



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**



**CICIMAR-IPN**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**

**DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LOS HÁBITATS DE LARVAS DE PECES  
EN LA ZONA SOMERA DEL MÍNIMO OXÍGENO EN EL PACÍFICO ORIENTAL  
TROPICAL FRENTE A MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS**

**PRESENTA**

**SUSAN MERY DAVIES MUSIL**

**LA PAZ, B.C.S., JUNIO 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 04 del mes de Junio 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:

“DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LOS HÁBITATS DE LARVAS DE PECES EN LA ZONA SOMERA DEL MÍNIMO OXÍGENO EN EL PACÍFICO ORIENTAL TROPICAL FRENTE A MEXICO”

Presentada por el alumno:

DAVIES

MUSIL

SUSAN MERY

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro: 

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B | 1 | 1 | 0 | 6 | 3 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|

Aspirante de:

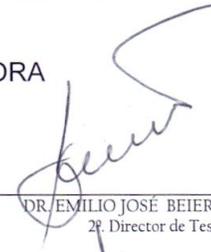
DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

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**

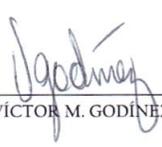
Directores de Tesis

  
\_\_\_\_\_  
DRA. LAURA SÁNCHEZ VELASCO  
Directora de Tesis

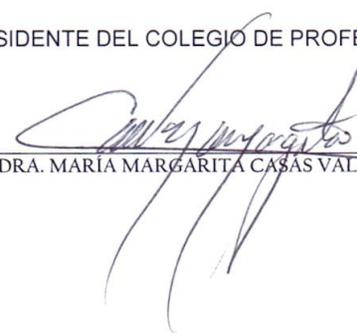
  
\_\_\_\_\_  
DR. EMILIO JOSÉ BEIER MARTÍN  
2º. Director de Tesis

  
\_\_\_\_\_  
DR. FRANCISCO ARREGUÍN SÁNCHEZ

  
\_\_\_\_\_  
DR. JAIME GÓMEZ GUTIÉRREZ

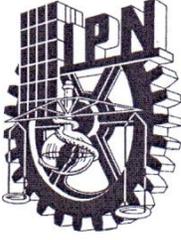
  
\_\_\_\_\_  
DR. VÍCTOR M. GODÍNEZ SANDOVAL

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
\_\_\_\_\_  
DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ



IPN  
CICIMAR  
DIRECCION



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

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 19 del mes junio del año 2015  
el (la) que suscribe MC. SUSAN MERY DAVIES MUSIL alumno(a) del  
Programa de DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

con número de registro B110635 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS  
manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DRA. LAURA SÁNCHEZ VELASCO y DR. EMILIO JOSÉ BEIER

y cede los derechos del trabajo titulado:

“DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LOS HÁBITATS DE LARVAS DE PECES EN LA ZONA  
SOMERA DEL MÍNIMO OXÍGENO EN EL PACÍFICO ORIENTAL TROPICAL FRENTE A MÉXICO”

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: sdavies23@hotmail.com - lsvelasc@gmail.com - ebeier@cicese.mx

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

*Susan Davies M.*  
MC. SUSAN MERY DAVIES MUSIL

*nombre y firma*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) por la oportunidad de realizar el Doctorado en Ciencias Marinas en esta institución de historia y tradición, para seguir en el camino de la investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la Beca Nacional otorgada durante los cuatro años de doctorado, así como por la Beca Mixta para la estancia de investigación en la Universidad de Valparaíso, Chile, y el PNPC para los congresos internacionales a los que asistí, y al Dr. Aguiñiga por su apoyo con el PNPC.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores (BIEFI) por su apoyo económico al finalizar cada semestre de este proceso.

A los proyectos que incluyen este trabajo: SEP-CONACyT 2014-36864 y CB-2014-01-236864 "Influencia de remolinos de mesoescala sobre hábitats de larvas de peces (con énfasis en especies de importancia comercial) en la zona de mínimo de oxígeno del Océano Pacífico frente a México: océano abierto y efecto de islas, MD-SIP-IPN 1721 módulo 2015-0176 "Ecología de larvas de peces y ambiente en el Alto Golfo de California".

A los directores de tesis: Dra. Laura Sánchez Velasco por permitirme ser parte del equipo de trabajo interdisciplinario que encabeza, por acercarme al ictioplancton y por compartir su experiencia en el escrito de artículos científicos. Al Dr. Emilio Beier, por compartir su experiencia en el procesamiento de datos ambientales y permitir usar las instalaciones de la Unidad de La Paz de CICESE.

A los demás investigadores que estuvieron involucrados en este trabajo: Dr. Jaime Gómez Gutiérrez, Dr. Víctor Godínez, Dr. Francisco Arreguin Sánchez, Dra. Patricia Jiménez Rosenberg y Dr. Evgueni Choumiline por la revisión, las charlas e intercambio de conocimiento de ideas, el apoyo y las valiosas observaciones hechas a este trabajo.

Al Laboratorio de Plancton, ahora conocidos como EGOZ, gracias por compartir ideas, charlas, asesorías y consejos en mis presentaciones, por su compañía y amistad.

A mis amigas (Paty, Sandra, Ingrid, Carola, María José, Elizabeth, Rocío, Gaby, Elvira Alice, Moni) muchas gracias por ser incondicionales, por su compañía en este viaje tan largo, gracias por darme ánimo y fuerza para no renunciar en las circunstancias difíciles.

A mi familia, que siempre me apoya incondicionalmente para todo, y son parte fundamental de mi vida. A mi familia Chilena por estar ahí siempre apoyándome, y un agradecimiento especial, para Juan Diego quien ha estado apoyándome desde el inicio de este viaje, ha sido el motor y la fuerza para continuar, gracias por su compañía y su amor, su paciencia y su buena disposición.

## INDICE

|                           |    |
|---------------------------|----|
| ÍNDICE DE FIGURAS         | 7  |
| ÍNDICE DE TABLAS          | 11 |
| ÍNDICE DE APÉNDICES       | 12 |
| GLOSARIO                  | 13 |
| RESUMEN                   | 15 |
| ABSTRACT                  | 16 |
| 1. INTRODUCCIÓN           | 17 |
| 2. ANTECEDENTES           | 20 |
| 3. ÁREA DE ESTUDIO        | 24 |
| 4. JUSTIFICACIÓN          | 30 |
| 5. HIPÓTESIS              | 30 |
| 6. OBJETIVO GENERAL       | 31 |
| 6.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 31 |

|  |    |
|--|----|
| 7. METODOLOGÍA   | 31 |
| 7.1 Obtención y procesamiento de datos ambientales y biológicos                                      | 31 |
| 7.2 Análisis estadísticos  | 36 |
| 8. RESULTADOS  | 38 |
| 8.1 Distribución vertical del oxígeno disuelto y otros indicadores ambientales                       | 38 |
| 8.2 Volumen desplazado del zooplancton y abundancia total de larvas de peces                         | 43 |
| 8.2.1 Hábitats de larvas de peces y asociaciones de especies   | 45 |
| 8.3 Análisis de Correspondencia Canónico – Hábitats/Condiciones Ambientales                          | 56 |
| 8.4 Masas de agua en el Pacífico Oriental Tropical frente a México y los hábitats de larvas de peces | 59 |
| 9. DISCUSIÓN   | 62 |
| 10. CONCLUSIONES   | 67 |
| 11. RECOMENDACIONES  | 68 |
| 12. BIBLIOGRAFÍA   | 69 |
| APÉNDICES  | 77 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del oxígeno disuelto a nivel mundial. Se representan los promedios en  $\mu\text{mol/kg}$  a 400 m de profundidad con intervalos cada 20  $\mu\text{mol/kg}$ , entre 10 y 230  $\mu\text{mol/kg}$  (equivalente a  $\sim 0.25\text{-}8$  mL/L). Los cuadros blancos indican la ubicación de las áreas de hipoxia/anoxia 1: Guinea-Senegal, 2: Atlántico central, 3: Namibia-Angola, 4: Mar Árabe 5: Bahía de Bengala, 6: Mar Indico-Indonesia, 7: Pacífico central y 8: Pacífico Oriental Tropical. La escala de color representa las concentraciones de oxígeno disuelto (morado: valores mínimos) y (rojo: valores máximos) (tomado de Stramma *et al.*, 2008). **21**

Figura 2a. Estaciones de muestreo localizadas entre la entrada del Golfo de California ( $24^{\circ}\text{N}$ ) y Cabo Corrientes ( $20^{\circ}\text{N}$ ). Imagen satelital de Temperatura Superficial del Mar (TSM) ( $^{\circ}\text{C}$ ) del Aqua/MODIS ( $4\times 4\text{km}$ ) de febrero 15, 2010. Los símbolos indican: estaciones biológicas (cuadrados blancos) y estaciones hidrográficas (círculos rojos). El Índice de Surgencia Costera (CUI) en la estación costera ( $21^{\circ}\text{N}\text{-}107^{\circ}\text{W}$ ) cerca de Cabo Corrientes (círculo negro). **25**

Figura 2b. Estaciones de muestreo localizadas entre la entrada del Golfo de California ( $24^{\circ}\text{N}$ ) y Cabo Corrientes ( $20^{\circ}\text{N}$ ). Imagen satelital de Clorofila *a* ( $\text{mg/m}^3$ ) del Aqua/MODIS ( $4\times 4\text{km}$ ) de febrero 23, 2010. Los símbolos indican: estaciones biológicas (cuadrados blancos) y estaciones hidrográficas (círculos rojos). El Índice de Surgencia Costera (CUI) en la estación costera ( $21^{\circ}\text{N}\text{-}107^{\circ}\text{W}$ ) cerca de Cabo Corrientes (círculo negro). **26**

Figura 3. Esquema de la circulación del Pacífico Oriental Tropical. Las abreviaciones corresponden a las siguientes corrientes oceánicas: la línea punteada son las corrientes superficiales, las líneas continuas son las corrientes geostróficas (CC: Corriente de California, CNE: Corriente Nor-Ecuatorial, CCNE: Contracorriente Nor-Ecuatorial, CSE: Corriente Sur-Ecuatorial, CCSE: Contracorriente Sur-Ecuatorial, CCCR: Corriente Costera de Costa Rica, CH: Corriente de Humboldt, y las líneas discontinuas son las Corrientes

Subsuperficiales norte (CCSSN) y sur (CCSSS), CSSE: Corriente Subsuperficial Ecuatorial, CCM: Corriente Costera Mexicana, CSSPC: Corriente Subsuperficial de Perú-Chile, CT: Cuenca de Tehuantepec, DCR: domo de Costa Rica (tomado de Kessler, 2006). **29**

Figura 4. Distribución vertical de las condiciones hidrográficas a lo largo del transecto entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D), cada gráfico presenta los contornos con sus valores correspondientes: a) Oxígeno disuelto (mL/L) (línea negra resaltada), b) Temperatura (°C) y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul), c) Salinidad y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul) y d) Clorofila *a* (mg/m<sup>3</sup>). La línea resaltada indica la oxipleta de 1mL/L. **40**

Figura 5. Distribución vertical de las condiciones hidrográficas a lo largo del transecto frente a Cabo Corrientes (E) cada gráfico presenta los contornos con sus valores correspondientes: a) Oxígeno disuelto (mL/L) (línea negra resaltada), b) Temperatura (°C) y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul), c) Salinidad y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul) y d) Clorofila *a* (mg/m<sup>3</sup>). La línea resaltada indica la oxipleta de 1mL/L. **41**

Figura 6. La evolución temporal del Índice de Surgencia Costera (CUI) o Índice de Bakun representado por el transporte hacia afuera de la costa durante febrero 2010 (línea negra), ver su ubicación en las Figuras 2a y 2b. La línea verde corresponde a la climatología del índice desde 1967 hasta el presente y las líneas rojas representan los valores de la desviación estándar. Las líneas azules indican los días del muestreo. **42**

Figura 7. Distribución vertical del volumen desplazado del zooplancton (mL/1000m<sup>3</sup>) y la concentración de oxígeno disuelto (mL/L) a lo largo del transecto a) entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D) y b) frente a Cabo Corrientes (E). La distribución del volumen desplazado del zooplancton se representa por los siguientes intervalos: (1-60, 61-180, >180 mL/1000m<sup>3</sup>) y los

símbolos representan: datos muestreados de día (círculos blancos) y datos muestreados de noche (círculos negros). Las líneas verticales negras muestran los rangos de cada estrato-estación muestreado. **43**

Figura 8. Distribución vertical de abundancia total de larvas de peces (larvas/10m<sup>2</sup>) y la concentración del oxígeno disuelto (mL/L) a lo largo del transecto a) entre Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D) y b) frente a Cabo Corrientes (E). El límite superior de la zona hipóxica se representa por una línea negra resaltada (1mL/L). La distribución de la abundancia de larvas de peces se representa por los siguientes intervalos: (1-30, 31-60, >60 larvas/10m<sup>2</sup>) y los símbolos representan: datos muestreados de día (círculos blancos) y datos muestreados de noche (círculos negros). Las líneas verticales negras muestran los rangos de cada estrato-estación muestreado. **44**

Figura 9. Dendograma de los hábitats de larvas de peces definidos por el Índice de disimilaridad de Bray–Curtis y el método aglomerativo flexible usando los agrupamientos (clúster) de estrato-estación (zonas) como hábitats de larvas de peces indicadas como: Golfo de California (color gris), Pacífico Tropical (color blanco) y Mínimo Oxígeno (color negro). **46**

Figura 10. Distribución vertical de las condiciones hidrográficas a lo largo del Transecto entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D), y frente a Cabo Corrientes (E), relacionados con la distribución de los hábitats de larvas de peces: a) y b) oxígeno disuelto (mL/L) y el límite superior de la zona hipóxica (línea negra), c) y d) temperatura (°C) y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul), e) y f) salinidad y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul) y g) y h) clorofila *a* (por debajo de los 60 m de profundidad la clorofila *a* se mantuvo homogénea con valores de 0.5 mg/m<sup>3</sup>). Los hábitats están representados como: Golfo de California (círculos grises), Pacífico Tropical (círculos blancos) y Mínimo Oxígeno (círculos negros). **49**

Fig. 11. Distribución vertical de las condiciones hidrográficas a lo largo del Transecto entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D) y frente a Cabo Corrientes (E): a) y b) salinidad y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul), y la distribución de la abundancia de *Anchoa sp.* (círculos grises), c) y d) oxígeno disuelto (mL/L) y el límite superior de la zona hipóxica (línea negra), y la abundancia de *Vinciguerria lucetia* (círculos blancos), y e) y f) *Bregmaceros bathymaster* (círculos negros). **50**

Figura 12. Distribución vertical de *Bregmaceros bathymaster* por estadios de desarrollo: a) y b) preflexión, c) y d) flexión y e) y f) postflexión a lo largo del transecto B-C-D y E, a través de la columna de agua (0–250m) sobre la distribución de oxígeno disuelto (mL/L). El límite superior de la zona hipóxica se representa con una línea negra. La abundancia de larvas (larvas/m<sup>2</sup>) se representa por círculos negros. **53**

Figura 13. Dendograma, definidos por la medida de la disimilaridad de Bray–Curtis y el método aglomerativo flexible, de los hábitats de larvas de peces y sin las especies dominantes, usando los datos colectados durante febrero 2010. Los hábitats de larvas de peces se indican como: Golfo de California (1), Pacífico Tropical (2) y Mínimo Oxígeno (3). **54**

Figura 14. Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) correlacionó los hábitats de larvas de peces y las condiciones hidrográficas durante febrero 2010. Los hábitats planctónicos son: Golfo de California (círculos grises), Pacífico Tropical (círculos blancos) y Mínimo Oxígeno (círculos negros). **59**

Figura 15. Distribución de oxígeno disuelto en el diagrama  $\theta$ –S en el Pacífico Oriental Tropical frente a México durante febrero 2010. a) Los colores indican las concentraciones de oxígeno disuelto (mL/L). b) El diagrama  $\theta$ –S muestra la distribución de los hábitats de larvas de peces. Los colores indican los hábitats: Golfo de California (círculos rojos), Pacífico Tropical (círculos blancos) y Mínimo Oxígeno (círculos azules). Las masas de agua son las siguientes: Agua de la

Corriente de California (ACC), Agua Superficial Tropical (AST) y Agua Subtropical Subsuperficial (AStSs). Los límites termohalinos entre las masas de agua son similares a Castro *et al.*, 2006. **61**

## INDICE DE TABLAS

Tabla I. Rangos de profundidades y grosor de cada estrato-estación muestreado a lo largo del transecto entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D); y el transecto frente a Cabo Corrientes (E) en el Pacífico Oriental Tropical frente a México. **35**

Tabla II. Especies dominantes determinadas por la prueba de Olmstead-Tukey para cada hábitat de larvas de peces (Golfo de California, Pacífico Tropical y Mínimo Oxígeno) durante febrero 2010. **51**

Tabla III. Especies y asociaciones sin las especies dominantes determinadas por la prueba de Olmstead-Tukey para cada hábitat de larvas de peces (Golfo de California, Pacífico Tropical y Mínimo Oxígeno) durante febrero 2010. **56**

Tabla IV. Varianza explicada por el análisis de correspondencia canónica, entre los datos ambientales y la abundancia de larvas de peces, relacionado con la ordenación espacial, en el océano Pacífico Oriental Tropical frente a México durante febrero 2010. **57**

Tabla V. Resultados de las correlaciones obtenidas por el análisis canónico de correspondencia, entre los datos ambientales y la abundancia de larvas de peces, relacionado con la ordenación espacial, en el océano Pacífico Oriental Tropical frente a México durante febrero 2010. **57**

## ÍNDICE DE APÉNDICES

- I. Lista de taxones presentes en cada hábitat de larvas de peces (Golfo de California, Pacífico Tropical, Mínimo de Oxígeno) durante febrero 2010. (X: abundancia promedio de especies, %F: porcentaje de la frecuencia de ocurrencia). **77**
- II. Lista de cada estrato-estación que se definió para cada uno de los hábitats de larvas de peces de acuerdo al dendograma definido por el Índice de disimilaridad de Bray-Curtis y el método aglomerativo flexible durante febrero 2010. **79**
- III. Distribución vertical de *Vinciguerria lucetia* por estadios de desarrollo, preflexión (a,b), flexión (c,d) y postflexión (e,f), a lo largo del transecto B-C-D y E, a través de la columna de agua (0–250m) sobre la distribución de oxígeno disuelto (mL/L). La abundancia de larvas (larvas/m<sup>2</sup>) se representa por círculos negros. **80**

## GLOSARIO

**Abundancia:** Número de organismos por unidad de superficie o de volumen.

**Capa de Mezcla:** Capa superior del océano donde se presenta poca variación en la temperatura y densidad con la profundidad. La capa de mezcla superficial se ve influenciada por la turbulencia generada por vientos, enfriamiento, o flujos de calor (evaporación), o la formación de hielo marino resultando en el incremento de la salinidad.

**Demersal:** Zona del océano que se localiza justo encima de la zona béntica. Los peces demersales viven y se alimentan cerca al fondo del mar. Este fondo puede ser de arena, grava, barro o rocas.

**Epipelágico:** Estrato del océano que abarca, desde la superficie hasta los 200 m aproximadamente, caracterizado por tener intensidad de luz para realizar la fotosíntesis, y por tanto está concentrada la mayor parte de la biomasa de autótrofos (plantas) y heterótrofos (animales).

**Especie:** el concepto evolutivo de especie fue formulado por Simpson y Gould donde define que una especie es un único linaje de poblaciones ancestro-descendiente que mantiene su identidad frente a otros linajes y posee sus propias tendencias evolutivas y su destino histórico.

**Hábitat:** es el área en donde se encuentran las larvas de peces en un tiempo dado denominado aquí como hábitats de larvas de peces.

**Mesopelágico:** proviene del griego (μέσoν, que significa “mitad”), es estrato de la habitat pelágico que se extiende aproximadamente desde los 200 a los 1000 metros de profundidad, ubicándose entre la zona epipelágica superior y la zona batipelágica inferior. En esta zona la luz escasea hasta llegar a la oscuridad. La presión es de cien atmósferas en la parte más profunda.

**Plancton:** proviene del griego πλαγκτός [*plagktós*], que significa 'errantes'), conjunto de organismos, principalmente microscópicos, que flotan en aguas marinas o epicontinentales. Se distingue del necton, (nadadores activos) y del neuston, (viven en la interface superficial).

**Plancton nerítico:** aquellos organismos planctónicos que se encuentran en la columna de agua sobre la plataforma continental.

**Pelágico:** proviene del griego πέλαγος (*pélagos*), se significa "mar abierto", es la parte del océano que está sobre la columna de agua pero que no está sobre la plataforma continental.

**Termoclina:** Estrato del océano donde la temperatura cambia rápidamente con la profundidad. La termoclina varía con la latitud y la estación: es permanente en los trópicos, variable en los climas templados (más fuerte en los veranos), y débil a inexistente en las regiones polares.

**Zona de Mínimo Oxígeno:** Estratos del océano que tienen baja concentración de oxígeno disuelto (<1 mL/L) las cuales son definidas como capas subsuperficiales y en algunas ocasiones pueden ser cerca de la superficie según su localización mundial.

**Zooplancton:** son organismos que hacen parte del plancton los cuales se alimentan, por ingestión, de materia orgánica ya elaborada. Son organismos heterótrofos que viven en la columna de agua. Está constituido por protozoos, generalmente microscópicos adultos y sus fases larvarias.

## RESUMEN

Se analizó la distribución tridimensional de los hábitats de larvas de peces desde el estrato inferior de la zona somera del mínimo oxígeno (~0.2 mL/L condiciones anóxicas) hasta la superficie, en el Pacífico Oriental Tropical de México durante febrero 2010. El límite superior (1 mL/L) se eleva desde los ~250 m de profundidad en la entrada del Golfo de California hasta los ~80 m de profundidad en Cabo Corrientes. Según la matriz de datos de estrato por estación, el análisis de Bray Curtis muestra estadísticamente la formación de 3 hábitats de larvas de peces: *i*) un hábitat en la parte sur del Golfo de California, dominado por larvas de *Anchoa* spp. (especie epipelágica), restringido por una capa superficial oxigenada (>3.5 mL/L) localizado dentro y por encima de la termoclina (~60 m de profundidad); y separado del Pacífico Tropical por un frente salino; *ii*) un segundo hábitat denominado Pacífico Tropical, dominado por larvas de *Vinciguerria lucetia* (especie mesopelágica), localizada a través de toda la columna de agua, pero con una mayor abundancia en la capa superior oxigenada por encima de la termoclina; *iii*) un tercer hábitat fue definido principalmente por debajo de la termoclina en aguas hipóxicas (<1 mL/L; ~70 m de profundidad) y aguas anóxicas (<0.2 mL/L; ~80 m de profundidad) en Cabo Corrientes. El estrato sub-superficial hipóxico presentó la mayor riqueza específica y abundancia larval, con dominancia de *Bregmaceros bathymaster*, siendo una especie nerítica-pelágica endémica del Pacífico Oriental Tropical; lo cual fue un resultado inesperado. Esto debe estar asociado con la elevación hacia superficie del límite superior de la zona de mínimo oxígeno cerca a la costa, como resultado de una fuerte surgencia costera detectada por el Índice de Bakun. En esta región de surgencias costeras fuertes y semi-continuas en el Pacífico Oriental Tropical frente a México, el agua hipóxica somera no parece tener efectos dramáticos, al menos en la abundancia total de larvas de peces, pero parece que afecta la composición de las especies.

**PALABRAS CLAVES:** Zona somera del mínimo oxígeno, hábitats de larvas de peces, *Bregmaceros bathymaster*, Pacífico Oriental Tropical en México.

## ABSTRACT

Three-dimensional distribution of larval fish habitats was analyzed, from the upper limit of the shallow oxygen minimum zone (~0.2 mL/L) to the sea surface, in the eastern tropical Pacific Ocean off Mexico in February 2010. The upper limit rises from ~250 m depth in the entrance of the Gulf of California to ~80 m depth off Cabo Corrientes. Three larval fish habitats were defined statistically: *i*) a Gulf of California habitat dominated by *Anchoa* spp. larvae (epipelagic species), constrained to the oxygenated surface layer (>3.5 mL/L) in and above the thermocline (~60 m depth) in the southern Gulf of California; and separated from the Tropical Pacific habitat by a salinity front; *ii*) a Tropical Pacific habitat, dominated by *Vinciguerria lucetia* larvae (mesopelagic species), located throughout the sampled water column, but with the highest abundance in the oxygenated upper layer above the thermocline; *iii*) an Oxygen Minimum habitat defined mostly below the thermocline in hypoxic (<1mL/L; ~70 m depth) and anoxic (<0.2 mL/L; ~80 m depth) water off Cabo Corrientes. This subsurface hypoxic habitat had the highest species richness and larval abundance, with dominance of *Bregmaceros bathymaster*, an endemic neritic pelagic species; which was an unexpected result. This may be associated with the shoaling of the upper limit of the shallow oxygen minimum zone near the coast, a result of the strong costal upwelling detected by the Bakun Index. In this region of strong and semi-continuous coastal upwelling in the eastern tropical Pacific off Mexico, the shallow hypoxic water does not have dramatic effects on the total larval fish abundance, but appears to affect species composition.

**KEYWORDS:** Shallow oxygen minimum zone, larval fish habitats, *Bregmaceros bathymaster*, eastern tropical Pacific Ocean off Mexico.

## 1. INTRODUCCIÓN

La concentración de oxígeno disuelto es un indicador químico sensible de los cambios físicos y biológicos en el océano (Stramma *et al.*, 2010). Como consecuencia, esta es una variable ambiental clave para comprender la dinámica oceanográfica y biológica del ecosistema marino (Keeling & García, 2002). Las Zonas de Mínimo Oxígeno (ZMO) son definidas como zonas intermedias en la columna de agua que presentan bajas concentraciones de oxígeno. Las ZMO se presentan en regiones altamente productivas, donde por debajo de la zona eufótica, la respiración microbiana es alta y la circulación profunda lenta proveniente de las regiones polares, formando algunas zonas estables con baja concentración de oxígeno disuelto a lo largo del tiempo en la columna de agua (Gilly *et al.*, 2013). No existe un consenso en los rangos de definición en una ZMO, pero se ha reportado que cuando las concentraciones de oxígeno disminuyen por debajo  $\sim 1$  mL/L (condiciones hipóxicas) los organismos pelágicos presentan estrés fisiológico; y si estas concentraciones de oxígeno bajan a  $\sim 0.2$  mL/L (condiciones anóxicas) los organismos pueden morir (Díaz & Rosenberg, 2008; Stramma *et al.*, 2008).

La expansión a gran escala de las ZMO someras sobre los últimos 50 años presenta un desafío para predecir los impactos en el ecosistema pelágico tropical, caracterizado por alta riqueza de especies (Saltzman & Wishner, 1997; Ekau *et al.*, 2009) y abundancia de especies de valor comercial (Prince & Goodyear, 2006, Stramma *et al.*, 2012). Las posibles consecuencias de la expansión de la ZMO somera incluye disminución del hábitat vertical oxigenado para organismos pelágicos, desde el zooplancton hasta los depredadores tope (Fernández-Álamos & Farber-Lorda, 2006, Prince & Goodyear, 2006; Koslow *et al.*, 2011).

La comunidad del zooplancton, incluyendo las larvas de peces meroplanctónicas, es altamente sensible a cambios ambientales (Gilly *et al.*, 2013), y se ha asumido que deben ser relativamente menos tolerantes a la hipoxia

que los organismos adultos (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008; Ekau *et al.*, 2009; Koslow *et al.*, 2013). Estudios previos (Longhurst, 1967; Brinton, 1979; Fernández-Álamos & Farber-Lorda, 2006; Criales-Hernández *et al.*, 2007; Escribano *et al.*, 2009; Wishner *et al.*, 2013) sobre la distribución vertical del zooplancton en diversas ZMO someras han reportado que la biomasa del zooplancton fue alta en la capa superficial oxigenada (>5 mL/L), decreciendo hacia la zona hipóxica (<1 mL/L).

Sin embargo, el conocimiento es escaso sobre el impacto de la hipoxia en las larvas de peces. Madhu *et al.* (2003) mostró que la alta abundancia de larvas de peces en el Mar de Arabia (ZMO someras en el Océano Indico), se ubicó en aguas oxigenadas (>4mL/L) bajo los 40 m de profundidad, una tendencia similar a lo registrado por la biomasa del zooplancton. Karuppasamy *et al.* (2011) en un trabajo en el Mar de Andaman (ZMO someras en el Océano Indico), registraron la abundancia de larvas relativa de especies mesopelágicas (e.g. *Diaphus aliciae*, *D. lucidis*, *Lampadena pontifex*) en aguas anóxicas (<0.2 mL/L) bajo los 150 m de profundidad en la ZMO del Mar de Andaman, aunque no se mencionó donde se ubicó la mayor abundancia total de larvas de peces. Koslow *et al.* (2011) indicó que las especies mesopelágicas han disminuido en abundancia en la zona hipóxica en la Corriente de California frente a California, pero el agua hipóxica ahí es considerablemente más profunda en relación al área de estudio de la presente tesis. Adicionalmente, Limburg *et al.* (2011) indicó que el ámbito de distribución de las larvas de bacalao (*Gadus morhua*) varió en función al aumento horizontal en la zona hipóxica en el Mar Báltico, sin embargo, en este estudio no se consideró el gradiente vertical de la concentración del oxígeno disuelto. Desafortunadamente, la ausencia de estudios en ecología de larvas de peces en las ZMO someras y su complejidad, hace que sea difícil de predecir un posible escenario de su expansión vertical en los océanos.

La ZMO somera en el Pacífico Oriental Tropical de México (POT), es la mayor región natural hipóxica del mundo (Díaz & Rosenberg, 2008; Stramma *et*

*al.*, 2010); pero también, es una de las menos estudiadas relacionada con las zonas de bajo oxígeno y/o zonas de anoxia. En la parte norte de la región de transición tropical–subtropical (~20°N) está influenciada por procesos advectivos de gran escala, siendo dominada principalmente por Agua de la Corriente de California (ACC) y Agua Subtropical Sub-superficial (AStSs) (Godínez *et al.*, 2010; Kurczyn *et al.*, 2012). Además, esta región exhibe un sistema complejo de circulación, mostrado por remolinos de meso escala así como procesos dinámicos en escalas inter-anual y estacional (Godínez *et al.*, 2010; Kurczyn *et al.*, 2012; 2013). En los trabajos reportados por Cepeda-Morales *et al.*, (2009; 2013), la circulación de meso escala y la surgencia costera pueden influenciar también la distribución vertical del límite superior de la ZMO, observado *in situ* en el POT y por ende puede impactar en la distribución y abundancia de zooplancton y las larvas de peces.

Aunque no hay estudios enfocados en la relación entre la distribución de larvas de peces y el oxígeno disuelto en la ZMO somera del POT, existen algunas descripciones sobre la composición y distribución de larvas de peces. Franco-Gordo *et al.* (2002; 2004) menciona la presencia sobresaliente del nerítico-pelágico *Bregmaceros bathymaster* (> 85% abundancia total de larvas de peces) en la costa (<30 m de profundidad) de Jalisco y Colima, México; León-Chávez *et al.* (2010) registró a *B. bathymaster* como una especie numéricamente dominante en el hábitat larval localizado en la plataforma continental y el talud de Cabo Corrientes desde finales de otoño a invierno. Recientemente, León-Chávez *et al.* (2015) describió usando escalas de composición ambiental y la presencia de hábitats de larvas de peces, siendo uno costero y de surgencia dominado por *B. bathymaster* que persiste todo el año, y está asociado a eventos de meso escala (p.e. surgencia costera y circulación ciclónica). Aunque es poco el conocimiento sobre la biología de esta especie nerítica-pelágica, su distribución desde Perú hasta la parte sur del Golfo de California está inmerso en la ZMO somera del POT; siendo clasificado como una especie endémica del POT por la FAO (Fischer *et al.*, 1995).

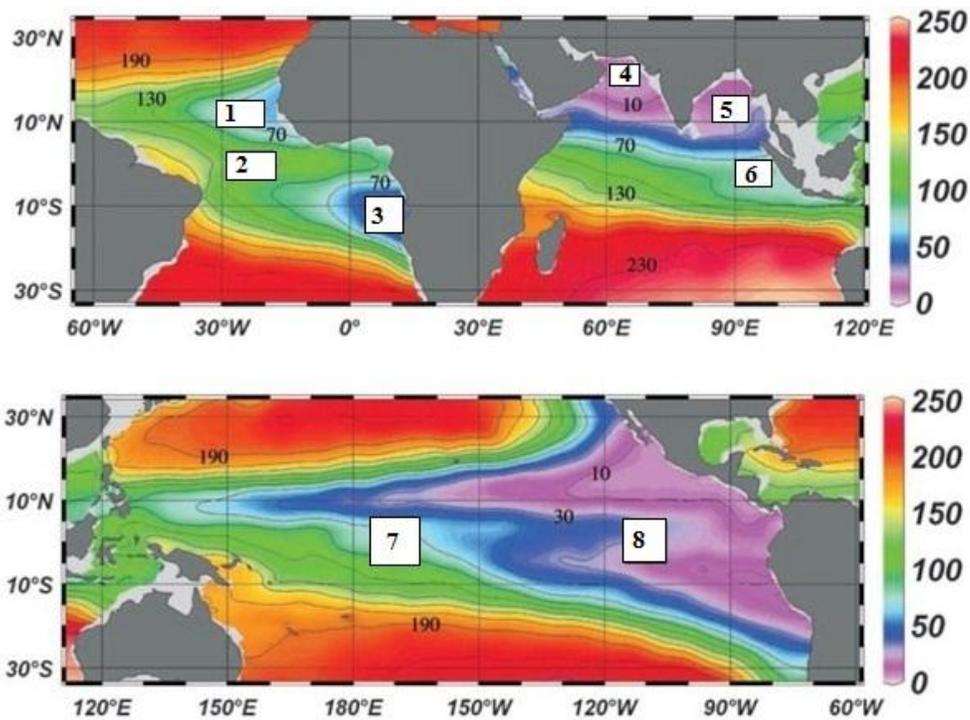
Basado en antecedentes biológicos de la ZMO somera y el POT de México, se espera encontrar un hábitat larval en aguas oxigenadas caracterizada principalmente por asociaciones de especies epipelágicas con la mayor abundancia larval; y un hábitat larval en aguas hipóxicas caracterizada por asociaciones de especies mesopelágicas. Adicionalmente, se espera encontrar mayor abundancia de larvas de *B. bathymaster* en Cabo Corrientes, pero es difícil predecir la distribución vertical y su hábitat preferencial. El objetivo de este estudio es analizar la distribución tridimensional de los hábitats de larvas de peces, y sus asociaciones de especies, desde el límite superior de la ZMO somera a superficie, en el POT de México durante febrero 2010. La distribución de hábitats de larvas de peces serán descritos en función de gradientes ambientales, con énfasis en el oxígeno disuelto. Los efectos del límite superior de la ZMO somera en el ecosistema pelágico, indicado por los hábitats de larvas de peces, serán discutidos a continuación.

## **2. ANTECEDENTES**

Usualmente el agua del mar cerca de la superficie está saturada por oxígeno a causa del intercambio con la atmósfera y la generación de oxígeno por el proceso de fotosíntesis. Pero existen áreas oceánicas, típicamente en estratos subsuperficiales o profundos, donde la concentración del oxígeno disuelto en el agua disminuye considerablemente, formando las zonas de mínimo oxígeno (ZMO), estas zonas son formadas por el consumo bioquímico del oxígeno y el patrón de circulación que afecta su distribución y posición en la columna de agua (Wyrski, 1966; 1967).

Las zonas de mínimo oxígeno (ZMO) se localizan en diversas áreas alrededor del mundo como en el Pacífico Oriental Tropical (POT), Costas de Perú-Chile y Benguela, y en los mares marginales (Mar Báltico, Mar Negro y Mar Árabe), así como en la Cuenca de California, Golfo de México, entre otros

(Figura 1). En estas zonas la concentración del oxígeno disuelto en el océano ha cambiado drásticamente a través del tiempo, incidiendo en la aparición de la hipoxia en la capa fótica del océano (Vaquer & Duarte, 2008). La expansión de estas regiones con hipoxia se ha registrado a nivel mundial en el océano y causa cambios en la estructura (niveles tróficos, ciclos de vida y reproducción) y las funciones de los ecosistemas (compresión o pérdida del hábitat así como especies) (Zhang *et al.*, 2010).



**Figura 1. Distribución del oxígeno disuelto a nivel mundial. Se representan los promedios en  $\mu\text{mol/kg}$  a 400 m de profundidad con intervalos cada 20  $\mu\text{mol/kg}$ , entre 10 y 230  $\mu\text{mol/kg}$  (equivalente a  $\sim 0.25 - 8 \text{ mL/L}$ ). Los cuadros blancos indican la ubicación de las áreas de hipoxia/anoxia 1: Guinea-Senegal, 2: Atlántico central, 3: Namibia-Angola, 4: Mar Árabe 5: Bahía de Bengala, 6: Mar Indico-Indonesia, 7: Pacífico central y 8: Pacífico Oriental Tropical. La escala de color representa las concentraciones de oxígeno disuelto (morado: valores mínimos) y (rojo: valores máximos) (tomado de Stramma *et al.*, 2008)**

Uno de los primeros trabajos que menciona la relación entre el zooplancton y la ZMO fue Longhurst, (1967), el cual estudió la distribución vertical del zooplancton en relación con el Pacífico Oriental Tropical (POT) y la ZMO. Los resultados obtenidos en la parte sur de la Corriente de California mostraron que la presencia de zooplancton era abundante en la ZMO, mostrando bajas concentraciones de oxígeno disuelto de hasta 0.2 mL/L. Su distribución vertical varió entre un rango desde los 5 mL/L de oxígeno disuelto (zonas muy oxigenadas) hasta concentraciones muy bajas de oxígeno disuelto (cerca del límite de detección 0.15mL/L).

Desde entonces relativamente pocos estudios han sido realizados sobre la relación del zooplancton y la profundidad del límite superior de la ZMO en el área del POT frente a México. Cabe mencionar a Brinton, (1979), quién estudió en el POT la distribución del zooplancton y en especial de los eufaúsidos. Este trabajo fue a lo largo de todo el Pacífico (desde los 23°N a los 3°S), donde se observaron que las distribuciones verticales se relacionaban con la adaptación que tenían con respecto a su migración de día y noche a través de la columna de agua y según su estadio larval, teniendo en cuenta también si vivían dentro de la capa de mezcla, o debajo de ella, así como en la zonas de bajo oxígeno disuelto de hasta 0.1mL/L.

Fernández-Álamos & Farber-Lorda, (2006), realizaron una revisión de la biomasa y estructura del zooplancton en el POT, sobre los patrones generales de la distribución vertical para los copépodos, los cuales están relacionados con una tolerancia aparente a las bajas concentraciones de oxígeno de disuelto. La distribución vertical y la migración están restringidas usualmente en la ZMO, la cual se extiende entre los 50 m y los 1200 m en el POT frente a México, pero esta capa somera de la ZMO puede variar su grosor dependiendo del lugar, las corrientes y otros factores. Esta zona se definió como una capa subsuperficial donde el oxígeno disuelto es  $< \sim 1$  mL/L y puede llegar a ser una barrera efectiva para muchos organismos en su distribución y migración.

Los estudios sobre la distribución vertical del zooplancton e ictioplancton han sido escasos en relación a los estudios dirigidos a su distribución en la zona de mínimo oxígeno del POT frente a México, y prácticamente nulos los que consideran el límite superior de la zona hipóxica. De acuerdo con los trabajos publicados para la zona de estudio y áreas adyacentes, existen gran variedad de trabajos relacionados con zooplancton y oceanografía para esta área de estudio, (composición taxonómica, asociados a la distribución y procesos de meso escala), sin embargo los que relacionan la hipoxia con el zooplancton son realmente escasos.

Cabe señalar, que uno de los trabajos dirigidos a la distribución horizontal de larvas de peces en la zona cercana a la entrada del Golfo de California y área adyacente a Cabo Corrientes, es el trabajo de León-Chávez *et al.*, (2010), este sirvió como referencia de las especies que habitan en la región y de sus gradientes horizontales de distribución. Aquí se mostraron la abundancia integrada muestreada con red Bongo (entre la superficie y los 200 m de profundidad), mostrando la correlación entre las asociaciones de peces, las masas de agua y la circulación. Se obtuvieron cuatro tipos de asociaciones específicas: i) Transicional, (menor abundancia de *V. lucetia* y *D. laternatus*) asociado a la ACC (invierno) y AST (otoño); ii) Costero-oceánico, (abundancia larval alta de *B. bathymaster*) en el área de Cabo Corrientes, y con presencia de remolinos; iii) Tropical A, (alta abundancia y diversidad de *D. laternatus* y *Auxis spp*) asociado a la AST y iv) Tropical B, (alta abundancia de *V. lucetia*) durante el otoño y asociado con la circulación de AST.

Otro trabajo que menciona la hipoxia con algún grupo del zooplancton es el reportado por Tremblay *et al.* (2010) donde se muestra el estrés oxidativo para tres especies de eufaúsidos (*Nyctiphanes simplex*, *Nematoscelis difficilis*, y *Euphausia eximia*) en el Golfo de California. Aquí se muestran dos especies posiblemente adaptadas a condiciones de hipoxia de la zona de mínimo oxígeno y una especie siendo restringida en su distribución hacia aguas superficiales más oxigenadas.

Cabe mencionar el trabajo de Farber-Lorda (2010) sobre la distribución vertical del zooplancton en la zona de mínimo oxígeno en el POT frente a México durante el otoño (2009) y en donde se menciona la hipótesis de la compresión del hábitat. Los resultados mostraron una distribución vertical muy variable, pero mostró un patrón con respecto a la reducción del zooplancton en abundancia y volumen en la zona hipóxica. Este trabajo es de los pocos donde se menciona la hipótesis de la compresión del hábitat, y según sus resultados la corrobora pues sus máximos de zooplancton fueron encontrados en los primeros 100m. Esta hipótesis argumenta que la termoclina y/o el bajo oxígeno confinan a los organismos, que tienen poca tolerancia a condiciones con baja concentración de oxígeno disuelto, a mantenerse por arriba de la zona hipóxica, restringiendo su distribución vertical a aguas superficiales concentrando el zooplancton sobre la capa oxigenada o sobre la termoclina.

### **3. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio está localizada desde la entrada del Golfo de California (24°N, 109°W) a lo largo de la plataforma continental hasta la costa de Cabo Corrientes (20°N, 105°W) (Figuras 2a y 2b).

Para el área de estudio mencionada anteriormente como a nivel mundial, se han caracterizado la distribución espacial de las zonas de mínimo oxígeno o zonas de hipoxia. Su permanencia temporal es el resultado de un balance entre los procesos biogeoquímicos relacionados con la disminución del oxígeno disuelto, y los procesos dinámicos responsables de la distribución global de las masas de agua con diferentes concentraciones de oxígeno disuelto (Karstensen *et al.*, 2008).

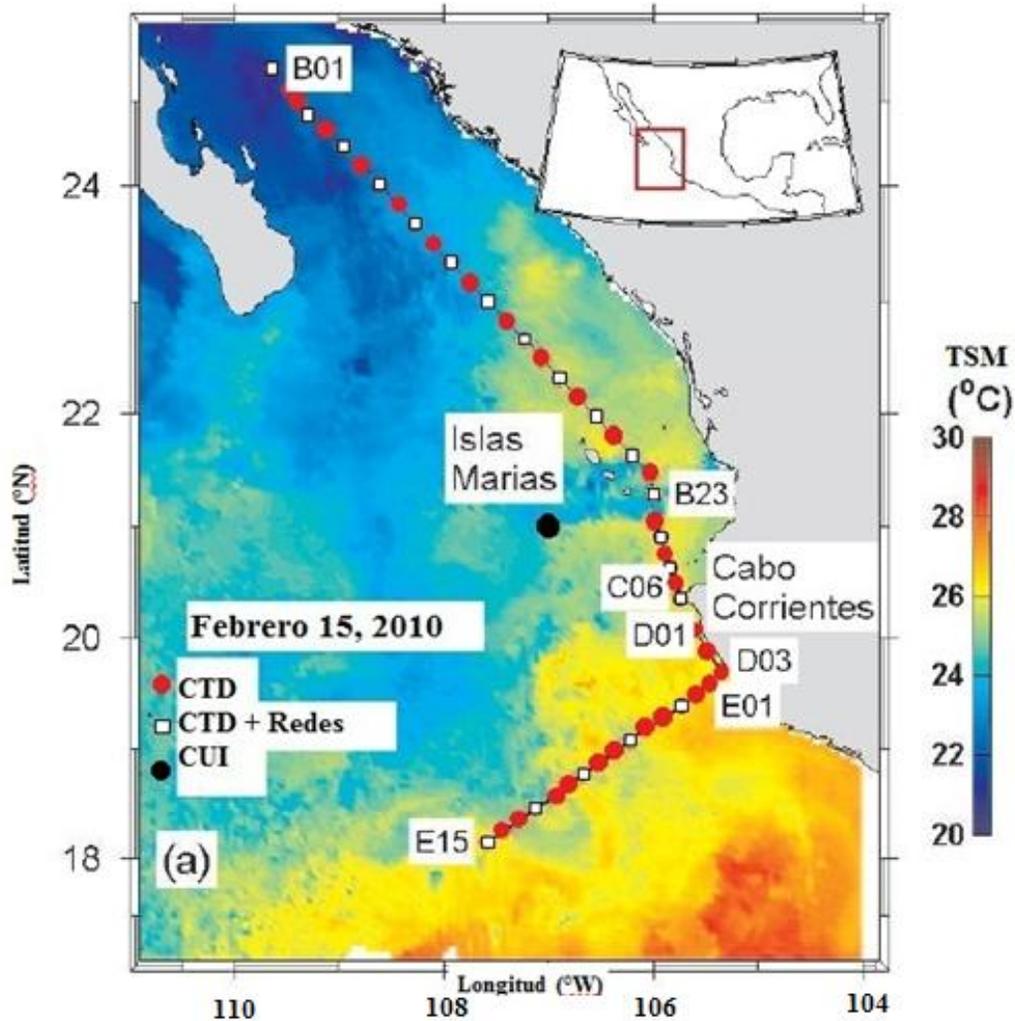
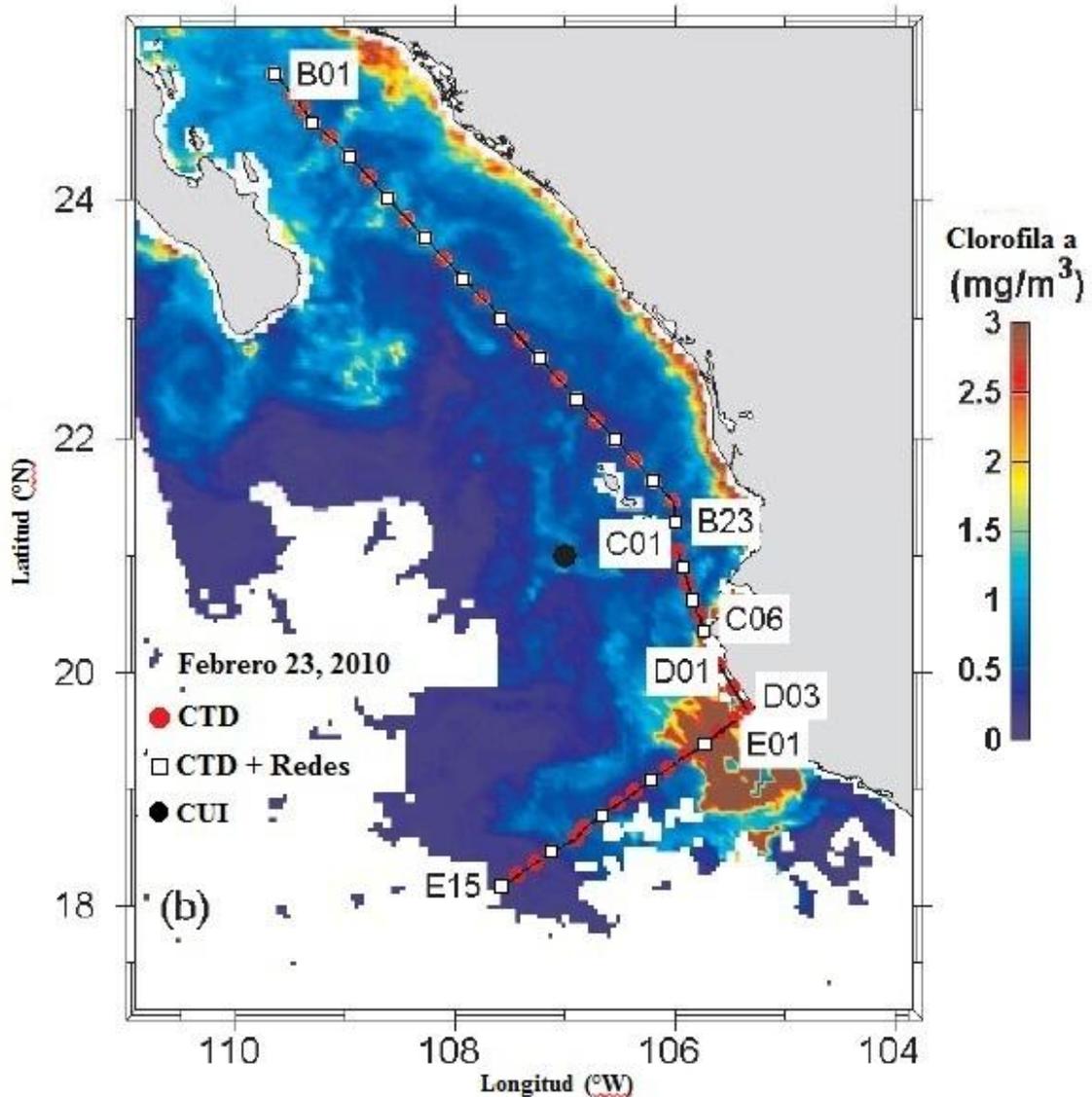


Figura 2a. Estaciones de muestreo localizadas entre la entrada del Golfo de California (24°N) y Cabo Corrientes (20°N). Imagen satelital de Temperatura Superficial del Mar (TSM) (°C) del Aqua/MODIS (4x4km) de febrero 15, 2010. Los símbolos indican: estaciones biológicas (cuadrados blancos) y estaciones hidrográficas (círculos rojos). El Índice de Surgencia Costera (CUI) en la estación costera (21°N-107°W) cerca de Cabo Corrientes (círculo negro).



**Figura 2b. Estaciones de muestreo localizadas entre la entrada del Golfo de California (24°N) y Cabo Corrientes (20°N). Imagen satelital de Clorofila a ( $\text{mg/m}^3$ ) del Aqua/MODIS (4x4km) de febrero 23, 2010. Los símbolos indican: estaciones biológicas (cuadrados blancos) y estaciones hidrográficas (círculos rojos). El Índice de Surgencia Costera (CUI) en la estación costera (21°N-107°W) cerca de Cabo Corrientes (círculo negro).**

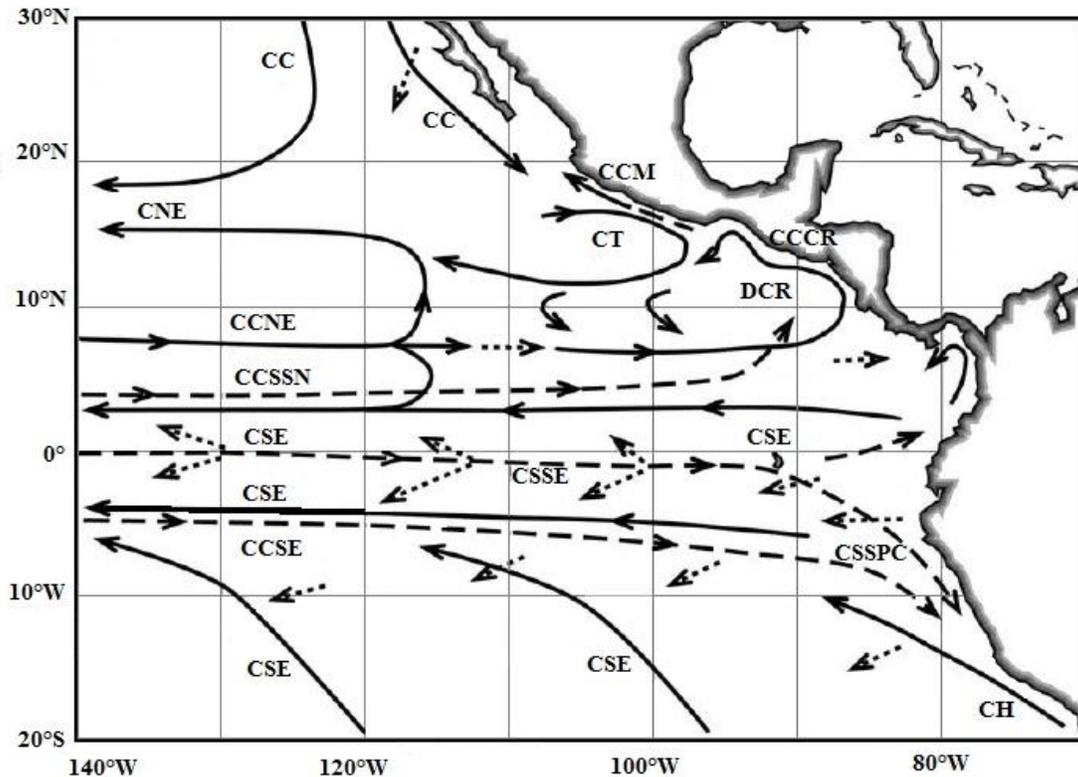
En estas zonas de mínimo oxígeno, la variabilidad temporal está influenciada por una fuerte componente estacional e interanual asociada a la presencia de masas de agua y cambios en la circulación oceánica (Morales *et al.*, 1999). La circulación en el Océano Pacífico presenta componentes oriental y ecuatorial de los grandes giros anticiclónicos subtropicales del Pacífico norte y del Pacífico sur (Wyrcki, 1962). Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto se encuentran al sur del Ecuador bajo la Corriente de Perú (norte de Perú) y al norte del Ecuador bajo el Pacífico Oriental Tropical (POT) en la masa de agua cálida a lo largo de la costa del suroeste de México (Fiedler & Talley, 2006; Stramma *et al.*, 2010; Auad *et al.*, 2011).

No ha sido estudiado a fondo la influencia de la circulación del océano en la variabilidad del límite superior de las zonas de mínimo oxígeno a escalas regionales en el Pacífico Oriental Tropical (POT) frente a México (Czeschel *et al.*, 2011). La zona de la entrada del Golfo de California (GC) está poco estudiada (Kessler, 2006). Esta región es un área de convergencia, donde el brazo costero de la Corriente de California (CC) fluye en dirección hacia el sur, donde se divide en dos ramas. Estas son separadas por circulación ciclónica hacia la costa al sur en Cabo Corrientes, encontrándose con la Corriente Costera Mexicana (CCM) que fluye hacia el norte hasta la entrada del golfo (Godínez *et al.*, 2010).

El POT frente a México es una zona de transición tropical–subtropical que está influenciada por procesos advectivos de gran escala y está afectada principalmente por el agua de la Corriente de California (ACC) y agua Subtropical Subsuperficial (AStSs) (Pennington *et al.*, 2006; Godínez *et al.*, 2010; Kurczyn *et al.*, 2012). Esta región presenta un sistema de circulación compleja, donde se muestran remolinos de mesoescala así como procesos dinámicos en escalas interanuales y estacionales (Zamudio *et al.*, 2007; Godínez *et al.*, 2010). En la parte sur del POT frente a México (16°–20°N), cerca al área de Cabo Corrientes, el límite superior de la zona de mínimo oxígeno está relativamente somera a unos ~80 m (Fernández-Álamos & Farber-Lorda, 2006). En la parte norte del POT frente

a México (20°–23°N), este límite superior se profundiza hasta los ~800 m, mostrando una pendiente fuerte en su distribución espacial (Cepeda-Morales *et al.*, 2009; Maske *et al.*, 2010). En esta región se puede observar una circulación ciclónica permanente la cual puede ser explicada por la dinámica de Sverdrup, como resultado de un largo período del rotacional de esfuerzo del viento. Esta circulación ciclónica parece ser la primera evidencia observada de que en promedio, la Corriente Costera Mexicana (CCM) es generada localmente por el rotacional del esfuerzo del viento y que está desconectada de la circulación ecuatorial (Godínez *et al.*, 2010).

En el Pacífico norte la dinámica está compuesta por la Corriente de California (CC) con aguas provenientes del ártico hacia el sur y la Corriente Nor-Ecuatorial (CNE) con aguas tropicales hacia el norte, esta corriente avanza a lo largo de Centro-América y se denomina como Corriente Costera de Costa Rica (CCCR) siendo un flujo de agua tropical que alcanza a llegar hasta la parte sur de la península de Baja California durante eventos El Niño y que a su vez se presenta por un flujo costero independiente de la CCCR que es denominada Corriente Costera Mexicana (CCM) la cual aparece durante octubre-abril en los alrededores de Cabo Corrientes (Beier *et al.*, 2003; Kessler, 2006; Lavín *et al.*, 2006; Godínez *et al.*, 2010). En el Pacífico sur está compuesta por la Corriente de Perú-Chile (Corriente de Humboldt) con aguas frías desde el sur y la Corriente Sur-Ecuatorial (CSE) con aguas más cálidas. A la mitad de estos dos giros de corrientes se forma la Contracorriente Ecuatorial (CCE) que fluye de Este a Oeste a lo largo de la Convergencia Intertropical (Wyrki, 1966). Las aguas superficiales ricas en oxígeno (<3 mL/L) se ubican en los primeros metros de profundidad sobre la zona hipóxica (< 1mL/L) donde se observan los diferentes gradientes de oxígeno disuelto a través de la columna de agua (Stramma *et al.*, 2010) (Figura 3).



**Figura 3. Esquema de la circulación del Pacífico Oriental Tropical. Las abreviaciones corresponden a las siguientes corrientes oceánicas: la línea punteada son las corrientes superficiales, las líneas continuas son las corrientes geostróficas (CC: Corriente de California, CNE: Corriente Nor-Ecuatorial, CCNE: Contracorriente Nor-Ecuatorial, CSE: Corriente Sur-Ecuatorial, CCSE: Contracorriente Sur-Ecuatorial, CCM: Corriente Costera Mexicana, CCCR: Corriente Costera de Costa Rica, CH: Corriente de Humboldt, y las líneas discontinuas son las Corrientes Subsuperficiales norte (CCSSN) y sur (CCSSS), CSSE: Corriente Subsuperficial Ecuatorial, CSSPC: Corriente Subsuperficial de Perú-Chile, CT: Cuenca de Tehuantepec, DCR: domo de Costa Rica (tomado de Kessler, 2006).**

#### **4. JUSTIFICACION**

La zona de mínimo oxígeno somera en el POT frente a México, es la región hipóxica natural más grande del mundo, pero a su vez es una de las menos estudiadas en términos físicos y biológicos. La comunidad del zooplancton, incluyendo las larvas de peces, es altamente sensible a los cambios del ambiente, y por lo tanto son menos tolerantes a la hipoxia que los organismos adultos. Sin embargo, el conocimiento es escaso acerca del efecto de la hipoxia sobre la distribución de las larvas de peces. Por ello es importante estudiar esta región, para conocer la dinámica del límite superior del mínimo oxígeno y cómo puede estar afectando la distribución de las comunidades pelágicas, con énfasis en la biomasa del zooplancton, y en especial en las larvas de peces.

#### **5. HIPOTESIS**

**En este contexto, se plantea las siguientes hipótesis no excluyentes entre sí:**

1. En la zona oxigenada se espera encontrar un hábitat de larvas de peces localizado en la capa de mezcla y la termoclina, con un alto volumen de zooplancton y alta abundancia de larvas de peces.
2. En la zona hipóxica se espera encontrar un hábitat de larvas de peces localizado por debajo de la termoclina, con baja abundancia larval y baja riqueza específica.

## **6. OBJETIVO GENERAL**

Analizar la distribución y abundancia tridimensional de los hábitats de larvas de peces, en la zona somera del mínimo oxígeno, en el Pacífico Oriental Tropical frente a México durante febrero 2010.

### **6.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Determinar la estructura hidrográfica de la columna de agua y la profundidad del límite superior de la zona de mínimo oxígeno durante febrero 2010 en el Pacífico Oriental Tropical frente a México.
2. Determinar hábitats de larvas de peces en relación a la profundidad del límite superior de la zona de mínimo oxígeno durante febrero 2010 en el Pacífico Oriental Tropical frente a México.
3. Identificar especies de larvas de peces indicadoras para cada uno de los hábitats larvales durante febrero 2010 en el Pacífico Oriental Tropical frente a México.

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1. Obtención y Procesamiento de datos ambientales y muestras biológicas**

Con el objeto de obtener una visión sinóptica del POT en México, las imágenes satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) y Clorofila *a* (Clo *a*) (4x4 km) fueron obtenidas del satélite de MODIS/Aqua desde la página <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/level3.pl> (Figuras 2a y 2b) para los días de febrero 15 y febrero 23 de 2010 2010.

Los datos de CTD y las muestras de zooplancton fueron obtenidos a bordo del R/V “Francisco de Ulloa” (CICESE) a lo largo del transecto realizado desde la entrada del Golfo de California hasta la costa de Cabo Corrientes (entre las estaciones B01 y D03, ver Figs. 1a y 1b), y desde Cabo Corrientes hacia océano abierto (entre E01 y E15) (Figuras 2a y 2b). El crucero se realizó durante febrero (14–27), 2010.

Un total de 86 estaciones fueron realizadas, de las cuales 46 estaciones fueron de datos hidrográficos (datos de CTD) y 20 fueron biológicas (arrastres de zooplancton). La distancia entre estaciones a lo largo de un transecto fue de 10 km. Los perfiles verticales de temperatura y salinidad fueron observados hasta 1000 m de profundidad (a ~5 m sobre el fondo si es somero) con un CTD calibrado de fábrica marca SeaBird SBE-911 plus, con sensores primarios y secundarios, y una tasa de muestreo de 24 Hz. Los datos fueron procesados y promediados a 1 dbar. Salinidad (S) fue calculada con la Escala Práctica de Salinidad 1978. La temperatura potencial  $\theta$  (°C) fue calculada de acuerdo a los algoritmos estándar (UNESCO, 1991). El CTD fue equipado con sensores recientemente calibrados de oxígeno disuelto (OD) y fluorescencia. La concentración de clorofila *a* (mg Clo *a* /m<sup>3</sup>) fue calculada internamente por el fluorímetro, produciendo un proxy de biomasa de fitoplancton para ser usada al explicar la distribución de fitoplancton en relación a estructuras físicas. La profundidad de la capa de mezcla (pCM), considerada como una región cuasi-homogénea en el océano superior, fue calculada siguiendo la metodología de Kara *et al.* (2000). Valores diarios del Índice de Bakun o Índice de Surgencia Costera (CUI) para la estación en 21°N-107°W (cerca a Cabo Corrientes, Figs. 1a y 1b) fue obtenida desde Pacific Fisheries Environmental Laboratory ([http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/data\\_download.html](http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/data_download.html)).

Basados en el conocimiento previo sobre la distribución vertical de larvas de peces (ej. Danell-Jiménez *et al.*, 2009; Sánchez-Velasco *et al.*, 2014) y la

estructura vertical de la columna de agua durante la época de invierno (Inda-Díaz *et al.*, 2014), los tres estratos de profundidad fueron seleccionados en cada estación de muestreo. El primer estrato se localizó desde la superficie hasta el límite superior de la termoclina; el segundo se localizó en la termoclina y el tercero se localizó desde el límite inferior de la termoclina hasta el límite inferior de ZMO (~0.2 mL/L). La profundidad de cada estrato-estación (Tabla I) fue decidida después de una inspección visual en el perfil del CTD y antes de cada arrastre de plancton.

Los arrastres oblicuos de zooplancton fueron realizados durante el día y la noche usando unas redes cónicas para zooplancton de 60 cm de diámetro en la boca, 250 cm de longitud de red y un haz de malla de 505  $\mu\text{m}$  (<http://www.generaloceanics.com>). Para saber la profundidad real de cada estrato-estación, la profundidad de la red se calculó por el método del coseno del ángulo del cable, siguiendo las especificaciones de estandarización de Smith & Richardson (Smith & Richardson, 1979). La técnica de muestreo estratificado ha sido usada exitosamente por estudios previos (Danell-Jiménez *et al.*, 2009; Inda-Díaz *et al.*, 2014). El volumen filtrado del agua fue calculado usando flujómetros calibrados y colocados en la boca de cada red. Las muestras fueron fijadas en 5% formalina y borato de sodio.

El volumen desplazado del zooplancton, fue estimado por el método del desplazamiento de volumen (Beers, 1976; Smith, 1971; Kramer *et al.*, 1972), siendo estandarizado el biovolumen a mL/1000  $\text{m}^3$  con la siguiente formulación:

$$\text{Biomasa (ml/1000 m}^3\text{)} = \text{volumen de la muestra (ml)} * 1000 / \text{volumen filtrado (m}^3\text{)}$$

Las larvas de peces fueron separadas de todas las muestras y utilizando un microscopio estereoscópico fueron identificadas hasta el nivel taxonómico más preciso posible con la descripción del Atlas CalCOFI No. 33 (Moser, 1996). La identificación se realizó tomando en cuenta las características morfométricas y de

pigmentación. Los organismos en estadio juvenil no fueron considerados en este estudio.

Para tener un consenso y poder comparar con varios trabajos a nivel mundial, a partir del programa de CalCOFI, con los modelos de prospección de huevos y larvas calculadas por unidad de área, se decidió en varias instituciones usar las unidades de área ( $10\text{m}^2$ ) en vez de unidades por volumen ( $\text{m}^3$ ).

La abundancia larval se estandarizó a individuos/ $10\text{m}^2$  (Smith & Richardson, 1979; Moser & Smith, 1993):

$$\text{No. de larvas}/10 \text{ m}^2 = \frac{(\text{No. de larvas}) \times (\text{profundidad real m}) * 10}{(\text{Volumen de agua filtrado m}^3)}$$

Se seleccionaron las larvas en estado preflexión para el análisis matricial porque esta fase de vida indican las áreas de desove (Moser, 1996). El volumen filtrado se obtiene de:

$$V = a (dr)$$

donde **a** es el área de la boca de la red y **dr** la distancia recorrida, siendo esta proporcional al número de revoluciones del flujómetro por el factor de calibración del mismo (Smith & Richardson, 1979).

**Tabla I. Rangos de profundidades y grosor de cada estrato-estación muestreado a lo largo del transecto entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D); y el transecto frente a Cabo Corrientes (E) en el Pacífico Oriental Tropical frente a México.**

| Estaciones muestreadas | Arrastre superficial de zooplancton |             |                         | Arrastre en la termoclina de zooplancton |             |                         | Arrastre en el mínimo de oxígeno de zooplancton |             |                         |
|------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------|--|-------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|
|                        | Prof. Inicial                       | Prof. Final | Grosor estrato-estación | Prof. Inicial                            | Prof. Final | Grosor estrato-estación | Prof. Inicial                                   | Prof. Final | Grosor estrato-estación |
| B01                    | 9                                   | 0           | 9                       | 90                                       | 20          | 70                      | 180   | 130         | 50                      |
| B03                    | 10                                  | 0           | 10                      | 50                                       | 20          | 30                      | 200   | 130         | 70                      |
| B05                    | 10                                  | 0           | 10                      | 90                                       | 20          | 70                      | 210   | 130         | 80                      |
| B07                    | 20                                  | 0           | 20                      | 100                                      | 40          | 60                      | 150   | 100         | 50                      |
| B09                    | 20                                  | 0           | 20                      | 160                                      | 80          | 80                      | 230   | 180         | 50                      |
| B11                    | 22                                  | 0           | 22                      | 110                                      | 50          | 40                      | 250   | 160         | 90                      |
| B13                    | 10                                  | 0           | 10                      | 90                                       | 20          | 70                      | 180   | 100         | 80                      |
| B15                    | 17                                  | 0           | 17                      | 100                                      | 50          | 50                      | 180   | 100         | 80                      |
| B17                    | 28                                  | 0           | 28                      | 90                                       | 30          | 60                      | 130   | 80          | 50                      |
| B19                    | 10                                  | 0           | 10                      | 90                                       | 20          | 70                      | 150   | 100         | 50                      |
| B21                    | 24                                  | 0           | 24                      | 110                                      | 50          | 60                      | 130   | 80          | 50                      |
| B23                    | 16                                  | 0           | 16                      | 70                                       | 20          | 50                      | 160   | 90          | 70                      |
| C02                    | 21                                  | 0           | 21                      | 100                                      | 50          | 50                      | 110   | 80          | 40                      |
| C04                    | 29                                  | 0           | 29                      | 130                                      | 70          | 60                      | 170   | 120         | 50                      |
| C07                    | 22                                  | 0           | 22                      | 70                                       | 30          | 40                      | 80  | 40          | 40                      |
| E03                    | 17                                  | 0           | 17                      | 80                                       | 20          | 60                      | 140   | 100         | 40                      |
| E06                    | 21                                  | 0           | 21                      | 60                                       | 20          | 40                      | 110   | 50          | 60                      |
| E09                    | 31                                  | 0           | 31                      | 80                                       | 30          | 50                      | 140   | 100         | 40                      |
| E12                    | 21                                  | 0           | 21                      | 90                                       | 40          | 50                      | 110   | 80          | 30                      |
| E15                    | 25                                  | 0           | 20                      | 80                                       | 30          | 50                      | 140   | 100         | 40                      |

## 7.2. Análisis estadísticos

La prueba no-paramétrica de Kruskal–Wallis (Sokal & Rohlf, 1985; Siegel & Castellón, 1988) fue usada para obtener la significancia estadística de las diferencias en el volumen desplazado del zooplancton y la abundancia total larval entre el día y la noche, y entre los tres estratos de profundidad. Se realizó una prueba de comparación múltiple (Olmstead-Tukey) usada para establecer si existen diferencias entre pares de estratos (Daniel, 2008). Para caracterizar a las especies, esta prueba clasifica jerárquicamente a las especies de la siguiente forma:

- A) Especies dominantes: son aquellas cuyos valores tanto de abundancia y de frecuencia relativa son mayores a la media aritmética.
- B) Especies constantes: aquellas cuya abundancia relativa no rebasa el valor promedio, pero si en relación a su frecuencia relativa de aparición.
- C) Especies ocasionales: cuya abundancia relativa es mayor al valor promedio de esta variable, pero con valores de aparición inferiores al promedio de la frecuencia relativa.
- D) especies raras: que se caracterizan por que ambas, sus abundancias y sus frecuencias relativas de aparición están por debajo de sus respectivas medias aritméticas.

Para determinar la presencia de grupos de estrato-estación o de los distintos hábitats de larvas de peces, y de sus especies características (indicadoras) o asociaciones de larvas de peces a lo largo del transecto, se aplicó un análisis de agrupación basado en la matriz de abundancia de especies versus estrato-estación (Clarke & Ainsworth, 1993). La contribución de las especies < 5% en el total de abundancia y con frecuencia de ocurrencia de < 2%, fueron excluidas de la matriz, en orden a considerar sólo las especies más

representativas del área de estudio. Un dendrograma aglomerativo se creó basado en una matriz de similaridad triangular (Índice de Disimilitud de Bray-Curtis; Sokal & Rohlf, 2012), usando la asociación completa de los promedios de los datos transformados a raíz cuarta de abundancia de larvas de peces para minimizar el efecto de los valores extremos (Field *et al.*, 1982). La línea de corte en el dendrograma fue definida visualmente, de acuerdo a la práctica común en estudios del zooplancton y larvas de peces (p.e. Doyle *et al.*, 1993; Moser & Smith, 1993; Atwood *et al.*, 2010).

Para detectar las diferencias significativas entre la disimilaridad de la abundancia entre los diferentes hábitats de larvas de peces, se aplicó la prueba estadística de una sola vía ANOSIM, la cual permite obtener la significancia de los hábitats de larvas de peces que fueron definidos y separados a priori. La prueba de ANOSIM muestra una significancia ( $p > 0.5$ ) entre las agrupaciones del análisis de cluster (Clarke, 1988; Clarke & Ainsworth, 1993).

La jerarquía de cada asociación de larvas de peces en cada hábitat fue obtenida de acuerdo con la prueba de Olmstead–Tukey (Sokal & Rohlf, 1985), la cual toma en cuenta la abundancia y la frecuencia relativa de cada especie. Las especies dominantes fueron consideradas como representativas de cada hábitat de larvas de peces. La similaridad promedio y el porcentaje de contribución de ciertas especies se usaron para identificar a cada hábitat por medio del porcentaje de similaridad (SIMPER) (PRIMER; Clarke & Warwick, 2001).

El Análisis de Correspondencia Canónico (ACC) (Ter-Braak, 1986) fue usado para definir las relaciones entre los hábitats de larvas de peces (estratos-estación muestreados) y las variables ambientales. Antes de calcular el ACC, la estandarización de los datos biológicos fue transformada a raíz-raíz. La matriz ambiental contiene los valores del volumen desplazado del zooplancton ( $\text{mL}/1000\text{m}^3$ ) en cada estrato-estación y los valores promedios de Salinidad,

Temperatura potencial (°C), Clorofila *a* (mg/m<sup>3</sup>) y concentración de Oxígeno Disuelto (mL/L) representativos en cada estrato (Ter-Braak, 1986).

## **8. RESULTADOS**

### **8.1 Distribución vertical del oxígeno disuelto y otros indicadores ambientales**

Las imágenes de satélite de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y de Clorofila *a* (Clo *a*) muestran los gradientes ambientales entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (Figuras 2a y 2b). La temperatura superficial del mar aumentó con dos posibles frentes térmicos oceánicos; uno en la entrada del Golfo (desde 20° a 24°C) y otro en Cabo Corrientes (desde 24° a 28°C). La Clo *a* mostró cambios en su concentración con un rango entre ~0.1 a ~3 mg/m<sup>3</sup> coincidiendo con los frentes térmicos. En la parte sur del Golfo de California, los valores de la Clo *a* fueron mayores de 1 mg/m<sup>3</sup>, mientras en el Pacífico estuvieron por debajo de 1 mg/m<sup>3</sup>. La concentraciones más altas de Clo *a* (<2.5 mg/m<sup>3</sup>) fueron observadas en la costa de Cabo Corrientes probablemente como resultado de la surgencia costera.

Una de las variables ambientales más relevantes en este trabajo es la concentración de oxígeno disuelto. Su distribución a lo largo de los transectos (Figuras 4a y 5a) mostró que la capa superficial es oxigenada (> 4 mL/L) hasta los 40-50 m de profundidad a lo largo de todo el transecto. Los valores de 4 mL/L > OD > 1 mL/L definen el límite superior del agua hipóxica, esta se eleva siendo más superficial, desde los ~100 m de profundidad cerca de la entrada del Golfo de California hasta los ~70 m de profundidad en Cabo Corrientes. El límite superior de las aguas anóxicas, indican que la oxipleta de los 0.2 mL/L, presenta una tendencia, desde los ~250 m de profundidad en la entrada del Golfo de California hasta los ~80 m de profundidad cerca de Cabo Corrientes, pero con una elevación drástica en el frente de este cabo (entre las estaciones C04 –D01).

La distribución vertical de la temperatura (Figuras 4b y 5b) revelan un rango entre 12° a 25°C. La termoclina (~18° y 20°C isotermas) fluctúa entre ~50 y 100 m de profundidad a lo largo de todo el transecto por debajo de la capa superficial oxigenada. Los dos frentes térmicos superficiales que fueron observados con las siguientes características: la isoterma de 22°C se presentó en la superficie a la entrada del Golfo de California (entre las estaciones B01 y B02) y la isoterma de 24°C se presentó al sur de Cabo San Lucas (entre las estaciones B13 y B14). Se observó una masa cálida al sur de este segundo frente en la termoclina. Por debajo de la termoclina, la temperatura bajó a los 12°C a los ~ 250 m de profundidad. La línea azul representa la profundidad de la capa de mezcla, la cual fluctuó entre los ~30 m en la entrada del Golfo de California hasta los ~ 70 m en Cabo Corrientes, y se eleva a los ~ 20 m de profundidad entre las estaciones oceánicas E13 y E15 (Figura 5b).

La salinidad presentó un rango entre los 34.2 y los 35 (Figuras 4c y 5c). El máximo de salinidad (~34.9 – 35) fue observado entre los ~ 80 m y los 40 m de profundidad al sur del Golfo de California (B013 y D15); asociado a un flujo salino saliente subsuperficial. El mínimo salino (~34.2 y 34.6) fue detectado en los primeros 70 m de profundidad en Cabo Corrientes (C01 y D03). Por debajo de los 150 m de profundidad, la salinidad fue relativamente homogénea (34.7 ups).

La Clo *a* mostró valores mesotróficos con valores máximos de ~ 2 mg/m<sup>3</sup> (Figuras 4d y 5d). Su distribución indicó que la mayor concentración de Clo *a* estuvo por debajo de la superficie (~1-2 mg/m<sup>3</sup>), se observa en las figuras como una banda gruesa de 45m localizada en la termoclina, la cual se eleva entre las estaciones B06 y B08, y entre C01 y C02, coincidiendo con las elevaciones de la isohalinas. Sin embargo, la alta concentración de Clo *a* que se detectó por medio del satélite frente a Cabo Corrientes, no fue observada en los datos *in situ*, lo cual puede resultar en una diferencia en los días entre los datos *in situ* (febrero 18 y 19) y la imagen satelital (febrero 23); este último correspondiendo a un evento fuerte de surgencia (Figura 6).

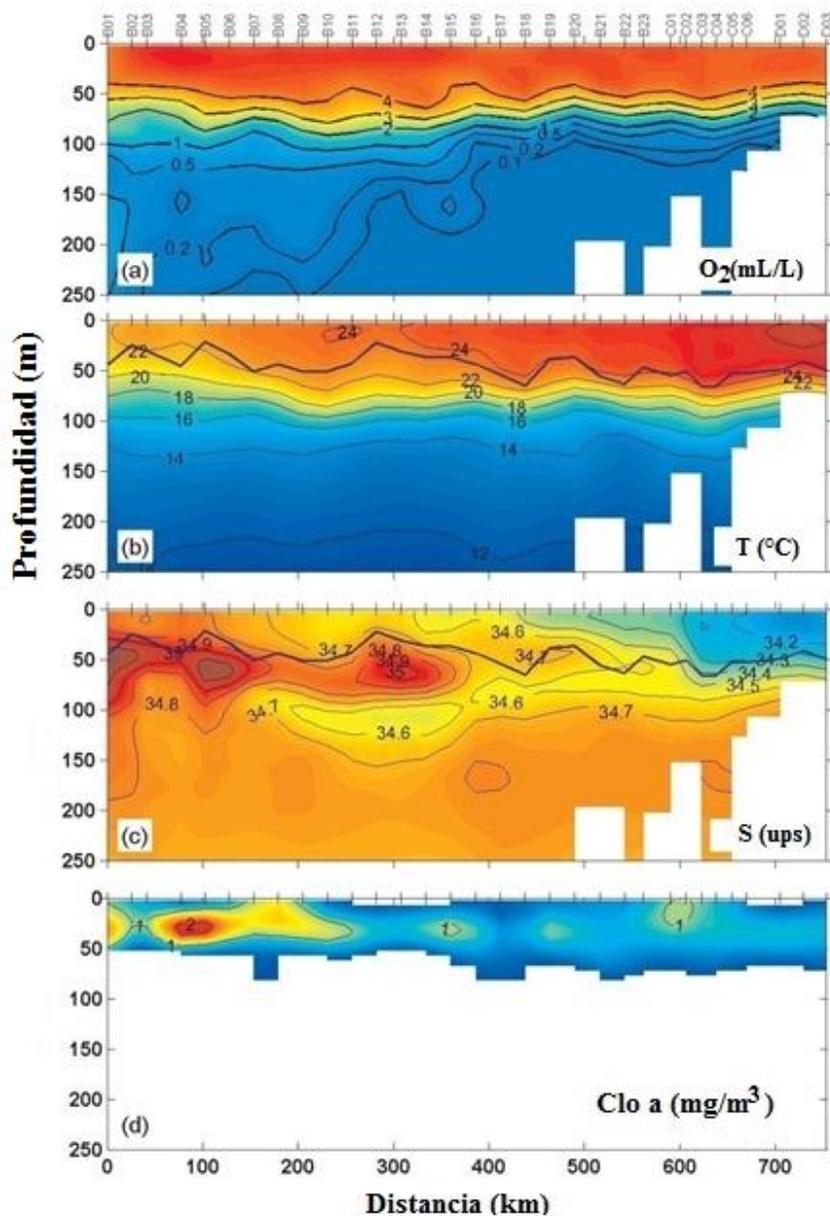


Figura 4. Distribución vertical de las condiciones hidrográficas a lo largo del transecto entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D), cada gráfico presenta los contornos con sus valores correspondientes: a) Oxígeno disuelto (mL/L) (línea negra resaltada), b) Temperatura (°C) y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul), c) Salinidad y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul) y d) Clorofila a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). La línea resaltada indica la oxipleto de 1mL/L.

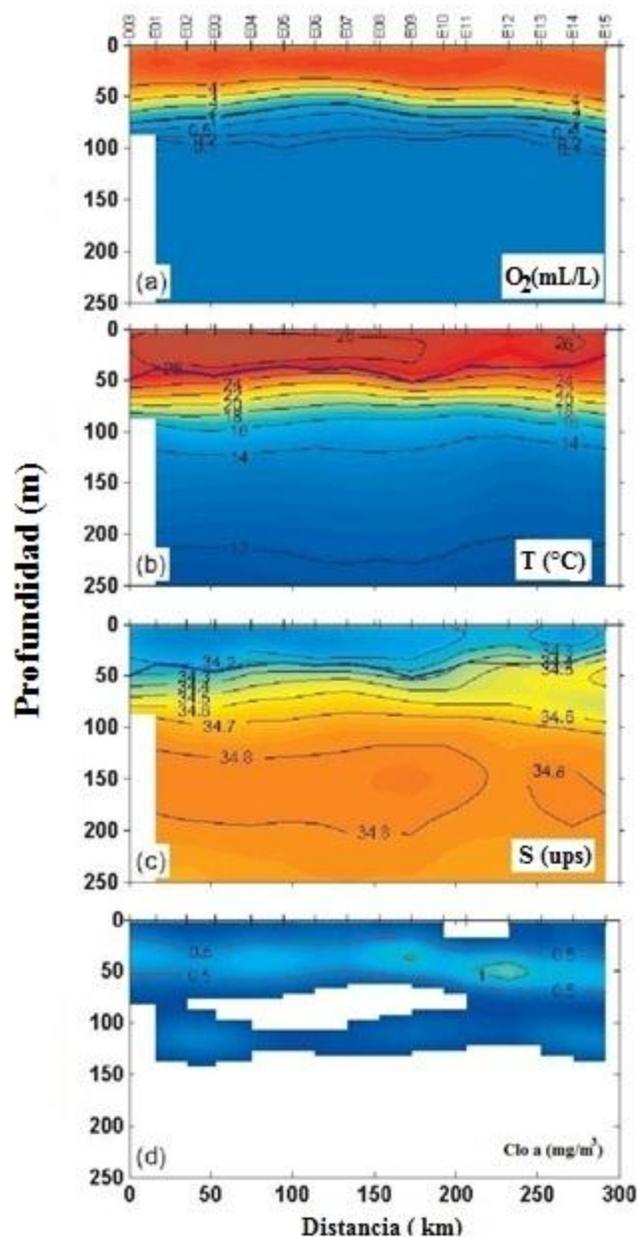
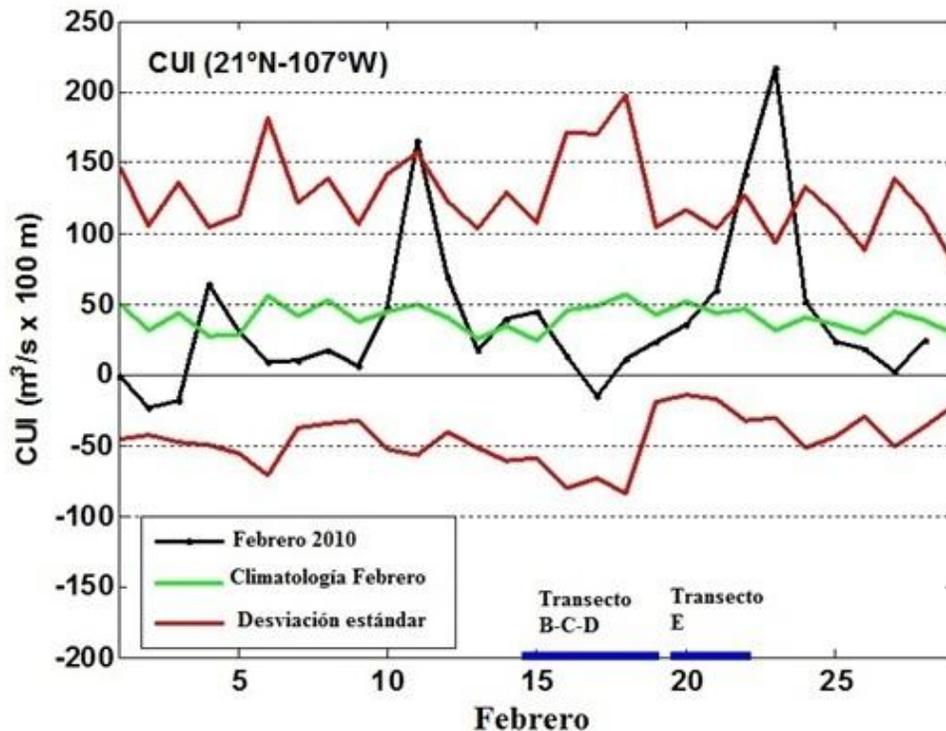


Figura 5. Distribución vertical de las condiciones hidrográficas a lo largo del transecto frente a Cabo Corrientes (E) cada gráfico presenta los contornos con sus valores correspondientes: a) Oxígeno disuelto (mL/L) (línea negra resaltada), b) Temperatura ( $^{\circ}C$ ) y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul), c) Salinidad y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul) y d) Clorofila a ( $mg/m^3$ ). La línea resaltada indica la oxipleto de 1mL/L.

El círculo de color negro cerca a las estaciones B23 y C01, en las Figuras satelitales 2a y 2b, representa la posición donde el Índice de Bakun o CUI fue estimado localizándose a los 21°N y 107°W. La evolución temporal del CUI (transporte de Ekman hacia afuera de la costa), ver en la figura 6, mostró los valores altos del índice entre 10 y 13, y entre 20 y 25 de febrero (línea negra) comparado con la climatología de febrero (1967-presente) (línea verde) y los valores de la desviación estándar correspondientes (línea roja). La presencia de un evento fuerte de surgencia durante el mes del crucero, el cual dobló los valores de la climatología, puede explicar la elevación de las isotermas acerca al área de Cabo Corrientes y los valores bajos de oxígeno disuelto cercanos a la superficie alrededor de los 80 m de profundidad.



**Figura 6.** La evolución temporal del Índice de Surgencia Costera (CUI) o Índice de Bakun representado por el transporte hacia afuera de la costa durante febrero 2010 (línea negra), ver su ubicación en las Figuras 2a y 2b. La línea verde corresponde a la climatología del índice desde 1967 hasta el presente y las líneas rojas representan los valores de la desviación estándar. Las líneas azules indican los días del muestreo.

## 8.2 Volumen desplazado del zooplancton y abundancia total de larvas de peces

El rango de profundidad de cada arrastre del zooplancton se muestra con barras verticales representando los estratos muestreados (Figuras 7 y 8) correspondiente a la distribución vertical del volumen desplazado del zooplancton. En las pruebas estadísticas no se evidencia diferencias significativas en el volumen desplazado del zooplancton en los datos muestreados entre el día y la noche ( $P > 0.05$ ), pero si se presentó diferencias significativas en los tres estratos muestreados ( $P < 0.05$ ); mostrando la mayor abundancia en el estrato en superficie.

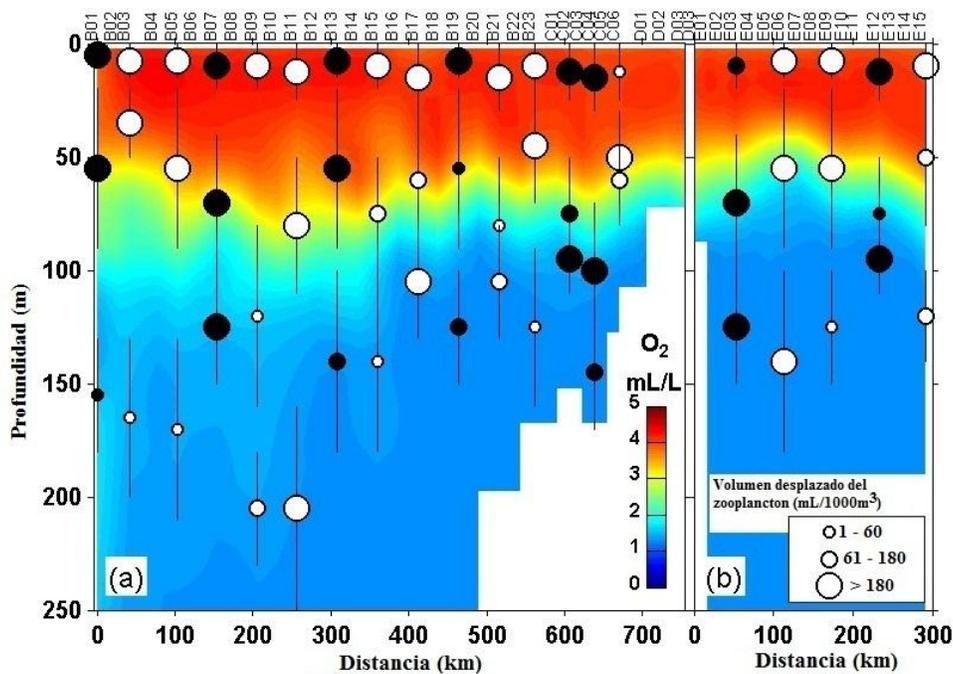
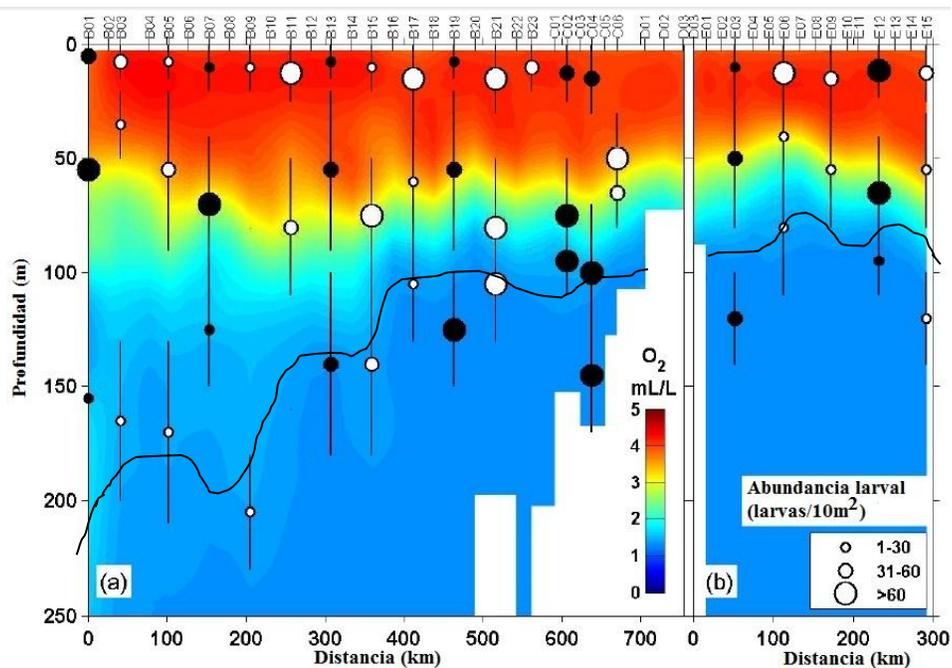


Figura 7. Distribución vertical del volumen desplazado del zooplancton ( $\text{mL}/1000\text{m}^3$ ) y la concentración de oxígeno disuelto ( $\text{mL}/\text{L}$ ) a lo largo del transecto a) entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D) y b) frente a Cabo Corrientes (E). La distribución del volumen desplazado del zooplancton se representa por los siguientes intervalos: (1-60, 61-180,  $>180$   $\text{mL}/1000\text{m}^3$ ) y los símbolos representan: datos muestreados de día (círculos blancos) y datos muestreados de noche (círculos negros). Las líneas verticales negras muestran los rangos de cada estrato-estación muestreado.

Los valores del volumen desplazado del zooplancton fluctuaron entre 1 y 2,250 mL/1000 m<sup>3</sup>. En la figura 7, los valores altos del volumen desplazado del zooplancton (> 180 mL/1000m<sup>3</sup>) fueron observados principalmente en la capa oxigenada (>1 mL/L) durante todo el muestreo, excepto en las estaciones C06 y E03 cercano a la costa, donde el volumen desplazado fue bajo en los tres estratos. La mayoría de los valores (<60 mL/L) fueron observados en aguas hipóxicas y anóxicas. Estadísticamente las diferencias significativas ocurrieron en el total de abundancia de larvas entre el día y la noche ( $P < 0.05$ ), pero no se presentó diferencias significativas entre los estratos ( $P > 0.05$ ).



**Figura 8. Distribución vertical de abundancia total de larvas de peces (larvas/10m<sup>2</sup>) y la concentración del oxígeno disuelto (mL/L) a lo largo del transecto a) entre Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D) y b) frente a Cabo Corrientes (E). El límite superior de la zona hipóxica se representa por una línea negra resaltada (1mL/L). La distribución de la abundancia de larvas de peces se representa por los siguientes intervalos: (1-30, 31-60, >60 larvas/10m<sup>2</sup>) y los símbolos representan: datos muestreados de día (círculos blancos) y datos muestreados de noche (círculos negros). Las líneas verticales negras muestran los rangos de cada estrato-estación muestreado.**

Los valores de la abundancia de larvas de peces presentaron un rango entre 3 y 140 larvas/10m<sup>2</sup> (Figura 8). En esta figura, las abundancias más altas de larvas de peces (>100 /10m<sup>2</sup>) fueron observadas principalmente en la capa oxigenada (> 4mL/L), excepto entre las estaciones B19 y C06, donde la alta abundancia de larvas de peces fue observada a través de la columna de agua, especialmente durante la noche.

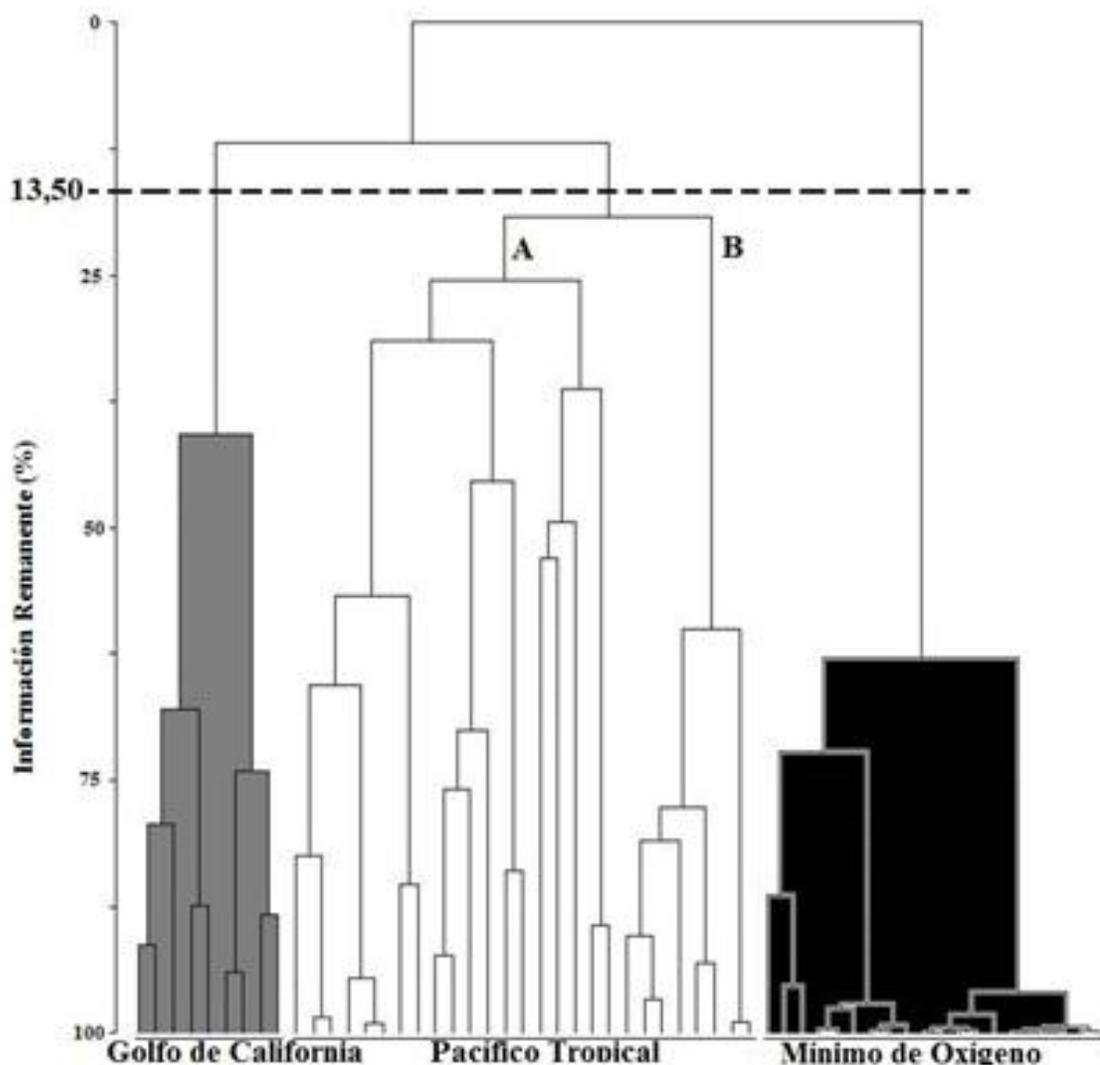
### **8.2.1. Hábitats de larvas de peces y asociaciones de especies**

Un total de 5,089 larvas de peces fueron identificadas, la mayoría fueron recolectadas en estadio de preflexión (79%) lo cual puede indicar que el muestreo estuvo cercano al área de desove. Dentro de estas se incluyen 61 taxones que pertenecen a 31 familias de larvas de peces siendo de características demersales costeros, epipelágicos, nerítico-pelágicos y mesopelágicos. Un total de 61 taxones fueron identificados a nivel de especie, 10 a nivel de género y una a nivel de familia (Apéndice I).

El índice de disimilitud de Bray-Curtis y el dendrograma obtenido usando el método de análisis de agrupaciones (clúster) en el cual se observan tres grandes grupos de estrato-estación muestreados o de hábitats de larvas de peces con un corte al 13.5% de la información remanente del set de datos (Figura 9). Según esta matriz de abundancias por estrato-estación se obtuvieron que los tres grupos son significativamente diferentes (ANOSIM:  $R=0.5$ ,  $P<0.05$ ) siendo definidos los tres hábitats de larvas de peces de acuerdo a su ubicación en el área de estudio y por su ubicación en la columna de agua, de acuerdo a ello y viendo en un mapa los tres grupos se nombraron como:

- i) Hábitat del Golfo de California,
- ii) Hábitat del Pacífico Tropical
- iii) Hábitat del Mínimo de Oxígeno.

En el Apéndice II, se muestra en una tabla la lista del análisis de agrupamiento (clúster) de estrato-estación que forma cada hábitat de larvas de peces.



**Figura 9. Dendrograma de los hábitats de larvas de peces definidos por el Índice de disimilaridad de Bray–Curtis y el método aglomerativo flexible usando los agrupamientos (clúster) de estrato-estación (zonas) como hábitats de larvas de peces indicadas como: Golfo de California (color gris), Pacífico Tropical (color blanco) y Mínimo Oxígeno (color negro).**

El hábitat de larvas de peces del Golfo de California fue ubicado al sur del Golfo de California, entre las estaciones B01 y B09, principalmente en la termoclina (~50 y 60 m de profundidad), donde los valores altos de oxígeno disuelto (>4 mL/L) y los valores altos de Clorofila *a* (>1 mg/m<sup>3</sup>) fueron registrados (Figuras 10g y 10h). Ambientalmente, este hábitat estaba separado del hábitat del Pacífico Tropical por un frente salino subsuperficial el cual es descrito más adelante.

El hábitat de larvas de peces del Golfo de California fue definido por 9 muestras (estrato-estación) y con 37 taxones con una abundancia larval promedio por estrato-estación de 45 larvas/10 m<sup>2</sup>, las cuales son de afinidad principalmente tropical y subtropical. Las especies dominantes en este hábitat fueron: *Anchoa spp.* (con hábito epipelágico en etapa adulta) (Figura 11a y 11b) y *Benthoosema panamense* (con hábito mesopelágico en etapa adulta), con una contribución de ambas especies del ~83 % de acuerdo al Porcentaje de Similaridad (SIMPER) (Tabla II). Las larvas de peces de especies como *Caranx sexfasciatus* (con hábito pelágico costero en etapa adulta), y *Xyrichtys mundiceps* (con hábito demersal costero en etapa adulta), fueron jerarquizados como especies ocasionales en dicho hábitat (Tabla II), es decir que estas especies presentaron un porcentaje de frecuencia de ocurrencia bajo pero con un porcentaje de abundancia relativamente alto. El 47% de las asociaciones de especies tienen un promedio de abundancia larval de < 2 larvas/10m<sup>2</sup>) (Apéndice II).

El hábitat de larvas de peces Pacífico Tropical mostró dos subgrupos (A y B) con un corte a nivel (>13.5 %) de la información remanente (Figura 9), aunque estos dos sub-hábitats no fueron significativamente diferentes (ANOSIM: R=0.1, P>0.05). Este hábitat de larvas de peces fue localizado al sur del Golfo de California entre las estaciones B13 y E15, principalmente en el transecto E (Figura 10). Este hábitat fue detectado a través de toda la columna de agua pero la mayor abundancia de larvas (>60 larvas/10m<sup>2</sup>) fue ubicada en la capa de mezcla y la termoclina en aguas oxigenadas (> 4 mL/L) y cálidas (> 23°C). La baja abundancia

de larvas de peces fue observada bajo la termoclina en aguas hipóxicas (< 1 mL/L) y frías (< 23°C).

Este hábitat fue formado por 27 estratos-estación y 27 taxones con una abundancia larval promedio por estrato-estación de 28 larvas/10m<sup>2</sup>. La especie dominante fue: *Vinciguerria lucetia* (con hábito mesopelágico en etapa adulta), con una contribución de 60% (Tabla II). Su abundancia definió la distribución de este hábitat, con mayor abundancia en la capa de mezcla y la termoclina (sub-hábitat A), y con baja abundancia por debajo de la termoclina (sub-hábitat B) (Figura 11c y 11d). Otras especies dominantes, pero con baja contribución con respecto a *V. lucetia*, fueron las larvas de peces de hábito mesopelágico en etapa adulta como *D. laternatus* (10%) y *Diaphus pacificus* (6%) (Tabla II). Las especies como *Opisthonema libertate* y *Engraulis mordax* (con hábitos epipelágicos en etapa adulta) fueron jerarquizadas como especies poco abundantes y frecuentes en este hábitat (Tabla 2). El 15% de las asociaciones de especies presentaron un promedio de abundancia larval < 2 larvas/10m<sup>2</sup>) (Apéndice I).

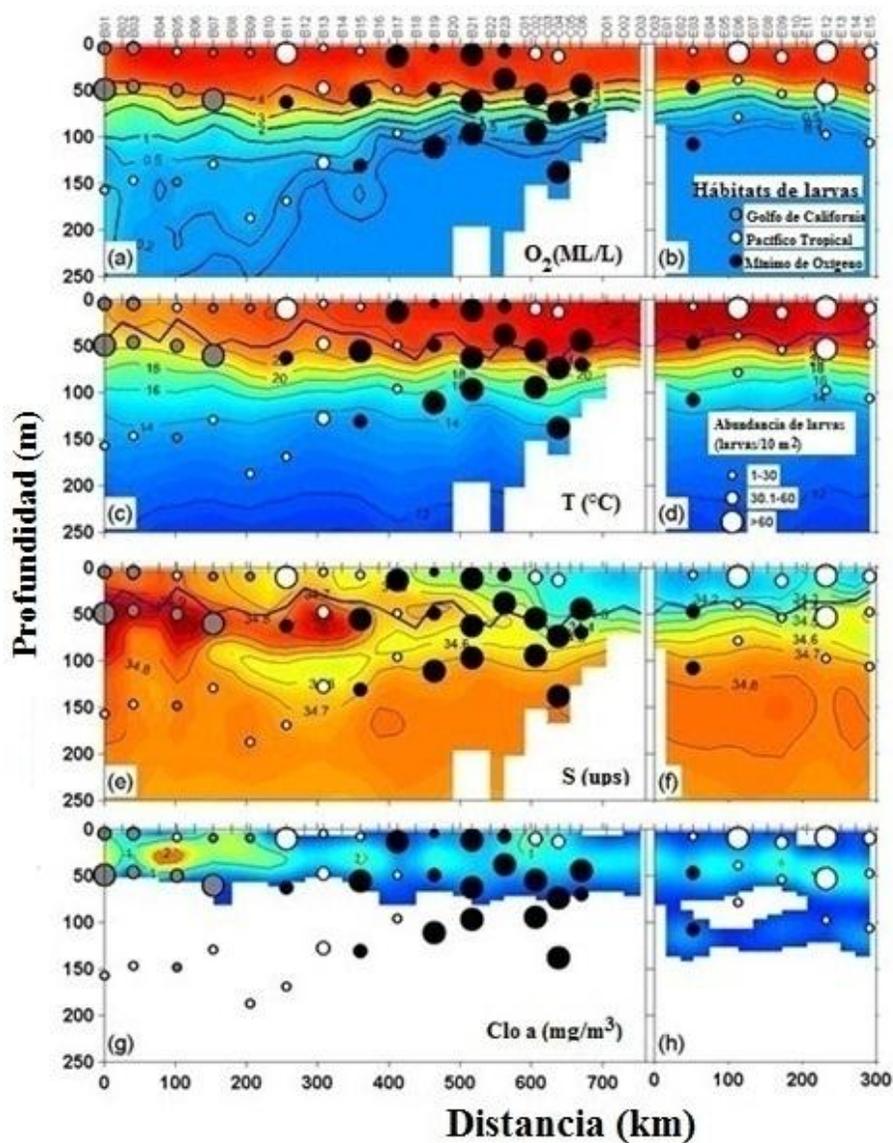


Figura 10. Distribución vertical de las condiciones hidrográficas a lo largo del Transecto entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D), y frente a Cabo Corrientes (E), relacionados con la distribución de los hábitats de larvas de peces: a) y b) oxígeno disuelto (mL/L) y el límite superior de la zona hipóxica (línea negra), c) y d) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul), e) y f) salinidad y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul) y g) y h) clorofila *a* (por debajo de los 60 m de profundidad la clorofila *a* se mantuvo homogénea con valores de  $0.5 \text{ mg/m}^3$ ). Los hábitats están representados como: Golfo de California (círculos grises), Pacífico Tropical (círculos blancos) y Mínimo Oxígeno (círculos negros).

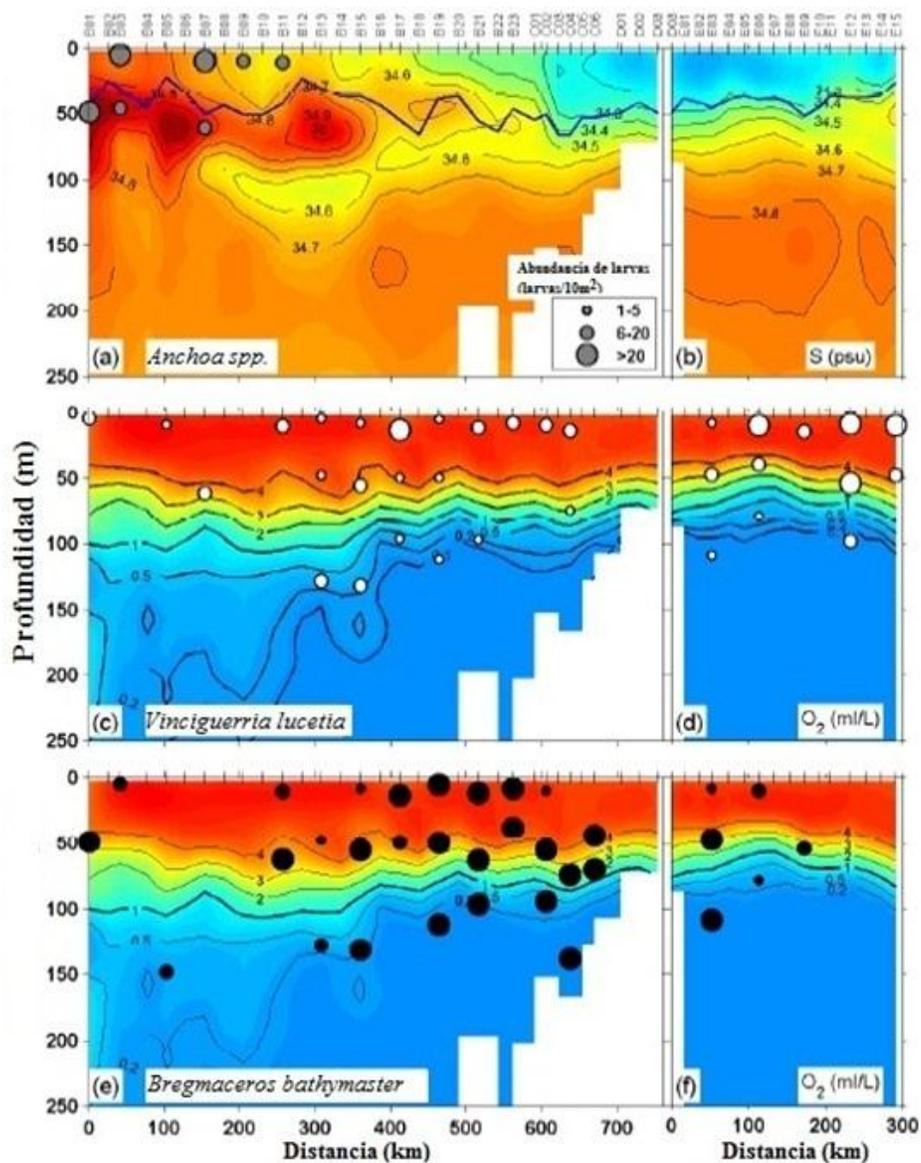


Fig. 11. Distribución vertical de las condiciones hidrográficas a lo largo del Transecto entre el Golfo de California y Cabo Corrientes (B-C-D) y frente a Cabo Corrientes (E): a) y b) salinidad y la profundidad máxima de la capa de mezcla (línea azul), y la distribución de la abundancia de *Anchoa sp.* (círculos grises), c) y d) oxígeno disuelto (mL/L) y el límite superior de la zona hipóxica (línea negra), y la abundancia de *Vinciguerria lucetia* (círculos blancos), y e) y f) *Bregmaceros bathymaster* (círculos negros).

**Tabla II. Especies dominantes determinadas por la prueba de Olmstead-Tukey para cada hábitat de larvas de peces (Golfo de California, Pacífico Tropical y Mínimo Oxígeno) durante febrero 2010.**

| HABITATS   |                                 | Golfo de California |    |    |   | Pacífico Tropical |    |    |   | Mínimo de Oxígeno |    |    |   |
|--|---------------------------------|---------------------|----|----|---|-------------------|----|----|---|-------------------|----|----|---|
| Familias   | TAXONES                         | X                   | %F | %S | H | X                 | %F | %S | H | X                 | %F | %S | H |
| Phosichthyidae   | <i>Vinciguerria lucetia</i>     |                     |    |    |   | 158               | 75 | 59 | D | 266               | 64 | 16 | D |
| Myctophidae  | <i>Diogenichthys laternatus</i> |                     |    |    |   | 79                | 33 | 10 | D | 109               | 23 | 1  | C |
| Synodontidae   | <i>Synodus lucioceps</i>        |                     |    |    |   | 13                | 17 | 4  | D |                   |    |    |   |
| Myctophidae  | <i>Benthoosema panamense</i>    | 148                 | 78 | 46 | D |                   |    |    |   |                   |    |    |   |
| Bregmacerotidae  | <i>Bregmaceros bathymaster</i>  |                     |    |    |   | 100               | 42 | 17 | D | 1085              | 95 | 77 | D |
| Engraulidae  | <i>Anchoa</i> spp.              | 86                  | 67 | 37 | D |                   |    |    |   |                   |    |    |   |
| Eleotridae   | <i>Dormitator latifrons</i>     |                     |    |    |   |                   |    |    |   | 15                | 23 | 2  | C |
| Myctophidae  | <i>Diaphus pacificus</i>        |                     |    |    |   | 59                | 21 | 6  | D | 70                | 32 | 2  | C |
| Engraulidae  | <i>Engraulis mordax</i>         |                     |    |    |   | 10                | 12 | 1  | C |                   |    |    |   |
| Nomeidae   | <i>Cubiceps pauciradiatus</i>   | 19                  | 37 |    | O | 10                | 12 | 1  | C |                   |    |    |   |
| Labridae   | <i>Xyrichtys mundiceps</i>      | 17                  | 22 |    | O |                   |    |    |   |                   |    |    |   |
| Carangidae   | <i>Caranx sexfasciatus</i>      | 4                   | 11 |    | O |                   |    |    |   |                   |    |    |   |
| Gobiidae   | <i>Rhinogobiops nicholsii</i>   | 5                   | 22 |    | O |                   |    |    |   |                   |    |    |   |
| Clupeidae  | <i>Opisthonema libertate</i>    |                     |    |    |   | 22                | 8  |    | O |                   |    |    |   |
| Bothidae   | <i>Bothus</i> sp.               |                     |    |    |   | 18                | 8  |    | O | 34                | 17 |    | O |
| Eleotridae   | <i>Eleotris picta</i>           |                     |    |    |   |                   |    |    |   | 20                | 18 |    | O |
| Nomeidae   | <i>Psenes pellucidus</i>        |                     |    |    |   |                   |    |    |   | 23                | 14 |    | O |
| Número de taxones                                      |                                 | 37                  |    |    |   | 27                |    |    |   | 46                |    |    |   |
| Número de estrato/estación                             |                                 | 9                   |    |    |   | 27                |    |    |   | 20                |    |    |   |
| Promedio abundancia larval (larvas /10m <sup>2</sup> ) |                                 | 45                  |    |    |   | 28                |    |    |   | 75                |    |    |   |

El hábitat del Mínimo Oxígeno fue ubicado en Cabo Corrientes entre las estaciones B15 y E03, cerca de las Islas Marías (Figura 10). La mayor abundancia larval fue observada dentro y por debajo de la termoclina (~60 m de profundidad), donde se localiza el agua hipóxica (<1 mL/L) y el agua anóxica (<0.2 mL/L), y donde se registró el agua fría (< 20°C) y de baja salinidad (34.5). Este hábitat fue definido por 20 estrato-estación donde se presentó la mayor riqueza específica (46 taxones) con una mezcla de especies con hábitos demersales costeros, epipelágicos, neríticas-pelágicas y mesopelágicas; y donde se observó la mayor abundancia promedio de larvas de peces (75 larvas/10m<sup>2</sup>). Las especies dominantes fueron: *B. bathymaster* (con hábito nerítico-pelágico en etapa adulta) con una contribución del ~77 % (Tabla 2). Esta especie, como *V. lucetia* en el hábitat Pacífico Tropical, delimita la distribución del hábitat del Mínimo Oxígeno con una mayor abundancia en zona hipóxica y anóxica, y aguas frías (Figuras 11e y 11f). La especie *Dormitator latifrons* (con hábito costero demersal en etapa adulta), *D. pacificus* y *D. laternatus*, se caracterizaron como especies constantes en este hábitat, es decir que presentaron un porcentaje de frecuencia de ocurrencia alta; y *Eleotris picta* (con hábito demersal costero) y *Psenes pellucidus* (con hábito batipelágico en etapa adulta) se caracterizaron como especies ocasionales, es decir que estas especies presentaron un porcentaje de frecuencia de ocurrencia bajo pero con un porcentaje de abundancia relativamente alto (Tabla 2). El 56% de la asociación de especies mostraron un promedio de abundancia larval < 2 larvas/ 10m<sup>2</sup> (Apéndice I).

La distribución de larvas de *B. bathymaster* por estadios de desarrollo (preflexión, flexión y postflexión) se observa en la Figura 12. El estadio de preflexión fue el de mayor abundancia, pero con una distribución similar entre todos los estadios larvales a lo largo de la columna de agua. La misma situación fue observada en las larvas de *V. lucetia* en los tres estadios de desarrollo (Apéndice III).

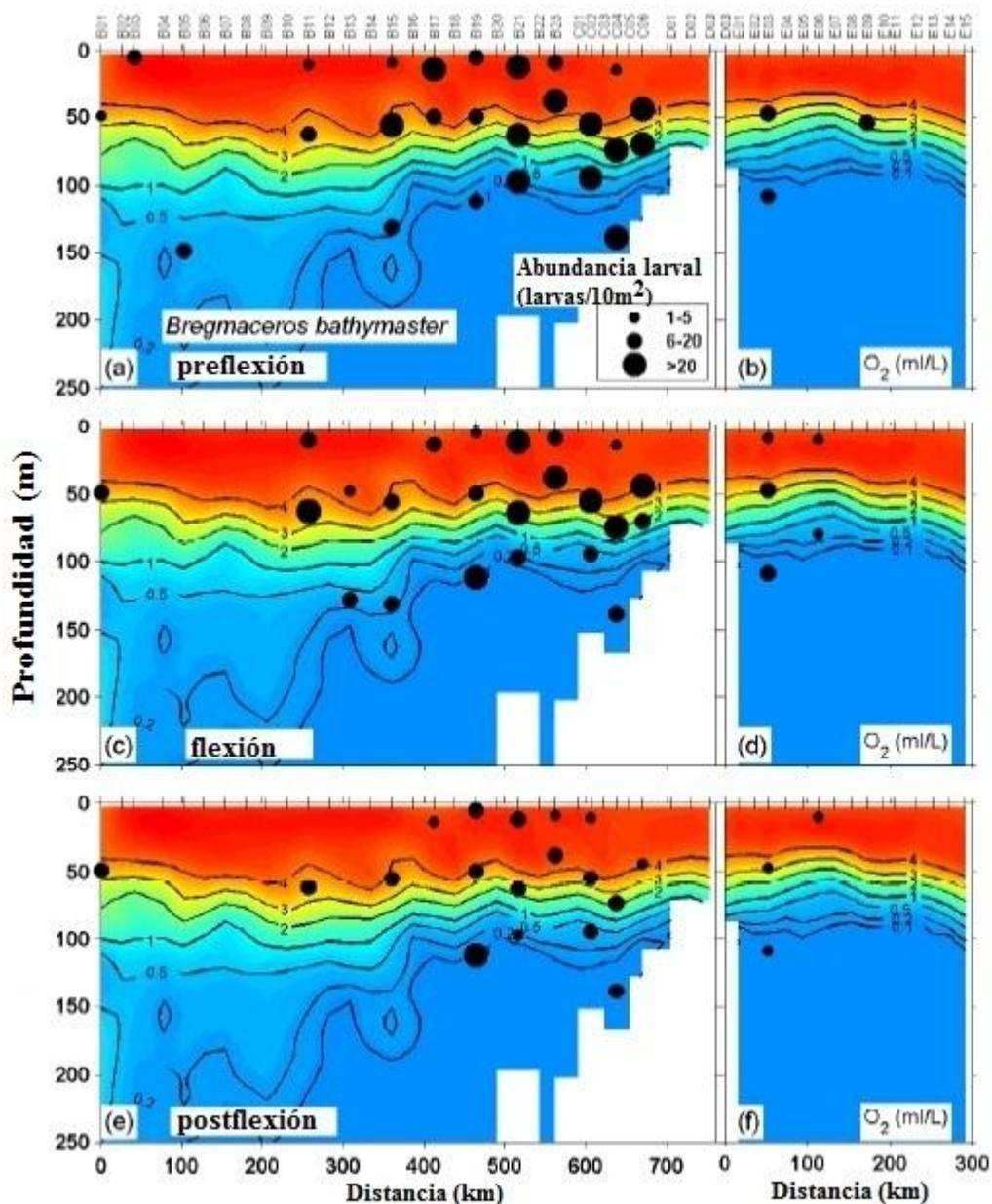
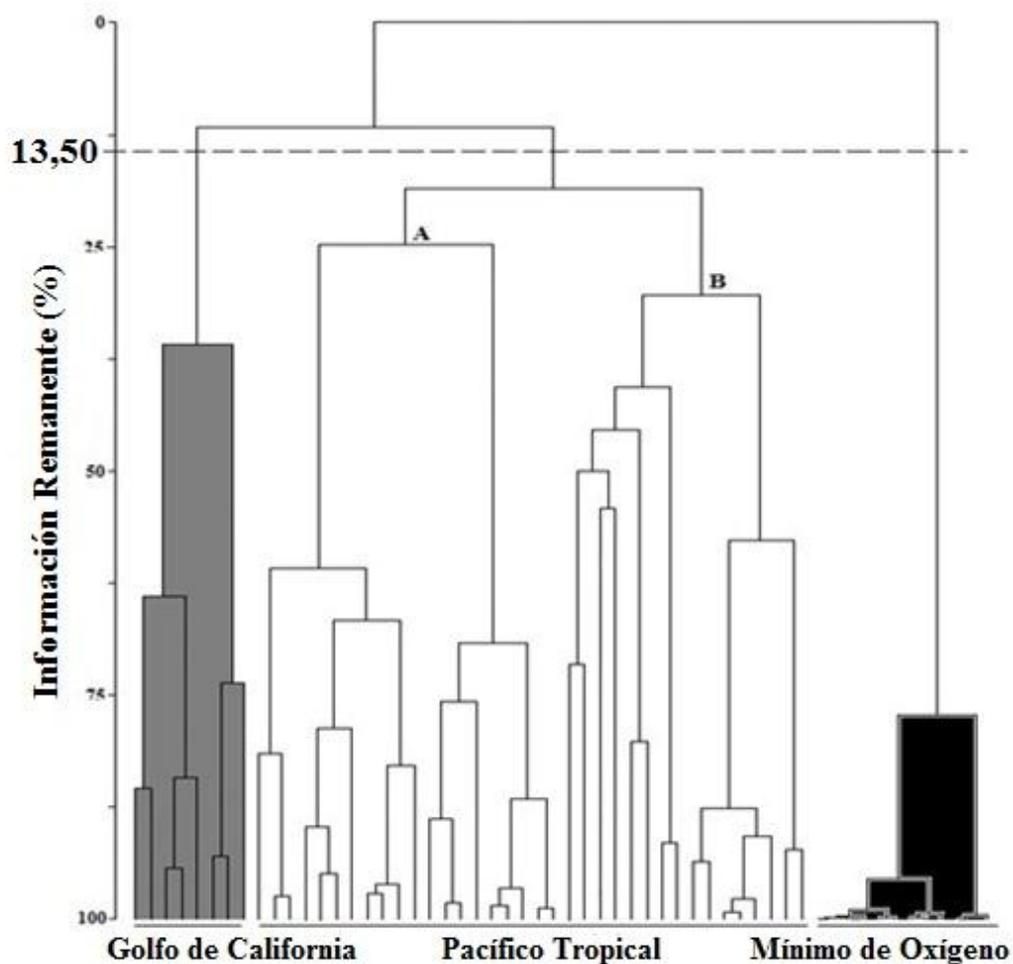


Figura 12. Distribución vertical de *Bregmaceros bathymaster* por estadios de desarrollo: a) y b) preflexión, c) y d) flexión y e) y f) postflexión a lo largo del transecto B-C-D y E, a través de la columna de agua (0 – 250m) sobre la distribución de oxígeno disuelto (mL/L). El límite superior de la zona hipóxica se representa con una línea negra. La abundancia de larvas (larvas/m<sup>2</sup>) se representa por círculos negros.

Finalmente, se realizó una prueba para confirmar la permanencia o constancia de los grupos en la zona de estudio, se utilizó la misma matriz biológica de la cual se extrajeron las especies dominantes definidas anteriormente las cuales son de amplia distribución. Se empleó el índice de disimilitud de Bray-Curtis y se obtuvo un dendograma usando el método de análisis de cluster en el cual resultaron los mismos tres grupos (GC, PT y MO), con el mismo corte al 13.5% de la información remanente del set de datos (Figura 13).



**Figura 13. Dendograma, definidos por la medida de la disimilaridad de Bray-Curtis y el método aglomerativo flexible, de los hábitats de larvas de peces y sin las especies dominantes, usando los datos colectados durante febrero 2010. Los hábitats de larvas de peces se indican como: Golfo de California (1), Pacífico Tropical (2) y Mínimo Oxígeno (3).**

Se realizó a continuación la prueba de SIMPER para obtener las especies de mayor contribución para cada hábitat y la prueba de Olmstead-Tukey para obtener las especies dominantes nuevas (prueba sin *V. lucetia*, *D. laternatus* y *B. bathymaster*) lo que se puede inferir que existe un reemplazo de especies y de asociaciones larvales. Para el hábitat del Golfo de California fue definido por 8 muestras (estrato-estación) y con 10 taxones.

En este caso se muestra un estrato-estación menos que en la prueba original pues estaba compuesta solo por las especies dominantes originales y desaparece del análisis, formando este hábitat del GC son solo 8 muestras. Las especies dominantes fueron: *Benthosema panamense* (con hábito mesopelágico en etapa adulta) con una contribución del 56% y *Anchoa spp.* (con hábito epipelágico en etapa adulta) con una contribución del 40%. En el hábitat de larvas de peces Pacífico Tropical fue definido por 36 muestras (estrato-estación) y con 43 taxones. Las especies dominantes fueron: *Diaphus pacificus* (con hábito mesopelágico en etapa adulta) con una contribución del 47%, *Cubiceps pauciradiatus* (con hábito epi-mesopelágico en etapa adulta) con contribución del 13% y *Synodus lucioceps* (con hábito demersal costero en etapa adulta) con una contribución de 12%. El hábitat del Mínimo Oxígeno fue definido por 12 estaciones y con 48 taxones. Las especies dominantes fueron: *D. pacificus* (con hábito mesopelágico en etapa adulta) con una contribución del 30%, *Eleotris picta* (con hábito demersal costero en etapa adulta) con una contribución del 17% y *Dormitator latifrons* (con hábito demersal costero en etapa adulta) con una contribución del ~52 % (Tabla III).

**Tabla III. Especies y asociaciones sin las especies dominantes determinadas por la prueba de Olmstead-Tukey para cada hábitat de larvas de peces (Golfo de California, Pacífico Tropical y Mínimo Oxígeno) durante febrero 2010.**

| Especies   | Hábitat 1 |    |    |   | Hábitat 2 |    |    |   | Hábitat 3 |    |    |   |
|--|-----------|----|----|---|-----------|----|----|---|-----------|----|----|---|
|  | X         | %F | %S | H | X         | %F | %S | H | X         | %F | %S | H |
| <i>Benthosema panamense</i>                      | 10        | 71 | 56 | D |           |    |    |   |           |    |    |   |
| <i>Anchoa sp.</i>                                | 10        | 71 | 40 | D |           |    |    |   |           |    |    |   |
| <i>Diaphus pacificus</i>                         |           |    |    |   | 20        | 28 | 47 | D | 28        | 25 | 30 | D |
| <i>Cubiceps pauciradiatus</i>                    |           |    |    |   | 10        | 17 | 13 | D |           |    |    |   |
| <i>Synodus lucioceps</i>                         |           |    |    |   | 10        | 17 | 12 | D |           |    |    |   |
| <i>Eleotris picta</i>                            |           |    |    |   |           |    |    |   | 10        | 25 | 17 | D |
| <i>Dormitator latifrons</i>                      |           |    |    |   |           |    |    |   | 9         | 33 | 52 | D |
| Número de taxones                                |           | 10 |    |   |           | 43 |    |   |           | 48 |    |   |
| Número de estrato-estación                       |           | 8  |    |   |           | 36 |    |   |           | 12 |    |   |
| Abundancia larval /10m <sup>2</sup> por taxón    |           | 1  |    |   |           | 1  |    |   |           | 1  |    |   |
| Abundancia larval /10m <sup>2</sup> por estación |           | 1  |    |   |           | 4  |    |   |           | 4  |    |   |

### 8.3 Análisis de Correspondencia Canónico – Hábitats de larvas de peces/ Condiciones ambientales

El análisis de correspondencia canónico (ACC) mostró un análisis de regresión múltiple entre los hábitats de larvas de peces y las variables ambientales (Figura 14). El primer eje presentó una correlación del 0.891, con un auto valor de 0.485 (Tabla IV) y el tercer eje presentó una correlación de 0.708, con un auto valor de 0.145 (Tabla IV). La salinidad fue la variable que mejor se correlacionó con el primer eje (0.746), y la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto se correlacionaron con el tercer eje (0.880 y 0.879) (Tabla V).

Tabla IV. Varianza explicada por el análisis de correspondencia canónica, entre los datos ambientales y la abundancia de larvas de peces, relacionado con la ordenación espacial, en el océano Pacífico Oriental Tropical frente a México durante febrero 2010.

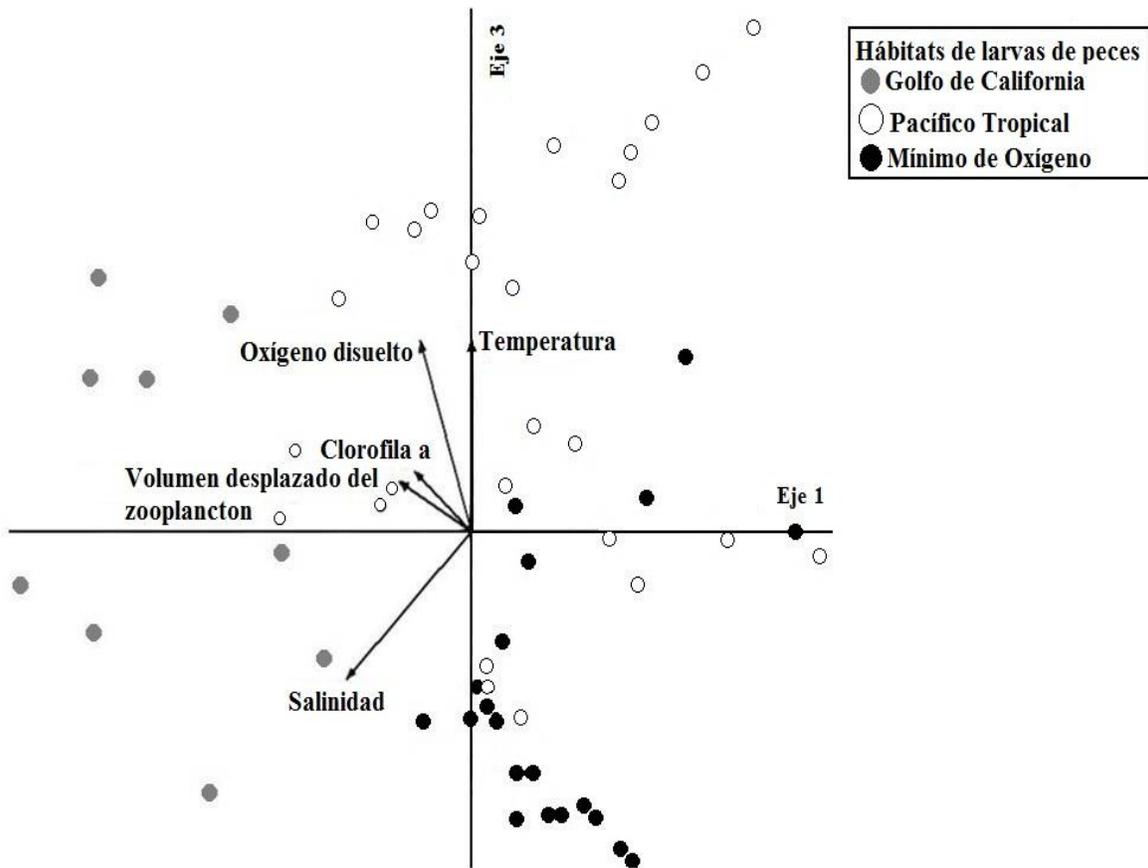
|   | Eje 1        | Eje 2 | Eje 3        |
|---|--------------|-------|--------------|
| <b>Auto valor</b>                               | <b>0,485</b> | 0,261 | 0,145        |
| <b>Varianza en los datos de especies</b>        |              |       |              |
| % Varianza explicada                            | 8.8.         | 4.7   | 2.6          |
| %Cumulativa explicada                           | 8.8.         | 13.5  | 16.2         |
| <b>Correlación de Pearson, Esp-Amb.</b>         | <b>0.891</b> | 0.698 | <b>0.708</b> |
| <b>Correlación de Kendall (Rango), Esp-Amb.</b> | 0.534        | 0.455 | 0.280        |

Tabla V. Resultados de las correlaciones obtenidas por el análisis canónico de correspondencia, entre los datos ambientales y la abundancia de larvas de peces, relacionado con la ordenación espacial, en el océano Pacífico Oriental Tropical frente a México durante febrero 2010.

| Variables                          | Correlaciones |        |              |
|------------------------------------|---------------|--------|--------------|
|                                    | Eje 1         | Eje 2  | Eje 3        |
| Temperatura                        | 0.143         | -0.057 | <b>0.880</b> |
| Salinidad                          | <b>-0.746</b> | 0.508  | 0.394        |
| Oxígeno disuelto                   | -0.126        | -0.044 | <b>0.879</b> |
| Clorofila <i>a</i>                 | -0.585        | 0.020  | -0.584       |
| Volumen desplazado del zooplancton | -0.407        | -0.523 | -0.230       |

El hábitat de larvas de peces del Golfo de California (círculos grises) (Fig. 14) fue correlacionado significativamente con valores altos de temperatura, oxígeno disuelto, volumen desplazado del zooplancton y clorofila *a*. El hábitat de larvas de peces del mínimo oxígeno (círculos negros) (Fig. 14) fue localizado en el cuadrante opuesto al del Golfo de California. Este fue correlacionado inversamente con los valores de concentración de oxígeno disuelto, temperatura, volumen desplazado del zooplancton y concentración de Clo *a*.

En contraste, el hábitat de larvas de peces del Pacífico Tropical (círculos blancos) (Fig. 14) mostró un intervalo amplio de variables ambientales, siendo consistente con su distribución a través de la columna de agua. El hábitat sub-A se localizó dentro y por debajo de la termoclina, este fue observado cerca al hábitat de larvas de peces del Golfo de California, y el hábitat sub-B se localizó por debajo de la termoclina, mostrándose prácticamente en la zona de mínimo oxígeno.



**Figura 14. Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) correlacionó los hábitats de larvas de peces y las condiciones hidrográficas durante febrero 2010. Los hábitats planctónicos son: Golfo de California (círculos grises), Pacífico Tropical (círculos blancos) y Mínimo Oxígeno (círculos negros).**

#### **8.4 Masas de Agua en el Pacífico Oriental Tropical frente a México y los hábitats de larvas de peces**

Las masas de agua que se presentan en el área de estudio durante febrero 2010 son graficadas por medio de un diagrama  $\theta$ -S como se muestra en las Figuras 15a y 15b, las cuales fueron elaboradas con el promedio de los perfiles de temperatura y salinidad (promedios cada 15 m). La clasificación de las masas de agua está basada en Castro *et al.*, 2006.

El diagrama  $\theta$ -S confirma que la concentración más baja del oxígeno disuelto corresponde a 12 °C (Figura 15a), en el Agua Subtropical Subsuperficial (AStSS), mientras que los valores más altos de oxígeno disuelto estuvieron presentes en el Agua Tropical Superficial (ATS). El diagrama  $\theta$ -S corresponde a los primeros 200 m de profundidad en la columna de agua mostrando la ubicación de los hábitats de larvas de peces en relación a las masas de agua (Figura 15b). El hábitat de larvas de peces del Golfo de California fue ubicado principalmente en el Agua del Golfo de California (AGC) (Fig. 15b, color rojo), con altas concentraciones de oxígeno disuelto y altos valores de salinidad, y valores intermedios de la temperatura. El estrato más somero del hábitat de larvas de peces del Pacífico Tropical fue ubicado en el ATS, y en la vertical el estrato más profundo, asociado con el AStSs (Fig. 15b, círculos blancos). El hábitat de larvas de peces del Mínimo Oxígeno estuvo concentrado en su mayoría de muestras en el AStSs (Fig. 15b, color azul), ubicándose en aguas hipóxicas ( $< 1$  mL/L) y anóxicas ( $< 0.2$  mL/L). Sin embargo, presentó algunas muestras se ubicaron en aguas oxigenadas en el ATS.

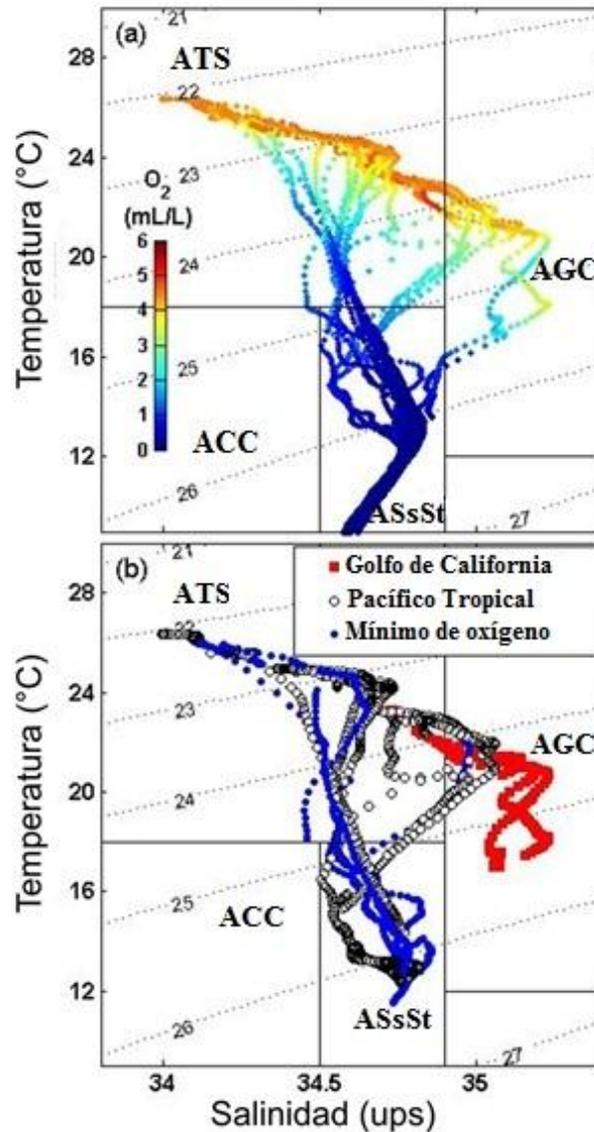


Figura 15. Distribución de oxígeno disuelto en el diagrama  $\theta$ -S en el Pacífico Oriental Tropical frente a México durante febrero 2010. a) Los colores indican las concentraciones de oxígeno disuelto (mL/L). b) El diagrama  $\theta$ -S muestra la distribución de los hábitats de larvas de peces. Los colores indican los hábitats: Golfo de California (círculos rojos), Pacífico Tropical (círculos blancos) y Mínimo Oxígeno (círculos azules). Las masas de agua son las siguientes: Agua de la Corriente de California (ACC), Agua Superficial Tropical (AST) y Agua Subtropical Subsuperficial (ASsSt). Los límites termohalinos entre las masas de agua son similares a Castro *et al.*, 2006.

## 9. DISCUSIÓN

Este trabajo se ha enfocado en la distribución tridimensional de los hábitats de las larvas de peces en la zona somera del mínimo oxígeno en el POT frente a México, la cual es la región natural más grande de hipoxia en el mundo (ej. Díaz & Rosenberg, 2008; Stramma *et al.*, 2010).

Los resultados observacionales mostraron que la capa oxigenada (>3.5 mL/L) se localizó entre ~ 40 y 50 m de profundidad hasta la superficie a lo largo de todo el transecto, pero el límite superior de la zona somera del mínimo oxígeno (~0.2 mL/L) disminuye con la profundidad desde los ~250 m en la entrada del Golfo de California hasta los ~80 m frente a Cabo Corrientes. Aunque la capa hipóxica (~ 1 > DO > ~ 0.2 mL/L) fue disminuida en extensión vertical desde los 150 m en el área norte hasta los ~ 80 m frente a Cabo Corrientes entre las estaciones B04–D01 (Figuras 4 y 5). El efecto de la disminución de la capa hipóxica en esta ZMO en el POT no se puede cuantificar aun debido a las pocas observaciones realizadas hasta la fecha (ej. Díaz & Rosenberg, 2008; Stramma *et al.*, 2010). La elevación local del AStSs en el POT, (esta elevación se puede observar en la Fig. 10, entre las estaciones E05-E07, que corresponden al transecto sur), parece estar asociado con la surgencia costera frente a Cabo Corrientes, como se muestra en el Índice de Bakun (Figura 6), el cual fue mucho mayor al promedio normal durante el período de muestreo (febrero 2010) que durante un típico febrero. Aunque este aumento en el área de Cabo Corrientes no se pudo evidenciar en los datos *in situ*, probablemente porque la mayoría de las muestras recolectadas fueron tomadas entre las horas del atardecer y las horas de la madrugada.

Basado en trabajos anteriores sobre el zooplancton (ej. Longhurst, 1967; Fernández-Álamos & Farber-Lorda, 2006; Escribano *et al.*, 2009 Wishner *et al.*, 2013) y larvas de peces en ZMO (ej. Koslow *et al.*, 2011; 2013), se espera encontrar un hábitat de larvas de peces en aguas oxigenadas caracterizado

principalmente por una asociación de especies epipelágicas con una alta abundancia de larvas de peces; y un segundo hábitat de larvas de peces en aguas hipóxicas caracterizado por una asociación de especies de hábitos mesopelágicos. Sin embargo, los tres hábitats de larvas de peces, fueron definidos estadísticamente, con una inesperada abundancia de larvas de peces en las aguas hipóxicas (con la mayor abundancia en toda la matriz de datos fue *B. bathymaster* que se ubicó en el hábitat del MO) y con mayor número de taxones (46 taxones) (ver Tabla II) (Figuras 9, 10 y 11).

En la entrada del Golfo de California, donde las aguas hipóxicas y anóxicas son relativamente profundas, las características oceanográficas más significativas detectadas en este estudio fueron gradientes fuertes de temperatura de 20°C a 24°C (área de la entrada del Golfo de California) y de 24°C a 28°C (área de Cabo Corrientes), y el flujo salino saliente del Golfo de California (Figura 10), los cuales separan al hábitat de larvas de peces del Golfo de California del hábitat del Pacífico Tropical. La presencia del frente de salinidad fue reportado también en el trabajo de Collins *et al.* (2014), el cual mostró que este frente se asocia con los límites de las masas de agua superficial entre la ACC, AGC y ATS en la entrada del Golfo de California. Por lo anterior, el flujo salino saliente del GC puede ser considerado como una característica que influye en la distribución de las larvas de peces como proceso persistente en el área en la zona límite entre el GC y el Pacífico Tropical.

El hábitat de larvas de peces del Golfo de California (Tabla II) fue restringido a la capa gruesa superficial oxigenada en los primeros 60 m de profundidad (>3.5 mL/L) (Figura 10) por encima de la termoclina en el sur del Golfo de California y correspondió al AGC (Figura 15). Este hábitat larval fue dominado fuertemente por larvas de *Anchoa* spp. (especie pelágico costera) y de larvas de *Benthosema panamense* (especie mesopelágica) al límite sur de su área de distribución. La misma distribución fue observada en especies ocasionales como *X. mundiceps* (especie demersal costera como adulto) y de *C. sexfasciatus* (pelágico costero

también como adulto). Esta asociación de especies ha sido reportado en la región del Archipiélago central ubicado al sur del Golfo de California (Danell-Jiménez *et al.*, 2009; Sánchez-Velasco *et al.*, 2014), particularmente dentro y por encima de la termoclina, la cual puede reflejar su afinidad por el oxígeno superficial y aguas cálidas, como se encontró en este estudio. El límite sur de esta asociación de especies coincide con los registros de especies que disminuyen su abundancia, tanto al sur como al norte de la entrada del Golfo de California (Moser *et al.*, 1974; Hammann *et al.*, 1998; Sánchez-Velasco *et al.*, 2014). Los gradientes fuertes ambientales sugieren en este estudio y en el estudio previo de Collins *et al.*, (2014) que pueden afectar en la continuidad de la conectividad larval a través de toda la columna de agua, entre el Golfo de California y el Pacífico adyacente, el cual debe ser probado en estudios futuros.

En el hábitat del Pacífico Tropical, a pesar de que la alta riqueza específica es característica de latitudes tropicales (Loeb *et al.*, 1983; Loeb & Nichols, 1984; Franco-Gordo, 2004; León-Chávez *et al.*, 2010), presentó la más baja abundancia larval y número de taxones, aunque su volumen desplazado del zooplancton fue la mayor de los tres hábitats. Este fue dominado fuertemente por larvas de *Vinciguerria lucetia* (especie mesopelágica), y con otras especies mesopelágicas. Adicionalmente, la presencia de los epipelágicos *E. mordax* y *Opisthonema libertate* mostró que este hábitat está caracterizado por especies pelágicas de acuerdo a la profundidad de la región. Los resultados de este trabajo coinciden con los de León-Chávez *et al.* (2010) y León-Chávez *et al.* (2014, sometido) quien también reportó una asociación de larvas de peces Tropical dominado por *V. lucetia* y otras especies pelágicas, pero no se reportó su distribución vertical.

Las larvas de *V. lucetia*, son consideradas como indicadores de la distribución de este hábitat, las cuales fueron localizadas a través de toda la columna de agua, mostrando su mayor abundancia larval en la capa superficial oxigenada sobre la termoclina, y la menor abundancia por debajo de la termoclina, en aguas hipóxicas y anóxicas (Figura 10). Este resultado puede reflejar una

posible migración de las larvas de *V. lucetia* a través de la termoclina desde la capa oxigenada hasta la capa hipóxica y anóxica. Esto es consistente con las diferencias estadísticamente significativas obtenidas en la abundancia total de larvas entre las horas de día y de noche ( $P < 0.05$ ). Aunque las larvas de *V. lucetia* pueden ser tolerantes a la hipoxia debido a que se encontraron especímenes dentro de la ZMO, su aparente preferencia está en la capa superficial oxigenada, coincide con reportes previos en estudios estratificados de larvas de peces en el Golfo de California (Sánchez-Velasco *et al.*, 2014; Apango-Figueroa *et al.*, 2015).

El tercer hábitat se definió como el hábitat de larvas de peces en el mínimo de oxígeno, por su ubicación principalmente en la zona hipóxica y anóxica frente a Cabo Corrientes (Figuras 10 y 11), correspondiente al AStSs (Figura 14). Este hábitat presentó la máxima abundancia larval y un número mayor de taxones de este estudio (ver Tabla II), lo cual fue inesperado basado en estudios previos enfocados en zooplancton (ej. Longhurst, 1967; Fernández-Álamos & Farber-Lorda, 2006; Escribano *et al.*, 2009) y larvas de peces (Madhu *et al.*, 2003; Karuppasamy *et al.*, 2011; Koslow *et al.*, 2011) en ZMO. Este hábitat subsuperficial fue dominado por larvas de *B. bathymaster*, siendo una especie nerítica-pelágica endémica del POT de acuerdo con la FAO (Fischer *et al.*, 1995). El trabajo de Franco-Gordo *et al.*, (2002; 2004) reportó la presencia masiva de las especies cerca a la costa (<30 m de profundidad) frente a Jalisco y Colima, lo cual puede implicar que las especies se han expandido hacia el océano por advección. Sin embargo, la alta abundancia en preflexión a lo largo de la columna de agua (Figura 12), donde la zona hipóxica se eleva hacia aguas más someras, sugiere la posible adaptación a vivir en gradientes fuertes de oxígeno disuelto, desde 0.2 a 5mL/L.

También, el alto número de taxones presentes registrada en el hábitat de larvas de peces del mínimo oxígeno (Tabla II) puede resultar de su proximidad a las Islas Marías y a la costa (~110 Km). La fuerte conectividad larval entre las islas y la costa puede aumentar el número de especies demersales costeras en este

hábitat como el caso de *D. latifrons* y *E. picta*; aunque la mayoría con baja abundancia (promedio abundancia larval  $< 2$  larvas/10m<sup>2</sup>). La surgencia costera persistente observada frente a Cabo Corrientes (Godínez *et al.*, 2010; Kurczyn *et al.*, 2012) podría ser el mayor proceso físico que genera la mezcla de especies de diferentes ambientes en este hábitat subsuperficial.

Aunque en general la posible ampliación de las ZMO hacia aguas someras y sus efectos en el ecosistema marino son difíciles de explicar por la falta de estudios multidisciplinarios hasta la fecha (ej. Díaz & Rosenberg, 2008; Stramma *et al.*, 2010), la distribución tridimensional de los hábitats de larvas de peces definidos en la ZMO frente a Cabo Corrientes en el POT en este estudio no muestran un efecto detectable sobre el total de la abundancia de larvas, lo cual es asociado a la posible adaptación larval de *B. bathymaster* a las condiciones hipóxicas. Pero las condiciones someras de la hipoxia pueden estar teniendo un efecto mayor en la composición de larvas. Es posible hipotetizar que la alta abundancia larval en aguas hipóxicas puede estar ocurriendo en otras ZMO someras. Esto claramente muestra que este fenómeno a nivel mundial es poco estudiado y requiere de un enfoque más amplio y una visión interdisciplinaria.

En este trabajo lo que se mostró fue una aproximación del posible efecto de la zona hipóxica sobre la distribución de las agrupaciones de larvas de peces en la columna de agua, y sobre algunas especies que se puedan encontrar adaptadas a dichas zonas. Es importante ver como la hipoxia somera puede estar influyendo en cambios de distribución y recambio de especies en las comunidades pelágicas en el océano. Esto permite con el tiempo entender las posibles adaptaciones tanto de comportamiento y fisiológicas en las diferentes especies de grupos del zooplancton, en particular en las larvas de peces las cuales son sensibles a los cambios fuertes del ambiente.

## 10. CONCLUSIONES

- Se definió un hábitat de larvas de peces en la parte sur del Golfo de California, dominado por larvas de *Anchoa spp.*, restringido a una capa superficial oxigenada ( $>3.5$  mL/L) localizado sobre los ~60 m de profundidad y separado del Pacífico Tropical por un frente salino.
- Se definió un segundo hábitat de larvas de peces denominado Pacífico Tropical, dominado por larvas de *Vinciguerria lucetia*, localizada a través de toda la columna de agua, con mayor abundancia en la capa oxigenada.
- Se definió un tercer hábitat de larvas de peces localizado por debajo de la termoclina en aguas hipóxicas ( $<1$  mL/L; ~70 m de profundidad) y aguas anóxicas ( $<0.2$  mL/L; ~80 m de profundidad) en Cabo Corrientes.
- El estrato sub-superficial hipóxico presentó el mayor número de taxones y alta abundancia larval, con dominancia de *Bregmaceros bathymaster*, siendo una especie nerítica-pelágica endémica del Pacífico Oriental Tropical; lo cual fue un resultado inesperado.
- La elevación hacia superficie del límite superior de la zona de mínimo oxígeno cerca a la costa, podría estar asociado a una fuerte surgencia costera detectada por el Índice de Bakun.
- En el Pacífico Oriental Tropical frente a México, el agua hipóxica somera no parece tener efectos dramáticos, al menos en la abundancia total de larvas de peces, pero parece que afecta la composición de las especies.
- La presencia de larvas de *Bregmaceros bathymaster* con alta abundancia por debajo de la termoclina en aguas hipóxicas se debe posiblemente a la adaptación fisiológica de la especie.

## 11. RECOMENDACIONES

- Las condiciones someras de la hipoxia y su efecto sobre la composición de larvas podría ser estudiado con trabajos interdisciplinarios más específicos (p.e. pruebas fisiológicas como estrés oxidativo, medición de otolitos, etc).
- Estudiar la dinámica temporal y espacial del límite superior de la zona hipóxica, observando la estacionalidad (diferentes meses del año) y las áreas adyacentes (entrada del Golfo de California, costa occidental de la península y área sur de Cabo Corrientes).
- Las ZMO someras es un fenómeno a nivel mundial que requiere de un enfoque más amplio (diferentes grupos del zooplancton) y una visión interdisciplinaria (oceanografía física, química y biológica) para hacer una comparación entre zonas a lo largo del Pacífico Oriental Tropical.
- Usar series de tiempo ambientales para observar la variabilidad y cómo esta puede estar afectando la distribución de las comunidades pelágicas, con énfasis en la biomasa del zooplancton, en diferentes grupos del zooplancton, y en especial en las larvas de peces.

## 12. BIBLIOGRAFIA

- Apango-Figueroa, E., L. Sánchez-Velasco, M.L. Lavín, V. Godínez & E.D. Barton. 2015. Larval fish habitats in a dipole eddy-pair in the Gulf of California, Deep-Sea Res II. Doi: 10.1016/j.dsr.2-015.05.005
- Atwood, E., J. T. Duffy-Anderson, J. K. Horne & C. Ladd. 2010. Influence of mesoscale eddies on ichthyoplankton assemblages in the Gulf of Alaska. *Fish. Oceanogr.*, 19(6):493-507.
- Auad. G., D. Roemmich, & J. Gilson. 2011. The California current system in relation to the northeast Pacific Ocean circulation. *Progr. In Oceanogr.*, 91: 576-592
- Beers, J.R. 1976. In Steedman, H.F. (ed.), *Zooplankton fixation and preservation. Determination of zooplankton biomass.* UNESCO publication, Paris, pp. 35-84.
- Beier, E., M.F. Lavín, J. Gómez, V. Godínez & J. García. 2003. La Corriente Costera Mexicana in GEOS, Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, 23, 152p., Puerto Vallarta, México
- Brinton, E. 1979. Parameters relating to the distributions of planktonic organisms, especially euphausiids in the eastern tropical Pacific, *Prog. Oceanogr.*, 8(3), 125–168.
- Castro, R., R. Durazo, A. Mascarenhas, C. A. Collins & A. Trasviña. 2006. Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California, *Deep-Sea Res I*, 53, 188–200.
- Cepeda-Morales, J., E. Beier, G. Gaxiola-Castro, M.F. Lavín & V.M. Godínez. 2009. Effect of the oxygen minimum zone on the second chlorophyll maximum in the Eastern Tropical Pacific off Mexico. *Cienc Mar*, 35, 389–403.
- Cepeda-Morales, J., G. Gaxiola-Castro, E. Beier, & V.M. Godínez. 2013. The mechanisms involved in defining the northern boundary of the shallow oxygen minimum zone in the Eastern Tropical Pacific Ocean off Mexico. *Deep Sea Res I*, 76, 1–12.

- Clarke, K. R.. & R.M. Warwick. 2001. Change in marine communities: an approach to statistical analyses and interpretation, 2nd 464 Edn. PRIMER-E, Plymouth, UK
- Clarke. K R. & M. Ainsworth. 1993. A method of linking multivariate community structure to environmental variables, *Mar Ecol Prog Ser*, 92, 205-219.
- Clarke, A. J. 1988. Inertial wind path and sea surface temperature patterns near the Gulf of Tehuantepec and the Gulf of Papagayo. *J. Geophys. Res. Oceans*. 93:15491–15501.
- Collins, C.A., R. Castro & A. Mascarenhas. 2014. Properties of an upper ocean front associated with water mass boundaries at the entrance to the Gulf of California, November 2004, *Deep Sea Res I*, 23, 1-13, DOI: 10.1016/j.dsr2.2014.06.002i.
- Criales-Hernandez, M.I., R. Schwamborn, M. Graco, P. Ayon, H. J. Hirche & M. Wolff. 2007. Zooplankton vertical distribution and migration off Central Peru in relation to the oxygen minimum layer, *Helgol Mar Res*, 62, 85-100, doi: 10.1007/s10152-007-0094-3.
- Czeschel, R., L. Stramma, F. U. Schwarzkopf, B. S. Giese, A. Funk & J. Karstensen. 2011. Middepth circulation of the eastern tropical South Pacific and its link to the oxygen minimum zone. *J. of Geoph. Res.*, Vol. 116, C01015, doi: 10.1029/2010JC006505
- Danell-Jiménez, A., L. Sánchez-Velasco, M.F. Lavín & G. Marinone. 2009, Three-dimensional distribution of larval fish assemblages across a surface termal/chlorophyll front in a semienclosed sea, *Estuar. Coast Shelf S.*, 85, 487-496.
- Daniel, W.W. 2008. *Biostatistics: A foundation for analysis in the health sciences*. John-Wiley & Sons. New York. 755 pp.
- Díaz, R. J. & R. Rosenberg. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321, 926-929.
- Doyle, M.J., W.W. Morse & A.W.Jr. Kendall. 1993. A comparison of larval fish assemblages in the temperate zone of the northeast Pacific and northwest Atlantic oceans, *B. Mar. Sci.*, 53, 588-644.

- Durazo, R., & T.R. Baumgartner. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 54:7-31.
- Ekau, W., H. Auel, H.O. Portner & D. Gilbert. 2009. Impacts of hypoxia on the structure and processes in the pelagic community (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences Discuss*, 6, 5073-5144.
- Escribano, R., P. Hidalgo & C. Krautz. 2009. Zooplankton associated with the oxygen minimum zone system in the northern upwelling region of Chile during March 2000, *Deep Sea Res II*, 56, 1083-1094.
- Farber-Lorda, J., E. Beier, I. Romero, V. Godínez, C. Almeda, J. M. Hernandez, A. Franco & A. Olivos. 2010. Autumn vertical distribution of zooplankton in the Eastern tropical Mexican Pacific in relation to oxygen, food availability and hydrography. Conference IMBIZO, Crete
- Fernández-Álamos, M. & J. Farber-Lorda. 2006. Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: a review, *Prog. Oceanogr.*, 69, 143–180.
- Fischer, W., F. Krupp, W. Schneider, C. Sommer, K.E. Carpenter & V.H. Niem. 1995. Identificación de especies para fines de la pesca, Pacifico Centro-Oriental, Vertebrados – Parte I, Vol. II, 647-1200 pp, FAO, Roma.
- Fiedler, P. & L. D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progr. In Oceanogr.* 69: 143-180
- Field, J.G., K.R. Clarke & R.M. Warwick. (1982). A practical strategy for analyzing multispecies distribution patterns, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 8, 37-52.
- Franco-Gordo, C., E. Godínez-Domínguez & A. E. Filonov. 2004. Plankton and larval fish dynamics prior and during El Niño period (1997–98) in the central Pacific coast of Mexico, *Prog. Oceanogr.*, 63, 99–123.
- Franco-Gordo, C., E. Godínez-Domínguez & E. Suárez-Morales. 2002. Larval fish assemblages in waters of the central Pacific Coast of Mexico, *J. Plankton Res.*, 24, 775–506 784.
- General Oceanics – Environmental Monitoring and Research Equipment  
(<http://www.generaloceanics.com/>)

- Gilly, W. F., J. M. Beman, S. Y. Litvin & B.H. Robison. 2013. Oceanographic and biological effects of shoaling of the oxygen minimum zone. *Annual Review of Marine Science*, 5, 21.1-21.28.
- Godínez, V.M., E. Beier, M.F. Lavin & A. Kurczyn. 2010. Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observation, *J. Geophys. Res.*, 115, C04007, doi: 10.1029/2009JC005705.
- Hammann, M.G., M.O. Nevarcz-Martínez & Y. Green-Ruíz. 1998. Spawning habitat of the Pacific Sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California: Eggs and larval distribution 1950-1957 and 1971-1991, *Calif. Coop. Fish. Invest. Rep.*, 39, 169-179.
- Inda Díaz, E. A., L. Sánchez Velasco & M.F. Lavín. 2014. The effects of a tidal-mixing front on the distribution of larval fish habitats in a semi-enclosed sea during Winter. *J. Mar. Biol. Ass. UK*, 94(7) 1517-1530
- Kara, A. B., P. A. Rochford & H. E. Hurlburt. 2000. An optimal definition for ocean mixed layer depth. *J. Geophys. Res.*, 105 (C7), 16803–16821.
- Karstensen, J., L. Stramma & M. Visbeck. 2008. Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans. *Progr. In Oceanogr.*, 77: 331-350
- Karuppasamy, P.K., C.M. Lalu Raj, K.R. Muraleedharan & M. Nair. 2011. Myctophid and pelagic shrimp assemblages in the oxygen minimum zone of the Andaman Sea during winter monsoon, *Indian J. Geo-Marine Science*, 40(4), 535-541.
- Keeling R.F. & H. E. García. 2002. The change in oceanic O<sub>2</sub> inventory associated with recent global warming, *PNAS*, 99 (12), 7848–7853, doi: 10.1073/pnas.122154899.
- Kessler, W. S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progr. In Oceanogr.* 69: 181-217
- Kramer, D.M., J. Kalin, E.G. Stevens, J.R. Trailkil & R. Zweiffel. 1972. Collecting and processing data on fish eggs and larvae in the California Current, *NOAA Tech. Rep., NMFS Cir.*, 370, 38p.

- Koslow, J. A., R. Goericke & W. Watson. 2013. Fish assemblages in the Southern California Current: relationships with climate, 1951–2008, *Fish. Oceanogr.* 22:3, 207–219.
- 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 Vol. 436*: 207–218, doi: 10.3354/meps09270.
- Kurczyn, J. A., E. Beier, M. F. Lavín, A. Chaigneau & V. M. Godínez. 2013. Anatomy and evolution of a cyclonic mesoscale eddy observed in the northeastern Pacific tropical subtropical transition zone, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, doi:10.1002/2013JC009339.
- Kurczyn, J. A., E. Beier, M. F. Lavín & A. Chaigneau. 2012. Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry, *J. Geophys. Res. Oceans*, 117, C10021, doi:10.1029/2012JC007970.
- Lavín, M.F., E. Beier, J. Gomez, V. Godínez & J. García, 2006. On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophysical Research Letters*, 33, L02601, doi: 10.1029/2005GL024686
- León-Chávez, C.A., E. Beier, L. Sánchez-Velasco, E.D. Barton & V. Godínez 2015. Role of circulation scales and water mass distributions on larval fish habitats in the eastern tropical Pacific off Mexico *J. Geophys. Res. Oceans* DOI: 10.1002/2014JC010289
- León-Chávez, C.A., L. Sanchez-Velasco, E. Beier, M.F. Lavín, V.M. Godínez & J. Farber-Lorda. 2010. Larval fish assemblages and circulation in the Eastern Tropical Pacific in Autumn and Winter, *J. Plankton Res.*, 32(4), 397-410.
- Limburg, K.E., C. Olson, Y. Walther, D. Dale, C. P. Slomp & H. HØie. 2011. Tracking Baltic hypoxia and cod migration over millennia with natural tags, *Proc. Natl Acad Sci USA*, 108 (22): E177–182, doi: 10.1073/pnas.1100684108.
- Loeb, V. J. & J. A. Nichols. 1984, Vertical distribution and composition of the ichthyoplankton and invertebrate zooplankton assemblages in the eastern tropical Pacific, *Biol. Pesq.*, 13, 39–66.

- Loeb, V. J., P. E. Smith & H. G. Moser. 1983. Recurrent groups of larval fish species in the California Current area, Calif. Coop. Fish. Invest. Rep., 24, 152–164.
- Longhurst, A. 1967. Vertical distribution of zooplankton in relation to the Eastern Pacific oxygen minimum, Deep-Sea Res, 14, 51-63.
- Madhu, N.V., R. Jyothibau, K. Ramu, V. Sunil, T.C. Gopalakrishnan & K.K.C. Nair. 2003. Vertical distribution of mesozooplankton biomass in relation to oxygen minimum layer in the Andaman Sea, Indian J. Fish., 50(4), 533-538.
- Maske, H., R. Cajal-Medrano, A. Trasviña-Castro, A. Jiménez-Mercado, C. O. Almeda-Jauregui, G. Gaxiola-Castro & J. Ochoa. 2010. Inorganic carbon and biological oceanography above a shallow oxygen minimum in the entrance to the Gulf of California in the Mexican Pacific. Limnol. Oceanogr., 55(2):481-491
- Morales, C. E., S. E. Hormazabal & J.L. Blanco. 1999. Interannual variability in the mesoscale distribution of the depth of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18-24S): Implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. J. Mar. Res., 57: 909-932
- Moser, G.H. 1996. The early stages of fishes in the California Current region: In California Cooperative Oceanic Fisheries Investigation Atlas no. 33, NOAA-NMFS.SFSC, Allen Press, Inc., Lawrence, Kansas.
- Moser, H. G. & P. E. Smith. 1993. Larval fish assemblages and oceanic boundaries, B. Mar. Sci., 53, 283-289.
- Moser, H. G., E.H. Ahlstrom & D. Kramer. 1974. Distribution and abundance of fish eggs and larvae in the Gulf of California. Calif. Coop. Fish. Invest. Rep., 17, 112-128.
- Ocean Color Web  
(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/level3.pl>)
- Pacific Fisheries Environmental Laboratory  
([http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/data\\_download.html](http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/data_download.html)).
- Pennington, J.T., K.L. Mahoney, V. S. Kuwahara, D. D. Kolber, R. Calienes & F. P. Chavez. 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. 69: 285-317

- Prince, E.D. & C. P. Goodyear. 2006. Hypoxia-based habitat compression of tropical pelagic fishes, *Fisheries Oceanography*, 15(6), 451-464.
- Saltzman, J. & K. Wishner. 1997. Zooplankton ecology in the eastern tropical Pacific oxygen minimum zone above a seamount I, *General Trends, Deep Sea Res I*, 44, 6, 907-930.
- Sánchez-Velasco, L., M.F. Lavín, S.P.A. Jiménez-Rosenberg & V.M. Godínez. 2014. Preferred larval fish habitat in a frontal zone of the northern Gulf of California during the early cyclonic phase of the seasonal circulation (June 2008) *J. M S.*, 129, 368–380.
- Siegel, S. & N.J. Castellán. 1988. *Nonparametric statistic for the behavioral sciences*, McGraw-Hill International Editions, Statistics Series. 399pp.
- Smith, P.E. & S. L. Richardson. 1979. *Técnicas modelo para prospecciones de huevos y larvas de peces pelágicos* FAO Documentos Técnicos de Pesca, No. 175, 107 pp.
- Smith, P.E. 1971. *Distributional atlas of zooplankton volume in the California Current Region, 1951, through 1966*. Calif. Coop. Fish. Invest. Rep., Atlas No. 13.
- Sokal R., & F.J. Rohlf, (2012), *Biometry: The Principles and Practices of Statistics in Biological Research*, 4th edition, W.H.Freeman and Co. New York, 937 pp.
- Sokal R.R. & F. J. Rohlf. 1985. *Biometry*, Blume, Barcelona, Spain. 587 pp.
- Stramma, L., E.D. Prince, S. Schimidtko, J. Luo, J.P. Hoolihan, M. Visbeck, D.W.R.Wallace, P. Brandt & A. Kortzinger. 2012. Expansion of oxygen minimum zones may reduce available habitat for tropical pelagic fishes, *Nat Clim Cchang*, 2, 33-37, doi: 10.1038/NCLIMATE1304.
- Stramma, L., S. Schimidtko, L. A. Levin & G. Johnson. 2010. Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts, *Deep Sea Res I*, 57,587-595.
- Stramma, L., G. Johnson, J. Sprintall & V. Mohrholz. 2008. Expanding oxygen minimum zones in the tropical ocean, *Science*, 320, 655–658, doi: 10.1126/1153847.

- Ter-Braak, C.J. F. 1986. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis, *Ecology*, 67, 60-71.
- Tremblay, N., J. Gómez-Gutiérrez, T. Zenteno-Savín, C. J. Robinson, & L. Sánchez-Velasco. 2010. Role of oxidative stress in seasonal and daily vertical migration of three krill species in the Gulf of California. *Limnol. Oceanogr.*, 55(6): 2570-2584
- UNESCO, 1991. Processing of oceanographic station data, JPOTS ed. UNESCO technical papers in marine science. Paris, France.
- Vaquer-Sunyer, R. & C.M. Duarte. 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *PNAS*. 105(40), 15452-15457.
- Wishner, K., D. M. Outram, B.A. Seibel, K. L. Daly & R. L. Williams. 2013. Zooplankton in the eastern tropical Pacific: Boundary effects of oxygen minimum zone expansion, *Deep Sea Res I*, 79, 122-140.
- Wyrski, K. 1967. Circulation and water masses in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. & Limnol*, Vol. 1 (2): 117-147
- Wyrski, K. 1966. Oceanography of the eastern equatorial Pacific Ocean. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 4:33-68
- Wyrski, K. 1962. The oxygen minima in relation to ocean circulation. *Deep Sea Res. Oceanogr.* 9:11-24
- Zamudio, L., H. E. Hurlburt, E. J. Metzger & C. E. Tilburg. 2007. Tropical wave-induced oceanic eddies at Cabo Corrientes and the María Islands, Mexico. *J. Geoph. Res.*, Vol 112, C05048, doi: 10.1029/2006JC004018
- Zhang, J., D. Gilbert, A.J. Gooday, L. Levin, S. W. A. Naqvi, J.J. Middelburg, M. Scranton, W. Ekau, A. Peña, B. Dewitte, T. Oguz, P.M.S. Monteiro, E. Urban, N.N. Rabalais, V. Ittekkot, W. M. Kemp, O. Ulloa, R. Elmgreen, E. Escobar-Briones & A. K. Van del Plas. 2010. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences*, 7, 1443-1467

**Apéndice I.** Lista de taxones presentes en cada hábitat de larvas de peces (Golfo de California, Pacífico Tropical, Mínimo de Oxígeno) durante febrero 2010. (X: abundancia promedio de especies, %F: porcentaje de la frecuencia de ocurrencia)

| <b>HABITATS</b>                 | <b>Golfo de California</b> |           | <b>Pacífico Tropical</b> |           | <b>Mínimo de Oxígeno</b> |           |
|---------------------------------|----------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| <b>TAXONES</b>                  | <b>X</b>                   | <b>%F</b> | <b>X</b>                 | <b>%F</b> | <b>X</b>                 | <b>%F</b> |
| <i>Vinciguerria lucetia</i>     | 13                         | 22        | 173                      | 72        | 266                      | 64        |
| <i>Diogenichthys laternatus</i> | 25                         | 22        | 58                       | 32        | 109                      | 23        |
| <i>Synodus lucioceps</i>        | 2                          | 11        | 19                       | 20        | 7                        | 9         |
| <i>Bregmaceros bathymaster</i>  | 42                         | 33        | 67                       | 40        | 1085                     | 95        |
| <i>Benthoosema panamense</i>    | 148                        | 78        | 5                        | 4         | 2                        | 5         |
| <i>Anchoa sp.</i>               | 86                         | 67        | 12                       | 4         | 1                        | 7         |
| <i>Diaphus pacificus</i>        | 21                         | 11        | 68                       | 24        | 70                       | 32        |
| <i>Cubiceps pauciradiatus</i>   | 19                         | 37        | 10                       | 12        | 12                       | 14        |
| <i>Xyrichtys mundiceps</i>      | 17                         | 22        | 6                        | 8         | 4                        | 5         |
| <i>Bregmaceros sp.</i>          | 4                          | 22        | 3                        | 4         | 1                        | 3         |
| <i>Chiasmodon niger</i>         | 11                         | 18        | 5                        | 8         | 13                       | 5         |
| <i>Eleotris picta</i>           | 2                          | 18        |                          |           | 20                       | 18        |
| <i>Engraulis mordax</i>         | 9                          | 11        | 10                       | 12        | 1                        | 7         |
| <i>Lestidiops neles</i>         | 1                          | 18        | 2                        | 4         | 6                        | 9         |
| <i>Psenes pellucidus</i>        | 2                          | 11        |                          |           | 23                       | 14        |
| <i>Syacium ovale</i>            | 2                          | 12        | 8                        | 8         | 4                        | 5         |
| <i>Auxis spp.</i>               | 14                         | 25        | 5                        | 8         | 8                        | 9         |
| <i>Opisthonema libertate</i>    | 3                          | 11        | 22                       | 8         | 8                        | 5         |
| <i>Etropus crossotus</i>        | 1                          | 6         |                          |           | 10                       | 14        |
| <i>Bathylagus bericoides</i>    | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |
| <i>Caranx sexfasciatus</i>      | 4                          | 11        |                          |           | 2                        | 5         |
| <i>Citharichthys platophrys</i> | 1                          | 6         |                          |           | 1                        | 3         |
| <i>Cyclopsetta panamensis</i>   | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |
| <i>Lampanyctus parvicauda</i>   | 1                          | 6         | 7                        | 8         |                          |           |
| <i>Sebastes sp.</i>             | 5                          | 11        | 8                        | 4         | 1                        | 3         |
| <i>Symphurus elongatus</i>      | 1                          | 6         |                          |           | 1                        | 3         |
| <i>Anchoa delicatissima</i>     | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |
| <i>Antennarius avalonis</i>     | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |
| <i>Bathycongrus macrurus</i>    | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |
| <i>Citharichthys gordae</i>     | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |
| <i>Coryphopterus nicholsii</i>  | 5                          | 22        |                          |           |                          |           |
| <i>Hemanthias signifer</i>      | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |
| <i>Idiacanthus antrostomus</i>  | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |
| <i>Labridae tipo 1</i>          | 1                          | 6         |                          |           |                          |           |

| HABITATS                          | Golfo de California |    | Pacífico Tropical |    | Mínimo de Oxígeno |    |
|-----------------------------------|---------------------|----|-------------------|----|-------------------|----|
| TAXONES                           | X                   | %F | X                 | %F | X                 | %F |
| <i>Scorpaenodes xyris</i>         | 1                   | 6  |                   |    |                   |    |
| <i>Triphoturus mexicanus</i>      | 1                   | 6  | 4                 | 4  | 3                 | 5  |
| <i>Bothus sp.</i>                 | 3                   | 11 | 18                | 8  | 34                | 17 |
| <i>Dormitator latifrons</i>       |                     |    | 2                 | 4  | 15                | 23 |
| <i>Scomberomorus sierra</i>       |                     |    | 3                 | 4  | 9                 | 5  |
| <i>Bathophilus filifer</i>        |                     |    | 1                 | 11 |                   |    |
| <i>Radiicephalus elongatus</i>    |                     |    | 1                 | 11 |                   |    |
| <i>Sardinops sagax</i>            |                     |    | 1                 | 11 |                   |    |
| <i>Caranx caballus</i>            |                     |    | 4                 | 4  | 17                | 9  |
| <i>Bregmaceros (tipo 1)</i>       |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Nannobranchium sp.</i>         |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Synchiropus atrilabiatus</i>   |                     |    | 10                | 8  | 1                 | 7  |
| <i>Alloclinus holderi</i>         |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Apogon atricaudus</i>          |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Bathylagoides wesethi</i>      |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Cherublemma emmelas</i>        |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Erotelis armiger</i>           |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Heteroconger digueti</i>       |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Labrisomus multiporosus</i>    |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Lepophidium negropinna</i>     |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Lutjanus peru</i>              |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Lythrypnus sp.</i>             |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Myctophum aurolaternatum</i>   |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Paralabrax maculofasciatus</i> |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Pontinus sp.</i>               |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Roncador steamsii</i>          |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |
| <i>Symphurus wiliamsii</i>        |                     |    |                   |    | 1                 | 3  |

**Apéndice II.** Lista de cada estrato-estación que se definió para cada uno de los hábitats de larvas de peces de acuerdo al dendograma definido por el Índice de disimilaridad de Bray-Curtis y el método aglomerativo flexible durante febrero 2010.

| Estaciones de muestreo | Estrato | Hábitat de larvas de peces | Estaciones de muestreo | Estrato | Hábitat de larvas de peces | Estaciones de muestreo | Estrato | Hábitat de larvas de peces |
|------------------------|---------|----------------------------|------------------------|---------|----------------------------|------------------------|---------|----------------------------|
| B01                    | 1       | Golfo de California        | B05                    | 1       | Pacífico Tropical (a)      | B19                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
| B03                    | 1       | Golfo de California        | B15                    | 1       | Pacífico Tropical (a)      | C07                    | 3       | Mínimo de Oxígeno          |
| B07                    | 1       | Golfo de California        | E03                    | 1       | Pacífico Tropical (a)      | C07                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
| B09                    | 1       | Golfo de California        | B11                    | 1       | Pacífico Tropical (a)      | E03                    | 3       | Mínimo de Oxígeno          |
| B01                    | 2       | Golfo de California        | C02                    | 1       | Pacífico Tropical (a)      | B21                    | 3       | Mínimo de Oxígeno          |
| B03                    | 2       | Golfo de California        | C04                    | 1       | Pacífico Tropical (a)      | C04                    | 3       | Mínimo de Oxígeno          |
| B05                    | 2       | Golfo de California        | E06                    | 1       | Pacífico Tropical (a)      | B17                    | 1       | Mínimo de Oxígeno          |
| B07                    | 2       | Golfo de California        | E09                    | 2       | Pacífico Tropical (a)      | C02                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
| B05                    | 3       | Golfo de California        | B17                    | 2       | Pacífico Tropical (a)      | E03                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | B13                    | 3       | Pacífico Tropical (a)      | C04                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | B13                    | 2       | Pacífico Tropical (a)      | B19                    | 3       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | E06                    | 3       | Pacífico Tropical (a)      | C02                    | 3       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | E12                    | 2       | Pacífico Tropical (b)      | B15                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | B13                    | 1       | Pacífico Tropical (b)      | B15                    | 3       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | B07                    | 3       | Pacífico Tropical (b)      | B19                    | 1       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | B01                    | 3       | Pacífico Tropical (b)      | B23                    | 1       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | E15                    | 3       | Pacífico Tropical (b)      | B21                    | 1       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | E09                    | 1       | Pacífico Tropical (b)      | B11                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | B03                    | 3       | Pacífico Tropical (b)      | B21                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | B11                    | 3       | Pacífico Tropical (b)      | B23                    | 2       | Mínimo de Oxígeno          |
|                        |         |                            | B17                    | 3       | Pacífico Tropical (b)      |                        |         |                            |
|                        |         |                            | E12                    | 1       | Pacífico Tropical (b)      |                        |         |                            |
|                        |         |                            | E12                    | 3       | Pacífico Tropical (b)      |                        |         |                            |
|                        |         |                            | E15                    | 1       | Pacífico Tropical (b)      |                        |         |                            |
|                        |         |                            | B09                    | 3       | Pacífico Tropical (b)      |                        |         |                            |
|                        |         |                            | E06                    | 2       | Pacífico Tropical (b)      |                        |         |                            |
|                        |         |                            | E15                    | 2       | Pacífico Tropical (b)      |                        |         |                            |

**Apéndice III.** Distribución vertical de *Vinciguerria lucetia* por estadios de desarrollo, preflexión (a,b), flexión (c,d) y postflexión (e,f), a lo largo del transecto B-C-D y E, a través de la columna de agua (0–250m) sobre la distribución de oxígeno disuelto (mL/L). La abundancia de larvas (larvas/m<sup>2</sup>) se representa por círculos negros.

