el flujo hacia el polo de la contracorriente costera se separa de la costa: una parte del flujo retorna hacia el sur sobre la porción occidental del giro ciclónico del sur, y la otra fluye hacia el este atrapado por el giro ciclónico del norte y, después hacia el polo de nuevo sobre el borde del talud continental (Durazo *et al.*, 2010, Durazo, 2015) ocasionando frentes persistentes en el área.

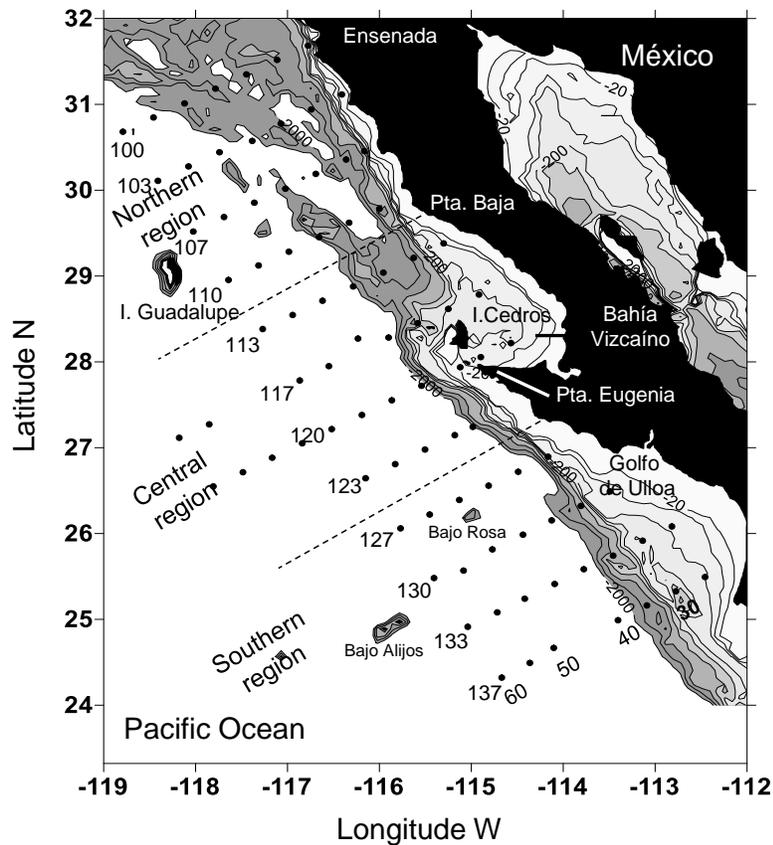


Fig. 1. Área de estudio mostrando el plan básico de estaciones del programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California).

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las investigaciones para conocer el hábitat preferencial del desarrollo y crecimiento de las larvas de peces, se han enfocado en relacionar la distribución y abundancia de las larvas con diferentes variables ambientales y procesos oceánicos. Las representaciones del hábitat han sido realizadas sobre la base de diversas suposiciones. La más simple es que la TSM es el factor principal que afecta la ubicación y extensión del hábitat de crianza de larvas, otras suposiciones utilizan como aproximación de hábitat, a otras variables ambientales o combinación de ellas que pudieran afectar más directamente a las larvas. La necesidad de conocer y predecir los cambios estacionales en el hábitat de crianza de larvas de peces, invita a explorar la relación con los frentes oceánicos en una escala espacial y temporal más amplia, a la que hasta ahora otras investigaciones han realizado en frentes o procesos de

mesoescala. Con la premisa de que los frentes oceánicos funcionan en la retención y mejoran la calidad del hábitat, tanto para los adultos en reproducción y sus productos del desove, surge el interés por analizar la relación entre los sistemas de frentes y la distribución de las larvas de peces.

El sistema de frentes oceánicos que ocurre en la COBC es reconocido por tener la mayor concentración y persistencia de frentes de temperatura de todo el Pacífico noroeste (Etnoyer *et al.*, 2004; Kahru *et al.*, 2012). Esto produce zonas de concentración y enriquecimiento, por que acumulan y retienen larvas y otros organismos, donde la alta productividad biológica es atribuida a una agregación de la densidad que resulta de una alta productividad primaria y secundaria (Franks, 1992; Agostini & Bakun, 2002; Etnoyer *et al.*, 2006). Debido a estas características, las estructuras de frente podría ser un lugar propicio para la agregación de larvas de peces.

IV. HIPÓTESIS

Los frentes oceánicos representan áreas de reproducción, crianza, refugio y alimentación de diferentes organismos marinos, por lo que se espera que estas estructuras contribuyan en la agregación de larvas de peces, bajo la premisa de que los frentes oceánicos favorecen la calidad del hábitat para un mejor desarrollo y supervivencia de larvas de diferentes especies de peces (pelágicos menores y mesopelágicos).

Una segunda hipótesis es que la variación estacional de la frecuencia de frentes en el ecosistema, explica las diferencias en la ubicación y extensión del hábitat de distribución de las larvas.

V. OBJETIVOS

General

Caracterizar la variabilidad estacional de la frecuencia de frentes en la parte sur de la corriente de California, con el objeto de identificar la ubicación y extensión del hábitat de distribución preferencial de las larvas de algunas especies de peces pelágico costeros y mesopelágicos.

Específicos

- Identificar, cuantificar y representar en mapas la distribución de los frentes en la parte sur de la corriente de California durante invierno, primavera y verano
- Asociar la distribución estacional de los frentes en la parte sur de la corriente de California durante invierno, primavera y verano, con las correspondientes distribuciones de la abundancia de larvas de *Sardinops sagax*, *Engraulis mordax*, *Trachurus symmetricus*, *Diogenichthys laternatus* y *Vinciguerria lucetia*
- Estimar las frecuencias de frentes en que las larvas de cada especie se encuentran recurrentemente.

VI. JUSTIFICACIÓN

Si bien se han realizado estudios que relacionan de forma cualitativa la asociación entre la distribución de las larvas de peces con diversas estructuras de mesoescala (e. g., giros, meandros y frentes), y su variabilidad estacional e interanual (El Niño, La Niña) (Moser *et al.*, 1993; Logerwell & Smith, 2001; Funes-Rodríguez *et al.*, 2002; 2009; 2011; Inda-Díaz *et al.*, 2014), no se conocen estudios que incorporen la distribución de los primeros estadios de vida de los peces a nivel regional, en los sistemas frontales en el Pacífico noroeste puesto que la mayoría de los estudios se enfocan a una escala local. No obstante, existen estudios donde a partir de estimaciones de imágenes de satélite (TSM y clorofila) y datos *in situ* de la distribución de huevos son utilizados para

estimar el hábitat potencial del desove de los peces pelágicos menores (*Engraulis mordax*, *Sardinops sagax*) (Reiss *et al.*, 2008). Así como, de otras variables (altura dinámica; capa de mínimo oxígeno) como proxy en la identificación del hábitat de desarrollo de los peces (Asch & Checkley Jr., 2013; Koslow *et al.*, 2011).

De esta forma, el monitoreo a lo largo de la variabilidad del hábitat y mediante la utilización de imágenes de satélite, mejora la información para describir las relaciones entre un hábitat observado y un hábitat estimado (Reiss *et al.*, 2008). Incluso, este tipo de variables ambientales son prometedoras como indicadores ecológicos del hábitat de desove, debido a que integran efectos de múltiples variables oceánicas, que pueden ser medidas con la percepción remota, incluyendo predicciones a través de modelos de circulación oceánica.

Debido a lo anterior, el presente estudio busca abrir una nueva línea en la investigación del ictioplancton, mediante relacionar la distribución de larvas de peces con frentes de temperatura para caracterizar de mejor manera el hábitat preferencial en la distribución de los primeros estadios de vida de los peces. Esto es de particular interés, ya que los frentes de temperatura son zonas producto de un conjunto de procesos físicos (e. g., surgencias, giros, meandros y confluencia de masas de agua) que podrían ofrecer un amplio panorama en la distribución de las especies a una escala regional. A diferencia de otras variables como la temperatura, velocidades geostróficas y la altura dinámica, que solo explican detalles puntuales, pero no engloban procesos físicos.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y procedimientos

Este estudio se realiza con la información de larvas de peces cuyos adultos son representativos de ambientes pelágico y mesopelágico, recolectadas durante seis cruceros oceanográficos estacionales (invierno, primavera y verano) realizados por el programa investigaciones mexicanas de la corriente de California (IMECOCAL) en los años 2006 y 2007. La identificación de los frentes se efectúa mediante el algoritmo de detección de borde (Cayula & Cornillon, 1996), a partir de imágenes satelitales de la temperatura superficial del mar. Para conocer la preferencia de cada especie por un hábitat caracterizado por la frecuencia de frentes, se realiza un análisis de cocientes con intervalos de confianza al 95 %.

Se analizaron las larvas de peces recolectadas en seis cruceros oceanográficos (84 estaciones de muestreo por campaña) realizados por el programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) en la costa occidental de la península de Baja de California, entre Ensenada y Cabo San Lázaro (31°-27°N y 112°-110°O), durante las temporadas de invierno, primavera y verano de 2006 y del 2007 (Fig. 2). Estos cruceros fueron seleccionados por el número de estaciones positivas con larvas de peces y avances de identificación específica de las larvas disponibles. El número total de lances positivos conteniendo larvas de las especies de nuestro interés fue de 390 en las 6 campañas. Las muestras de zooplancton se obtuvieron de arrastres oblicuos entre la superficie y 200 m de profundidad, utilizando una red bongo de 0.6 m de diámetro en su boca (505 µm de luz de malla) provista de un flujómetro para medir el volumen de agua filtrada. El plancton se conservó en una solución de formalina al 4% y borato sódico como solución amortiguadora (Smith & Richardson, 1997).

Análisis de laboratorio

La biomasa del zooplancton recolectado fue medida mediante la técnica de volumen desplazado. El ictioplancton fue separado del zooplancton y las larvas de peces fueron identificadas en su mayoría hasta nivel de especie, utilizando claves

especializadas (Moser, 1996). Los valores directos de la abundancia (datos crudos) fueron estandarizados a número de larvas por cada 10 m² de superficie marina (Smith & Richardson, 1977). Del total de las larvas de peces contabilizadas y estandarizadas se eligieron cinco especies, tres representativas del ambiente epipelágico y dos del ambiente mesopelágico, la elección de las especies se realizó con base a la frecuencia de ocurrencia y la abundancia presentada; las tres especies epipelágicas (*Sardinops sagax*, *Engraulis mordax* y *Trachurus symmetricus*) fueron las que tuvieron una mayor frecuencia de ocurrencia y las especies de mesopelágicos (*Diogenichthys laternatus* y *Vinciguerria lucetia*) presentaron una mayor abundancia a lo largo de los seis cruceros.

Con el fin de seleccionar la mejor escala geográfica para efectuar las relaciones estadísticas entre la frecuencia de frentes y la abundancia de larvas de cada especie se realizó un análisis exploratorio del tamaño de las unidades de área. Para ello, los lances positivos de las campañas del 2006 y del 2007 fueron agrupadas por temporada (invierno, primavera y otoño). Se analizaron tres tamaños de unidad de área (0.5 °, 1° y 2°), seleccionando como unidad de área a los cuadrantes de 2° x 2°, en los que un número de estaciones positivas por cuadrante/ temporada (>5) se consideró pudiera ser representativo para obtener un índice de abundancia promedio, así como la detección de frentes por cuadrante (>0.02; Fig.4).

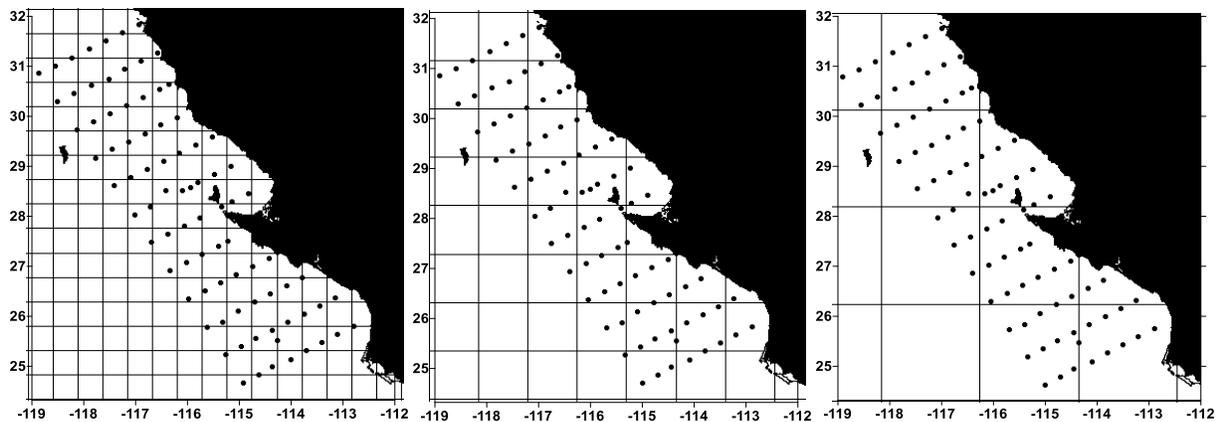


Fig. 2. Diferentes tamaños de cuadrantes en los que se exploró la relación entre el índice de frentes y abundancia de larvas de peces: a) 0.5°x 0.5°, b) 1° x 1° y c) 2° x 2°.

Información ambiental y composición de las imágenes satelitales

La identificación de los frentes se realizó a través de imágenes satelitales semanales del sensor Aqua-MODIS, obtenidas de la página <http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>, las imágenes se procesaron en el programa WIM (Windows Image Manager), con el cual se recortaron y transformaron a través del algoritmo Pathfinder para convertirlas a escala de temperatura superficial del mar (TSM) con resolución espacial de 4x4km.

Para obtener los frentes de temperatura a partir de las imágenes satelitales de TSM se procedió a realizar un análisis exploratorio a partir de diferentes combinaciones de imágenes satelitales de TSM, para lo que se consideró que una campaña de muestreo tiene una duración de aproximadamente dos semanas. El derrotero inicia en la estación más norteña frente a la ciudad de Ensenada, B. C. (31°N) y durante la primera semana (S1) cubre el plan básico de estaciones de muestreo N (Punta Eugenia), aquí denominado zona norte (ZN). De ahí la campaña continua y durante la segunda semana (S2) se cubre el resto del área de estudio hasta la latitud de 24.5° N (frente al Golfo de Ulloa; Fig. 1), aquí denominada zona sur (ZS). Las tres combinaciones de imágenes de TSM que se exploraron fueron:

Combinación 1: Dos imágenes de TSM. Una para la ZN obtenida durante la primera semana del crucero (S1) y otra para la ZS obtenida durante la segunda semana del crucero (S2; Fig. 4a).

Combinación 2: Dos imágenes de TSM. Una para la ZN obtenida durante una semana previa al inicio del crucero (-S1) y otra para la ZS de la semana previa al muestreo en esa zona. Esta última, en tiempo correspondería a la primera semana de la campaña (S1; Fig. 4b).

Combinación 3: Utilizando dos imágenes de TSM para cada zona. Para la ZN, una imagen obtenida durante la primera semana del crucero (S1) y otra de una semana previa al inicio del crucero (-S1). Para la ZS, se utilizó la imagen obtenida durante la segunda semana del crucero (S2) y una imagen de la semana previa al muestreo en esa zona, la que en tiempo correspondería a la primera semana de la campaña

estacional (S1; Fig. 4c).

Las premisas ecológicas y biológicas que soportan las combinaciones mencionadas son:

Combinación 1: Los frentes oceánicos pueden ocurrir en una escala de tiempo desde días hasta meses y el movimiento vertical de los gradientes de temperatura, salinidad y nutrientes están fuertemente asociados a la distribución de los organismos, especialmente en los que carecen de la capacidad de nado como el plancton (Owen, 1986).

Combinación 2.- Los organismos del meroplancton (e.g. larvas de peces) están propensos a dispersarse y colonizar, o pueden ser depredados por organismos mayores. Asimismo, la variabilidad en escalas espacio-temporales (Kaiser *et al.*, 2011) de los procesos físicos y biológicos que ocurren en el océano juegan un papel importante en la distribución de los organismos (Pechenik, 1999).

Combinación 3.- El éxito de una población dependerá de la habilidad de sus larvas de permanecer agregadas durante los primeros meses de vida (Sinclair, 1988) y donde, la variabilidad en la mortalidad durante el desarrollo inicial de sus larvas, es el resultado de la disponibilidad diferencial del alimento (Hjort, 1914; Cushing, 1975).

Para la identificación de los frentes de temperatura en cada imagen de TSM se utilizó el algoritmo de detección de borde implementado por Cayula & Cornillon (1996) y modificado por Diehl *et al.*, 2002, el cual ha sido ampliamente utilizado por diversos autores (e.g., Etnoyer *et al.*, 2004; Kahru *et al.*, 2012, Belkin 2009). El algoritmo se basa en un análisis de histogramas en el cual mide la frecuencia mínima del frente en relación a las frecuencias máximas de las zonas adyacentes, representando al frente con líneas de contorno sobre las imágenes satelitales. El algoritmo se aplicó en una ventana de 32 x 32 píxeles, recomendada como la más adecuada (Etnoyer *et al.*, 2004; Belkin, 2009; Kahru *et al.*, 2012; Fig.3).

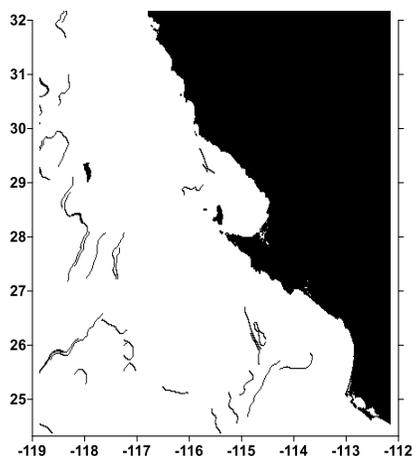


Fig. 3. Ejemplo de imagen resultante con los frentes de temperatura caracterizados como líneas de contorno utilizando ventanas de 32 x 32 píxeles.

El procedimiento para extraer los datos numéricos de los frentes para los cuadrantes de $2^\circ \times 2^\circ$ para cada una de las tres posibles combinaciones de imágenes de TSM fue el mismo. Para cada unidad de área (cuadrantes de $2^\circ \times 2^\circ$) se obtuvo el índice de frecuencia del frente (IFF), el cual es un valor relativo que representa el número de píxeles que ocupa el frente con respecto al total de píxeles del cuadrante analizado (Kahru *et al.*, 2012; Fig.5).

Un ejemplo de los resultados del análisis exploratorio (primavera de 2006) se presenta en la figura 4.

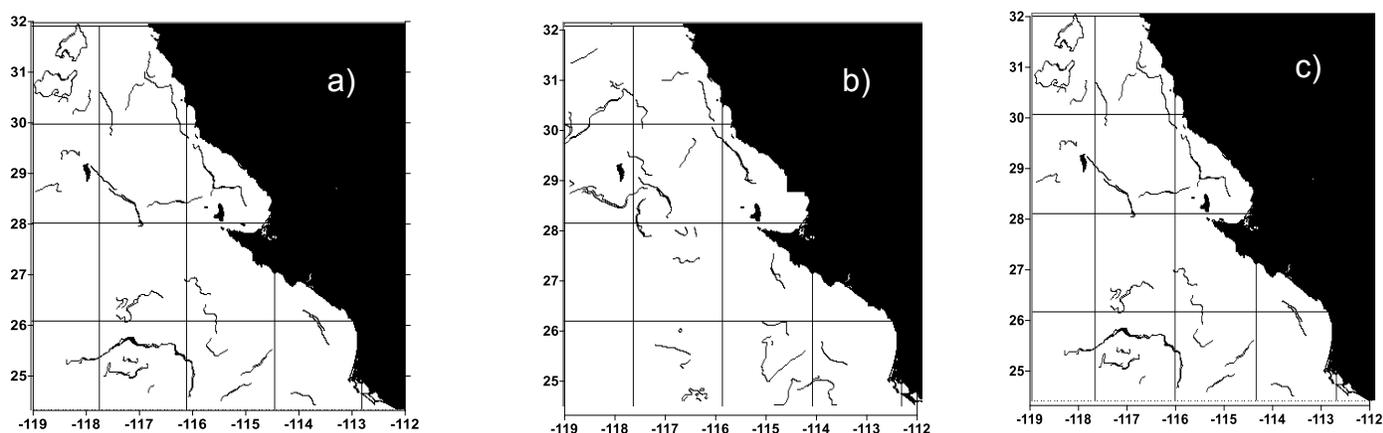


Fig. 4. Frentes resultantes para la primavera de 2006, utilizando diferentes combinaciones de imágenes semanales de TSM: a) Combinación 1: (S1, ZN), (S2, ZS); b) Combinación 2: (-S1, ZN), (S1, ZS); y c) Combinación 3: (-S1+S1, ZN), (S1+S2, ZS).

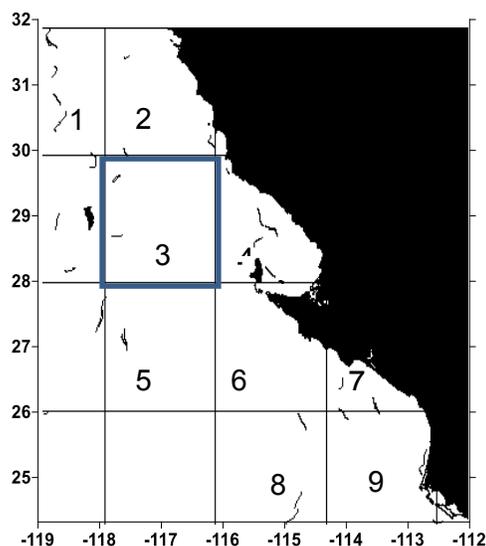


Fig. 5. Área de estudio mostrando los 9 unidades de área (cuadrantes de 2° x 2°) utilizados para los análisis estadísticos de este trabajo.

La tercera combinación fue seleccionada sobre la base de los supuestos planteados y porque se observó que había una mayor coincidencia entre las líneas de contorno que representan a los frentes con los cambios de TSM, cuando los primeros fueron sobrepuestos en las imágenes de TSM de las cuales fueron extraídos. Así mismo, para cada caso se elaboró un diagrama de dispersión donde se observa una tendencia positiva entre la abundancia de larvas y las frecuencias frontales (Anexo 1).

El resultado exploratorio de las frecuencias frontales de las combinaciones 1 y 2 fueron descartadas, porque de forma cualitativa expresaron la menor cantidad de frentes (Fig. 4a, b). Esto mismo se comprobó en los diagramas de dispersión para la combinación 1 (invierno, primavera y verano de 2006 y 2007; Anexo 1).

Análisis de Cocientes

Las curvas de cocientes son una herramienta útil para caracterizar el hábitat de desove de peces, relacionado con parámetros físicos y/o biológicos. Un análisis de cociente es una curva bivariada, que describe la forma de la relación entre las

abundancias relativas del producto del desove (et. it. larvas de peces) y variables ambientales como temperatura, salinidad, profundidad y fitoplancton (e. g. van der Lingen *et al.*, 2001).

Para inferir el hábitat que las larvas de cada especie prefiere en función de la frecuencia de frentes (IFF), se realizó un análisis de cocientes (van der Lingen *et al.*, 2005). Para realizarlo, se establecieron los intervalos de clase, tanto para los datos del IFF como para los valores de abundancia promedio por cuadrante para cada especie. Posteriormente, se calcularon los porcentajes de ocurrencia tanto de la variable biológica $\%xIAPi = xIAPi / \sum xIAPi$, como para la variable ambiental $\%IFFi = IFFi / \sum IFFi$, estimando los cocientes para cada especie de la siguiente forma:

$$Q1 = \frac{IAPi / \sum IAPi}{IFFi / \sum IFFi}$$

Dónde:

Q1 = Es el valor del cociente

IAPi = Es la abundancia promedio de larvas de cada una de las especies por intervalo de clase

IFFi = frecuencia de ocurrencia de los valores de frecuencia frontal entre la sumatoria del número total de valores.

En el análisis, solo los cocientes > 1 fueron considerados indicativos de una selección positiva de la especie, en particular hacia la variable ambiental mientras que los valores < 1 fueron considerados como valores que no son significativos para la selección de la variable ambiental (Van der Lingen *et al.*, 2001).

Para observar la distribución espacial de las larvas de peces a través del sistema de frentes, se sobrepusieron los mapas que muestran ambas variables en la zona de estudio.

VIII. RESULTADOS

Identificación de frentes

De forma cualitativa, en apariencia parecería que un mayor número de frentes ocurrieron en las diferentes temporadas del 2007 (Figs. 6b, 6.1d, 6.2f) con respecto a las del 2006 (Figs. 6a, 6.1c, 6.2e). No obstante, no se encontraron diferencias significativas inter-anales ni intra-anales ($p < 0.05$; Tabla 1; Anexo 2). La longitud máxima de algunos frentes osciló entre 231 a 283 km en las diferentes temporadas de 2006 y 2007, siendo de 478 km el frente más largo en la zona costera entre Punta Eugenia y Ensenada, durante la primavera del 2007 (Fig. 6.1d) y también en la zona oceánica en invierno del 2006 (362 km; Fig. 6a).

Tabla 1. Análisis de Kruskal-Wallis de las frecuencias frontales de ambos años (2006 y 2007) valores significantes con un $p < 0.05$.

IFF	
IFF 2006	$H_{(0.05, 2)} = 0.211$ $p = 0.94$
IFF 2007	$H_{(0.05, 2)} = 0.6032$ $p = 0.73$
IFF 2007 vs 2006	$H_{(0.05, 2)} = 0.2152$ $p = 0.89$
IFF invierno 2006 vs 2007	$H_{(0.05, 2)} = 0.4995$ $p = 0.47$
IFF primavera 2006 vs 2007	$H_{(0.05, 2)} = 2.3879$ $p = 0.12$
IFF verano 2006 vs 2007	$H_{(0.05, 2)} = 3.6043$ $p = 0.05$

A partir de la identificación de frentes se logró asociar a algunas de estas estructuras con la circulación oceánica que ocurrió durante invierno, primavera y verano de 2006 y 2007 (e. g. frentes de surgencia, influencia de la corriente de California, invasión de agua del Pacífico Central y del Pacífico Tropical).

Durante las campañas de invierno, el mayor número de frentes se ubicaron al norte de los 29°N y 30°N en 2006 y 2007, respectivamente (Figs. 6a, b), que coincide con la invasión de aguas de la corriente de California. Además de una zona de surgencia costera entre 29° y 31.5°N en invierno del 2006 (Fig. 6a). Con la influencia de la masa de agua del Pacífico Central, otra serie de frentes se registraron en aguas oceánicas al oeste de Punta Eugenia (28°N). También asociado a la presencia de frentes, fue posible identificar una masa de agua al parecer de origen tropical, hasta más allá de Punta Eugenia (29°N) en invierno de 2007 (Fig. 6b).

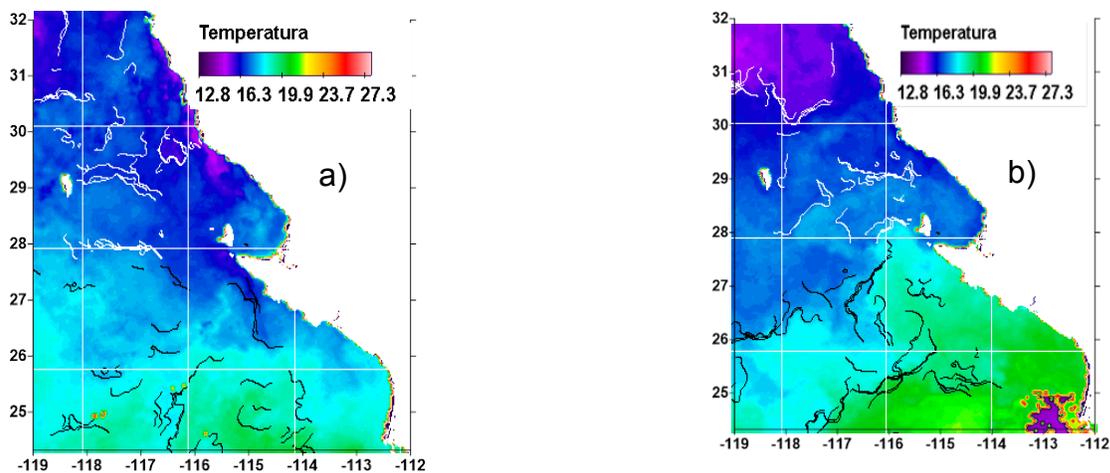


Fig. 6. Caracterización de los frentes de temperatura en 2006 y 2007. Invierno (a, b).

Durante las campañas de primavera, se identifican una serie de frentes a lo largo de la zona costera al norte de Punta Eugenia (28-32°N), mismos que estarían relacionados con surgencias costeras (Figs. 6.1c, d). También se observa que el sistema está dominado ampliamente por la influencia de agua de menor temperatura, asociada con la corriente de California. De forma similar a los muestreos de invierno, en primavera se identifica una serie de frentes oceánicos al oeste del área de estudio, que pudieran ser relacionados con el agua del Pacífico Central, mientras que en el sur,

se ubica la influencia de la masa de agua cálida (24.5-26.5°N; 6c y d).

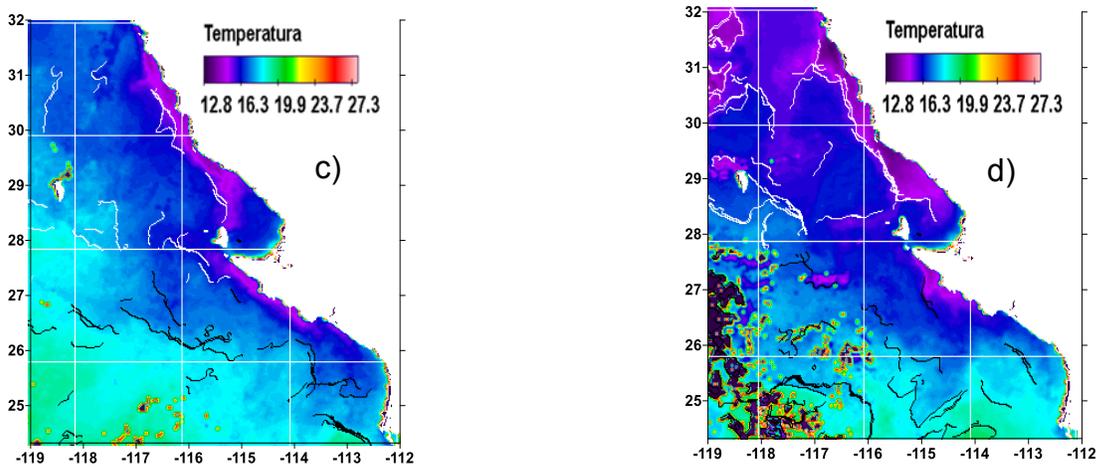


Fig. 6.1. Caracterización de los frentes de temperatura en 2006 y 2007. Primavera (c, d).

Durante el verano, se observa que el sistema de circulación oceánica permite el avance de la masa de agua cálida que proviene del sur, con su mayor influencia hasta la latitud de Punta Eugenia (28°N), por lo que se desarrollan una serie de frentes en el borde de ésta masa de agua que delimitan su avance. También es posible observar en aguas oceánicas la invasión de la masa de agua del Pacífico Central alrededor de los 30°N (Figs. 6.2e, f).

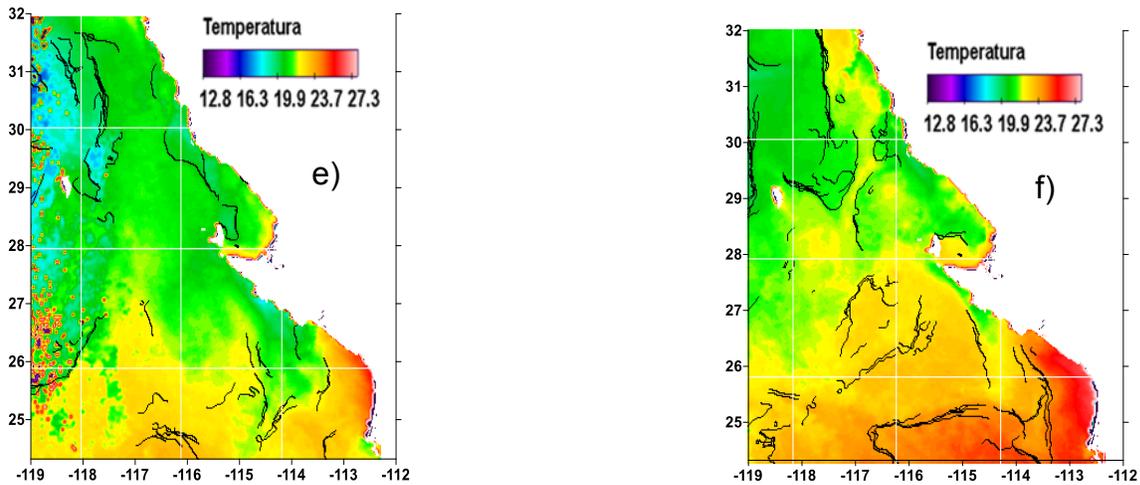


Fig. 6.2. Caracterización de los frentes de temperatura en 2006 y 2007. Verano (e, f).

Distribución de la abundancia de larvas

Las larvas de *Sardinops sagax* se recolectaron en las temporadas de primavera y verano de 2006 y 2007, y únicamente en invierno de 2007 (Fig. 7). En invierno, esta especie ocurrió con abundancia baja (<50 larvas/10m²), con distribución costera y sureña en dos localidades: frente al Golfo de Ulloa (25.5°N, GU) y en Bahía Sebastián Vizcaíno (29.0°N, BSV), (Fig.7b).

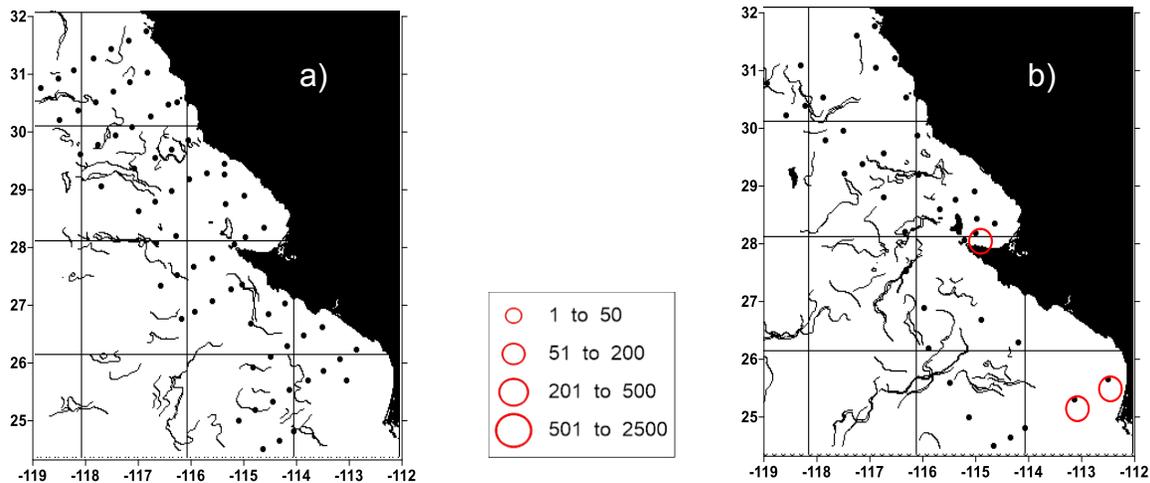


Fig.7. Distribución de *Sardinops sagax* en 2006 y 2007. Invierno (a, b). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

En los muestreos de primavera su distribución fue principalmente norteña (31.5-28.0°N), en aguas cercanas a la costa entre Punta Eugenia (PE) y Ensenada (EN). La abundancia mayor se registró en 2007, asociada a la zona de frentes de surgencia costera (>1000 larvas/10m²); y también fueron abundantes en aguas oceánicas entre el borde exterior de la corriente de California y el Pacífico Central (29-31°N; Figs. 7.1c, d).

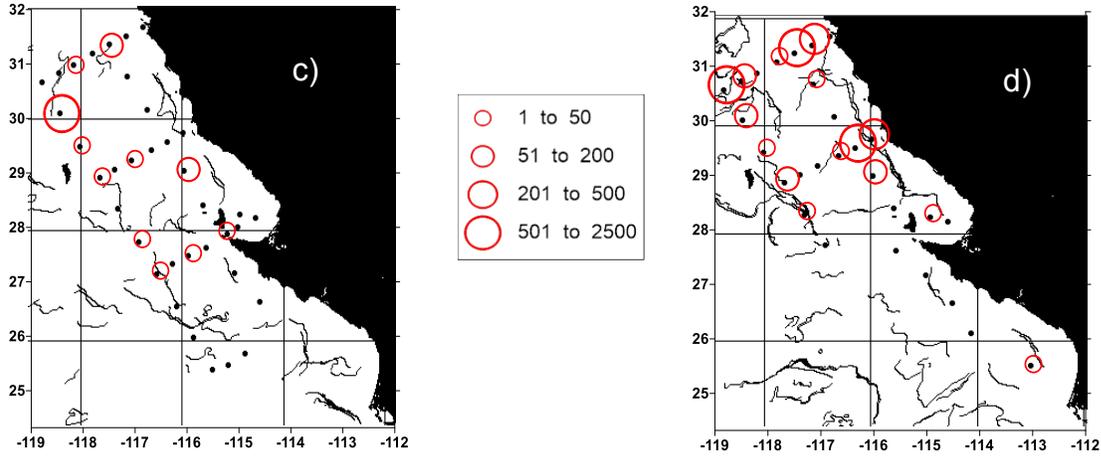


Fig.7.1. Distribución de *Sardinops sagax* en 2006 y 2007. Primavera (c, d). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

En los muestreos de verano, esta especie presentó una amplia distribución costera entre Ensenada (EN) y el GU (31.5-25.5°N) en verano del 2007 (Fig. 7.2e) y fue menos extensa en verano del 2006 (BSV-GU; Fig. 7.2f). Incluso su distribución fue más oceánica alrededor de 26°N en verano del 2006, relacionada con frentes en la zona de confluencia entre la corriente de California con agua del Pacífico Central al oeste y hacia el sur con agua tropical. Así como, coinciden con una zona de frentes del Pacífico Central, frente a BSV en verano del 2007 (Figs. 7.2e, f).

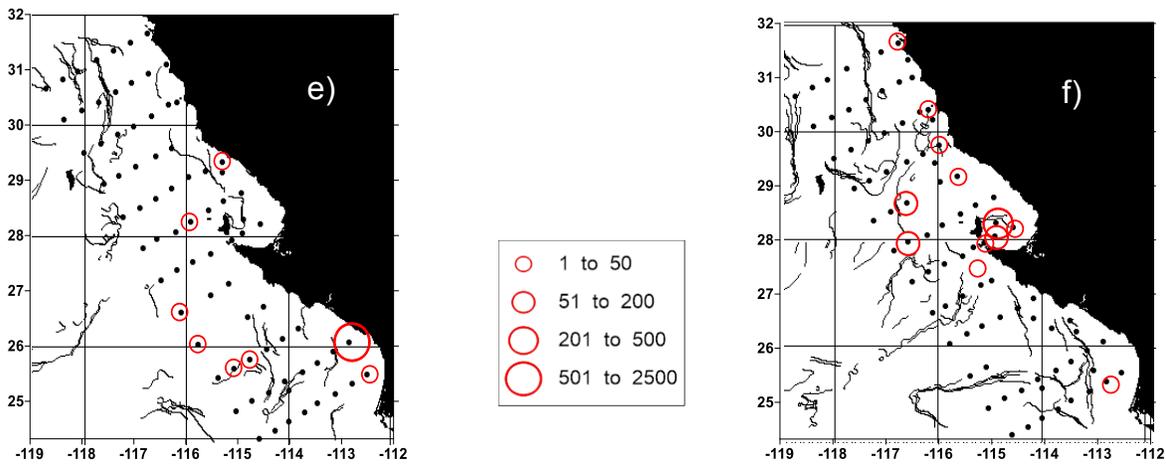


Fig.7.2. Distribución de *Sardinops sagax* en 2006 y 2007. Verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

Las larvas de *Engraulis mordax* se distribuyeron hacia la parte norte de la península (31-28°N) durante las tres temporadas (invierno, primavera y verano) de 2006 y 2007, excepto por un punto aislado con distribución sureña (25°N) en verano del 2007 (Fig. 8f). Su mayor abundancia fue en primavera de ambos años (Figs. 8d, e), y particularmente abundante en primavera del 2007 (>1000 larvas/10 m²), con un máximo oceánico (2500 larvas) frente a Ensenada (Fig. 8e). Su distribución se relaciona con la influencia de la CC hasta la latitud de Punta Eugenia (28°N), entre los frentes costeros generados por la surgencia y el borde exterior de la CC. En los muestreos de verano disminuye su abundancia (<50 larvas/10 m²), pero mantiene una distribución similar y algunas larvas ocurren a lo largo de frentes en Punta Baja en 2007 (Fig. 8f).

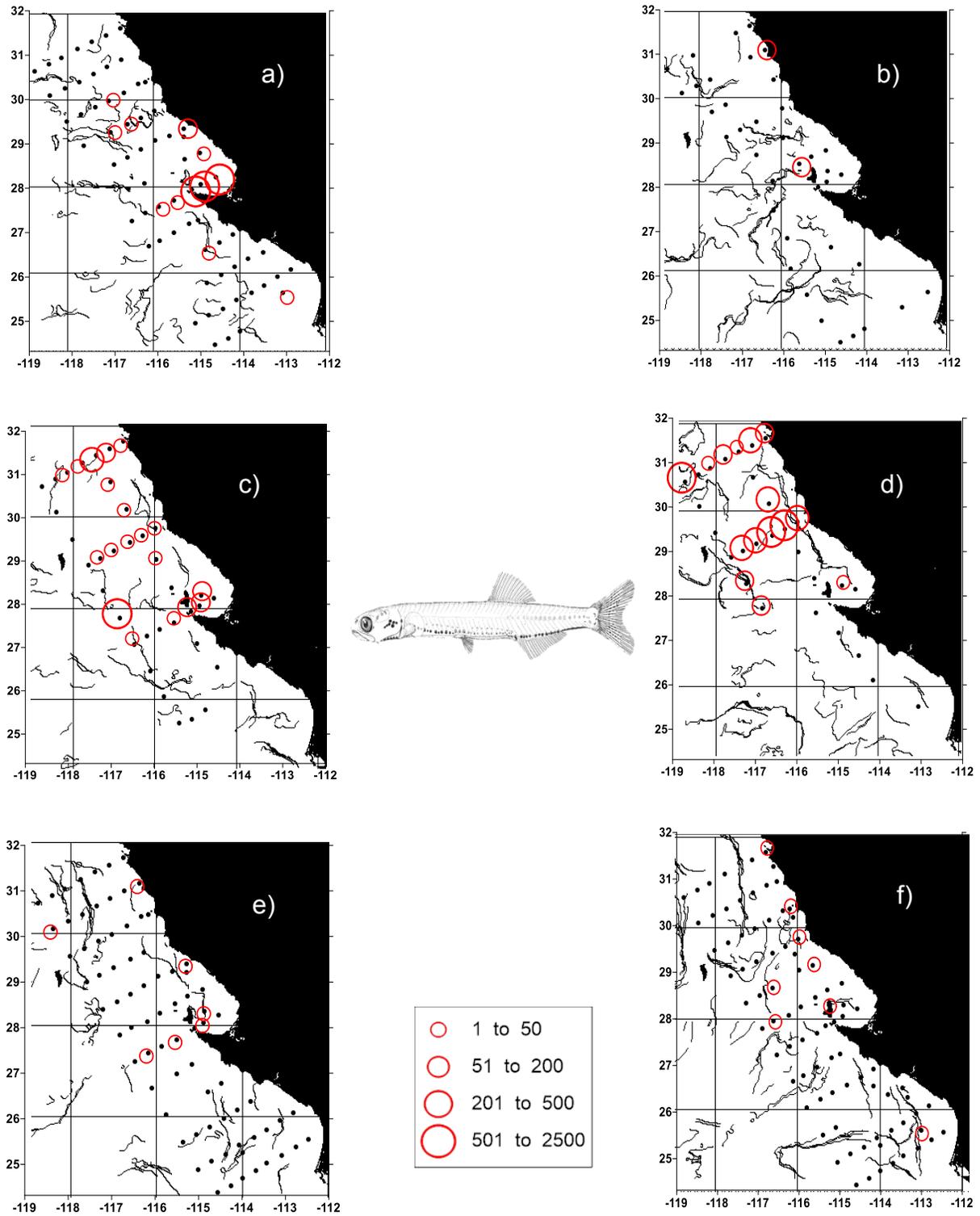


Fig.8. Distribución de *Engraulis mordax* en 2006 y 2007. Invierno (a, b), primavera (c, d) y verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

Las larvas de *Trachurus symmetricus* fueron recolectadas en primavera y verano de 2006 y 2007 e invierno del 2006 (Fig. 9). En invierno su distribución fue delimitada en estaciones costeras y oceánicas al norte del área de estudio (Fig. 9a), y durante primavera y verano presentaron una distribución más amplia (Figs. 9c, d, e, f). Su distribución coincide con la de *E. mordax*, relacionada con la influencia de la CC, entre los frentes costeros generados por surgencias y el borde exterior de la CC en invierno y primavera. En verano alcanzó su distribución más sureña, cercana a los frentes que delimitan la masa de agua tropical (Figs. 9e, f). Esta especie presentó abundancias comparativamente bajas durante el periodo de estudio (≤ 200 larvas).

Las larvas de *Diogenichthys laternatus* y *Vinciguerria lucetia*, cuyos adultos pertenecen a especies mesopelágicas se registraron durante las tres temporadas en 2006 y 2007 (Fig. 10, 11). Estas especies estuvieron ampliamente distribuidas en los muestreos de verano (Figs. 10e, f; 11e, f), posiblemente asociadas con la invasión de agua subtropical-tropical y también fue cuando presentó su mayor abundancia (500-2500 larvas/10m²) a lo largo del área de estudio, excepto por una disminución en su abundancia en la porción central de la península (~27.5-28.0°N). La mayor abundancia fue localizada en el extremo sureño del área y la zona oceánica frente a Punta Baja (29.5°N) relacionada con una serie de frentes. Con densidades menores, también se ubicaron núcleos relacionados con estructuras frontales en el extremo sur y la zona oceánica generados por la confluencia de masas de agua tropical y la del Pacífico Central. Comparativamente, en primavera ambas especies fueron escasas y en menor número de estaciones.

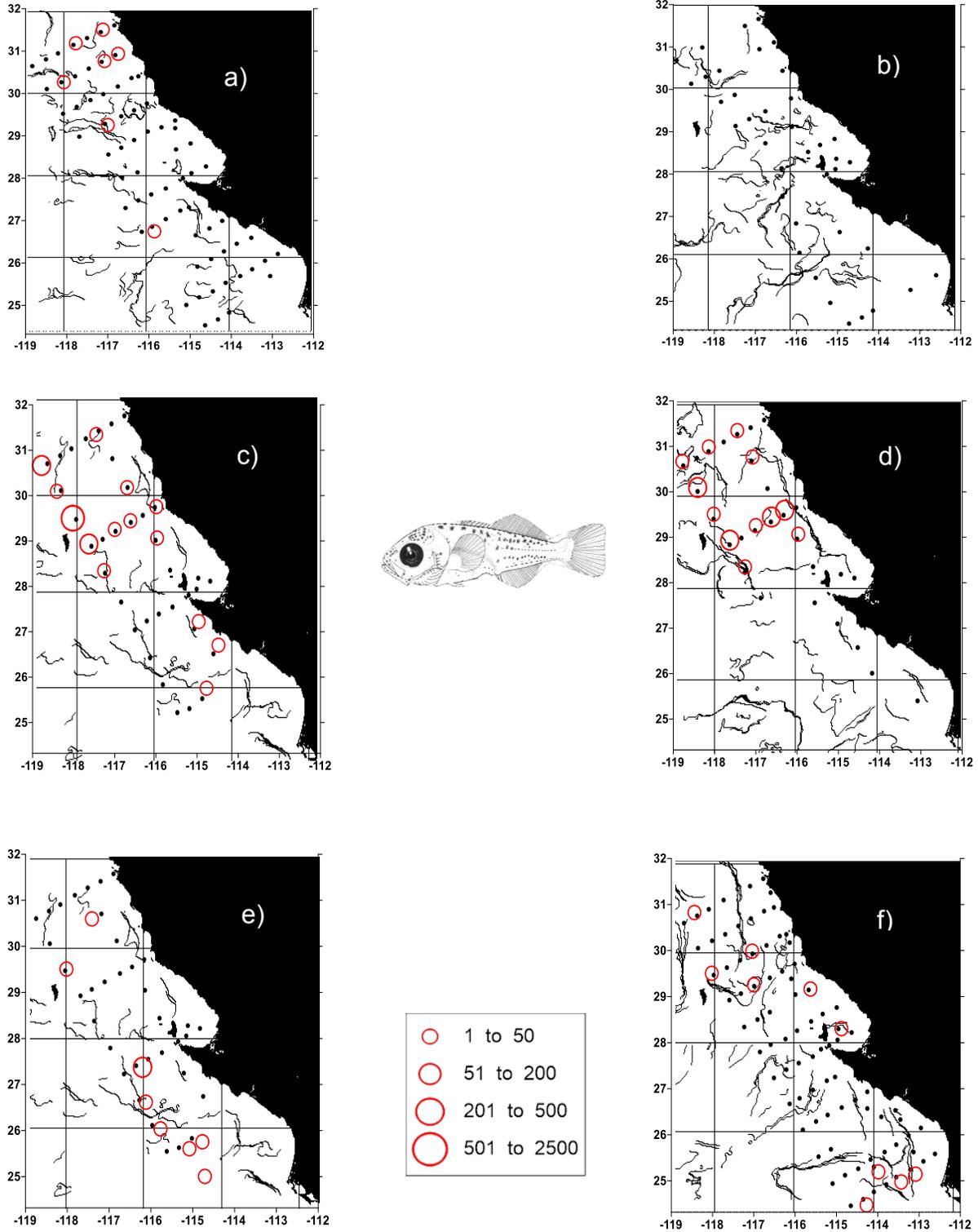


Fig.9. Distribución de *Trachurus symmetricus* en 2006 y 2007. Invierno (a, b), primavera (c, d) y verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

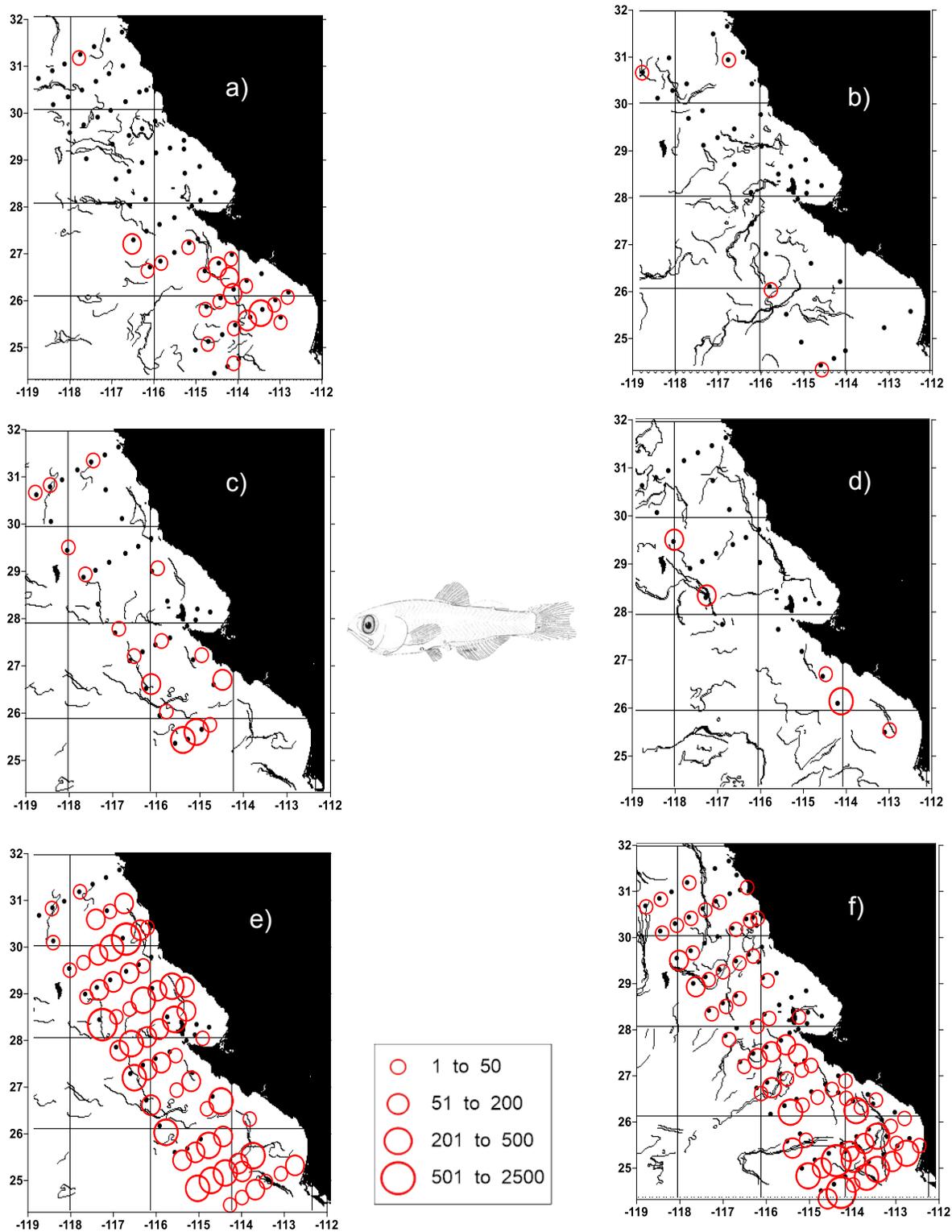


Fig.10. Distribución de *Diogenichthys laternatus* en 2006 y 2007. Invierno (a, b), primavera (c, d) y verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

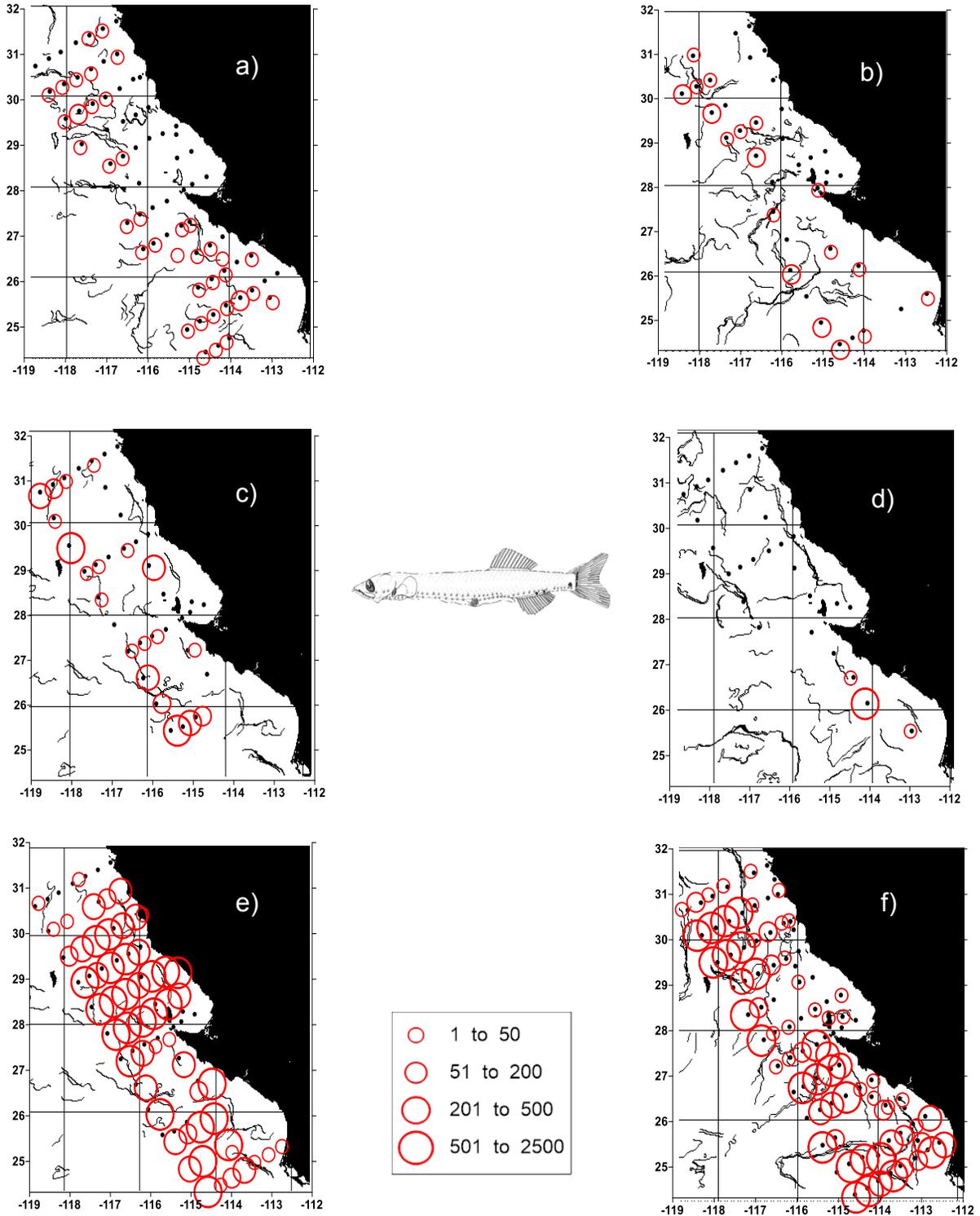


Fig.11. Distribución de *Vinciguerria lucetia* en 2006 y 2007. Invierno (a, b), primavera (c, d) y verano (e, f). El tamaño del círculo indica la abundancia de la especie por estación; y los puntos las estaciones muestreadas.

Análisis de Cocientes

El índice de frecuencia de frentes (IFF), osciló entre un mínimo de 0.025 hasta un máximo de 0.09 por cuadrante, mientras que el índice de abundancia promedio por cuadrante (IAP) fluctuó entre 0 y 1058 larvas/10m² de superficie marina (Tabla 3). Mientras que por temporada fluctuó entre 0 y 476.42 larvas/10m² (Tabla 4).

Tabla 3. Valores mínimos y máximos del índice de abundancia promedio por cuadrante (IAP) para cada una de las especies seleccionadas.

Especie	IAP mínimo	IAP máximo
Sardinops sagax	0	838.82
Engraulis mordax	0	927.10
Trachurus symmetricus	0	86.97
Diogenichthys laternatus	0	332.85
Vinciguerria lucetia	0	1058.98

Tabla 4. Valores del índice de abundancia promedio por cuadrante (IAP) por temporada y año para cada una de las especies seleccionadas.

Especie	IAP invierno		IAP primavera		IAP verano	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007
Sardinops sagax	0	3.7	48.30	131.01	1.25	5.70
Engraulis mordax	22.60	1.64	36.72	183.62	0.59	1.82
Trachurus symmetricus	0.55	0	13.41	4.23	4.3	1.3
Diogenichthys laternatus	68.91	9.06	18.82	18.93	94.07	70.32
Vinciguerria lucetia	31.99	7.23	76.52	108.36	476.42	424.19

Las especies epipelágicas (pelágicos menores) tuvieron una distribución preferencial (>1 del cociente) en valores intermedios del IFF. Las larvas de *S. sagax* muestran un hábitat preferencial asociado a un valor intermedio y alto (0.04, 0.05, 0.08 IFF). De forma similar, *E. mordax* ocurre en un hábitat preferencial con valores intermedios y altos (0.05, 0.08 IFF), mientras que para las larvas de *T. symmetricus* se identifica una preferencia en valores bajos (0.01) e intermedios-altos (0.05, 0.08) del IFF.

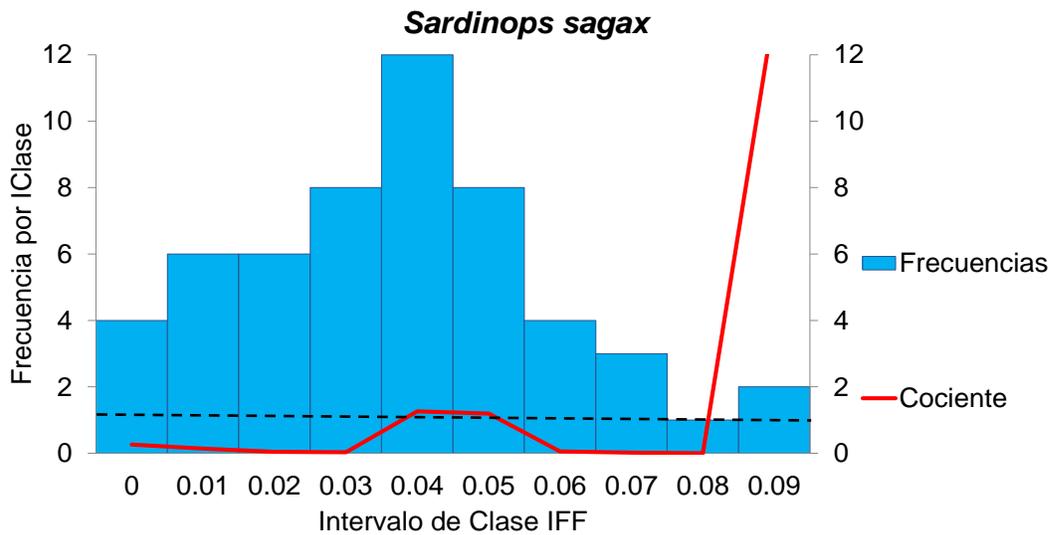


Fig.12. Línea de cociente para la abundancia de *Sardinops sagax* (línea roja) respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

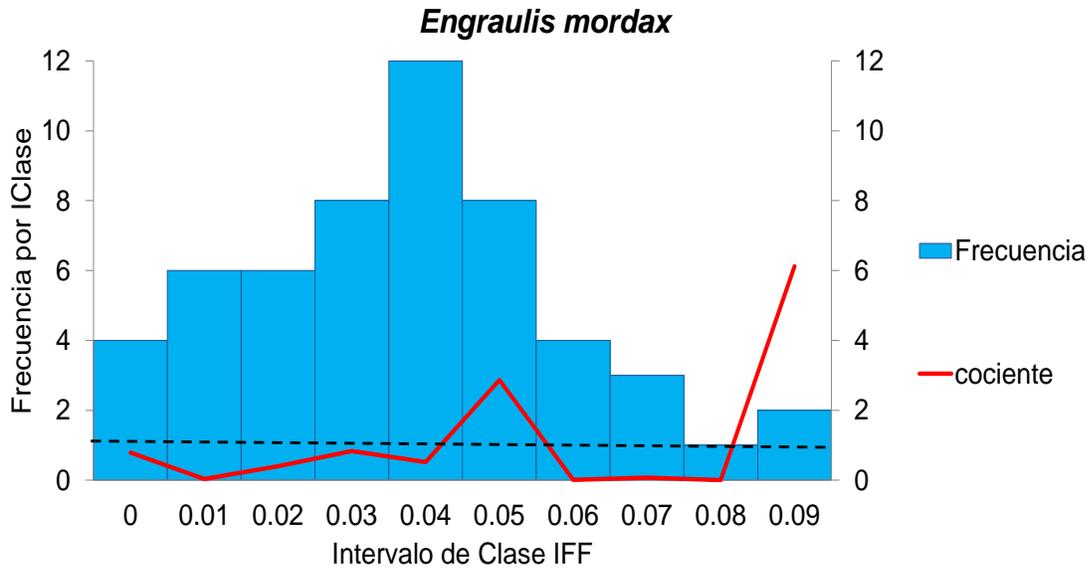


Fig.13. Línea de cociente para la abundancia de *Engraulis mordax* (línea roja) con respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

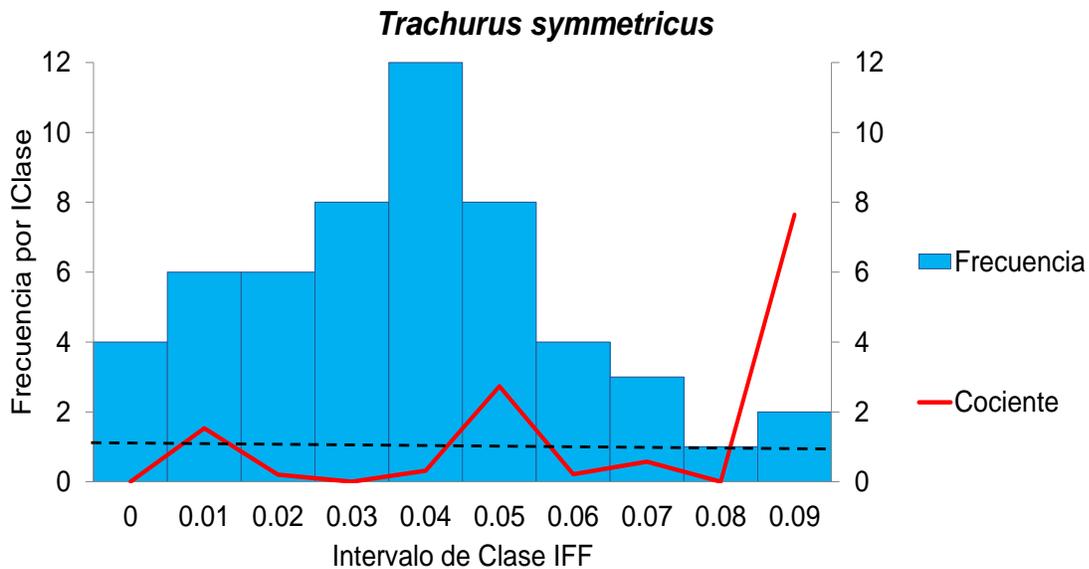


Fig. 14. Línea de cociente para la abundancia de *Trachurus symmetricus* (línea roja) con respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

Las especies mesopelágicas mostraron diferencias en la relación entre las frecuencias frontales y el índice de abundancia. Las larvas de *D. laternatus* ocurrieron en valores bajos e intermedios de IFF (0.03, 0.04-0.07) y *V. lucetia* entre valores intermedios y ligeramente altos (0.05-0.07 IFF) en correspondencia a su alta abundancia y amplia distribución.

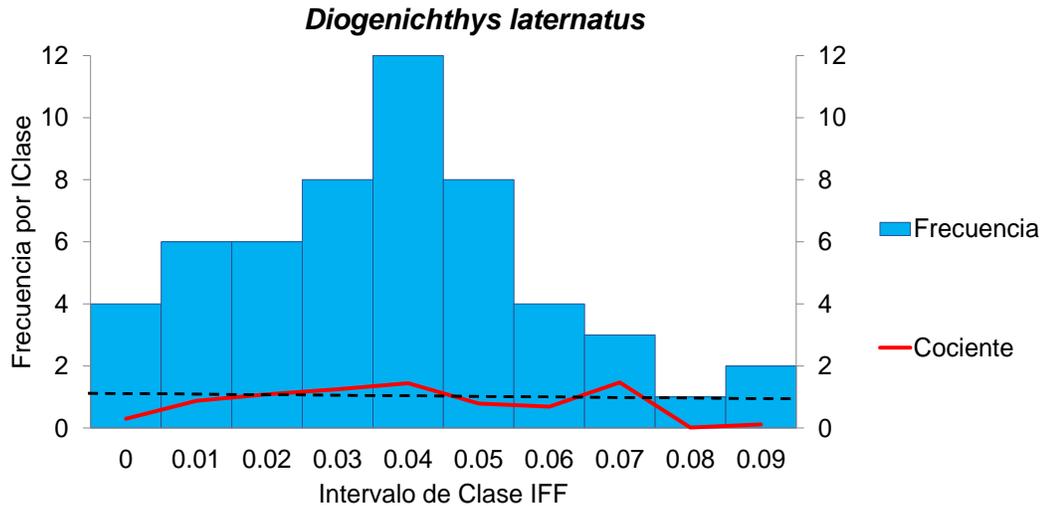


Fig.15. Línea de cociente para la abundancia de *Diogenichthys laternatus* (línea roja) con respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

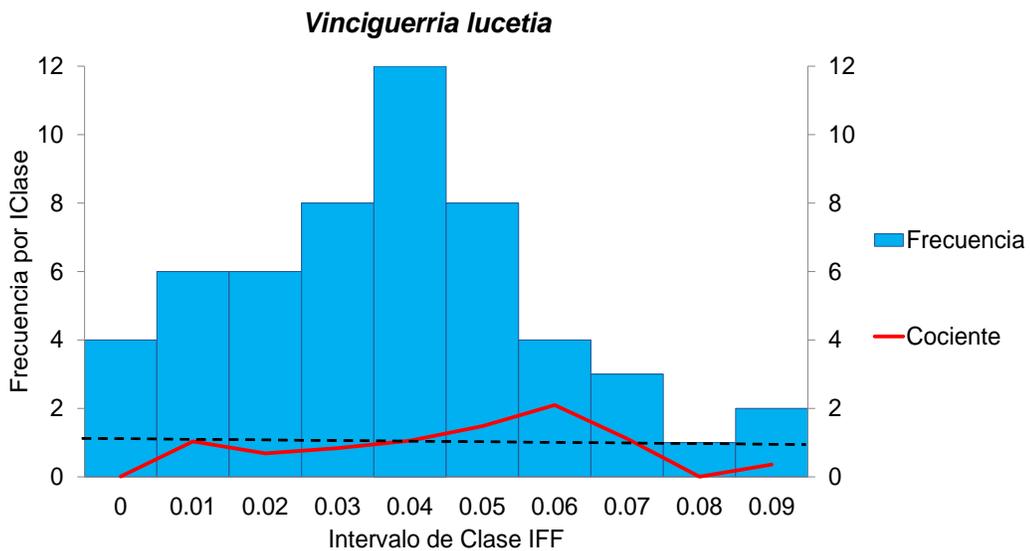


Fig.16. Línea de cociente para la abundancia de *Vinciguerria lucetia* (línea roja) con respecto al intervalo de clase del índice de Frecuencia de Frente (IFF). Las barras muestran la frecuencia para cada intervalo de clase del IFF. La línea punteada (negra) es el valor de referencia para el cociente (=1).

IX. DISCUSIÓN

Los frentes oceánicos son estructuras que favorecen el desarrollo y supervivencia de las larvas de peces y además, se les ha asociado a áreas de reproducción, crianza, refugio y alimentación de diferentes organismos marinos. En este estudio se analiza el acoplamiento entre la distribución de las larvas de peces y las estructuras de frentes, con el objeto de cuantificar su recurrencia e identificar diferencias en la ubicación y extensión del hábitat de distribución de las larvas.

Sistema de frentes

A lo largo del noroeste del Pacífico, menos del 1% del área exhibe una concentración persistente de frentes de temperatura dentro y entre años (>8 meses/año; >0.2 km/km²; Etnoyer *et al.*, 2004). En el área de estudio (COBC), a pesar de ser una pequeña porción de la extensión del noroeste del Pacífico, se presentó una notable persistencia de frentes a lo largo del año; sin que hubiera diferencias significativas en la variabilidad interanual (2006 y 2007). Esto tiene relación con el centro de máxima densidad de frecuencia de frentes de temperatura que se ubica frente a la península de Baja California (Kahru *et al.*, 2012). Lo cual puede ser atribuido a la alta variabilidad estacional en la dinámica oceánica en la parte sur de la CC (i. e., surgencias, meandros, giros y tres tipos de masas de agua (Soto-Mardones *et al.*, 2004; Durazo, 2015; Perez-Brunius *et al.*, 2007).

De igual forma, no hubo diferencias significativas entre muestreos de la misma temporada. La generación de frentes de la COBC está relacionada con la variabilidad estacional en la dinámica oceánica, como es observada en la climatología de variables hidrográficas (Durazo *et al.*, 2010; 2015) y la generación de giros y meandros (Soto-Mardones *et al.*, 2004). De la misma forma en que la parte sur de la CC forma parte de los ecosistemas de frontera oriental, considerados de una dinámica oceánica y productividad alta (Belkin, 2009, Chavéz & Messié, 2009). Los frentes generados en invierno y primavera corresponden al avance del flujo hacia el sur de la CC, caracterizada por una capa homogénea de carácter subártico que se mezcla en su

recorrido hacia el sur. De igual forma que el esfuerzo del viento origina la surgencia costera, principalmente en primavera. En contraste, la generación de frentes y giros durante el verano correspondería al avance de la masa de agua subtropical-tropical por el sur, así como la formación de meandros en la zona oceánica, al oeste de la COBC, producto del avance de la masa de agua del Pacífico Central.

En invierno, la mayor cantidad de frentes se observaron en la parte oceánica, al norte del área de estudio, al parecer relacionado con el desplazamiento del flujo de la CC en invierno (Lynn & Simpson, 1987). No obstante, un número de frentes menor fueron identificados en invierno del 2006 (0.029 IFF), con respecto al del 2007 (0.037 IFF). La presencia menor de frentes pudiera atribuirse al efecto de las anomalías negativas de la temperatura y la salinidad, que caracterizaron el predominio de la masa de agua subártica en invierno de 2006 (Peterson *et al.*, 2006). En contraste, las anomalías de temperatura positivas dentro y fuera de la costa y el debilitamiento de la CC (Goericke *et al.*, 2007), así como de gradientes de salinidad fuertes, asociados con la presencia de una masa de agua salina y cálida hacia el oeste y noroeste de Punta Eugenia (Durazo, 2009), contribuyeron con un mayor número de frentes, tanto al norte y sur del área de estudio en invierno del 2007. En primavera, la generación de frentes a lo largo de la costa puede ser relacionada con el predominio de la CC, con temperaturas bajas asociadas a la masa de agua subártica, pero de forma importante la surgencia costera contribuyó con la generación de frentes, sobre todo en primavera cuando es más intensa (Goericke *et al.*, 2007).

En general, la distribución de los frentes de temperatura durante el verano podría estar asociada con el avance de la masa de agua cálida proveniente del sur. Contrariamente, el origen y ubicación de los frentes en invierno del 2006 pueden estar asociados a diferentes fuentes. La presencia de un giro ciclónico frente a Punta Eugenia que frena el flujo de la CC y permite el avance de la masa de agua cálida (Peterson *et al.*, 2007), en el que una serie de frentes son identificados en el borde de la masa de agua; y en agua oceánicas, debido a la invasión de la masa de agua del Pacífico Central (alrededor de los 30°N). Por su parte, en verano del 2007, además de

la influencia de la masa de agua cálida, una serie de frentes (29° y 31°N), son originados por la presencia de un meandro (~28°N), al mismo tiempo que un giro anticiclónico restringe el flujo de la CC, entre el norte y sur de los 28°N (McClatchie *et al.*, 2008).

Variabilidad estacional e interanual de la distribución y abundancia de larvas

De acuerdo con Moser *et al* (1993), *Sardinops sagax* presenta dos incrementos en su abundancia: uno en invierno hacia el sur de Punta Eugenia y otro en verano alrededor de Punta Eugenia. Sin embargo, en invierno de 2006 no se encontró y fue escasa en 2007, con abundancia mayor en primavera en la parte norte del área de estudio. Al parecer el incremento en su abundancia en primavera tiene relación con la aparición de las surgencias costeras y el predominio de la CC, como es indicado en la variabilidad climática y circulación de corrientes en esta temporada (Goericke *et al.*, 2007; Durazo, 2009; 2015). No obstante, la temperatura y la salinidad tienden a ser factores limitantes en su distribución, con preferencia por áreas donde existe una baja salinidad, temperaturas templadas y valores altos de clorofila (Emmet *et al.*, 2005). Esto ayudaría a explicar su disminución en invierno, relacionado con una alta salinidad y disminución de la clorofila (Peterson *et al.*, 2006). Durante el segundo incremento de *S. sagax* en verano, su distribución fue más sureña en 2006, mientras que fue limitada en aguas al norte de Punta Eugenia en verano del 2007.

Engraulis mordax presenta un máximo de abundancia en invierno, disminuye en primavera y es escasa en verano entre el sur de California y Punta Eugenia de acuerdo con Moser *et al* (1993). A diferencia de esto, sus larvas fueron muy escasas en invierno y abundantes en primavera, pero disminuyó en verano. Las larvas de esta especie se encontraron principalmente al norte de Punta Eugenia en invierno, primavera y verano de 2006 a 2007. No obstante, en California (centro y norte) no hubo larvas de *E. mordax* durante 2006, lo que pudiera estar relacionado con un cambio significativo en las anomalías de temperatura de cálidas a frías (Auth, 2008). El periodo de enero a abril del 2006 estuvo caracterizado por un enfriamiento, seguido de un calentamiento moderado El Niño de junio 2006 a febrero 2007 (Peterson *et al.*, 2006). Lo cual

significaría que *E. mordax* es sensible a condiciones extremas de enfriamiento y calentamiento. La distribución de las larvas *E. mordax* en COBC fue tanto en estaciones costeras como oceánicas, siguiendo el centro de la CC, entre las surgencias costeras y el borde exterior de la CC. A diferencia de lo observado al sur de California con distribución costera que se relaciona con salinidades comparativamente altas y aguas templadas (Checkley *et al.*, 2000) y principalmente oceánica en regiones norteñas asociadas a la pluma del Río Columbia (Emmet *et al.*, 1997).

Moser *et al.* (1993) mencionan que *Trachurus symmetricus* incrementa su abundancia en invierno y es máxima en primavera, disminuyendo en verano. Esta especie se distribuye preferentemente en aguas oceánicas al sur de California y frente a Baja California (MacCall & Stauffer, 1983; Moser *et al.*, 1993). En consistencia con la temporada de máxima abundancia en primavera en la COBC y con distribución en aguas costeras y mayor abundancia en aguas oceánicas. La distribución de sus larvas se ubicó entre las surgencias costeras y el borde exterior de la CC, similar a la distribución de *E. mordax* en primavera. En verano, *T. symmetricus* presentó su más amplia distribución sureña (frente al Golfo de Ulloa), donde ha sido reportada con poca frecuencia (Moser *et al.*, 1993). En cambio en invierno aunque era de esperar una mayor densidad, fue escasa en 2006 y no se observó en 2007, probablemente debido a un calentamiento moderado El Niño de junio 2006 a febrero 2007, ya que esta especie está fuertemente relacionada con temperaturas templadas y por lo tanto el núcleo del desove se desplaza hacia el norte de Ensenada (Ahlstrom & Ball, 1954; Moser *et al.*, 1993).

Moser *et al.* (1993) mencionan que las larvas de *Diogenichthys laternatus* y *Vinciguerria lucetia* se presentan durante todo el año y son más abundantes al sur de Punta Eugenia en aguas oceánicas en verano. De forma similar en este estudio se encontró que las larvas ocurrieron a lo largo del año, con máximos de abundancia en verano. Estas especies han sido descritas como de afinidad subtropical-tropical y amplia distribución a lo largo de la COBC (Ahlstrom, 1969; De la Cruz-Agüero, 1991; Moser *et al.*, 1993; Funes-Rodríguez *et al.*, 2002; Jiménez-Rosenberg *et al.*, 2010). En

verano su incremento en la abundancia y amplia distribución (costa-océano), puede ser relacionado con el avance de la masa de agua tropical con un flujo hacia el norte (Goericke *et al.*, 2007; MacClatchie *et al.*, 2008; Durazo *et al.*, 2010; 2015). Es de interés señalar que durante la primavera estas especies se localizaron en aguas oceánicas y al sur del área, asociadas a la masa de agua del Pacífico Central y por el sur, a la masa de agua Tropical.

Distribución de larvas en el sistema de frentes

Las comunidades del plancton y de las larvas de peces por lo regular están estructuradas en asociaciones, en estrecha relación con las características del ambiente (Cowen *et al.*, 1993). La identificación de las áreas propicias de distribución de las larvas en relación a los cambios en las condiciones oceánicas, son de gran interés debido a la estrecha tolerancia de los primeros estadios de vida de los peces, con respecto a los adultos (Portner & Farrell, 2008). Por ejemplo, la importancia de los sistemas de frentes en la atracción de peces pelágicos, mamíferos marinos y otros organismos contribuye en su distribución (Etnoyer *et al.*, 2004; 2006; Carpi *et al.*, 2015) y por lo que respecta a las especies de peces desovantes, estos sitios influyen en su distribución y por consiguiente en los organismos del plancton. No obstante, la relación entre los organismos del plancton y los sistemas frontales, ya sean hidrográficos, por marea o incluso por aportes de ríos han sido estudiados a una escala local (Moser *et al.*, 1993; Inda-Díaz *et al.*, 2014; Munk *et al.*, 2003, Danell-Jimenez *et al.*, 2009, Sánchez-Velasco *et al.*, 2012), en el que los frentes pudieran actuar como barreras en la retención de organismos (Inda-Díaz *et al.*, 2014).

En investigaciones recientes, la caracterización del hábitat del desove de especies de peces pelágicos menores se ha dirigido al estudio de una combinación de variables oceánicas. La importancia de los giros en la retención o dispersión de las larvas (Bakun, 1997; Logerwell & Smith, 2001; Lynn 2003; Asch & Checkley, 2013), incluso de la importancia de la variabilidad hidrográfica que determina el enriquecimiento con nutrientes, la disponibilidad de alimento y la retención de larvas de peces, han cobrado la atención por su estudio (Sinclair, 1988; Agostini & Bakun, 2002;

Reiss *et al.*, 2008). Por ejemplo, la altura dinámica explican el comportamiento de elegibilidad del hábitat de desove de los pelágicos menores (Asch & Checkley, 2013) que comparten un nicho particionado, donde *E. mordax* desova en aguas costeras, *T. symmetricus* en aguas oceánicas y *S. sagax* en la zona de transición, entre estas dos áreas, similar a la distribución observada en la COBC.

Las especies epipelágicas ocurrieron en aguas con temperaturas comparativamente menores, relacionadas con la influencia de la CC (Peterson *et al.*, 2006, Goericke *et al.*, 2007; MacClatchie *et al.*, 2008). Estas especies ocurrieron de invierno a verano, con mayor abundancia en primavera, en consistencia con otros autores (Ahlstrom & Ball, 1954; McCall & Stauffer, 1983; Methot, 1983; Emmet *et al.*, 1997; Moser *et al.*, 1993; Moser, 1996; Checkley *et al.*, 2000). Durante la primera mitad del año una capa homogénea con temperaturas y salinidades relativamente menores de origen subártico es dominante a lo largo de la COBC (Lynn, 2003; Durazo, 2015). Esto tiene relación con la generación de frentes de diferente origen, que coinciden con la invasión de aguas de la corriente de California y una zona de frentes generados por las surgencias costeras, principalmente en primavera. De forma similar, es posible identificar una zona de frentes, en la confluencia con la masa de agua de origen subtropical-tropical, al sur y suroeste del área de estudio.

Asimismo estas especies mostraron una preferencia en frecuencias frontales con valores de intermedios a altos, lo que confirma la importancia de estas estructuras en la agregación de los organismos larvales como ha sido mencionado en otros estudios (Carpi *et al.*, 2015). A su vez, estos valores de frecuencias frontales muestran una dinámica oceanográfica compleja, en los que las especies pelágicas aprovechan para alimentarse (Hazen *et al.*, 2013) y además funcionan como zonas de alta diversidad biológica (Scales *et al.*, 2014). Al respecto, se ha dicho que la localidad y extensión de áreas de retención geográficamente estables determinan la localización del sitio de desove (Iles & Sinclair, 1982). Y además, que dependerá de la habilidad de sus larvas de permanecer agregadas durante los primeros meses de vida (Sinclair, 1988), porque la disponibilidad diferencial del alimento, determinará la variabilidad en la mortalidad y

supervivencia (Hjort, 1914; Cushing, 1975). Por otro lado, la concentración de frentes de temperatura es un buen indicador de que éstos influyen de manera positiva en la distribución y agregación de las especies pelágicas, ya que al preferir zonas con una concentración intermedia y alta de frentes indica que estas zonas son altamente productivas.

Las especies mesopelágicas (*V. lucetia* y *D. laternatus*) con máximos poblacionales asociados al Pacífico Tropical Oriental, presentan un periodo reproductivo a lo largo del año, pero son más abundantes en verano, hecho que coincide con el periodo de mayor actividad reproductiva (Moser *et al.*, 1993; Moser, 1996; Funes-Rodríguez *et al.*, 2011). Las especies mesopelágicas mostraron valores positivos (>1) en un amplio rango de frecuencias frontales. Esto es el resultado de su amplia distribución, con el avance de la masa de agua subtropical-tropical en verano, aunado a las zonas de confluencia con el Pacífico Central en invierno y primavera, como ha sido descrito en la distribución de estas especies en otros estudios (Moser *et al.*, 1993; Funes-Rodríguez *et al.*, 2002; 2011; Jiménez-Rosenberg *et al.*, 2007; 2010).

A su vez, la zona de estudio, es dominada por meandros y giros en balance geostrófico, asociados a la geometría de la línea de costa y la circulación de corrientes (Soto-Mardones *et al.*, 2004), que pudieran influir en la generación de frentes. La distribución de la abundancia fue máxima en verano donde estuvo dominada por la presencia de meandros y giros que delimitaron el avance de la masa de agua cálida hacia el norte y la masa de agua subártica hacia el sur (Goericke *et al.*, 2007; McClatchie *et al.*, 2008). La presencia de giros y meandros en el verano resulta en un mayor dinamismo en la oceanografía de la COBC y por consiguiente, en una mayor distribución de los frentes de temperatura. De esta forma, la distribución de las larvas de mesopelágicos ocurrió en un amplio rango de frecuencias frontales en la COBC, lo cual nos indica que sí influyen en su distribución, pero en menor medida en comparación con las especies epipelágicas.

El presente estudio identifica que la distribución de las larvas de especies de peces epipelágicos y mesopelágicos son modulados por los frentes de temperatura y dependiendo de las especie, existe un mayor o menor acoplamiento y por consiguiente, un mayor éxito reproductivo para los adultos y una mayor retención de larvas y muy probablemente un mejor desarrollo y supervivencia.

X. CONCLUSIONES

La costa occidental de la Península de Baja California mostró una concentración y persistencia de frentes de temperatura en la variabilidad estacional e interanual.

La variación estacional de la frecuencia de frentes determinó las diferencias en la ubicación y extensión del hábitat de distribución de las larvas.

Se encontró una relación de intermedia a alta entre la presencia de frentes de temperatura y la distribución de la abundancia de larvas de peces cuyos adultos pertenecen a diferente hábitat (*Sardinops sagax*, *Engraulis mordax*, *Trachurus symmetricus*, *Vinciguerria lucetia* y *Diogenichthys laternatus*). No obstante, las especies mesopelágicas, debido a su alta abundancia y distribución estuvieron presentes en un amplio rango de frecuencias de frentes.

XI. RECOMENDACIONES

Los frentes oceanograficos al ser zonas de convergencia diferentes especies de vertebrados marinos las utilizan como áreas para migración o forrajeo haciendo de estos sitios candidatos para su conservación. La accesibilidad, predictibilidad espacio-temporal y productividad relativa del frente asociado al forrajeo del hábitat o a la selección del mismo por las especies son aspectos claves de importancia ecologica (Scales *et al.*, 2014).

De esta forma sugerimos que si bien, nuestro trabajo da una nueva respuesta hacia la distribución de las especies de peces en especial las larvas de peces descritas, aun hace falta realizar estudios que describan los procesos oceanográficos

asociados a la generación de un frente de temperatura y como éste influye en la distribución vertical de las larvas de peces, así como incluir otras variables que puedan complementar la elección del hábitat favorable del desove de las especies de peces marinos.

XII. BIBLIOGRAFÍA

- Agostini-Vera, N. & A. Bakun. 2002. Ocean triads in the Mediterranean Sea: Physical mechanism potentially structuring reproductive habitat suitability (with example application to European anchovy, *Engraulis encrasicolus*). *Fish. Oceanogr.* 11(3):129-142.
- Ahlstrom, E.H. & O.P. Ball. 1954. Description of eggs and larvae of jack mackerel (*Trachurus symmetricus*) and distribution and abundance of larvae in 1950 and 1951. *Fish. bull.* 97. (56):225-234.
- Asch, R.G. & D.M. Checkley Jr. 2013. Dynamic height: A key variable for identifying the spawning habitat of small pelagic fishes. *Deep-Sea Res. I.* 71:79-91.
- Auth, T.D. 2008. Distribution and community structure of ichthyoplankton from the northern and central California current in May 2004-06. *Fish. Oceanogr.* 17(4):316-33.
- Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean: Ocean processes and marine population *Dynamics*. California Sea Grant College System, NOAA. 323p.
- Bakun, A. 2006. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive. *Adv. Sci. Ma.* 70:105-122.
- Belkin, I.M., R. Krishfield & S. Honjo. 2002. Decadal variability of the North Pacific polar Front: subsurface warming versus surface cooling. *Geophys. Res. Lett.* 29(9):1944-8007.
- Belkin, I.M., P.C. Cornillon & K. Sherman. 2009. Fronts in large Marine Ecosystems, 223-236. En: Briggs, J.C (Ed.) *Progress Oceanogr.* Marine zoogeography. McGraw Hill, EUA, 475 p.
- Bograd, S.J. & R. Lynn. 2003. Anomalous Subarctic influence in the southern California current during 2002. *Geophys. Res. Lett.* 30(15):1944-8007.
- Carpi, P.M., M. Martinelli., A. Belardinelli., A. Russo., E. Arneri., A. Coluccelli & A. Santojanni. 2015. Coupling an oceanographic model to a Fishery observing system through mixed models: the importance of fronts for anchovy in the Adriatic Sea. *Fish. Oceanogr.* 1-13.

- Cayula, J.F. & P. Cornillon. 1996. Edge Detection Algorithm for SST images. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 9:67-80.
- Chávez, F.P. & M. Messié., 2009. A comparison of eastern boundary upwelling ecosystem. *Progress oceanogr.* 83. 80-96.
- Checkley Jr., D.M., R.C. Dotson., D.A. Griffith. 2000. Continuous, underway sampling of eggs of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) and Northern anchovy (*Engraulis mordax*) in spring 1996 and 1997 off southern and central California. *Deep-sea Res.* 11(47): 1139-1155.
- Checkley Jr. D.M., P. Ayon., T.R. Baumgarther., M. Bernal., J.C. Coetzee., R. Emmett., R. Guevara-Carrasco., B. Planque., J. Schweigert., Y. Stratoudakis & C. Van der Lingen. 2010. Habitats, 64-117. En: Checkley Jr. D.M., J. Acheit., Y. Oozeki & C. Roy (Eds.) *Climate change and small pelagic fishes*. Cambridge University Press, Cambridge, 1026p.
- Cowen, R.K., J.A. Hare & M.P. Fahay. 1993. Beyond hydrography: Can physical processes explain larval fish assemblages within the middle Atlantic bight? *Bull. Mar. Sci. Part. I* 53 (2): 567-587.
- Cushing, D.H. 1975. *Marine Ecology and Fishes*. Cambridge. CUP Archive Oxford: Edición Ilustrada, reimpressa. Aldest Press. 278 p.
- Danell-Jiménez, A., L. Sánchez-Velasco., M.F. Lavín. & S.G. Marinone. 2009. Three-dimensional distribution of larval fish assemblages across a surface thermal/chlorophyll front in a semienclosed sea. *Estuar. Coast. shelf Sci.* 85:487-496.
- De la cruz-Agüero, J. 1991. Composición, distribución y estructura de la ictiofauna mesopelágica de aguas adyacentes a la costa occidental de Baja California Sur. Tesis de maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. (CICIMAR). 101p.
- Diehl, S.F., J.W. Budd., D. Ullman & J.F. Cayula. 2002. Geographic window sizes applied to remote sensing sea surface temperature front detection. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 19:1105-1113.
- Durazo, R., A.M. Ramirez-Manguilar., L.E., Miranda & L.A. Soto-Mardones. 2010. *Climatología de variables Hidrográficas. Patrones y Procesos a Escala*

- Estacional e interanual. 25-53p.
- Durazo, R., 2015. Seasonality of the transitional region of the California current system off Baja California. *J. Geophys. Res. C. Agu-Publications*. 1-33.
- Emmet, R.L., P.J. Bentley & M.H. Schiwe. 1997. Abundance and Distribution of Northern Anchovy Eggs and larvae (*Engraulis mordax*) off the Oregon Coast, Mid-1970s vs 1994 and 1995. Proceedings Forage Fishes in Marine Ecosystems Alaska. Sea Grant College Program. 1-97.
- Emmet, R.L., T.W. Miller., P.J. Bentley., S.S. Pool., R.D. Brodeur., G.K. Krutzikowsky & J. McCrae. 2005. Pacific sardine (*Sardinops sagax*) abundance, distribution, and ecological relationships in the Pacific Northwest. *CalCOFI Rep.* 46(1): 122-143.
- Etnoyer, P., P. Canny., B. Mate & L. Morgan. 2004. Persistent pelagic habitats in the Baja California to Bering Sea (B2B) Ecoregion. *J. Oceanogr. S.* 17:90–101.
- Etnoyer, P., P. Canny., R.B. Mate., E.L. Morgan., J.G. Ortega-Ortiz & W.L.J. Nichols. 2006. Sea-surface temperature gradients across blue whale and sea turtle foraging trajectories off the Baja California Peninsula, Mexico. *Deep Sea Res. II.* 340-358.
- Fiedler, P.C. 1983. Satellite remote sensing of the habitat of spawning anchovy in the southern California Bight. *CalCOFI Rep.* 24.
- Funes-Rodríguez, R., C. Flores-Coto., A. Esquivel-Herrera., M.A. Fernández-Álamos & A. García-Gasca. 2002. Larval fish community structure along the west coast of Baja California during and after the El Niño event (1983). *Bull. Mar. Sci.* 70(1):41-54.
- Funes-Rodríguez, R., J.F. Elorduy-Garay., A. Hinojosa-Medina., A. Zárate-Villafranco. 2009. Interannual distribution of Pacific hake larvae in the southern part of the California Current. *J. Fish Biol.* 75:630–646.
- Funes-Rodríguez, R., A. Zárate-Villafranco., A. Hinojosa-Medina., R. González-Armas & S. Hernández-Trujillo. 2011. Mesopelagic fish larval assemblages during El Niño-Southern Oscillation (1997–2001) in the southern part of the California Current. *Fish. Oceanogra.* 20(4):329-346.
- Franks, P.J.S. 1992a. Phytoplankton blooms at fronts: patterns, scales, and physical

- forcing mechanisms. *Rev. Aquat. Sci.* 6: 121–137.
- Goericke, R., E. Venrick., T. Koslow., W.J. Sydeman., F.B. Schiwing., S.J. Bograd., W.T. Peterson., R. Emmet., J.R. Lara-Lara., G. Gaxiola-Castro., J. Gómez-Valdéz., K.D. Hyrenbach., R.W. Bradley., M.J. Weise., J.T. Harvey., C. Collins & N.C.H. Lo. 2007. The state of the California Current, 2006-2007: Regional and local processes dominate. *CalCOFI Rep.* 48(1): 33-66.
- Hazen, E.L., S. Bograd., R.M. Suryan., Y. Watanuki & R. Wilson. 2013. Biophysical coupling of marine hotspots. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 487:176-304.
- Hjort, J. 1914, Fluctuations in the great fisheries of Northern Europe, vol. 20. En: Host & Fils (Ed.) in the light of biological research. *Rapports et procès-verbaux des reunions*, 228 p.
- Illes & Sinclair, T.D. & M. Sinclair. 1982. Atlantic herring: stock discreteness and abundance. *Sci. (Washington, D.C.)*. 215:627-63.
- Inda-Díaz, E.A., L. Sánchez-Velasco & F.M. Lavín. 2012. The effects of a tidal-mixing front on the distribution of larval fish habitats in a semi-enclosed sea during winter. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 1-14.
- Jacobson L.D. & A.D. MacCall. 1995. Stock-recruitment models for Pacific sardine (*Sardinops sagax*). *Canadian J. fish. Aquat. Sci.* 52(3): 566-577.
- Jimenez-Rosenberg, S.P.A., R. Saldierna-Martinez., G. Aceves-Medina., V. Cota-Gómez. 2007. Fish Larvae in Bahia Sebastian Vizcaino and the adjacent oceanic region, Baja California, Mexico. *Check List.* 3:204–222.
- Jiménez-Rosenberg, S.P.A. 2008. Asociaciones de Larvas de peces por estadio de desarrollo en la costa noroccidental de la Península de Baja California. Tesis de Doctorado. CICIMAR-IPN.223 p.
- Jiménez Rosenberg, S.P.A., R.J. Saldierna-Martínez., G. Aceves-Medina., A. Hinojosa-Medina., R. Funes-Rodríguez., M. Hernández-Rivas & R. Avendaño-Ibarra. 2010. Fish larvae off the northwestern coast of the Baja California Peninsula, Mexico. *Check List.* 6(2):334-339.
- Kahru, M., E. Di Lorenzo., M. Manzano-Sarabia & G.B. Mitchell. 2012. Spatial and temporal statistics of sea surface temperature and chlorophyll fronts in the California current. *J. plankton Res.* 34(9):749-760.

- Koslow, J.A., R. Goericke., A. Lara-Lopez. & W. Watson. 2011. Impact of declining intermediate-water oxygen on deepwater fishes in the California Current. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 436:207-218.
- Kaise, M.J., M.J. Attrill., S. Jennings., D.N. Thomas., D.K.A. Barnes., A.S.Brierly., J.G. Hiddink., H. Kaartokallio., N.V.C. Polonin & D.G. Raffaelli. 2011. Marine ecosystem: Processes, systems, and impacts. Oxford University press. 238p.
- Loeb, V.J., P.E. Smith. & H.G. Moser. 1983a. Recurrent groups of larval fish species in the California current area. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.* 24: 152–164.
- Loeb, V.J., P.E., Smith & H.G. Moser. 1983b. Geographical and seasonal patterns of larval fish species structure in the California Current area, 1975. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 24:132 151.
- Logerwell, E.A. & P.E. Smith. 2001. Mesoscale Eddies and survival of late stage Pacific Sardine (*Sardinops sagax*) larvae. *Fish. Oceanogr.* 10(1):13-25.
- Lynn, R.J & J. Simpson. 1987. The California current system: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.* 92:12947-12966.
- Lynn, R.J. 2003. Variability in the spawning habitat of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) off southern and central California. *Fish. Oceanogra.* 12, 541-53.
- McCall, A. & G.D. Stauffer. 1983. Biology and fishery potential of jack mackerel (*Trachurus symmetricus*). *CalCOFI Rep.* 44: 46-56.
- McClatchie, S., R. Goericke., G. Aud & K. Gill. 2010. Re- assessment of the stock-recruit and temperature-recruit relationships for Pacific sardine (*Sardinops sagax*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 67: 1782-1790.
- Moser, H.G., Smith P.E. 1993a. Larval assemblages of the California current region and their horizontal and vertical distributions across a front. *Bull. Mar. Sci.* 53:645-691.
- Moser, H.G., R.L. Charter, P.E. Smith, D.A. Ambrose, S.R. Charter, C.A. Meyer, E.M. Sandknop & W. Watson.1993. Distribution atlas of fish larvae in the California Current region: taxa with 1000 or more total larvae, 1951 through 1984. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Atlas* 31.
- Moser, H.G., D.H. Hanan., M.M. Mullin & M.F. Tillman. 1996. The early stages of fishes in the California current region, 1951 through 1984. *Calif. Coop. Oceanic Fish.*

- Invest. Atlas 33.
- Munk, P., B.W. Hansen., T.G. Nielsen & H.A. Thomsen. 2003. Changes in plankton and fish larvae communities across hydrographic fronts off West Greenland. *J. plankton Res.* 25(7):815-830.
- Nieto, K., H. Demarcq., & S. Mcclatchie. 2012. Mesoscale frontal structures in the Canary upwelling system: New front and filament detection algorithms applied to spatial and temporal patterns. *Remote sens. Environ.* 123:339-346.
- Owen R. 1986. Fronts and eddies in the sea: Mechanism, interactions and biological effects, 197-233. En: Blaxter H.S & A. J. Southward (Ed.) *Advances in Marine Biology*. Academic press inc. 363 p.
- Pérez-Brunius, P., M. López., A. Parés-Sierra., J. Pineda. 2007. Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind sources. *CalCOFI Rep.*, 48:205-214.
- Peterson, B., R. Emmet., R. Goericke., E. Venrinck., A. Mantyla., S.J. Bograd., F.B. Schiwg., R. Hewitt., N.Lo., W. Watson., J. Barlow., M. Lowry., S. Ralston., K.A. Forney., B.E. Lavaniegos., W.J. Sydeman., D. Hyrebach., R.W. Bradley., P. Warzybok., F. Chávez., K. Hunter., S. Benson., M. Weise., J. Harvey., G. Gaxiola-Castro., R. Durazo. 2006. The state of the California current 2005-2006: Warm in the North, cool in the south. *CalCOFI Rep.* 47-45p.
- Portner, H.O. & A.P. Farrell. 2008. Physiology and climate change. *Sci.* 322:690-692.
- Reiss, C.S., D. Checkley JR & S. J. Bograd. 2008. Remotely sensed spawning habitat of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) and Northern anchovy (*Engraulis mordax*) within the California current. *Fish. Oceanogra.* 17(2):126-136.
- Reiss, C.S., D.M. Checkley Jr. & S.J. Bograd. 2008. Remotely sensed spawning hábitat of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) and Northern anchovy (*Engraulis mordax*) within the California Current. *Fish. Oceanogra.* 17(2): 126:136.
- Rodríguez- Sánchez, R., D. Lluch-Belda., H. Villalobos & S. Ortega-García. 2002. Dynamic geography of small pelagic fish populations in the California Current system on the regime time scale (1931-1997). *Canadian J. Fish. Aquat. Sci.* 59(12): 1980-1988.
- Sánchez-Velasco, L., M.F. Lavín., S.P.A. Jiménez-Rosenberg., J.M. Montes & P.J. Turk-

- Boyer. 2012. Larval fish habitats and hydrography in the Biosphere Reserve of the upper Gulf of California (June 2008). *Cont. Shelf Res.* 3:89-99.
- Scales, K.L., P.I. Miller., L.A. Haws., S.N. Ingram., D.W. Sims & S.C. Votier. 2014. On the Front Line: frontal zones as priority at Sea conservation areas for mobile marine vertebrates. *J. Applied Ecol.* 10:11-18.
- Sinclair, M., T.D. Iles.1988. Population richness of marine fish species. *Aquat. Living Resour.* 1. 71–83.
- Smith, P.E., S.L. Richardson. 1977. Standard techniques for pelagic fish egg and larval surveys. FAO Fish. Tech. Pap. No. 175. FAO, Roma. 113 p.
- Soto-Mardones, L., A. Páres-Sierra., J. García., Durazo R. & S. Hormazabal. 2004. Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California) from hydrographic, ADC and altimetry data. *Deep-Sea Res. II.* 51:785-798.
- Van der Lingen, C.D., L. Hutchings., D. Merkle., J.J. Van der Westhuizen., & J. Nelson. 2001. 185-209. En: Kruse, G.H., N. Benz., T. Booth., M. Dorn., S. Hills., R.N. Lipcius., D. Peletier., C. Roy., S.J. Smith & D. Witherell (Eds.). Spatial processes and management of marine populations. University of Alaska Sea Grant, AK-56-01-02,209p.
- Van der Lingen, C.D., J.C. Coetzee., H. Demarcq., L. Drapeau., T. Fairweather & Hutchings. 2005. An eastward shift in the distribution of southern Benguela sardine. *GLOBEC International Newsletter.* 11.2:17-22.
- Weber, E.D. & S. McClatchie. 2010. Predictive models of northern anchovy *Engraulis mordax* and Pacific sardine *Sardinops sagax* spawning habitat in the California current. *Mar. Ecol. Progress series.* 406:251-263.
- Zwolinski, J.P., D.A. Demer., K.A. Byers., G.R. Cutter., J.S. Renfree., T.S. Sessions & J.B. Macewicz. 2012. Distributions and abundances of pacific sardine (*Sardinops sagax*) and other pelagic fishes in the California current ecosystem during Spring 2006, 2008, and 2010, estimated from acoustic-trawl surveys. *Fish. Bull.* 110(1): 110-122.

ANEXO 1

Sardinops sagax

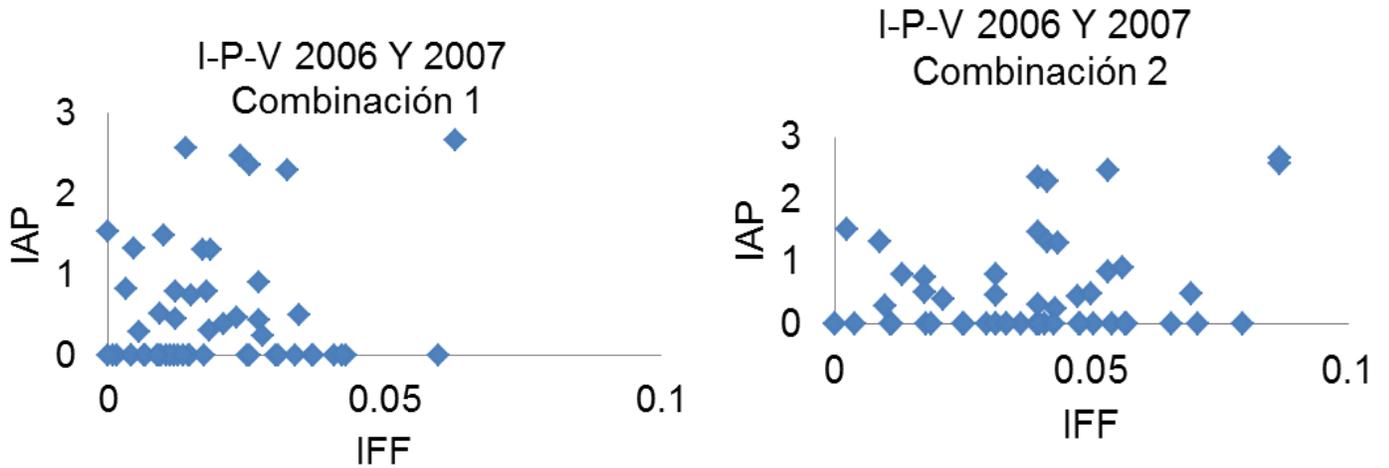


Fig. 17. Diagramas de dispersión para *Sardinops sagax*, de las combinaciones 1 y 2 en invierno, primavera y verano, en el eje de las x se muestran los valores del índice de abundancia promedio (IAP), vs en el eje de las y los valores del índice de frecuencia del frente (IFF).

Engraulis mordax

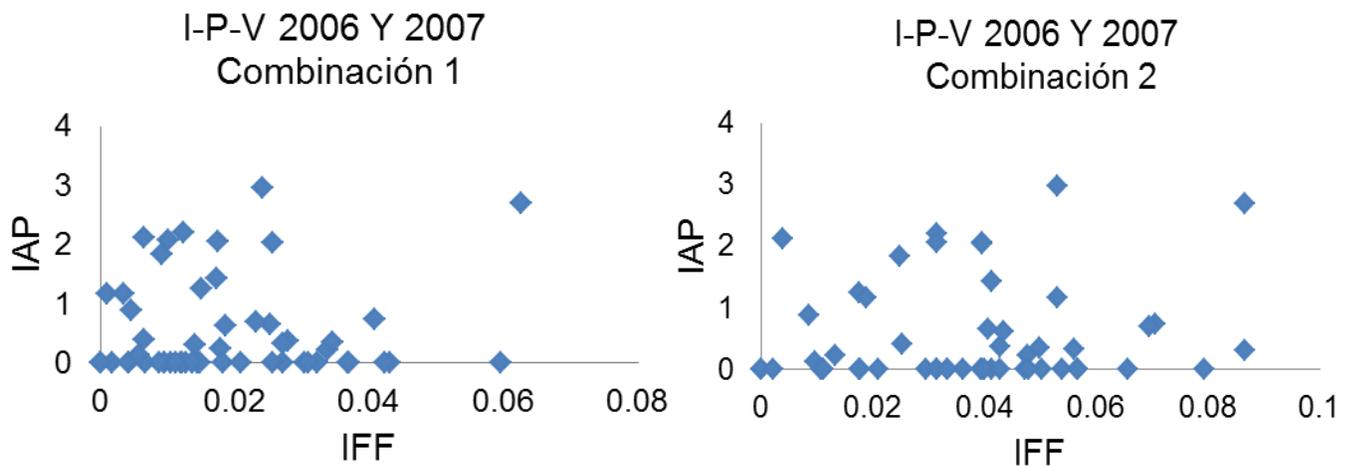


Fig. 18. Diagramas de dispersión para *Engraulis mordax*, de las combinaciones 1 y 2 en invierno, primavera y verano, en el eje de las x se muestran los valores del índice de abundancia promedio (IAP), vs en el eje de las y los valores del índice de frecuencia del frente (IFF).

Trachurus symmetricus

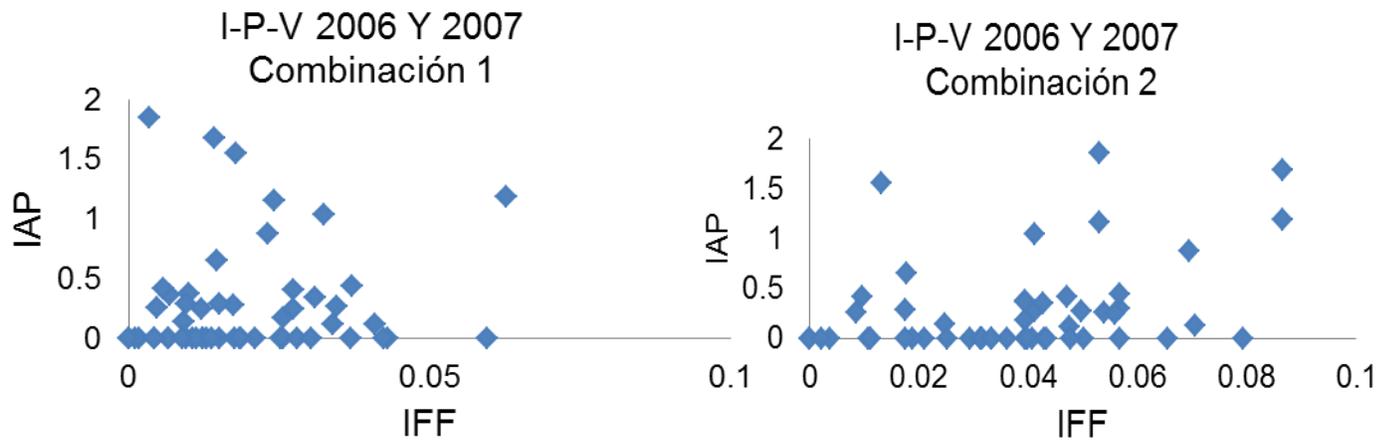


Fig. 19. Diagramas de dispersión para *Trachurus symmetricus*, de las combinaciones 1 y 2 en invierno, primavera y verano, en el eje de las x se muestran los valores del índice de abundancia promedio (IAP), vs en el eje de las y los valores del índice de frecuencia del frente (IFF).

Diogenichthys laternatus

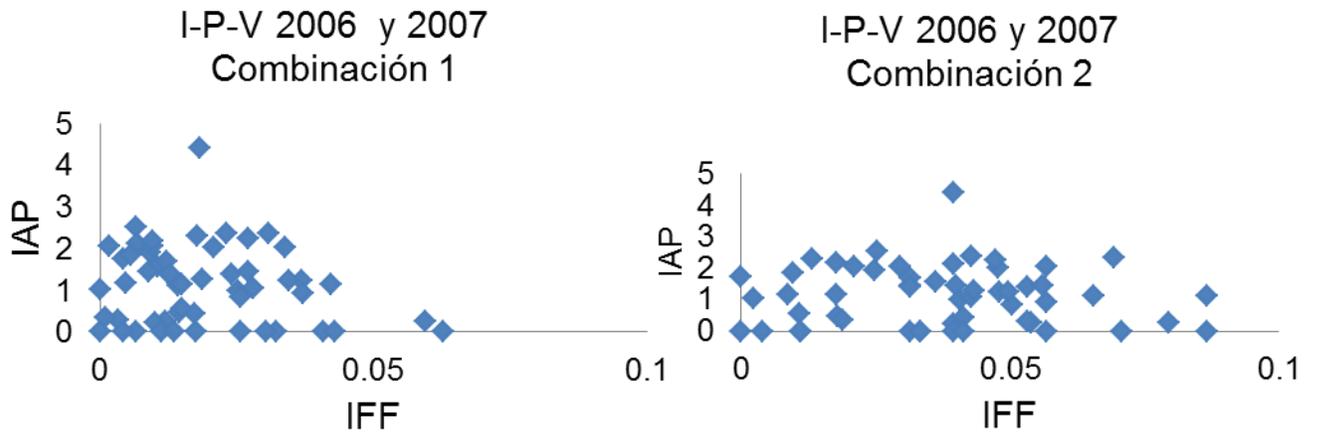


Fig. 20. Diagramas de dispersión para *Diogenichthys laternatus*, de las combinaciones 1 y 2 en invierno, primavera y verano, en el eje de las x se muestran los valores del índice de abundancia promedio (IAP), vs en el eje de las y los valores del índice de frecuencia del frente (IFF).

Vinciguerria lucetia

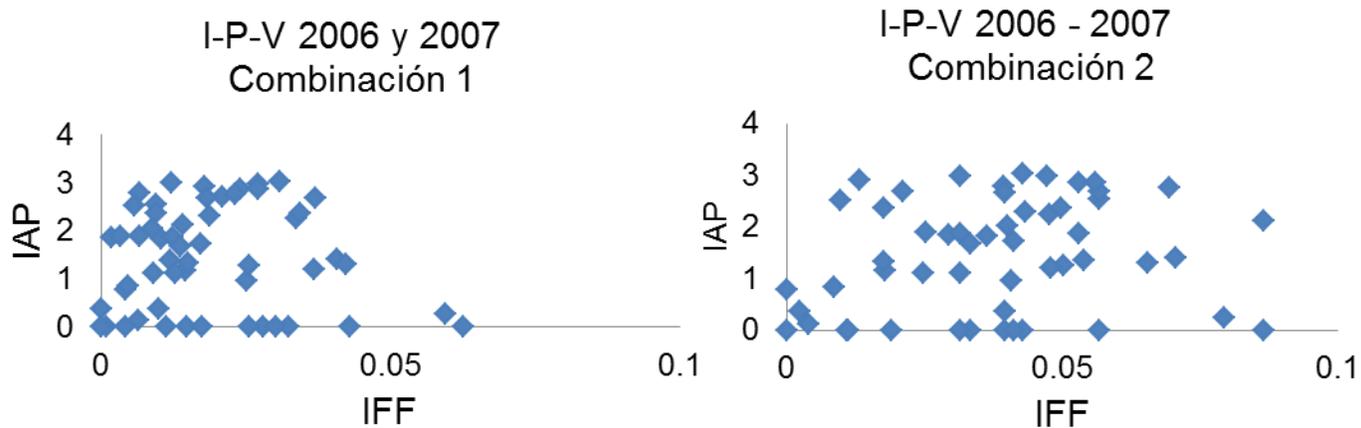


Fig. 21. Diagramas de dispersión para *Vinciguerria lucetia*, de las combinaciones 1 y 2 en invierno, primavera y verano, en el eje de las x se muestran los valores del índice de abundancia promedio (IAP), vs en el eje de las y los valores del índice de frecuencia del frente (IFF).

ANEXO 2

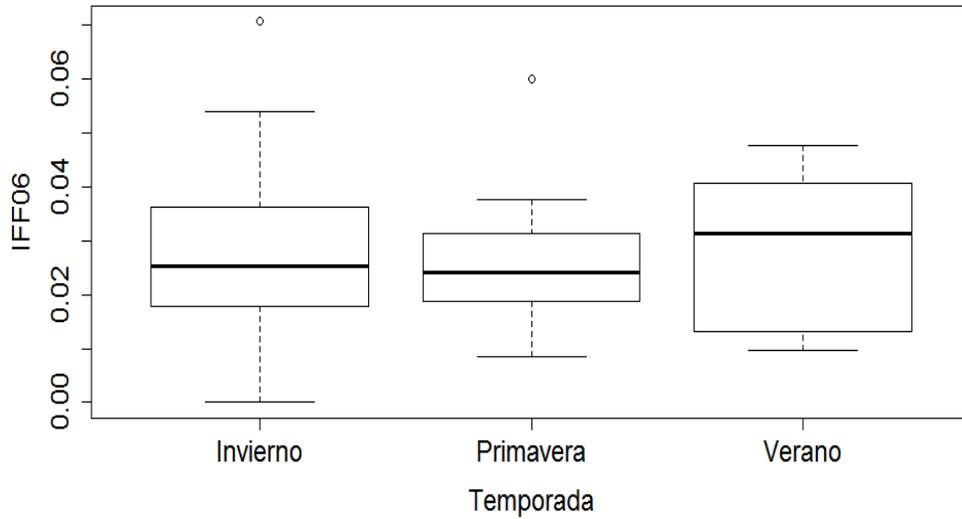


Fig. 5.1. Variación estacional de las frecuencias frontales (invierno, primavera y verano) de 2006; $H_{(0.05, 2)} = 0.211$ $p = 0.94$.

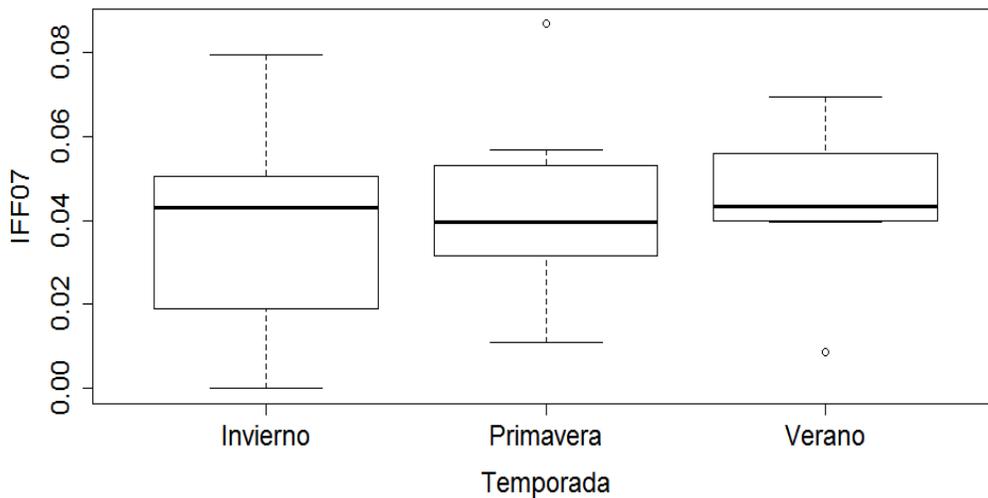


Fig. 5.2. Variación estacional de las frecuencias frontales (invierno, primavera y verano) de 2007; $H_{(0.05, 2)} = 0.6032$ $p = 0.73$.

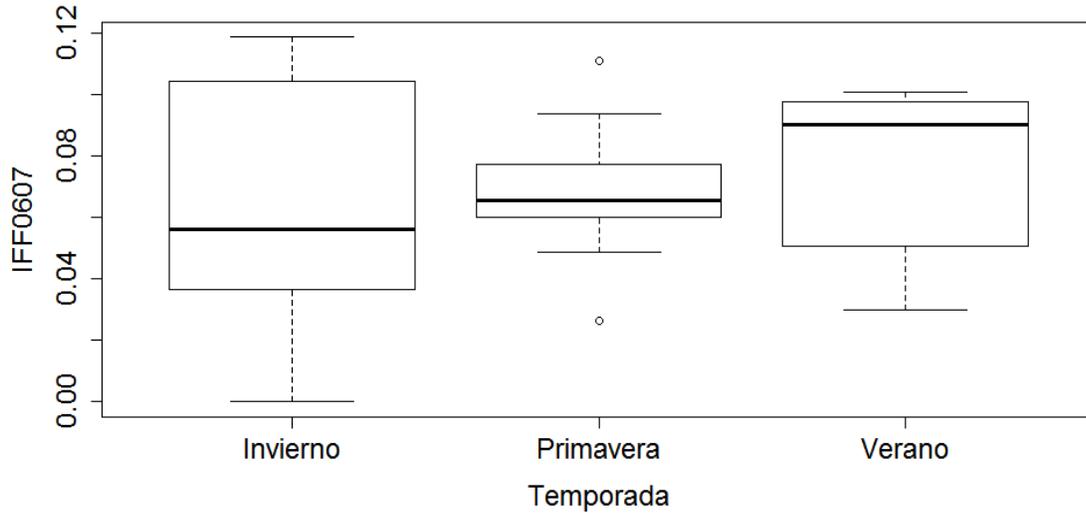


Fig. 5.3. Variación estacional de las frecuencias frontales entre años de 2006 y 2007; $H_{(0.05, 2)}=0.2152$ $p=0.89$.

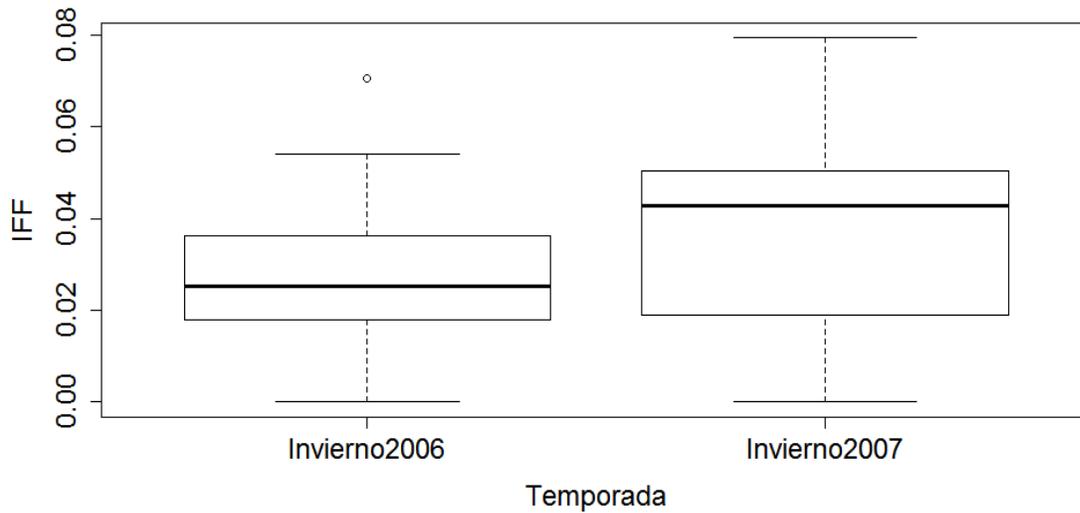


Fig. 5.4. Variación inter-estacional de las frecuencias frontales (invierno; $H_{(0.05, 2)}=0.4995$ $p=0.47$).

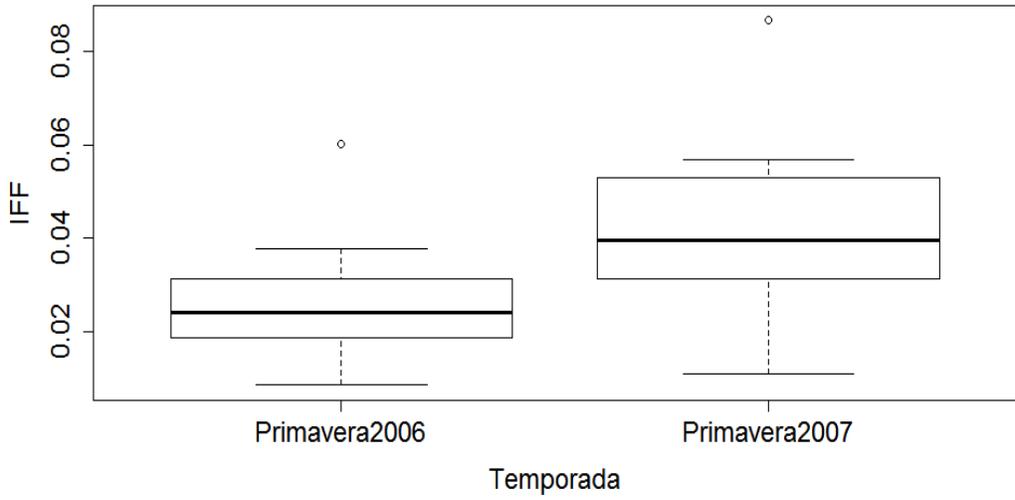


Fig. 5.5. Variación inter-estacional de las frecuencias frontales (primavera; $H_{(0.05, 2)}=2.3879$ $p=0.12$).

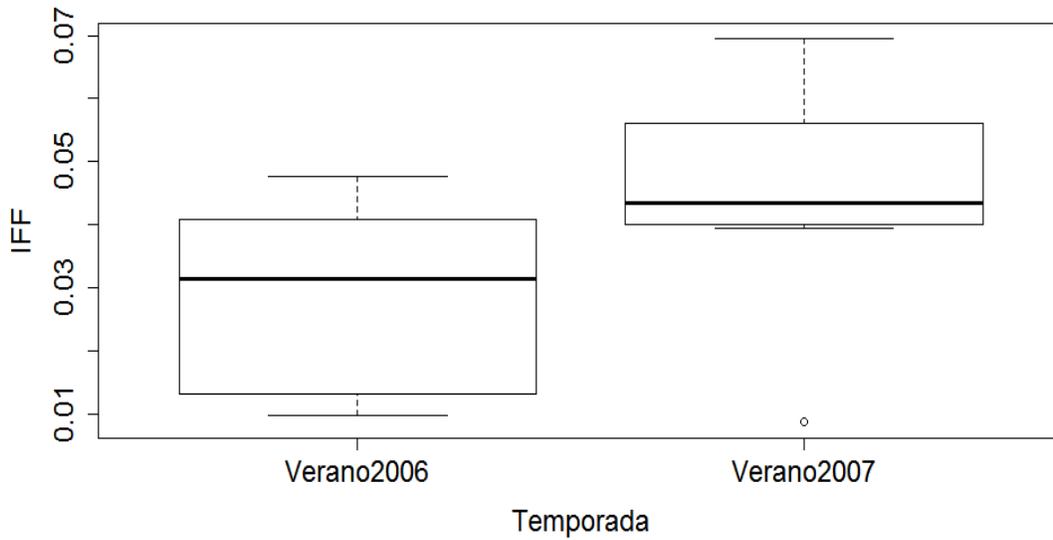


Fig. 5.6. Variación inter-estacional de las frecuencias frontales (verano; $H_{(0.05, 2)}=3.6043$ $p=0.05763$).