



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



IPN-CICIMAR

ZONAS PROPICIAS PARA EL DESARROLLO  
DE LARVAS DE *Scomber japonicus*  
(Perciformes: Scombridae) MEDIANTE EL  
ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TALLAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA

EDUARDO ANAYA GODINEZ

LA PAZ, B.C.S., DICIEMBRE DE 2015.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**  
*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 13 del mes de Noviembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**“ZONAS PROPICIAS PARA EL DESARROLLO DE LARVAS DE *Scomber japonicus***  
**(PERCIFORMES: SCOMBRIDAE) MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TALLAS”**

Presentada por el alumno:

<b>ANAYA</b> Apellido paterno	<b>GODÍNEZ</b> materno	<b>EDUARDO</b> nombre(s)							
		Con registro: <table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>1</td> <td>4</td> <td>0</td> <td>4</td> <td>8</td> <td>7</td> </tr> </table>	A	1	4	0	4	8	7
A	1	4	0	4	8	7			

Aspirante de:

**MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Directores de Tesis

  
 DR. RENÉ FUNES RODRÍGUEZ  
 Director de Tesis

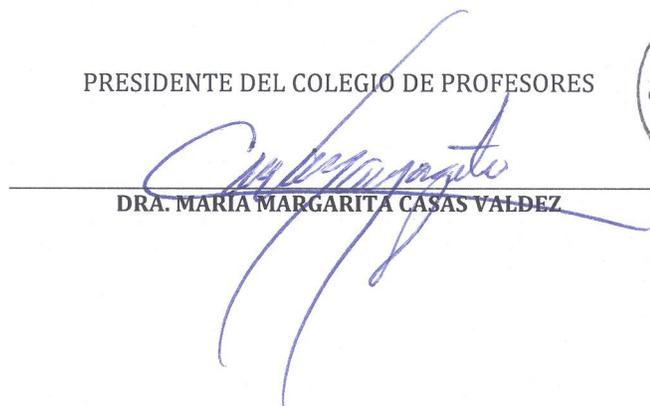
  
 MC. ALEJANDRO TRINIDAD HINOJOSA MEDINA  
 2º. Director de Tesis

  
 DR. JOSÉ LUIS ORTIZ GALINDO

  
 DR. ADRIÁN FELIPE GONZÁLEZ ACOSTA

  
 DR. EDUARDO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
 DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ



I.P.N.  
CICIMAR  
DIRECCIÓN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 26 del mes de Noviembre del año 2015

El (la) que suscribe BIÓL. EDUARDO ANAYA GODÍNEZ Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A140487 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. RENÉ FUNES RODRÍGUEZ y MC. ALEJANDRO TRINIDAD HINOJOSA MEDINA

y cede los derechos del trabajo titulado:

"ZONAS PROPICIAS PARA EL DESARROLLO DE LARVAS DE *Scomber japonicus*

(PERCIFORMES: SCOMBRIDAE) MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TALLAS"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: winchester\_mezcalito@hotmail.com - rfunes@ipn.mx - ahinojos@ipn.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
BIÓL. EDUARDO ANAYA GODÍNEZ

*Nombre y firma del alumno*

*DEDICATORIA*

*A mis padres*

*Gregorio Anaya López y Rosaura Godínez Pérez*

*Por su apoyo, comprensión y paciencia ante todo.*

*Por sus regaños y consejos, los cuales me han forjado para enfrentar  
los azares de la vida.*

*Por la vida que me han obsequiado y me han permitido vivir.*

*Por todo lo que me han enseñado.*

*Muchas gracias.*

*Los quiero.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN) por permitirme realizar mis estudios de maestría y la presente investigación dentro de sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI) y a la Subdirección Académica de Investigación (SAI) por el apoyo concedido a través de sus becas y estímulos económicos para llevar a cabo mis estudios de maestría y la realización de la estancia en la Universidad de Valparaíso, Chile. Así como a la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del IPN (COFAA) por el apoyo otorgado para la asistencia a congresos.

A mis directores de tesis: Dr. René Funes Rodríguez y M. en C. Alejandro T. Hinojosa Medina por su amistad, apoyo, asesoría, consejos y sugerencias en la realización de la presente investigación.

A mi comité revisor: Dr. Adrián F. Gonzales Acosta, Dr. José L. Ortiz Galindo y Dr. Eduardo Gonzales Rodríguez por sus sugerencias y aportaciones referentes durante el desarrollo de mi tesis.

Al Dr. Mauricio F. Landaeta Díaz por su apoyo, asesoría y sugerencias en la realización del presente trabajo, así como al equipo LABITI y a la Universidad de Valparaíso, Chile, por su apoyo y aceptación durante mi estancia.

A los compañeros y amigos que conocí durante mi estancia en CICIMAR, Juan David Acevedo Acosta, Diego Gámez Soto, Francisco Javier Barrón Barraza, María T. Peiro Alcantar, José Alfredo Ruiz Chavarría, Arturo R. Sanchez Uvera, Adalberto Tamayo Corona, Maria del Rosario Torres Esparza y Julián Israel Mendoza Alcalá, por su amistad, apoyo y consejos durante mis estudios de maestría.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>HIPÓTESIS</b> .....	7
<b>OBJETIVOS</b>	
<b>General</b> .....	8
<b>Específicos</b> .....	8
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
<b>Área de estudio</b> .....	9
<b>Obtención de la muestras</b> .....	10
<b>Análisis hidrográfico</b> .....	12
<b>Análisis de tallas y desarrollo</b> .....	12
<b>RESULTADOS</b>	
<b>Distribución espacio-temporal de la abundancia</b> .....	15
<b>Distribución temporal de tallas larvales</b> .....	18
<b>Análisis del crecimiento larval con relación a la altura del cuerpo (AC) y su longitud estándar (LE)</b> .....	19
<b>Relación del desarrollo de <i>S. japonicus</i> con la temperatura del ambiente y biomasa del zooplancton</b> .....	21
<b>DISCUSIÓN</b> .....	26
<b>CONCLUSIONES</b> .....	31
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización del área de estudio y de las estaciones de muestreo del programa IMECOCAL, en la costa occidental de la Península de Baja California. ....	10
<b>Figura 2.</b> División del área de estudio de acuerdo a Moser <i>et al.</i> (1993); zona norte (líneas 100 a 110), zona centro (líneas 113 a 123) y zona sur (líneas 127 a 137).....	13
<b>Figura 3.</b> Distribución espacio-temporal de la temperatura y abundancia larval (larvas/10 m <sup>2</sup> ) de <i>Scomber japonicus</i> , para invierno, primavera, verano y otoño, durante el periodo de 2006 a 2010.....	16
<b>Figura 4.</b> Distribución espacio-temporal de las anomalías en la altura del nivel medio del mar y de la abundancia larval (larvas/10 m <sup>2</sup> ) de <i>Scomber japonicus</i> , para invierno, primavera, verano y otoño durante el periodo de 2006 a 2010. Las flechas identifican la dirección e intensidad del flujo de corrientes, referenciada a 25 cm s <sup>-1</sup> en el recuadro inferior izquierdo de cada mapa.....	17
<b>Figura 5.</b> Distribución anual y temporal de la variabilidad de tallas observadas en larvas de <i>Scomber japonicus</i> .....	18
<b>Figura 6.</b> Tendencia del incremento de la altura del cuerpo (AC) en relación a la longitud estándar (LE) de <i>Scomber japonicus</i> , para la zona norte, centro y sur; durante invierno, primavera y verano de los años analizados.....	20
<b>Figura 7.</b> Líneas de cocientes de la abundancia larval de <i>Scomber japonicus</i> : (a) con respecto a la temperatura superficial del mar y (b) la	

biomasa del zooplancton. Las barras indican el número de estaciones tomadas en cada clase de temperatura y biomasa del zooplancton. Los valores de cociente >1 (por encima de la línea punteada) indican una preferencia a la variable ambiental..... 23

**Figura 8.** Frecuencia de las estaciones positivas por cada °C de temperatura para las larvas de *Scomber japonicus* en relación al incremento de la altura del cuerpo con respecto a la longitud estándar, para cada zona de cada temporada analizada. Las barras indican la frecuencia de estaciones positivas; el valor de indica el incremento en milímetros; el valor de EE indica la variación del incremento..... 24

**Figura 9.** Frecuencia de las estaciones positivas por cada 100 ml/ 1000 m<sup>3</sup> de BZ para las larvas de *Scomber japonicus* en relación al incremento de la altura del cuerpo con respecto a la longitud estándar, para cada zona de cada temporada analizada. Las barras indican la frecuencia de estaciones positivas; el valor de indica el incremento en milímetros; el valor de EE indica la variación del incremento..... 25

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Periodicidad y número de estaciones de cada cruceo realizado por el programa IMECOCAL durante el periodo 2006-2010.....	11
<b>Tabla 2.</b> Parámetros del modelo de regresión simple para cada zona analizada: ( ) intercepto de la pendiente; (EEP) error estándar de la pendiente; ( ) valor del incremento en milímetros por cada milímetro de LE; (EE) error estándar del incremento en milímetros; ( $R^2$ ) valor de la variabilidad de los datos explicada por el modelo; valor de F y estadístico P.....	20
<b>Tabla 3.</b> Análisis de covarianza (ANCOVA) con valores de media ajustada y homogeneidad de pendiente (F) y valor P, que comprueban las diferencias significativas entre cada una de las zonas de los cruceos analizados.....	21
<b>Tabla 4.</b> Valores obtenidos del análisis de las medias geométricas para cada una de las tres temporadas analizadas.....	21

## GLOSARIO

**Abundancia.** Número total de individuos de una población presentes en una muestra o en un área determinada (Lincoln *et al.*, 1995).

**Altura del Cuerpo (AC).** Distancia que va desde el perfil inferior del cuerpo, donde inicia el intestino hasta el perfil del dorso (Froese, 1990).

**Anomalía del nivel medio del mar.** Diferencia ya sea positiva o negativa del nivel promedio del mar durante un periodo determinado (Pons, 2009).

**Biomasa.** Cualquier estimación cuantitativa de la masa total de los organismos que comprenden toda una población, o parte de ella, o cualquier otra unidad específica, o dentro de un área en un tiempo determinado; se puede medir como volumen, masa (peso vivo, muerto, seco o libre de cenizas) o energía (calorías) (Lincoln *et al.*, 1995).

**Condición.** Apariencia externa, aspecto o forma de crecimiento de un organismo (Lincoln *et al.*, 1995).

**Corriente de California.** Corriente oceánica superficial fría de borde oriental que fluye hacia el sur a lo largo de la costa del estado de California, en E. U. A, formando la rama este del giro del Pacífico norte (Lincoln *et al.*, 1995; Durazo *et al.*, 2010).

**Crecimiento isométrico.** Que guarda en todo caso siempre una misma proporción (Lincoln *et al.*, 1995).

**Desarrollo.** Crecimiento regulado y diferenciación de un individuo, incluyendo su diferenciación celular, histogénesis y organogénesis (Lincoln *et al.*, 1995).

**Distribución espacio-temporal.** Disposición de los organismos de una población en el espacio a lo largo del tiempo (Lincoln *et al.*, 1995).

**Efecto de punta.** Cambio de dirección de un flujo provocado por el choque de este con una barrera natural o artificial (difracción) (Brown *et al.*, 2001).

**Estrategia de crecimiento.** En larvas de peces, representa el cambio morfométrico en las proporciones corporales durante el desarrollo hasta obtener la forma adulta (Froese, 1990).

**Flujo geostrófico** Es el flujo de agua oceánica que resulta de la rotación de la tierra; las fuerzas que están en equilibrio son el gradiente de presión horizontal y la fuerza de Coriolis (Bakun, 1996, Zúñiga-López & Crespo Del Arco, 2010).

**Giro.** Sistema circular de mesoescala de agua oceánica que en el hemisferio norte, pueden ser en dirección hacia la derecha (anticiclón), con núcleo cálido y empujando agua hacia el centro del giro (convergente), o a la izquierda (ciclón) con núcleo frío y dispersando agua hacia afuera del giro (divergente) (Schureman, 1989; Bakun, 1996; De la Lanza-Espino *et al.*, 1999).

**Intervalo preferencial.** En el análisis de cocientes, son los valores de las covariables en el que la captura por unidad de esfuerzo (cociente) es significativamente mayor que 1 (Arrizabalaga *et al.*, 2015)

**Larva.** En los peces, es el periodo de desarrollo desde la completa absorción del saco vitelino hasta la adquisición plena de los caracteres merísticos externos (aletas y escamas); consta de dos fases: la apterolarva (sin los elementos que forman las aletas) y la pterolarva (con aletas bien formadas) (Balon, 2001).

**Longitud estándar (LE).** Distancia entre el extremo anterior del pez hasta el extremo posterior de la columna vertebral (complejo hipural) que externamente se

manifiesta por la base de los radios centrales de la cauda; en larvas, antes de la formación del complejo hipural la distancia se extiende hasta el extremo posterior del notocordio; también llamada longitud notocordal (Lloris, 2007).

**Nivel medio del mar.** Se define como el nivel de las aguas tranquilas del mar promedio, durante un periodo determinado de tiempo (meses, años), de tal forma que los efectos provocados periódicamente por mareas y por otras causas frecuentes como las olas queden compensados (Pons, 2009).

**Periodo crítico.** Es una etapa inherente, durante la cual las larvas son especialmente sensibles a factores ambientales y a menudo se produce una mortalidad catastrófica (Lloris, 2007).

**Pelágico-costero.** Se refiere a los organismos que viven en la columna de agua, independientes del fondo oceánico en áreas cercanas a la costa (Lincoln *et al.*, 1995).

**Stock.** Conjunto de individuos que presentan patrones similares de crecimiento, reproducción, migración y/o dispersión, y los mismos riesgos de mortalidad (Hilborn & Walters, 1992).

**Surgencia costera.** Se genera cuando el esfuerzo de los vientos provocan que el agua superficial se aleje de la costa y el agua de fondo rica en nutrientes emerge de forma vertical enfriando las aguas superficiales con los componentes nutricionales necesarios para la productividad biológica (Lloris, 2007).

## RESUMEN

El cambio de la alimentación endógena a la exógena, en muchas especies de peces se caracteriza por una alta mortalidad, ésta etapa se considera como un "periodo crítico". Para entender los cambios en el desarrollo de las larvas y la identificación de un entorno adecuado para ellas, la diferencia de tallas se considera como una variable importante. Las larvas de la macarela del Pacífico (*Scomber japonicus*) presentan un lento crecimiento durante las primeras fases de su desarrollo (6-8 mm de LE); posteriormente, la velocidad de crecimiento aumenta, pero la variabilidad del desarrollo depende de la temperatura y del alimento. El objetivo del presente trabajo fue identificar las zonas y temporadas propicias para el desarrollo larval de *S. japonicus*, por medio de un análisis de sus patrones de distribución, abundancia y diferencia espacio temporal del desarrollo, realizado durante el periodo 2006 a 2010 (11 cruceros del programa IMECOCAL); todo lo anterior en relación con la temperatura superficial del mar, flujo geostrofico y biomasa del zooplancton. Los resultados indicaron que los cambios en la distribución y abundancia larval, se encuentran principalmente en función del flujo geostrofico y la variabilidad térmica. La variabilidad en su desarrollo también se relacionó con la temperatura además de con la biomasa del zooplancton. Durante el verano la distribución se limitó al área frente a Punta Eugenia en Baja California Sur, donde se observaron las más altas abundancias. En términos generales, se establece que las condiciones térmicas y de disponibilidad de alimento durante la temporada de verano, permiten un óptimo desarrollo de las larvas de *S. japonicus* en ésta área.

Palabras clave: macarela del Pacífico, crecimiento isométrico, distribución, corriente de California, flujo geostrofico.

## ABSTRACT

The endogenous to exogenous feeding switch on many species of fish is characterized by high mortality and this stage is considered as a "critical period". To understand the changes during the larval development and the identification of an appropriate environment, the difference in size is considered as an important variable. Larvae of Pacific mackerel (*Scomber japonicus*) slow growth by during their early stages of development (LE 6-8 mm), then the growth rate increases, but the variability of development depends on temperature and food conditions. The aim of this study was to identify the areas and seasons favorable for larval development of *S. japonicus*, by analyzing the distribution, abundance as well as the spatial and seasonal differences in the development of the Pacific Mackarel during the period 2006-2010 (11 cruises the IMECOCAL Program) in relation to the sea surface temperature, geostrophic flow and zooplankton biomass. The results indicated that changes in the distribution and larval abundance, are mainly influenced by geostrophic flow and thermal variability. The variability on the larvae development also was related to the temperature in addition to zooplankton biomass. During the summer the larvae distribution was limited to the area off Punta Eugenia in Baja California Sur where highest abundances were observed. Termal conditions and availability of food during summer season allowed an optimum development for *S. japonicus* larvae in this area.

Keywords: Pacific mackerel, isometric growth, distribution, california current, geostrophic flow.

## INTRODUCCIÓN

El período larval de muchas especies de peces es considerado como un "período crítico", debido a una alta mortalidad y vulnerabilidad a la depredación e inanición de las larvas (Li & Mathias, 1987; Stouthamer & Bain, 2012). Este periodo comienza cuando el pez es capaz de capturar organismos y se extiende hasta presentar el tamaño y edad marcada por la formación del esqueleto axial; así como el desarrollo de las aletas con radios y espinas, que mejoran su habilidad para capturar el alimento (Stouthamer & Bain, 2012). Durante este periodo crítico, las larvas son susceptibles a requerimientos ambientales y necesidades de hábitat específicas (e. g. temperatura, refugio, corrientes y disponibilidad del alimento), que son claramente diferentes a los de juveniles y adultos (Werner, 2002).

Un "hábitat apropiado" para las primeras fases de vida de los peces es difícil de concebir, aunque éste puede ser definido como "la posición en el espacio ocupado en cualquier momento en el tiempo, que es definido por las características físicas, químicas y biológicas" (Werner, 2002). No obstante, un hábitat apropiado es el reflejo del crecimiento y supervivencia larval, siendo las tallas especialmente sensibles a la variabilidad ambiental que las rodea y por ello, pudieran ser un indicador de la calidad del hábitat (Hare & Cowen, 1997; Werner, 2002; Criales *et al.*, 2003).

La macarela del Pacífico (*Scomber japonicus*), es una especie pelágica costera que se distribuye en el Pacífico nororiental, desde el sureste de Alaska hasta Bahía de Banderas (Moser *et al.*, 1993). Sus larvas, al igual que las de otras especies de hábitos similares, fluctúan en el tiempo y zonas de desove, que concurren principalmente en el borde exterior de la plataforma continental entre California y México (Weber & McClatchie, 2012; Lo *et al.*, 2010). Durante los eventos El Niño, se puede observar un incremento en la supervivencia de las larvas asociado a una reducción en el transporte de la Corriente de California (CC) hacia el sur. Por el contrario, en años La Niña las tasas de supervivencia pueden ser comparativamente bajas, pero con un aumento en el transporte de la CC y en la biomasa de plancton (Sinclair *et al.*, 1985). No obstante, las densidades larvales de esta especie han disminuido desde mediados de la década de los 80's y hasta el

2000, aunque se considera que esta tendencia puede continuar (Hsieh *et al.*, 2005; Lo *et al.*, 2010).

Las larvas de *S. japonicus* se pueden encontrar durante todo el año, con mayor abundancia en la parte norte y central de la costa occidental de la Península de Baja California (COPBC), en primavera y verano, pero con menor abundancia en otoño (Kramer, 1969; Moser, 1993). Así mismo, se ha establecido la existencia de dos stocks en el área frente a la COPBC (Gluyas-Millán & Quiñónez-Velázquez, 1996). El primero frente a Bahía Magdalena en Baja California Sur, con un máximo de desove y alta abundancia de larvas durante el invierno (Arcos-Huitrón & Torres-Villegas, 1990; Moser *et al.*, 1993); y el segundo, se localiza en Bahía San Sebastián Vizcaíno, B. C. S; el cual se extiende hacia el norte con una menor abundancia durante la primavera, pero presenta un máximo del desove y una mayor abundancia larval durante el verano (Moser, 1993; Gluyas-Millán, 1994; Gluyas-Millán & Quiñónez-Velázquez, 1996).

La variabilidad de la abundancia de larvas de macarela puede estar asociada entre otras cosas a la biomasa del zooplancton (BZ), al cambio de la temperatura, al flujo geostrofico y a la latitud geográfica (Sinclair *et al.*, 1985; Weber & McClatchie, 2012). La BZ puede no reflejar el tamaño y la calidad de los alimentos necesarios para las altas tasas de supervivencia, pero la estimación del volumen de zooplancton se encuentra altamente correlacionada con la biomasa del microplancton, el cual es un índice más confiable de alimento larval (Sinclair *et al.*, 1985).

La temperatura, determina no solo la duración del crecimiento, también cambia el patrón de desarrollo (Pörtner *et al.*, 2010). A menor temperatura, la eclosión se retrasa y el desarrollo larval se prolonga, pero a temperaturas más altas, la eclosión, la natación de las larvas y el inicio de la alimentación exógena ocurre en un tamaño de cuerpo claramente más pequeño (Pörtner *et al.*, 2010). El transporte oceánico influye de forma importante durante el desarrollo inicial de los peces, debido al desplazamiento de los organismos desde, o hacia las zonas propicias para su supervivencia (Hare & Cowen, 1997). No obstante, las estrategias de reproducción de muchas especies marinas están adaptadas para ajustarse a las

corrientes predominantes, para ser transportadas hacia las zonas de crianza, generalmente en aguas poco profundas o costeras (Parrish *et al.*, 1981; Norcross & Shaw, 1984; Hare & Cowen, 1997); o bien, para formar parte de las comunidades biológicas que se desarrollan en algunos remolinos, debido a la retención de los organismos planctónicos y a los afloramientos en remolinos ciclónicos (Asch & Checkley, 2013). Así como también, la localidad y extensión de áreas de retención geográficamente estables pueden determinar el número y localización de los stocks y sitios de desove (Iles & Sinclair, 1982). De igual forma, el éxito de una población dependerá en gran parte de la habilidad de las larvas para permanecer agregadas durante los primeros meses de vida (Sinclair, 1988).

Diferentes autores sugieren que el crecimiento de las larvas de peces depende principalmente de la temperatura, así como de la cantidad y calidad del alimento, siendo estas variables útiles para diferenciar el hábitat en que se desarrollan las distintas especies (Hunter & Kimbrell, 1980; Sinclair *et al.*, 1985; Esqueda-Escarcega & Hernández-Trujillo, 1995; Logerwell & Smith, 2001; Criales *et al.*, 2003; Folkvord *et al.*, 2009; Pörtner *et al.*, 2010; Sassa & Tsukamoto, 2010; Koubbi *et al.*, 2011; Weber & McClatchie, 2012; Zenteno *et al.*, 2014). Al respecto, las larvas de la macarela del Pacífico se caracterizan por presentar un alto metabolismo y una tendencia al canibalismo (Hunter & Kimbrell, 1980). Sin embargo, se considera que la agregación de las larvas de tallas similares dentro de un hábitat, puede ser un mecanismo para reducir el canibalismo y aumentar la supervivencia (Matsuura & Hewitt, 1995).

El crecimiento de las larvas de peces, sea alométrico o isométrico, es una estrategia que resulta en una forma específica del cuerpo que puede variar dependiendo del ambiente en el que se desarrollen (Froese, 1990); por su parte, la variabilidad del incremento de la Altura del Cuerpo (AC) con respecto de la Longitud Estándar (LE), puede utilizarse como un indicador de la condición nutricional de larvas, después de la absorción del saco vitelino (Ehrlich *et al.*, 1976) y consecuentemente, de la condición durante el desarrollo (Hunter & Kimbrell, 1980). Las larvas de *S. japonicus* presentan un lento crecimiento durante los primeros 6 a 8 mm de LE; después de esta talla, su crecimiento es más rápido y alcanza su

completa transformación (~15 mm de LE) entre dos y tres semanas, éste desarrollo depende tanto del alimento como de la temperatura en un intervalo relativamente constante (14-22 °C) en el cual estas ocurren (Kramer, 1960; Hunter & Kimbrell, 1980; Esqueda-Escarcega, 1995; Sassa & Tsukamoto, 2010).

En la presente investigación se analiza la distribución y la abundancia larval de *S. japonicus*; además de que se discute por primera vez la respuesta del incremento de la AC en relación con la LE (como estrategia de crecimiento), a la temperatura superficial del mar (TSM), flujo geostrofico y biomasa del zooplancton. Todo lo anterior con la finalidad de identificar las áreas y épocas propicias para el adecuado desarrollo de las larvas de la macarela del Pacífico, en el área frente a la COPBC.

## **HIPÓTESIS**

Los cambios en la distribución y abundancia, así como en las estrategias de crecimiento de las larvas de peces, son afectados por las condiciones ambientales. Por lo que en este trabajo se espera que, tanto las tallas como un mayor incremento en la altura del cuerpo, respecto de la longitud estándar de las larvas de *Scomber japonicus* en su hábitat de distribución, permitirá identificar las áreas y épocas propicias para su desarrollo.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Identificar las zonas y temporadas propicias para el desarrollo larval de *Scomber japonicus*, mediante el análisis de su distribución y variación espacio-temporal de tallas, durante el periodo 2006 a 2010 en relación con la temperatura superficial del mar, flujo geostrofico y biomasa del zooplancton.

### **Particulares**

Determinar la distribución espacio-temporal de la abundancia de *S. japonicus*, en relación con la temperatura superficial del mar y el flujo geostrofico.

Examinar la distribución temporal de las tallas larvales de la macarela del Pacífico.

Identificar los cambios espacio-temporales del desarrollo larval, en la relación: altura del cuerpo vs. longitud estándar.

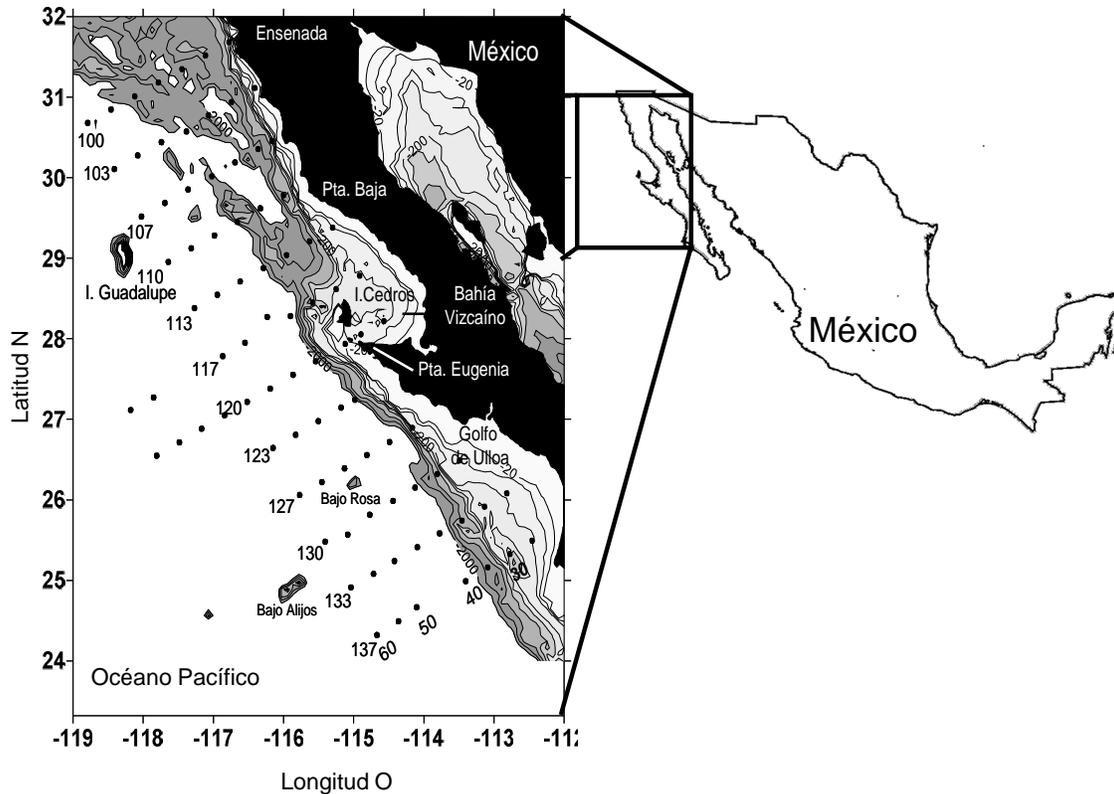
Identificar las áreas propicias para el desarrollo larval de *S. japonicus*, en relación con la variabilidad del ambiente (temperatura superficial del mar y biomasa del zooplancton).

## **MATERIALES Y MÉTODOS.**

**Área de estudio.** Se ubica frente a la costa occidental de la Península de Baja California, desde los 25° N, hasta los 31° N y desde los 112° a 118° O (Fig.1). En el área se distinguen dos provincias, una al norte y otra al sur de Punta Eugenia, Baja California Sur. La provincia norte se caracteriza como de dominio subártico debido a la dominancia de agua de ese origen durante todo el año; mientras que la provincia sur, muestra una alternancia entre el dominio subártico durante invierno y primavera, y tropical-subtropical durante verano y otoño (Durazo *et al.*, 2010).

De acuerdo con Durazo *et al.* (2010), el área de estudio se caracteriza por presentar surgencias costeras que persisten todo el año en la región norte, mientras que en la región sur solo son evidentes en primavera y verano. Durante la primavera y verano la CC fluye hacia el sur, y en otoño su flujo persiste a lo largo de la costa y se define una contracorriente superficial a la altura de Punta Eugenia. En esta área también se presenta una contracorriente localizada sobre el talud continental en todas las estaciones del año, excepto en primavera, la cual serpentea a lo largo del talud continental con un cambio meridional en profundidad (Durazo *et al.*, 2010).

La presencia de giros anticiclónicos se destaca en los patrones de circulación superficial durante todo el año, excepto en otoño; además de dos estructuras de meandros: una ubicada al sureste de Isla Guadalupe, mejor definidas durante el verano; y otra frente a Punta Eugenia (Durazo *et al.*, 2010). En primavera, la circulación de la CC es más homogénea y no se distingue la formación de giros, aunque hay una formación de meandro frente a Punta Eugenia, que parece estar iniciando un nuevo giro (Soto-Mardones *et al.*, 2004; Durazo *et al.*, 2010). La importancia de estas estructuras de circulación, es que interrumpen la interconexión hidrodinámica entre las regiones norte y sur del área de estudio, interrupción que puede tener consecuencias notables en el transporte meridional de propiedades biológicas (Durazo *et al.*, 2010).



**Figura 1.** Localización del área de estudio y de las estaciones de muestreo del programa IMECOCAL, en la costa occidental de la Península de Baja California.

**Obtención de las muestras.** Las larvas de *S. japonicus* fueron obtenidas a partir de 11 cruceros realizados por el Programa de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), durante el periodo 2006-2010, de donde se obtuvieron un total de 722 muestras de zooplancton (Tabla 1). El área de muestreo comprendió la zona marina entre Ensenada, Baja California hasta San Juanico, Baja California Sur. La distancia entre estaciones de muestreo fue de 37.04 km (20 mn) y entre transectos perpendiculares a la línea de costa de 74.08 km (40 mn); el transecto más largo se extiende mar adentro hasta 200.016 km (108 mn) (Fig. 1).

**Tabla 1.** Periodicidad y número de estaciones de cada crucero realizado por el programa IMECOCAL, durante el periodo 2006-2010.

Crucero	Año	Temporada	Fecha	Número de muestras
IME0602	2006	Invierno	09 – 26 de febrero	70
IME0604	2006	primavera	20 de abril – 02 de mayo	38
IME0701	2007	Invierno	23 de enero – 10 de febrero	90
IME0704	2007	primavera	26 de abril – 07 de mayo	25
IME0708	2007	Verano	25 de agosto – 13 de septiembre	90
IME0801	2008	Invierno	23 de enero – 11 de febrero	68
IME0804	2008	primavera	16 de abril – 01 de mayo	50
IME0807	2008	Verano	14 de julio – 02 de agosto	90
IME0810	2008	Otoño	14 – 26 de octubre	59
IME0910	2009	Otoño	04 – 10 de septiembre	71
IME1004	2010	primavera	30 de marzo – 18 de abril	74

Las muestras de plancton se obtuvieron mediante arrastres oblicuos efectuados a bordo del B/O “Francisco de Ulloa” (Tabla 1). Los arrastres se efectuaron con una red Bongo cilíndrico-cónica de 0.71 m de diámetro en la boca y malla de monofilamento de 505  $\mu\text{m}$ , provista de flujómetros (marca General Oceanics, modelo 2030RC), para medir el volumen de agua filtrada. Los arrastres fueron oblicuos desde la superficie hasta aproximadamente 200 m de profundidad como máximo y la velocidad del arrastre fue de 2 nudos, aproximadamente.

Las muestras de plancton fueron preservadas en formaldehído al 4%, neutralizado con una solución saturada de borato de sodio. En cada estación se realizaron mediciones continuas de conductividad y temperatura, desde la superficie hasta 1000 m de profundidad, utilizando un CTD (marca SBE, modelo 9/11), equipado con dos sensores de temperatura y dos de conductividad.

En el laboratorio, se midió la biomasa del zooplancton por el método de volumen desplazado, el total de larvas de peces fue separado de las muestras

madre de plancton y las submuestras de ictioplancton fueron preservadas en formaldehído al 1% para su conservación final.

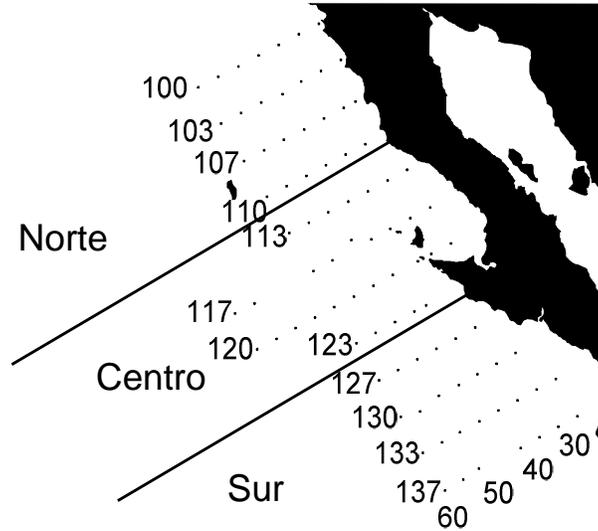
La determinación taxonómica de las larvas de *S. japonicus*, se realizó utilizando como principal fuente bibliográfica el trabajo de Kramer (1960). La abundancia de larvas de macarela se presentó en número de larvas por 10 m<sup>2</sup>. Las larvas fueron medidas individualmente en su longitud estándar (LE) y altura del cuerpo (AC), con la ayuda de un microscopio estereoscopio (marca Carl Zeiss, modelo SV11), provisto de un micrómetro ocular.

**Análisis hidrográfico.** Los datos de TSM se obtuvieron de las mediciones realizadas con CTD en el primer nivel de profundidad (0m) interpolados a través del método de Kriging, con una resolución espacial de 6.66 x 6.66 Km aproximadamente.

Los mapas de circulación geostrófica, derivados de las anomalías de la altura del nivel medio del mar (NMM), se generaron a partir de los datos de anomalías de alturas dinámicas y sus componentes vectoriales, descargados de *Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic* (AVISO) (<http://www.aviso.altimetry.fr/>). Los mapas se presentaron con una resolución espacial de 33 x 33 Km y los flujos de corrientes expresados en cm s<sup>-1</sup>. Se utilizó la información de las anomalías de la altura del NMM en lugar de los cálculos de altura dinámica *in situ*, debido a que la información satelital permite una visión más amplia de la circulación oceánica superficial de la zona. Los mapas obtenidos son un promedio de los datos diarios para las fechas de cada crucero.

La distribución de la abundancia de larvas fue superpuesta en estos mapas, con la finalidad de llevar a cabo una exploración cualitativa de la influencia potencial de la TSM y del flujo de corrientes, entre otras estructuras (e. g., giros y meandros).

**Análisis de tallas y desarrollo.** Con el fin de identificar zonas propicias para el desarrollo larval de *S. japonicus* y realizar comparaciones, el área de estudio se dividió en tres zonas: norte; centro y sur, basada en las subdivisiones propuestas en Moser *et al.* (1993) (Fig. 2).



**Figura 2.** División del área de estudio de acuerdo a Moser *et al.* (1993); zona norte (líneas 100 a 110), zona centro (líneas 113 a 123) y zona sur (líneas 127 a 137).

Para conocer si hubo diferencias significativas entre los promedios de las tallas con la estacionalidad, se realizó una prueba de Kruskal–Wallis y posteriormente un análisis de regresión lineal simple para observar la tendencia de desarrollo (incremento de la AC en relación con la LE) en cada zona-temporada. Solo se realizó el análisis para cada zona-temporada con un número de individuos  $N > 30$ . La proporcionalidad del incremento de la AC respecto de la LE, fue corroborada mediante un ajuste del Análisis de Medias Geométricas (AMG) propuesto por Ricker (1984), el cual se calculó con la siguiente ecuación:

$$S \log Y = b S \log X$$

Donde,  $Y$  representó la medida de AC,  $X$  la medida de LE en milímetros y  $S$  la desviación estándar. La diferencia entre las desviaciones estándar de los logaritmos (representada por  $b$ ), al diferir de 1 (es decir  $1 - b$ ) pudo ser comparada con los valores  $t$  de tablas para  $N - 2$  grados de libertad (con 95 % de confianza) con lo cual se decidió si existe o no un desarrollo alométrico en la relación AC vs. LE (Ricker, 1984).

Con la premisa de que la temperatura y la disponibilidad del alimento son las variables con mayor influencia en el desarrollo larval de *S. japonicus* (Hunter & Kimbrell, 1980; Sassa & Tsukamoto, 2010; Weber & McClatchie, 2012), se realizó un análisis de cocientes para identificar los intervalos preferenciales en la distribución de las larvas, y como variables exploratorias (covariantes) a la TSM y la BZ. Se utilizó la TSM (*in situ*) y los valores de BZ estandarizados a 1000m<sup>3</sup> de cada estación. El análisis de cocientes de la abundancia se calculó con la siguiente ecuación:

$$Q_i = \frac{A_i / N_i}{A_i / N_i}$$

Donde  $N_i$  y  $A_i$  denotan, respectivamente, el número de estaciones y la abundancia total por clase  $i$ . Los valores de cociente mayores a 1 ( $Q_i > 1$ ) indican la selección de hábitat positivo, es decir, rango de temperatura y BZ óptima (Ibaibarriaga *et al.*, 2007).

Por último, para identificar las zonas y temporadas en que el ambiente favorece el mejor desarrollo larval de *S. japonicus*, se comparó la tendencia del incremento de la AC respecto de la LE en el desarrollo larval, obtenida con el análisis de regresión lineal simple, con la TSM y la BZ en las que las larvas se presentaron. Esta información se presentó con una sobreposición de los valores de incremento en gráficas de frecuencia de estas variables, para cada una de las zonas (norte, centro y sur), dentro de las temporadas analizadas (invierno, primavera y verano).

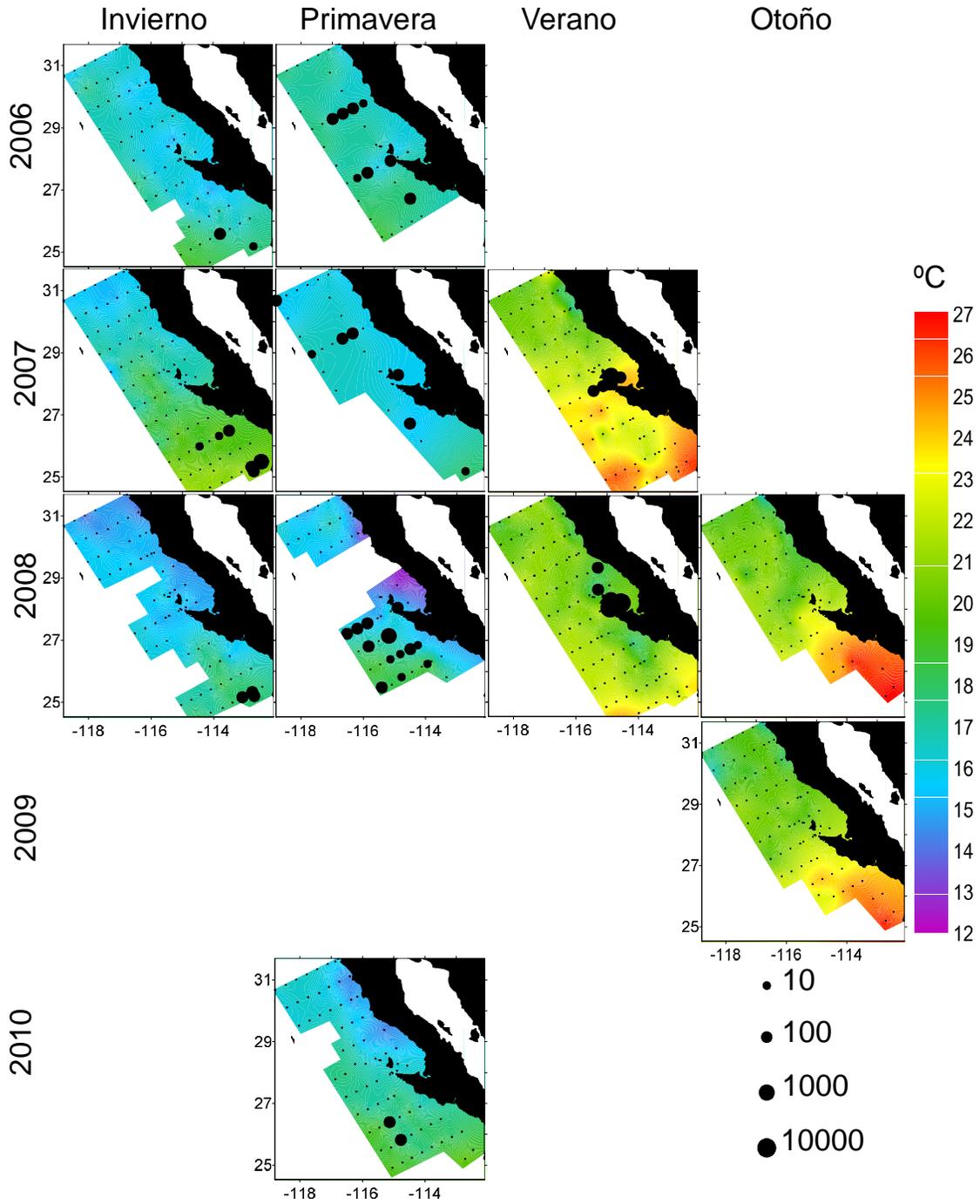
## RESULTADOS

**Distribución espacio-temporal de la abundancia.** Durante las temporadas de invierno, las larvas de *S. japonicus* estuvieron presentes solo en la zona sur y por lo general cerca de la costa, coincidiendo con los bordes de un giro anticiclónico que es común en todos los inviernos con temperaturas entre 18 y 20 °C (Figs. 3 y 4).

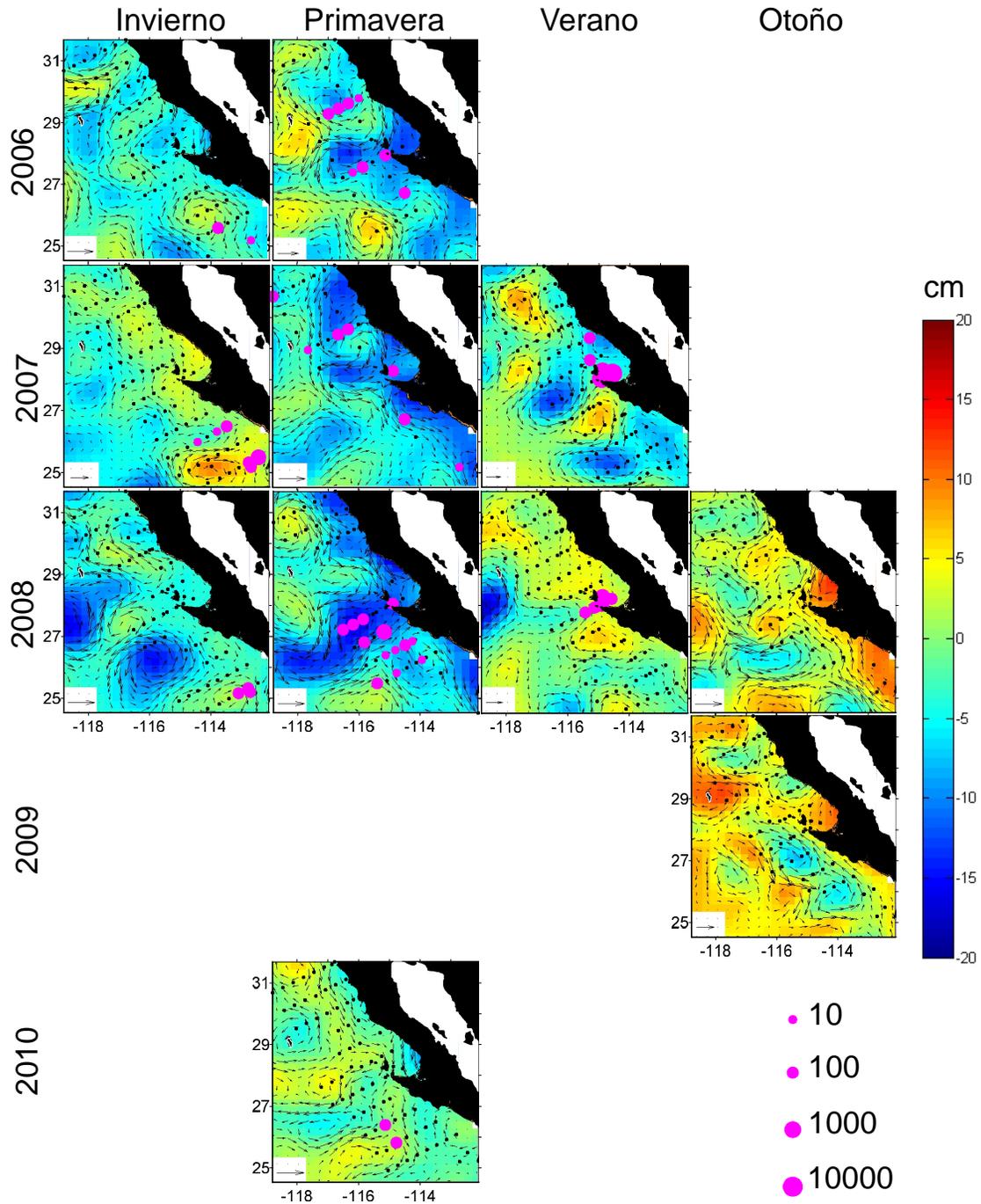
En la temporada de primavera, las larvas de la macarela del Pacífico estuvieron presentes en toda el área de estudio, tanto en estaciones oceánicas como costeras (excepto en la primavera del 2010). La mayor abundancia de larvas en primavera, se observó en sobre la convergencia de giros frente a Punta Baja, B. C. y frente a Punta Eugenia B. C. S., en un giro ciclónico relacionado con el efecto de punta que desvía el flujo hacia mar abierto, el cual presentó mayor efecto en la primavera de 2008. No obstante, se observó una zona de concentración de larvas en la zona sur, en los bordes de una estructura anticiclónica (2008 y 2010). Durante las temporadas de primavera, las larvas concurren en un intervalo menor de TSM (15 – 20 °C) (Figs. 3 y 4).

Durante los muestreos de verano, la más alta abundancia de larvas (10000 larvas/10 m<sup>2</sup>) se presentó solo en la parte costera de la zona centro, relacionada con un intervalo térmico más elevado 19 y 23 °C. La distribución de las larvas pudo haber sido delimitada por dos estructuras oceanográficas, una ciclónica y otra anticiclónica frente a Punta Eugenia (durante el verano del 2007) y un contraflujo serpenteante a lo largo del margen costero que se aleja de la costa en la zona norte, el cual pareciera transportar agua hacia la costa frente a Punta Eugenia durante el verano de 2008 (Figs. 3 y 4).

Durante el otoño, no hubo registro de larvas de *S. japonicus* en toda el área de estudio; lo que se relacionó con un incremento de la TSM (21 a 27 °C) y una intensificación de un contraflujo costero con dirección hacia el norte (Figs. 3 y 4).



**Figura 3.** Distribución espacio-temporal de la temperatura y abundancia larval (larvas/10 m<sup>2</sup>) de *Scomber japonicus*, para invierno, primavera, verano y otoño, durante el periodo de 2006 a 2010.

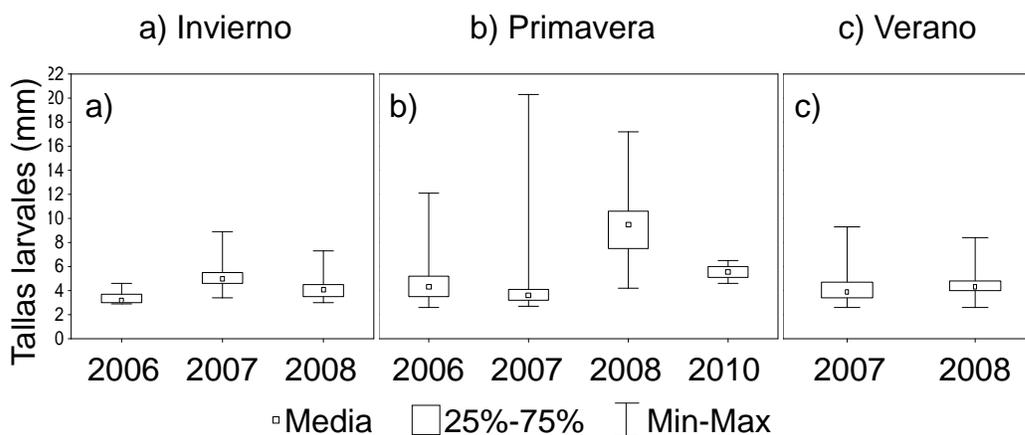


**Figura 4.** Distribución espacio-temporal de las anomalías en la altura del nivel medio del mar y de la abundancia larval (larvas/10 m<sup>2</sup>) de *Scomber japonicus*, para invierno, primavera, verano y otoño durante el periodo de 2006 a 2010. Las flechas identifican la dirección e intensidad del flujo de corrientes, referenciada a 25 cm s<sup>-1</sup> en el recuadro inferior izquierdo de cada mapa.

**Distribución temporal de tallas larvales.** Durante el invierno del 2007, el intervalo de tallas fue de 3.4 a 8.6 ( $\bar{x}$ = 5.1 mm de LE) y fue similar en invierno del 2008 (3-7.3;  $\bar{x}$ = 4.5 mm de LE), sin que hubiera diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). En cambio el intervalo de tallas fue significativamente menor en invierno del 2006 (2.9-4.6;  $\bar{x}$ = 3.5 mm de LE) (Fig. 5a).

Durante la temporada de primavera de los años 2006 y 2007, el intervalo de tallas fue comparativamente más amplio (2.6-12.1 y 2.7-20.3 mm de LE, respectivamente); en cambio, en la primavera de 2010 el intervalo fue más corto (4.6-6.5 mm de LE). No obstante, no se observaron diferencias significativas en los promedios de talla durante primavera en los tres años (2006, 2007 y 2010;  $\bar{x}$ = 4.6, 4.2 y 5.5. mm de LE, respectivamente). Solo en la primavera de 2008, a pesar de que se observó un intervalo de 4.2-17.2 mm de LE (similar a la de primavera de los años 2006 y 2007), el promedio de tallas fue significativamente mayor ( $\bar{x}$ = 9.0 mm de LE) (Fig. 5b).

Por otra parte, se pudo determinar qué en las temporadas de verano de los años 2007 y 2008, las tallas de las larvas de *S. japonicus* fueron similares en sus intervalos (2.6-9.3 y 2.6 -8.4 mm de LE, respectivamente) y en sus promedios ( $\bar{x}$ = 4.2 y 4.3 mm de LE, respectivamente), sin mostrar diferencias significativas entre ambos veranos (Fig. 5c).



**Figura 5.** Distribución anual y temporal de la variabilidad de tallas observadas en larvas de *Scomber japonicus*.

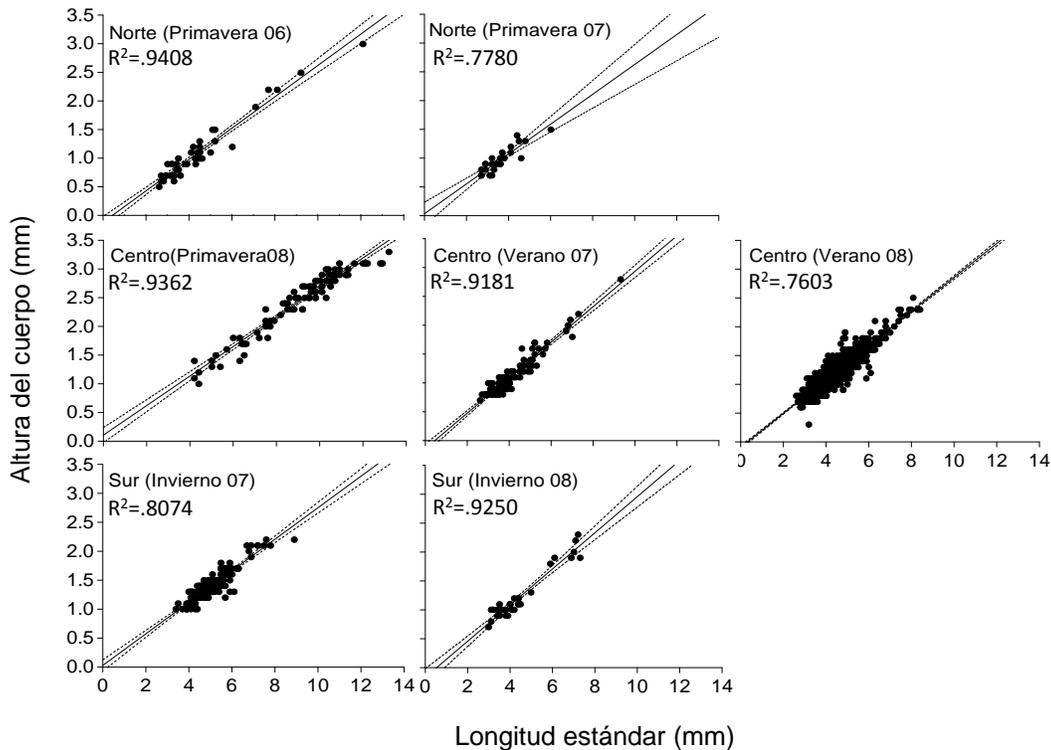
**Análisis del crecimiento larval con relación a la altura del cuerpo (AC) y su longitud estándar (LE).** En la zona norte, durante la temporada de primavera de los años 2006 y 2007, las larvas de *S. japonicus* presentaron incrementos comparativamente bajos de la AC por cada milímetro de LE (AC/1 mm LE) (0.273 y 0.256 mm de AC/1 mm LE, respectivamente), aunque con una amplia variabilidad representada por el error estándar del incremento (EE) (0.010 y 0.026 mm de AC/1 mm LE, respectivamente). De forma similar, en la zona centro, en la primavera de 2008 se observó un bajo incremento (0.257 mm de AC/1 mm LE); mientras que, en verano de los años 2007 y 2008, el incremento de la AC fue alto (0.307 y 0.292 mm de AC/1 mm LE, respectivamente). No obstante, en la zona centro, tanto en primavera de 2008 como en verano de los años 2007 y 2008, siempre se observó una baja variabilidad en el incremento de la AC (0.007, 0.009 y 0.003 mm de AC/1 mm LE, respectivamente). En la zona sur, durante el invierno de 2008, las larvas de la macarela presentaron el mayor incremento (0.312 mm de AC/1 mm LE), aunque con una amplia variabilidad (0.015 mm de AC/1 mm LE). En cambio, en el invierno del 2007 el incremento fue bajo (0.272 de AC/1 mm LE) y con una baja variabilidad (EE= 0.009 mm de AC/1 mm LE) (Tabla 2).

El modelo de regresión evidenció que el incremento de la AC, con respecto a la LE en las larvas de *S. japonicus*, fue siempre lineal y altamente correlacionado (Fig. 6). Además, el ANCOVA mostró diferencias significativas en los incrementos, entre las zonas norte, centro y sur durante invierno, primavera y verano de los años analizados ( $p < 0.05$  en la media ajustada y en la homogeneidad de la pendiente) (Tabla 3). Así mismo, en el análisis de medias geométricas se observó que ninguno de los valores de  $1-b$  fue mayor que el valor teórico con grados de libertad  $N-2$ , esto demuestra que el desarrollo de las larvas de macarela en la relación AC vs. LE, siempre fue proporcional o isométrico (Tabla 4).

Cabe señalar que las larvas utilizadas en el análisis de regresión lineal simple y en el análisis de medias geométricas se presentaron en un intervalo de tallas de 2.2 a 13.2 mm de LE. Las larvas de tallas mayores ( $>13.2$  mm) fueron escasas y no formaron parte del análisis, porque estuvieron presentes en las zonas donde el número de individuos fue insuficiente para el análisis ( $N < 30$ ).

**Tabla 2.** Parámetros del modelo de regresión simple para cada zona analizada: ( ) intercepto de la pendiente; (EEP) error estándar de la pendiente; ( ) valor del incremento en milímetros por cada milímetro de LE; (EE) error estándar del incremento en milímetros; ( $R^2$ ) valor de la variabilidad de los datos explicada por el modelo; valor de F y estadístico P.

Modelo AC x LE		EEP	EE		$R^2$	F	P
Norte-primavera 2006	-0.119	0.050	0.273	0.010	.9408	684.77	<0.0000
Norte-primavera 2007	0.033	0.098	0.259	0.026	.7780	95.624	<0.0000
Centro-primavera 2008	0.105	0.066	0.257	0.007	.9362	1263.0	<0.0000
Centro-verano 2007	-0.138	0.040	0.307	0.009	.9181	1111.7	<0.0000
Centro-verano 2008	-0.079	0.014	0.292	0.003	.7603	7893.0	<0.0000
Sur-invierno 2007	0.029	0.049	0.272	0.009	.8074	810.20	<0.0000
Sur-invierno 2008	-0.167	0.073	0.312	0.015	.9250	395.72	<0.0000



**Figura 6.** Tendencia del incremento de la altura del cuerpo (AC) en relación a la longitud estándar (LE) de *Scomber japonicus*, para la zona norte, centro y sur; durante invierno, primavera y verano de los años analizados.

**Tabla 3.** Análisis de covarianza (ANCOVA) con valores de media ajustada y homogeneidad de pendiente (F) y valor P, que comprueban las diferencias significativas entre cada una de las zonas de los cruceros analizados.

F	Media ajustada		Homogeneidad de pendiente	
	P		F	P
1.45		0.00000000000000509	7.61	0.000000412

**Tabla 4.** Valores obtenidos del análisis de las medias geométricas para cada una de las tres temporadas analizadas.

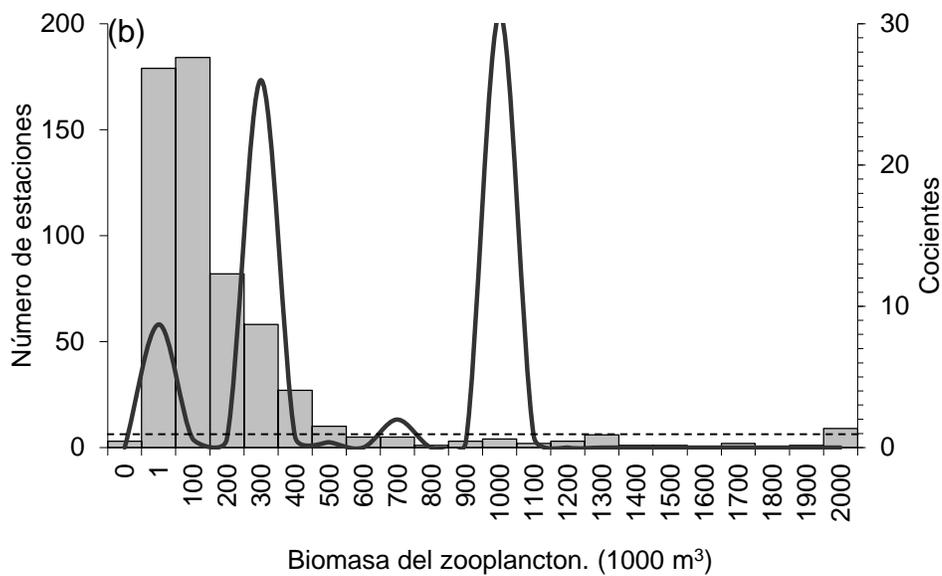
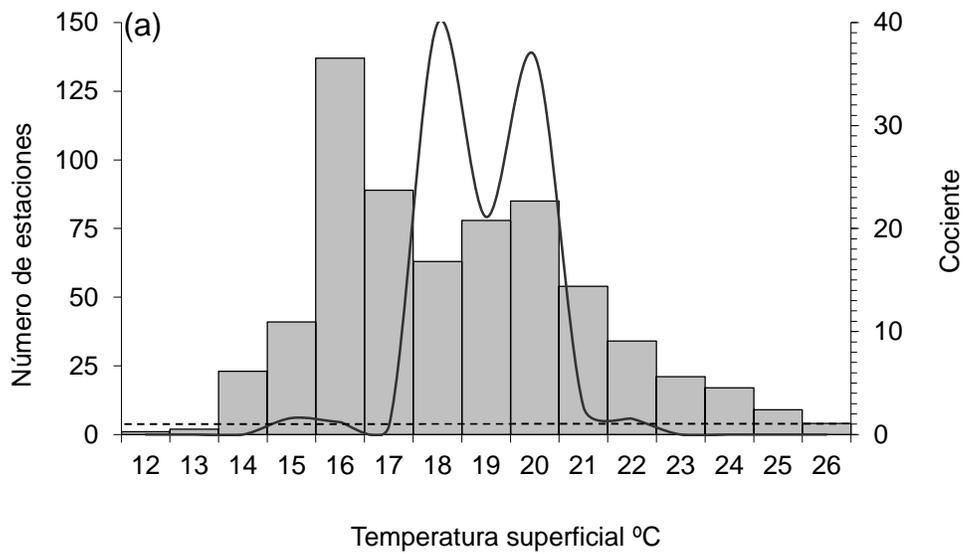
Modelo AC x LE	Valor 1- <i>b</i>	Valor teórico gl. N-2
Norte, primavera 2006	1.0258	1.6759
Norte, primavera 2007	1.0104	1.7056
Centro, primavera 2008	1.0017	1.6602
Centro, verano 2007	1.0155	1.6602
Centro, verano 2008	1.0171	1.645
Sur, invierno 2007	1.0062	1.645
Sur, invierno 2008	1.0166	1.6839

**Relación del desarrollo de *S. japonicus* con la temperatura del ambiente y biomasa del zooplancton.** Las larvas de *S. japonicus* se presentaron en un intervalo preferencial de 15 a 22 °C de TSM (excepto a 17 °C) indicado por el análisis de cocientes, mientras que las larvas concurren en diferentes niveles preferenciales de la BZ (1, 300, 700 y 1000 ml/1000m<sup>3</sup>) (Fig. 7).

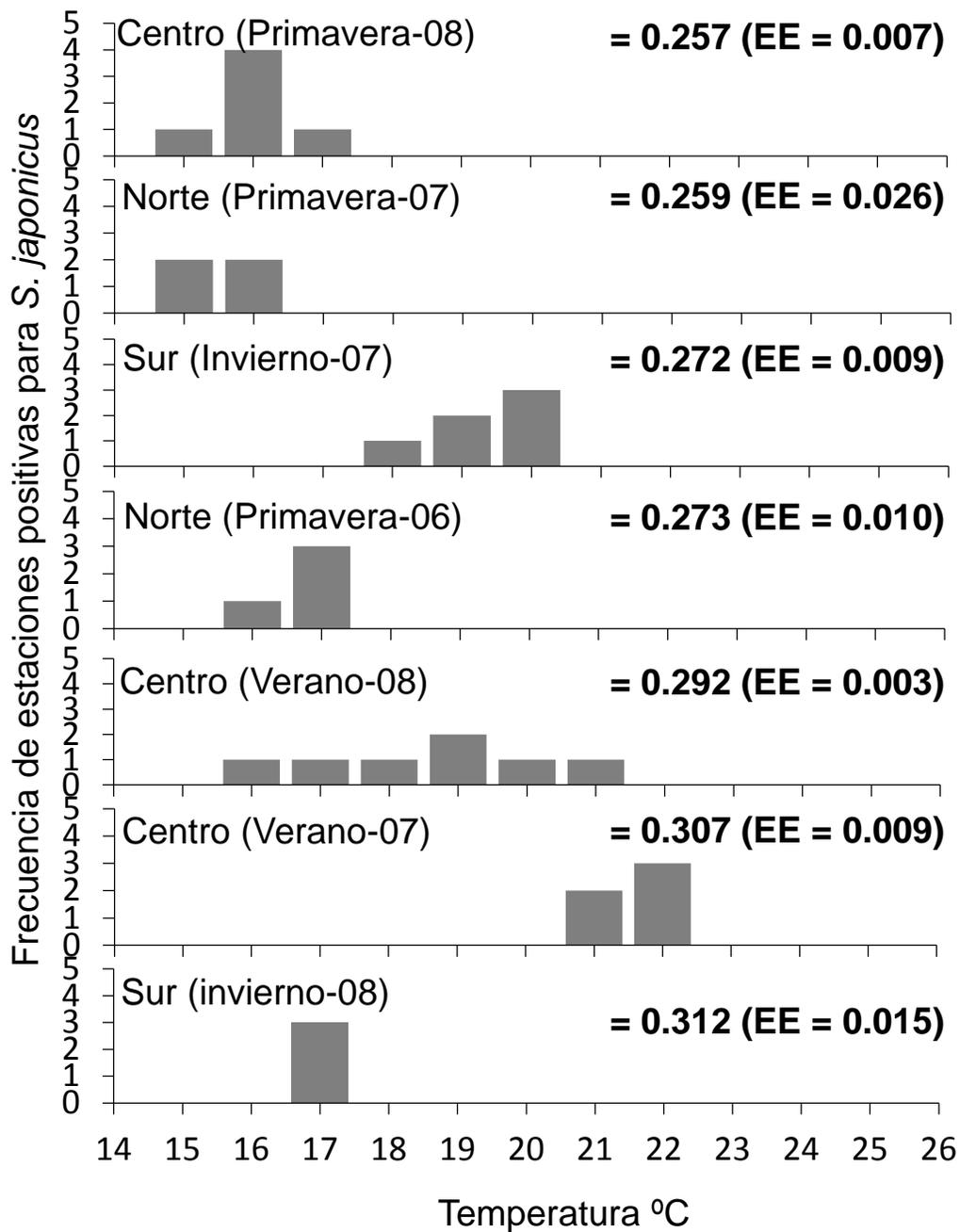
El incremento en la AC de las larvas con respecto a la TSM, fue comparativamente menor (0.257-0.273 mm), a temperaturas entre 15 y 20 °C durante la primavera. Al contrario del verano, con un mayor incremento (0.292-0.307

mm), relacionadas con un ligero aumento en la temperatura (16-22 °C). En las épocas de invierno, aunque los incrementos fueron distintos para las larvas de 2007 y 2008 (0.272 y 0.312 mm, respectivamente), estas se presentaron en temperaturas de entre 18-20 y 17°C, respectivamente (Fig. 8).

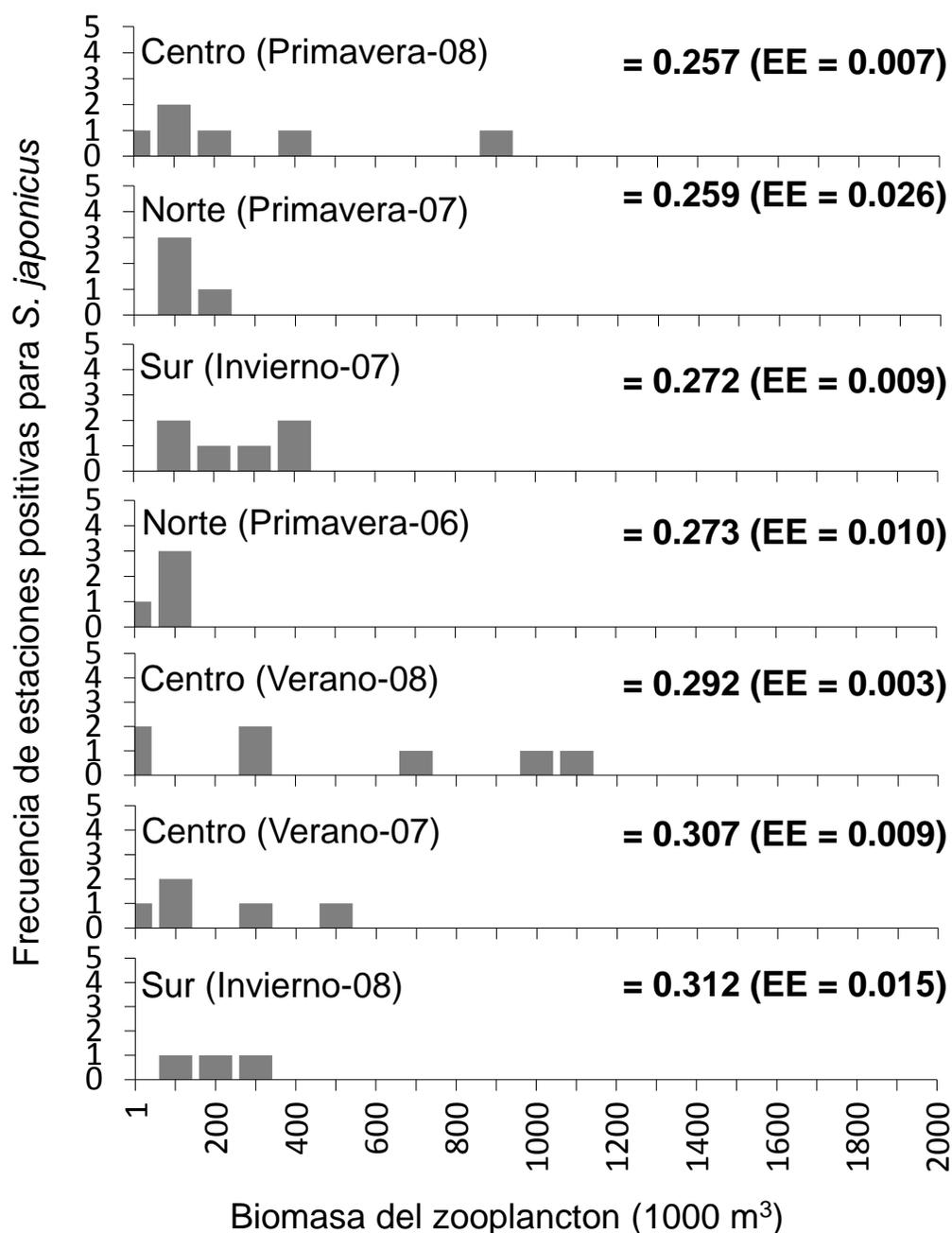
Por otro lado, la variación en los niveles de BZ y la latitud geográfica se relacionaron con los cambios en la variabilidad del incremento de la AC. En la zona norte y sur, cuando las larvas presentan una mayor variabilidad en el incremento (0.009-0.026 mm) los niveles de BZ fueron menores a 400 ml/1000m<sup>3</sup>, mientras que en la zona centro, con menor variabilidad en el incremento (0.003-0.009 mm) los niveles de BZ fueron más altos (>500 ml/1000m<sup>3</sup>) (Fig. 9).



**Figura 7.** Líneas de cocientes de la abundancia larval de *Scomber japonicus*: (a) con respecto a la temperatura superficial del mar y (b) la biomasa del zooplancton. Las barras indican el número de estaciones tomadas en cada clase de temperatura y biomasa del zooplancton. Los valores de cociente >1 (por encima de la línea punteada) indican una preferencia a la variable ambiental.



**Figura 8.** Frecuencia de las estaciones positivas por cada °C de temperatura para las larvas de *Scomber japonicus* en relación al incremento de la altura del cuerpo con respecto a la longitud estándar, para cada zona de cada temporada analizada. Las barras indican la frecuencia de estaciones positivas; el valor de indica el incremento en milímetros; el valor de EE indica la variación del incremento.



**Figura 9.** Frecuencia de las estaciones positivas por cada 100 ml/ 1000 m<sup>3</sup> de BZ para las larvas de *Scomber japonicus* en relación al incremento de la altura del cuerpo con respecto a la longitud estándar, para cada zona de cada temporada analizada. Las barras indican la frecuencia de estaciones positivas; el valor de indica el incremento en milímetros; el valor de EE indica la variación del incremento.

## DISCUSIÓN

Las larvas de *S. japonicus* presentaron una marcada diferencia estacional en su distribución y abundancia. Durante las temporadas de invierno, se presentaron solo en la zona sur (frente al Golfo de Ulloa), mientras que en las temporadas de primavera la distribución se extendió por toda el área de estudio, incluso en las estaciones de muestreo más oceánicas. En ambas temporadas del año (invierno y primavera), las abundancias en cada estación de muestreo, fueron comparativamente bajas (10 y 100 larvas/10m<sup>2</sup>). En contraste, durante las temporadas de verano las larvas, en las estaciones positivas alcanzaron la más alta abundancia (1000 larvas/10m<sup>2</sup>) y su distribución se restringió solo al área costera frente a Punta Eugenia. Al respecto, Moser *et al.* (1993) señalan que es común observar dos incrementos de la abundancia larval frente a la COPBC, uno en invierno frente a Bahía Magdalena y otro más abundante en verano alrededor de Punta Eugenia.

La diferencia en tiempo y espacio en la distribución de las larvas de *S. japonicus*, sugiere la presencia de diferentes stocks. Esto es consistente con la identificación previa de dos stocks frente a la COPBC (Gluyas-Millán & Quiñónez-Velázquez, 1996): uno frente a Bahía Magdalena que es más evidente durante el invierno (Arcos-Huitrón & Torres-Villegas, 1990), y otro frente a Bahía Sebastián Vizcaíno, cuya distribución es más amplia durante la primavera y posteriormente se concentra frente a Punta Eugenia durante el verano (Gluyas-Millán, 1994).

En apoyo a la existencia de los dos stocks de la macarela del Pacífico, la amplia distribución de larvas en primavera sugiere que pudiera corresponder a un stock norteño, relacionado con temperaturas comparativamente menores (15-20 °C), el cual se restringe a la zona costera frente a Punta Eugenia en verano (Gluyas-Millán, 1994). En cambio, la presencia de larvas restringidas a la porción sur del área de estudio durante el invierno (Golfo de Ulloa), pudiera corresponder a un stock sureño relacionado con temperaturas alrededor de 18-20 °C. Este intervalo coincide con el determinado en Bahía Magdalena (18.5-23.5 °C; Funes-Rodríguez *et al.*, 2007) y en el Golfo de California (16-22 °C; Esqueda-Escárcega, 1995) y por consiguiente, los organismos que se distribuyen al sur de la costa occidental de la

península de Baja California y al interior del Golfo de California, podrían corresponder este stock sureño.

El intervalo preferencial de temperatura en el que se presentaron las larvas de macarela del Pacífico, es similar al reportado para todo el sistema de la CC (14 a 21.9 °C; Kramer, 1960; Weber & McClatchie, 2012), incluso en la distribución de larvas de la macarela del sur del Mar de China (Sassa & Tsukamoto, 2010). No obstante, la copiosa agregación de larvas en la zona costera frente a Punta Eugenia en verano, semeja la existencia de un hábitat apropiado, con temperaturas entre 19 y 23 °C. En apoyo a lo anterior, Hunter & Kimbrell (1980) señalan que en este intervalo la especie tiende a completar exitosamente su desarrollo larval. Los resultados de este trabajo indican que evita temperaturas de más de 23 °C, a juzgar por la ausencia de larvas y temperaturas elevadas en otoño; además en esta temporada disminuye la actividad reproductiva de la macarela del Pacífico (Kramer, 1969).

El efecto de los giros de mesoescala, ha sido señalado como precursor en la retención y probable reducción de la mortalidad en larvas de diferentes especies pelágico-costeras como la sardina monterrey y anchoveta norteña (Logerwell & Smith, 2001; Aschy & Checkley, 2013), así como de la macarela y otros escómbridos (Alemany *et al.*, 2010; Sassa & Tsukamoto, 2010). De igual forma, los flujos de las corrientes y estructuras de mesoescala como giros y meandros, pudieran ser responsables del transporte y retención en organismos de plancton en la zona de estudio (Funes-Rodríguez *et al.*, 2015). Durante la primavera, el transporte de larvas hacia el sur por el flujo de la CC, además del efecto de punta aunado al transporte de Ekman (Parrish *et al.*, 1981; Norcross & Shaw, 1984), pudieran ser la causa de la amplia distribución latitudinal y hacia mar abierto de las larvas, principalmente frente a Punta Eugenia; también se observó una zona de retención frente a Punta Baja en primavera, al parecer relacionada con una convergencia entre dos giros, uno ciclónico y otro anticiclónico. De manera similar, la mayor concentración de larvas observada frente a Punta Eugenia en verano, parece estar asociada a un giro ciclónico frente a Bahía Sebastián Vizcaíno y otro anticiclónico hacia el sur, además de un contraflujo serpenteante hacia el norte que

parece evitar su dispersión hacia mar abierto y las concentra en la costa (Parrish *et al.*, 1981; Norcross & Shaw, 1984). Esto último como resultado del debilitamiento en el transporte del agua de la CC, relacionado con los cambios en la circulación oceánica en el extremo sureño de la CC (Durazo *et al.*, 2010).

Cabe señalar que de acuerdo con el *Climate Diagnostic Bulletin*, de la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/index.html>) , la información de los cruceros analizados durante el periodo de estudio, se ubica en un periodo caracterizado por anomalías negativas en el índice multivariado El Niño (MEI, por sus siglas en ingles); excepto en la primavera del 2010, con evento El Niño moderado, cuando las abundancias fueron reducidas. En consistencia con un incremento en la abundancia de larvas de macarela, y la reducción en la intensidad del flujo de la CC (Sinclair *et al.*, 1985)

La variabilidad de tallas presentó una marcada diferencia estacional. Durante las temporadas de invierno y verano, las larvas fueron de menor tamaño y no superaron los 9 mm de LE; mientras que en las temporadas de primavera del 2006, 2007 y 2008, alcanzaron tallas de hasta 20.3 mm de LE. De acuerdo con Folkvord *et al.* (2009), la diferencia en la variabilidad de tallas está influenciada por la temperatura y disponibilidad de las presas (i. e., entre mayor sea la variación de estos factores, mayor será la variación de las tallas, siempre y cuando no se excedan los límites de tolerancia). Esto pudiera ser relacionado con la amplia variabilidad de tallas observada durante las temporadas de primavera (2.5-20.3 mm LE), las cuales se presentaron en un amplio intervalo térmico (15-20 °C). Además, las pequeñas tallas observadas en las temporadas de invierno, se presentaron en un intervalo de temperatura comparativamente más corto (18-20 °C). Por el contrario, las pequeñas tallas observadas durante las temporadas de verano, parecen estar más relacionadas con un ligero incremento en la TSM (16-23 °C) (Ehrlich *et al.*, 1976), que con la variación de este factor. Al respecto, Matsuura & Hewitt, (1995) mencionan que la agregación de larvas de *S. japonicus* con tallas similares dentro de un hábitat, reduce el canibalismo y por lo tanto aumentan las probabilidades de supervivencia.

El crecimiento de las larvas de la macarela del Pacífico fue siempre isométrico en la relación AC/LE. Esta relación es un indicador de la condición nutricional de las larvas (Ehrlich *et al.*, 1976) y en consecuencia del crecimiento, el cual puede variar dependiendo de la temperatura y del alimento (Hunter & Kimbrell, 1980). Se considera que las condiciones térmicas y de disponibilidad de alimento óptimas que permitieron un adecuado desarrollo larval, se presentaron en el área frente a Punta Eugenia durante las temporadas de verano. Donde la baja variabilidad en los altos incrementos en la AC, coincidió con una alta disponibilidad de alimento y un incremento en la temperatura. Por el contrario, aun cuando las larvas presentaron mayores tallas en las temporadas de primavera, el incremento de la AC fue menor. Además, la alta variabilidad observada en este incremento en las larvas de la zona sur durante las temporadas de invierno, pudieran indicar una aparente deficiencia nutricional en las larvas durante invierno y primavera, y en consecuencia un menor desarrollo y un crecimiento en un tiempo más prolongado (Ehrlich *et al.*, 1976; Hunter & Kimbrell, 1980; Pörtner *et al.*, 2010).

Por otro lado, el rápido crecimiento en larvas de *S. japonicus* es una característica de las larvas de los escómbridos, por lo que requieren de una temperatura óptima y una adecuada alimentación (Hunter & Kimbrell, 1980). La temperatura no sólo determina la velocidad del crecimiento, también cambia el patrón de desarrollo, a menor temperatura el desarrollo se prolonga y viceversa, a temperaturas más altas se genera un inicio temprano de la alimentación exógena y la natación de las larvas (Pörtner *et al.*, 2010). Un hábitat que proporciona una temperatura óptima y altos niveles de presas, permite un rápido crecimiento y mayor probabilidad de supervivencia (Hunter & Kimbrell, 1980; Werner, 2002; Kanaji *et al.*, 2009).

En resumen, los resultados de este trabajo sugieren que durante la primavera, a pesar de estar más ampliamente distribuidas, las larvas del stock norteño presentan una probable deficiencia nutricional que en consecuencia prolonga su desarrollo; esto es debido a que en esta temporada, las larvas se presentaron en temperaturas y niveles de BZ comparativamente bajas. Durante el verano, la contracción de este stock en el área de Punta Eugenia, provocada por

los procesos oceanográficos de la zona, permite que las larvas al encontrarse en condiciones idóneas de temperatura y en una alta disponibilidad de alimento, pueden presentar una mejor condición nutricional y en consecuencia obtengan una mayor robustez y aumenten su desarrollo.

## **CONCLUSIONES**

Durante la primavera las larvas del stock norteño se encuentran más ampliamente distribuidas; pero durante esta temporada, las larvas son menos robustas durante el desarrollo.

En la temporada de verano, las larvas del stock norteño se concentran en el área frente a punta Eugenia por efecto de retención, donde las condiciones térmicas y los niveles de biomasa de zooplancton permitieron un óptimo desarrollo larval, con la presencia de larvas más robustas.

En invierno las larvas del stock sureño extienden su distribución hasta el área frente al Golfo de Ulloa, con larvas menos robustas.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Aleman, F., L. Quintanilla, P. Velez-Belchí, A. García, D. Cortés, J. M. Rodríguez, M. L. Fernández de Puellas, C. González-Pola & J. L. López-Jurado. 2010. Characterization of the spawning habitat of atlantic bluefin tuna and related species in the Balearic Sea (Western Mediterranean). *Prog. Oceanogr.*, 86(1-2):21-38.
- Arévalo-Martínez, D. L. & A. Franco-Herrera. 2008. Características oceanográficas de la surgencia frente a la ensenada de gaira, departamento de magdalena, época seca menor de 2006. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 37(2):131-162.
- Arcos-Huitrón, N. E. & J. R. Torres Villegas. 1990. Ciclo reproductor de la macarela del Pacífico *Scomber japonicus* Houttuyn (Pisces: Scombridae) en Bahía Magdalena, Baja California Sur, México. *Inv. Mar. CICIMAR*, 5(1):37-45.
- Arrizabalaga, H., F. Dufour, L. Kell, G. Merino, L. Ibaibarriaga, G. Chust, X. Irigoien, J. Santiago, H. Murua, I. Fraile, M. Chifflet, N. Goikoetxea, Y. Sagarminaga, O. Aumont, L. Bopp, M. Herrera, J. M. Fromentin & S. Bonhommeui, 2015. Global habitat preferences of commercially valuable tuna. *Deep Sea Res. II*. 113:102-113.
- Asch, R. G. & D. M. Checkley. 2013. Dynamic height: a key variable for identifying the spawning habitat of small pelagic fishes. *Deep-Sea Res. I*, 71:79-91.
- Balon, E. K. 2001. Saltatory ontogeny and the life-history model: neglected processes and patterns of evolution. *J. Bioec.*, 3(1):1-26.
- Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean: ocean processes and marine population dynamics. University of California Sea Grant (in cooperation with Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste, La Paz, Baja California Sur, Mexico), San Diego, California, USA., 323 p.
- Brown E., A. Colling, D. Park, J. Phillips, D. Rothery & J. Wright. 2001. Ocean circulation (Second Edition). The open university, 286 p.
- Criales-Hernández, M., E. Arteaga & L. Manjarrés. 2003. Distribución espacio-temporal y tallas de las larvas de tres especies de lutjánidos en el área norte del Caribe colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 27(102):85-91.

- Coutant, C. C. 1987. Thermal preference: when does an asset become a liability?. *Environ. Biol. Fish.*, 18:161-172.
- De la Lanza-Espino, G., C. Cáceres-Martínez, S. Adame-Martínez & S. Hernández-Pulido. 1999. Diccionario de hidrología y ciencias afines. Plaza y Valdes. México, 286 p.
- Durazo, R., A. M. Ramírez, L. E. Miranda & L. A. Soto-Mardones. 2010. Climatología de variables hidrográficas, 25-57. En: Gaxiola-Castro, G. & R. Durazo (Eds.) Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1977–2007: diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California, 501 p.
- Ehrlich, K. F., J. H. S. Blaxter & R. Pemberton. 1976. Morphological and histological changes during the growth and starvation of herring and plaice larvae. *Mar. Biol.*, 35:105-118.
- Esqueda-Escarcega, G. M. 1995. Spatial and temporal distribution of *Scomber japonicus* larvae in the Sea of Cortez (1984–1988). *Sci. Mar.*, 59(3-4):391-397.
- Esqueda-Escarcega, G. M. & S. Hernández-Trujillo. 1995. Características del hábitat del desarrollo larval de tres especies de peces batilágidos (Pisces: Salmoniformes). *Cien. Mar.*, 21(4):427-438.
- Froese, R. 1990. Growth strategies of fish larvae. ICES C.M./L:91, 20 p.
- Funes-Rodríguez, R., J. D. Leal-Espinoza, A. Hinojosa-Medina, M. E. Hernández-Rivas & C. Flores-Coto. 2007. Composición, distribución y abundancia de larvas de peces en Bahía Magdalena, 205-219. En: Funes-Rodríguez R., J. Gómez-Gutiérrez & J. R. Palomares-García (Eds.), Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. CICIMAR-IPN. La Paz, Baja California Sur, México, 311 p.
- Funes-Rodríguez, R., J. A. Ruíz-Chavarría, R. González-Armas, R. Durazo & S. A. Guzmán-del Proó. En prensa. Influence of hydrographic conditions on the distribution of Spiny lobster (*Panulirus interruptus*) larvae off the west coast of the Baja California Peninsula. *Trans. Amer. Fish Soc.*
- Folkvord, A., Ø. Fiksen, H. Høie, A. Johannessen, E. Otterlei & K. W. Vollset. 2009. What can size distributions within cohorts tell us about ecological processes in fish larvae?. *Sci. Mar.*, 73:119-130.

- Gluyas-Millán, M. G. 1994. Reproducción, edad y talla de primera madurez de la macarela *Scomber japonicus* (Houttuyn, 1872) en Bahía Vizcaíno. *Sci. Mar.*, 20(3):409–419.
- Gluyas-Millán, G. & C. Quiñónez-Velázquez. 1996. Evidencias de distintos grupos poblacionales de macarela *Scomber japonicus*. *Sci. Mar.*, 22(3):377-395.
- Hare, J. A., & R. K. Cowen. 1997. Size, growth, development, and survival of the planktonic larvae of *Pomatomus saltatrix* (Pisces: Pomatomidae). *Ecol. Soc. of Ame.*, 78(8):2415-2431.
- Hilborn, R. & C. J. Walters. 1992. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty. *Rev. Fish. Biol. Fisher.*, 2:177–178 p.
- Hsieh, Ch-h., C. Reiss, W. Watson, M. J. Allen, J. R. Hunter, R. N. Lea, R. H. Rosenblatt, P. E. Smith & G. Sugihara. 2005. A comparison of long-term trends and variability in population of larvae of exploited and unexploited fishes in the Southern California regions: A community approach. *Prog. Ocean.*, 67:160-185.
- Hunter, J. R., & C. M. Kimbrell. 1980. Early life history of Pacific mackerel. *Scomber japonicus*. *Fish. Bull.*, 78:89-101.
- Ibaibarriaga, L., X. Irigoien, M. Santos, I. Motos, J. M. Fives, C. Franco, A. Lago de Lanzós, S. Acevedo, M. Bernal, N. Bez, G. Eltink, A. Farinha, C. Hammer, S. A. Iversen, S. P. Milligan & D. G. Reid. 2007. Egg and larval distributions of seven fish species in north-east Atlantic waters. *Fish. Ocean.*, 16(3):284-293.
- Iles, T. D. & M. Sinclair. 1982. Atlantic herring: Stock discreteness and abundance. *Science.*, 215:627-633.
- Kanaji, Y., Y. Watanabe, T. Kawamura, S. Xie, Y. Yamashita, C. Sassa & Y. Tsukamoto. 2009. Multiple cohorts of juvenile jack mackerel *Trachurus japonicus* in waters along the Tsushima Warm Current. *Fish. Res.*, 95:139-145.
- Kramer, D. 1960. Development of eggs and larvae of Pacific mackerel and distribution and abundance of larvae 1952–1956. *Fish. Bull.*, 60:393-438.

- Kramer, D. 1969. Synopsis of the biological data on the Pacific mackerel, *Scomber japonicus*, Houttuyn (Northeast Pacific). Fisheries Synopsis. FAO, circular 302, Washington D.C., 18 p.
- Koubbi, P., C. O'Brien, C. Loots, C. Giraldo, M. Smith, E. Tavernier & M. Moteki. 2011. Spatial distribution and inter-annual variations in the size frequency distribution and abundances of *Pleuragramma antarcticum* larvae in the Dumont d'Urville Sea from 2004 to 2010. *Pol. Sci.*, 5(2):225-238.
- 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.
- Li, S. & J. Mathias. 1987. The critical period of high mortality of larval fish - a discussion based on current research. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 5(1):81-96.
- Lincoln, R. J., G. A. Boxshall & P. F. Clark. 1995. Diccionario de ecología, evolución y taxonomía. México. Fondo de Cultura Económica, 488 p.
- Lloris, D. 2007. Glosario ilustrado de ictiología: para el mundo hispanohablante. Instituto de Ciencias del Mar. Barcelona, 966 p.
- Lo, N. C. H., E. Dorval, R. Funes-Rodríguez, M. E. Hernández-Rivas, Y. Huang & Z. Fan. 2010. Utilities of larval densities of Pacific mackerel (*Scomber japonicus*) off California, U.S.A. and west coast of Mexico from 1951 to 2008, as spawning biomass indices. *Cienc. Pesq.*, 18(2):59-75.
- Matsuura, Y. & R. Hewitt. 1995. Changes in the spatial patchiness of Pacific mackerel, *Scomber japonicus*, larvae with increasing age and size. *Fish. Bull.*, 93(1):172-178.
- Moser, H. G., R. L. Charter, P.E. Smith, D. A. Ambrose, S. R. Charter, C. A. Meyer, E. M. Sandknop & W. Watson. 1993. Distributional atlas of fish larvae and eggs in the California Current Region: Taxa with 1000 or more total larvae, 1951 through 1984. CALCOFI ATLAS No.31., 233 p.
- Norcross, B. L. & R. F. Shaw. 1984. Oceanic and estuarine transport of fish eggs and larvae: A review. *Trans. Am. Fish Soc.*, 113:153-165.
- Parrish, R. H., C. S., Nelson, & A., Bakun. 1981. Transport mechanisms and reproductive success of fishes in the California Current. *Biol. Ocean.*, 1(2):175-203.

- Pons, J. M. 2009. La medición del nivel medio del mar: principios y métodos. *Mapping*, (135):6-10.
- Pörtner, H. O., P. M. Schulte, C. M. Wood & F. Schiemer. 2010. Niche dimensions and limits in fishes: an integrative view. Illustrating the role of physiology in understanding ecological realities. *Physiol. Biochem. Zool.*, 83:808-826.
- Ricker, W. E. 1984. Computation and uses of central trend lines. *Can. J. Zool.*, 62:1897-1905.
- Sinclair, M. 1988. Marine populations. An essay on population regulation and speciation. University of Washington Press, Seattle., 252 p.
- Sinclair, M., M. J. Tremblay & P. Bernal. 1985. El Niño events and variability in a Pacific mackerel (*Scomber japonicus*) survival index: support for Hjort's second hypothesis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42:602-608.
- Soto-Mardones, L., A. Parés-Sierra, J. García, R. Durazo & S. Hormazabal. 2004. Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California) from hydrographic, ADCP and altimetry data. *Deep-Sea Res. II*, 51:785-798.
- Sassa, C. & Y. Tsukamoto. 2010. Distribution and growth of *Scomber japonicus* and *S. australasicus* larvae in the southern East China Sea in response to oceanographic conditions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 419(30):185-199.
- Schureman, P. 1989. Tide and current glossary. United states department of commerce, coast and geodetic survey. Special publication no. 228., 40 p.
- Stouthamer, C. E. & M. B. Bain. 2012. Quantifying larval fish habitat in shoreline and shallow waters of the tidal Hudson River. Section VII., 25 p.
- Weber, E. D. & S. McClatchie. 2012. Effect of environmental conditions on the distribution of Pacific mackerel (*Scomber japonicus*) larvae in the California Current system. *Fish. Bull.*, 110(1):85-97.
- Werner, R. G. 2002. Habitat requirements, 161-182. En: Fuiman, L. A. & R. G. Werner (Eds.) Fishery Science, the unique contributions of early life stages. Blacwell Publishing. USA., 326 p.

- Zenteno, J. I., C. A. Bustos & M. F. Landaeta. 2014. Larval growth, condition and fluctuating asymmetry in the otoliths of a mesopelagic fish in an area influenced by a large Patagonian glacier. *Mar. Biol. Res.*, 10(5):504-514.
- Zúñiga-López I., & E. Crespo Del Arco. 2010. *Meteorología y climatología*. UNED. Madrid., 263 p.