

TESIS DEFENDIDA POR  
**Jorge Alejandro Cerón Gómez**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dra. Sharon Zinah Herzka Llona  
*Director del Comité*

---

Dra. Paula Pérez Brunius  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Timothy Robert Baumgartner  
McBride  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Casimiro Quiñónez Veázquez  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Axayácatl Rocha Olivares  
*Coordinador del programa de posgrado  
en Ecología Marina*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

30 de Noviembre de 2010

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA



---

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ECOLOGÍA MARINA

---

DISCRIMINACIÓN DE SUBPOBLACIONES DE LA SARDINA DEL  
PACÍFICO (*Sardinops sagax*) CON BASE EN LA TEMPERATURA DE  
CRIANZA ESTIMADA A PARTIR DE VALORES DE  $\delta^{18}\text{O}$  DE LOS NÚCLEOS DE  
OTOLITOS

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

**JORGE ALEJANDRO CERÓN GÓMEZ**

Ensenada, Baja California, México, **noviembre de 2010.**

**Resumen** de la tesis de **Jorge Alejandro Cerón Gómez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ECOLOGÍA MARINA. Ensenada, Baja California, México. Noviembre 2010.

**DISCRIMINACIÓN DE SUBPOBLACIONES DE LA SARDINA DEL PACÍFICO (*Sardinops sagax*) CON BASE EN LA TEMPERATURA DE CRIANZA ESTIMADA A PARTIR DE VALORES DE  $\delta^{18}\text{O}$  DE LOS NÚCLEOS DE OTOLITOS**

---

Dra. Sharon Zinah Herzka Llona  
Directora del comité

La implementación de estrategias de manejo para la explotación de poblaciones de peces marinos se basa en la identificación de las subpoblaciones, así como en la caracterización de su distribución espacial y temporal en relación con las condiciones ambientales. Esto es particularmente importante para las especies cuyo nivel de explotación varía a lo largo de su distribución y que presentan migraciones extensas. A pesar de los esfuerzos de investigación realizados en la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax*) durante el siglo pasado, aún hay incertidumbre en cuanto a su estructura poblacional, el origen natal de los individuos, la cantidad de mezcla entre subpoblaciones y su capacidad migratoria. La composición isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) del carbonato de los otolitos de peces marinos ha sido utilizada con éxito como una herramienta natural para entender sobre la estructura poblacional y el origen natal, así como para reconstruir la historia térmica de los individuos e inferir los patrones de migración. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  en los otolitos registran permanentemente la temperatura y la salinidad en la cual el carbonato es formado. Otolitos de sardinas que han crecido en aguas con diferentes temperaturas o bajo distintos regímenes de salinidad pueden presentar diferentes valores isotópicos. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  se pueden utilizar para retrocalcular la temperatura de formación de carbonato si la composición isotópica del agua ( $\delta_w$ ) se conoce o se estima con base en la salinidad. Valle y Herzka (2008) reportaron un alto grado de variabilidad en los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de otolitos enteros de sardinas jóvenes capturadas en el Pacífico Mexicano y el Golfo de California (hasta 2 ‰ para una misma localidad). El alto nivel de variación se consideró consistente con la mezcla de sardinas expuestas a ambientes con diferentes temperaturas durante el primer año de vida. Sin embargo, los valores isotópicos derivados del análisis de otolitos enteros integra la temperatura a la que estuvo expuesto un individuo a lo largo de toda su vida, por lo cual la resolución temporal es limitada.

El presente estudio aplicó tecnología de vanguardia para obtener y analizar submuestras de carbonato de los núcleos de los otolitos de sardinas del Pacífico. Los objetivos son reconstruir la temperatura de crianza de sardinas para identificar subpoblaciones de desove y evaluar si hay evidencia de mezcla entre las subpoblaciones del norte y el sur. Se hicieron muestreos quincenales de 150 sardinas cada uno de desembarques de la flota pesquera de El Sauzal, Baja California de febrero de 2008 a marzo de 2009. Las sardinas presentaron un promedio de  $165 \pm 15$  mm de longitud estándar (LE). Para los análisis

isotópicos, se seleccionaron las sardinas capturadas en febrero de 2008 ( $173 \pm 16$  mm LE). Estas presentaron una distribución bimodal, un grupo de tallas chicas con un promedio de  $159 \pm 4$  mm (151/165) y tallas grandes con promedio de  $189 \pm 7$  mm LE (182/205) de los cuales se analizaron sub-muestras ( $n=39$  en total). Según el modelo de migración de Felix-Uraga *et al.* (2005), estas sardinas deberían de corresponder a la subpoblación fría. Se estimaron las edades por medio del conteo de anillos estacionales. El carbonato fue extraído de 39 núcleos. Con base en mediciones del ancho de anillos diarios, el carbonato extraído de los núcleos abarca entre 50 y 70 días del periodo larval y juvenil temprano. Se encontró una amplia variabilidad en los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de los núcleos de los otolitos. También se retrocalculó la temperatura basada en los valores  $\delta^{18}\text{O}$  y estimaciones de  $\delta_w$  (obtenida con base en valores de salinidad en los centros principales de desove) para las temporadas en las que se estimó pudieron desarrollarse las sardinas sub-muestradas. Por último, para evaluar si las temperaturas corresponden a la subpoblación fría, las temperaturas retrocalculadas se compararon con imágenes de satélite de temperatura superficial del mar (TSM). Para las sardinas de 2.5 y 3.5 años de edad, las temperaturas retrocalculadas a partir de valores isotópicos son consistentes con las zonas de hábitat de crianza propuestas para las subpoblaciones fría y templada, lo cual es consistente con la hipótesis de mezcla. Esta tesis ejemplifica el potencial de esta técnica para contribuir al entendimiento de la estructura poblacional de la sardina del Pacífico.

**Palabras clave:** Isótopos de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ), *Sardinops sagax*, identificación de subpoblaciones.

**Abstract** of the thesis presented by **Jorge Alejandro Cerón Gómez** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in MARINE ECOLOGY. Ensenada, Baja California, México. November 2010.

## DISCRIMINATION OF PACIFIC SARDINE (*Sardinops sagax*) SUBPOPULATIONS USING $\delta^{18}\text{O}$ VALUES OF OTOLITH CORES TO CALCULATE LARVAL REARING TEMPERATURE

The implementation of management strategies for marine fish populations relies on the identification of subpopulations, as well as the characterization of their spatial and temporal distribution relative to environmental conditions. This is particularly important for species whose level of exploitation varies along its distribution and that exhibit extensive migrations. Despite the research effort conducted on the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) during the last century, there is still uncertainty regarding its population structure, the natal origin of individuals, the amount of mixing between subpopulations and its migratory ability. The oxygen isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$ ) of the otolith carbonate of marine fishes has been successfully used as a natural tracer of stock structure and natal origin, as well as to reconstruct the thermal history of individuals and infer migration patterns.

Otolith  $\delta^{18}\text{O}$  values permanently record the temperature and salinity under which the carbonate formed. The otoliths of individuals that have grown in waters with different temperature and/or salinity regimes can thus exhibit differing isotopic values. Further, if the isotopic composition of the water ( $\delta_w$ ) in a given area is known (or can be estimated based on salinity),  $\delta^{18}\text{O}$  values can be used to calculate the temperature of carbonate formation. Valle and Herzka (2008) found a high degree of variability in the  $\delta^{18}\text{O}$  values of whole otoliths of young sardines captured in the Mexican Pacific and Gulf of California (up to 2 ‰). The high level of variation was considered consistent with mixing during the first year of life. However, whether mixing occurred at the subpopulation level or among subpopulations is not clear. However, isotopic values derived from whole otoliths integrate the temperature to which an individual was exposed throughout life. The temporal resolution that can therefore be obtained from whole otoliths is limited.

Our ongoing research is implementing cutting-edge technology to obtain and analyze carbonate sub-samples from the cores of the otoliths of Pacific sardines. Our overall goal is to reconstruct the temperature to which individual sardines were exposed to during the larval and early juvenile period to identify spawning subpopulation and evaluate whether there is evidence of mixing among the northern and southern Pacific subpopulations.

Samples of 150 sardines were taken biweekly each one from landings of the fishing fleet of El Sauzal, Baja California since February 2008 to March 2009. The sardines had an average  $165 \pm 15$  mm standard length (SL). For isotopic analysis, sardines were selected from February 2008 ( $173 \pm 16$  mm SL). These sardines presented a bimodal distribution, the small group size with an average of  $159 \pm 4$  mm (151/165) and large sizes with average of

189 ± 7 mm SL (182/205) of which sub-samples were used in the analysis (n = 39 in total). According to the migration pattern of Felix-Uraga *et al.* (2005), these sardines should correspond to the cold subpopulation. Ages were estimated by counting seasonal rings. The carbonate was extracted from 39 cores. Based on ring width measurements per day, carbonate cores covered between 50 and 70 days of early larval and juvenile stages. There was a wide variability in the values of  $\delta^{18}\text{O}$  otolith cores. We backcalculate temperature based on  $\delta^{18}\text{O}$  values and estimates of  $\delta w$  (obtained from salinity values corresponding to the main centers of spawning) for the periods of development of the subsampled sardines. Finally, to assess whether the temperatures correspond to the cold subpopulation backcalculate temperatures were compared to satellite images of sea surface temperature (SST). For sardines 2.5 and 3.5 years of age, backcalculate temperatures from isotopic values are consistent with the proposed breeding areas for cold and temperate subpopulations, congruent with the mixing hypothesis. This thesis exemplifies the potential of this technique to contribute to the present-day understanding of Pacific sardine subpopulations.

**Keywords:** Oxygen isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$ ), *Sardinops sagax*, identification of subpopulations.

## **DEDICATORIA**

A Diego Barak.

Que los frutos de mi aprendizaje sean siempre de tu provecho

Alejandra, Jorge y Adrián.

Por su apoyo y cariño.

A Sharon

Gracias por tu confianza y darme la oportunidad aprender.

A mis amigos

## AGRADECIMIENTOS

Al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada** a su **Departamento de Servicios Escolares**, la **División de Oceanología** y su **Departamento de Oceanografía Biológica**, y el **Posgrado en Ecología Marina**, a todo su personal académico por sus enseñanzas para mi formación y al personal administrativo por su apoyo durante este ciclo de trabajo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por la beca (# 213357) para realizar mis estudios de maestría en este posgrado

Al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada** por la beca-préstamo de estudios de maestría (folio 11726) y también por la beca otorgada por el Departamento de Oceanografía Biológica del mismo centro de estudios (folio 14360) para la conclusión de la maestría en este centro de estudios.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** y al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada** por las becas (folio 14046 y 14816) otorgadas por el proyecto externo (registro 83575) “**Aplicación de análisis isotópicos de los otolitos para la reconstrucción del historial térmico, origen natal y patrones de migración de la sardina del Pacífico**” para la conclusión de este trabajo.

Al Proyecto Sep- **CONACyT 625234** a cargo de la **Dra. Sharon Herzka Llona** por el apoyo brindado durante las estancias y congresos relacionados con la elaboración de este trabajo.

A la empresa **Productos ABC** y a el **Ing. Ragnar Gutiérrez** por su colaboración para proporcionar las muestras biológicas necesarias para la realización de esta tesis.

Al comité de tesis compuesto por la **Dra. Sharon Herzka Llona**, **Dra. Paula Pérez Brunius**, **Dr. Casimiro Quiñónez Velazquez** y **Dr. Timothy Baumgartner McBride** por sus comentarios y críticas que han sido útiles para mejorar la calidad de este trabajo.

Al **Dr. Casimiro Quiñónez Velazquez** por su tiempo invertido durante las estancias en la ciudad de La Paz, Baja California Sur, México, para el entrenamiento para las estimaciones de edad, además del conocimiento brindado sobre la sardina del Pacífico. También a sus colegas del laboratorio del **CICIMAR** al **Dr. Roberto Félix-Uraga** y **Dr. Felipe Neri** y todo su grupo de trabajo.

**M en C. Vicente Ferreira** (gran chef, guía de múltiples dimensiones y en ratos libres profesor) por toda su ayuda brindada en la instalación de diversos equipos además de toda su asesoría intelectual y sincera amistad.

**Dr. Juan Carlos Herguera** por sus el conocimiento brindado y apoyo en la instalación del equipo y **M en C. Axel Rosas** por todo su apoyo logístico y técnico en el procesamiento de muestras.

Al **Dr. Oscar Sosa Nishizaki** y al **Laboratorio de Ecología Pesquera** integrado por **M en C. Carmen Rodríguez**, **M en C. Francisco López**, **M en C. Karina de la Rosa**, **M en C. Kena Curiel**, **Biol. Abigail Iris**, **M en C Bertha Aguirre**, **M en C. Omar Santana**, **M en C. Erick Oñate**, **Biol. Cesar Guerrero**, **M en C. Miguel Escobedo**, **M en C. Luis Malpica**, **M en C. Anelena Campuzano**, **M en C. Andrea Jara**, **M en C. Alfonso Medellín**, **Biol. Melissa Mayorga**, **Biol. Mariela Brito**, **Biol. Emiliano García** y **Astrid Vargas**. Por su apoyo y compañía durante el desarrollo de la tesis.

Al **M. en C. Evaristo Rojas**, **Dr. Jushiro Cepeda** y **Dr. Reginaldo Durazo** por su asesoría en el procesamiento de imágenes de satélite en Matlab.

**M en C. Dolores Sarracino, Norma Fuentes, Citlali Romero y Quim. Ivonne Best.**

Gracias por su atención y ayuda en los trámites desde el inicio hasta el final de este ciclo.

Por su asistencia en las labores administrativas y amistad durante el desarrollo de este trabajo **Elvia Serrano, Elizabeth Farias, Viviana Oloño, Lucy y Julieta Castro**

A Giuliana Cruz, Leopoldo Díaz, Karla Ríos, Cristina Gonzalez-Rubio, Miki Takayama, Erika Santacruz, Maricarmen Ávila, Yuliana Bedolla, Sandra Moreno, Eva Fernández, Paola Rodríguez, Linda Barranco, Lum, Abraham Guerrero, Fernando García, Alfredo Castillo, Miguel Guevara, Erick González, Ulises Angulo, Arely Martínez, Tiago Pereira, Juan Pablo Hernández, Carlos Norzagaray, Guadalupe Gómez, Lupita Cabrales, Nancy Saavedra, Ruth Gingold, Mary Carmen Ruiz, Iris Segura, Anelisse Barcenás, Vania Blancas, Alejandro Rodríguez, Gemma Gómez, Isabel Hernández, Daniela Gutiérrez, José Abella, Jorge Montaña, Diana Pérez, Vladimir Toro, Alejandro Arias, Andrea McTavish, Mariana Sanchez, Augusto Valencia, Bellinet Valencia, María Fernanda Hernández, Abigail Domínguez, Ricardo Cruz, Luis Lombardo, Karla Pedraza, Cinthia Nava, Daniela Rabiela, Erik Peñaloza, Constanza Ricaurte, Héctor Ocampo, Amayali Becerril, Daniela Rodríguez, Erendira Canales, Michelle Valdes, Emilio Inda, Mayra Hernández, Diana López, Gloria Villareal, José Antonio Mata, Socorro Jiménez, Marisol Simon, Obed Pérez, Francisco Nuñez, Ana Islas, Leonardo Tenorio, Adriana González, Gabriela Colorado, Lilia Flores, Pamela de Grau, Raciél de Dios, Norma Oliva, Griselda Arias.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
I.1 Breve historia de la pesquería de la sardina del Pacífico.....	1
I.2 Biología y la estructura de la población de la sardina del Pacífico.....	4
I.3 Otolitos como trazadores naturales de ambientes.....	8
I.4 Isótopos estables de oxígeno.....	9
I.5 Planteamiento del problema y justificación.....	13
<b>II. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
II.1 Objetivo general.....	14
II.2 Objetivos específicos.....	14
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>15</b>
III.1 Área de estudio.....	15
III.2 Obtención de muestras de sardina del Pacífico.....	17
III.3 Estimación de la edad.....	18
III.4 Preparación de otolitos para análisis isotópicos.....	19
III.5 Análisis isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ de los núcleos.....	20
III.6 Evaluación de la resolución temporal de las submuestras de otolitos.....	21
III.7 Estimación de los valores regionales de $\delta_w$ .....	20
III.8 Reconstrucción de la temperatura.....	22
III.9 Evaluación de la variabilidad isotópica en los otolitos en función del hábitat de crianza.....	23
<b>IV. RESULTADOS .....</b>	<b>25</b>
IV.1 Características biológicas de las sardinas.....	25
IV.2 Edades y dimensiones de los otolitos.....	27
IV.3 Resolución temporal correspondiente a la zona de extracción de carbonato de los núcleos.....	31
IV.4 Valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ .....	32
IV.5 Variación en la salinidad.....	34
IV.6 Reconstrucción de la temperatura con base en valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ .....	37
IV.7 Estimación de la TSM (temperatura superficial del mar) por medio de imágenes de satélite.....	39

## CONTENIDO (continuación)

	<b>Página</b>
<b>V. DISCUSIÓN.....</b>	<b>49</b>
V.1 Estructura de tallas y edades.....	49
V.2 Variabilidad en los valores isotópicos de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ ).....	50
V.3 Variación en la salinidad.....	52
V.4 Reconstrucción de la temperatura con base en valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ y comparación de la TSM.....	53
<b>VI. CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>VII. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>57</b>

**Figura****LISTA DE FIGURAS****Página**

- 1 Modelo conceptual de la distribución espacio-temporal de la sardina del Pacífico en el cual se considera la existencia de tres stocks con base en sus afinidades de temperatura: uno de afinidad cálida (C) en rojo, uno de afinidad “templada” (T) en gris, y uno de de afinidad “fría” (F) en azul. El grosor y orientación de las flechas indican la intensidad y la dirección de las corrientes de California (hacia el sur) y Norecuatorial (hacia el norte). Tomado y modificado de Félix-Uraga *et al.* (2005). 6
- 2 Relación entre la temperatura y la composición isotópica de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de el carbonato de otolitos de peces con base en la ecuación de Campana (1999), quien la calculó a partir de evaluaciones empíricas y estudios de precipitación de carbonato realizados bajo condiciones controladas. Se observa una relación negativa entre la temperatura y la composición isotópica del oxígeno del carbonato (5 °C por cada 1 ‰) a un valor de  $\delta w$  constante. 10
- 3 Relación entre la composición isotópica de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) del agua de mar ( $\delta w$ ) con la salinidad (PSU) para aguas superficial del noroeste del Pacífico presentada por Craig y Gordon (1965) y estudios recientes para latitudes medias (Paul *et al.* 1999). Se observa una relación positiva entre la salinidad y valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del carbonato con una pendiente de 1 PSU por cada 0.5 ‰. 11
- 4 Mapa de la zona de estudio. Se muestran las áreas que abarcan los datos usados para la estimación de salinidad de los reportes de CalCOFI y el área que abarcan las estimaciones de TSM de las imágenes de satélite. En los recuadros se indican la zona norte (35 ° N 123° O- 33° N 126° O y 32° N 120 ° O- 30° N 125 ° O) y la zona centro (31° N 119° O-30° N 121° O y 26 ° N 116° O- 25 ° 120 ° O entre los 30° y 35° N), en las cuales se han caracterizado los desoves de sardina. El área en la cual opera la flota pesquera del Puerto de El Sauzal está señalada con rojo. Modificado del CalCOFI Rep., Vol. 48, 2007. 16
- 5 Esquema de las mediciones realizadas a los otolitos de sardinas del Pacífico. Diámetro ( $R \pm 1\mu\text{m}$ ), radio ( $r \pm 1\mu\text{m}$ ), distancia del centro al borde ( $h \pm 1\mu\text{m}$ ), desde el núcleo radio al primer opaco ( $r_0 \pm 1\mu\text{m}$ ) y radio al primer hialino ( $r_1 \pm 1\mu\text{m}$ ). Modificado de Quiñónez-Velázquez *et al.* 2002. 19

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
6	Distribución de frecuencias de tallas (LE= longitud estándar) de la sardina del Pacífico ( <i>Sardinops sagax</i> ) recolectadas de desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México de febrero 2008 a marzo 2009. Se recolectaron ~150 sardinas cada dos semanas. Los intervalos de tallas son de 10 mm (e.g. 101-110 mm LE).	28
7	Distribución de frecuencias de tallas (LE= longitud estándar) de sardinas del Pacífico ( <i>Sardinops sagax</i> ) recolectadas de desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México del 25 de febrero 2008. Los intervalos de tallas son de 10 mm (e.g. 101-110 mm LE). Se seleccionaron 20 sardinas de las dos modas principales de la distribución para los análisis isotópicos: un grupo de sardinas de tallas chicas (150 mm a 165 mm LE) y uno de tallas grandes (180 mm a 205 mm LE).	29
8	Número de sardinas ( <i>Sardinops sagax</i> ) clasificadas por estación del año (temporadas de crianza específica) con base en la fecha de captura y a la determinación de edad obtenida de la lectura de sus otolitos. Se evaluaron sardinas de tallas chicas (150 a 165 mm LE) y tallas grandes (180 a 205 mm LE) de una submuestras de las sardinas recolectadas el 25 de febrero del 2008 en desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México.	31
9	Valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ (‰) del carbonato extraído de los núcleos de otolitos de sardinas ( <i>Sardinops sagax</i> ) recolectadas el 25 de febrero del 2008 en desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México, en función de su longitud estándar (LE). Se consideraron sardinas de un grupo de tallas chicas (150 a 165 mm) y grandes (180 a 205 mm LE).	33
10	Valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ (‰) del carbonato extraído de los núcleos de otolitos de sardinas ( <i>Sardinops sagax</i> ) recolectadas el 25 de febrero del 2008 en desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México, en función de su edad. Tallas chicas (150 a 165 mm LE) y tallas grandes (180 a 205 mm LE).	34

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
11	Temperaturas para zona norte y centro estimadas con la salinidad ( <b>Tsal<sub>MIN</sub></b> : temperatura estimada con salinidad mínima y <b>Tsal<sub>MAX</sub></b> : temperatura estimada con salinidad máxima para cada época y cada región). Para tener una estimación conservadora de las temperaturas, graficas solo los valores más amplios (Tsal min norte y Tsal max centro) para la zona norte y para la zona centro con la fórmula de Campana (1999). Los recuadros de color representan los intervalos de temperatura reportados como hábitat de crianza de las subpoblaciones “fría” y “templada” de las sardinas. El recuadro con borde claro es la asociada con la subpoblación “fría” y el recuadro con borde oscuro es la asociada las de la subpoblación “templada”.	38
12	Climatología anual de la temperatura superficial del mar (TSM) para el periodo 2002-2009 calculada a partir de promedios mensuales. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis (imágenes de 9 km <sup>2</sup> ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. <b>Lat</b> : Latitud, <b>Lon</b> : Longitud y <b>T</b> : Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base a los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove. Las barras laterales junto al de gradiente de temperatura indica el rango de temperaturas esperadas para cada zona con base Félix-Uraga <i>et al.</i> 2004 (Tabla VII) para la subpoblación “templada” y “fría” son del mismo color que la zona de desove a la cual supuestamente pertenecen (círculos).	41
13	Desviación estándar (DE) de la temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para el periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados s con el satélite Aqua Modis (imágenes 9 km <sup>2</sup> ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. <b>Lat</b> : Latitud, <b>Lon</b> : Longitud y <b>T</b> : Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove.	42

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
14	Temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para los otoños 2002-2009. La imagen se generó con base promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis (9km <sup>2</sup> ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. <b>Lat</b> : Latitud, <b>Lon</b> : Longitud y <b>T</b> : Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base a los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove. Las barras laterales junto al de gradiente de temperatura muestra el rango de temperaturas esperadas para cada zona con base Félix-Uraga <i>et al.</i> 2004 (Tabla VII) para la subpoblación “templada” y “fría”, y son del mismo color que la zona de desove a la que pertenecen (cuadros).	43
15	Desviación estándar de la temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para los otoños 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados s con el satélite Aqua Modis (9 km <sup>2</sup> ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. <b>Lat</b> : Latitud, <b>Lon</b> : Longitud y <b>T</b> : Temperatura. La zona norte (oscuro) y la zona centro (claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove.	44
16	Temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para los veranos periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis (9 km <sup>2</sup> ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. <b>Lat</b> : Latitud, <b>Lon</b> : Longitud y <b>T</b> : Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove. Las barras laterales junto al de gradiente de temperatura muestra el rango de temperaturas esperadas para cada zona con base Félix-Uraga <i>et al.</i> 2004 (Tabla VII) para la subpoblación “templada” y “fría”, y son del mismo color que la zona de desove a la cual supuestamente pertenecen (cuadros).	45

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
17	Desviación estándar de la temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para los veranos periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis (9 km <sup>2</sup> ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. <b>Lat:</b> Latitud, <b>Lon:</b> Longitud y <b>T:</b> Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove.	46
18	Temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para las primaveras periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis (9 km <sup>2</sup> ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. <b>Lat:</b> Latitud, <b>Lon:</b> Longitud y <b>T:</b> Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base a los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove. Las barras laterales junto al gradiente de temperatura muestra el rango de temperaturas esperadas para cada zona con base Félix-Uraga <i>et al.</i> 2004 (Tabla VII) para la subpoblación “templada” y “fría”, y son del mismo color que la zona de desove a la que pertenecen (cuadros).	47
19	Desviación estándar de la temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para las primaveras periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis (9 km <sup>2</sup> ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. <b>Lat:</b> Latitud, <b>Lon:</b> Longitud y <b>T:</b> Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove.	48

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
<b>I</b>	Fecha de captura, número, longitud estándar y peso total de la sardina del Pacífico <i>Sardinops sagax</i> , recolectadas de los desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, desde febrero del 2008 a marzo del 2009. En gris se señala la muestra de donde se obtuvieron los otolitos para realizar los para análisis isotópicos $\delta^{18}\text{O}$ del carbonato de sus otolitos. <b>x</b> : media, <b>DE</b> : desviación estándar, <b>Min</b> : valor mínimo y <b>Max</b> : valor máximo.	26
<b>II</b>	Valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ obtenidos del carbonato de los núcleos de otolitos (40 otolitos) de la sardina del Pacífico ( <i>Sardinops sagax</i> ). Grupo de tallas chicas (150 a 165 mm LE) y tallas grandes (180 mm a 205 mm LE) colectadas el 25 de febrero del 2008 en desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México. <b>x</b> : media, <b>DE</b> : desviación estándar, <b>Min</b> : valor mínimo y <b>Max</b> : valor máximo.	30
<b>III</b>	Ancho de anillos diarios del periodo larvario medido a lo largo del radio (ver figura metodología) en los núcleos de 50 otolitos de sardinas ( <i>Sardinops sagax</i> ) capturadas entre febrero 2008 y marzo de 2009. Los valores se presentan en micras. <b>x</b> : media, <b>DE</b> = desviación estándar, <b>Mi</b> : valor mínimo y <b>Max</b> : valor máximo.	32
<b>IV</b>	Valores máximos y mínimos de salinidad y temperatura a 10 m de reportes de cruceros CALCOFI e IMECOCAL (Goericke <i>et al.</i> 2004; Goericke <i>et al.</i> , 2005; Peterson <i>et al.</i> , 2006; Goericke <i>et al.</i> 2007; (zona norte (subpoblación “fría”): 35 ° N 123° O- 33° N 126° O y 32° N 120 ° O- 30° N 125 ° O) (zona centro (subpoblación “templada”): 31° N 119° O-30° N 121° O y 26 ° N 116° O- 25 ° 120 ° O). Se excluyeron las zonas de surgencia cercanas a la costa. Los periodos evaluados corresponden a las temporadas de crianza estimadas para sardinas de tallas chicas (150a 165 mm LE) y de tallas grandes (180a 205 mm LE) colectadas el 25 de febrero del 2008 de desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México. <b>R</b> : valores mínimo y máximo reportados, <b>DA</b> : diferencia absoluta (valor mínimo – valor máximo). En gris se señalan las temporadas en las que se estima que las sardinas capturadas en febrero del 2008 estuvieron presentes en su hábitat de crianza.	35

<b>Tabla</b>	<b>LISTA DE TABLAS (continuación)</b>	<b>Página</b>
<b>V</b>	<p>Temperaturas de crianza estimada usando la ecuación de Campana (1999), valores de <math>\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}</math> de los núcleos de sardinas y la salinidad mínima y máxima reportadas para los cruceros CALCOFI o IMECOCAL. El carbonato de los núcleos se obtuvo de sardinas capturadas en el Puerto El Sauzal en febrero 2008. Se presentan las estimaciones de temperatura tanto por época de crianza como para la región norte (subpoblación “fría”) y central (subpoblación “templada”) calculadas con el mínimo y máximo de salinidad observada en cada época y región. <b>LE</b>: longitud estándar, <b>x</b>: media, <b>DE</b>: desviación estándar, <b>Min</b>: valor mínimo, <b>Max</b>: valor máximo, <b>TSal</b><sub>MIN</sub>: temperatura estimada con salinidad mínima y <b>TSal</b><sub>MAX</sub>: temperatura estimada con salinidad máxima.</p>	36
<b>VI</b>	<p>Características del hábitat térmico de la sardina del Pacífico (<i>Sardinops sagax</i>) reportada en la literatura para diferentes regiones, épocas y subpoblaciones para diferentes etapas de ciclo de vida (huevos, larvas y adultos).</p>	40

# I. INTRODUCCIÓN

## I.1 Breve historia de la pesquería de la sardina del Pacífico

Para desarrollar planes adecuados de manejo de un recurso pesquero que sea concordante con su uso precautorio, es necesario caracterizar la estructura poblacional y geográfica de los stocks o subpoblaciones, conocer su abundancia, distribución espacial y temporal, sus zonas y condiciones de crianza, sus patrones de migración y evaluar el grado de mezcla entre ellos (Waldman, 2005). En el manejo de poblaciones, una subpoblación se define como una unidad poblacional discreta con origen, demografía y dinámica propios. El conocer esto es aún más importante en el caso de especies cuya explotación varía a lo largo de su distribución, como es el caso de la sardina del Pacífico. El mismo recurso puede estar sujeto a diferentes presiones de pesca captura en diversas regiones y sobre más de una subpoblación, lo cual puede afectar de manera diferente su abundancia y distribución.

A principios del siglo XX, hubo un incremento sustancial en la explotación de la sardina del Pacífico o sardina Monterrey (*Sardinops sagax*), lo cual llevó al desarrollo de pesquerías importantes en la costa Pacífico de EE.UU, México y Canadá (Marr, 1960; Murphy, 1966; Lluch-Belda *et al.* 1989; Barnes *et al.* 1992; Cisneros-Mata *et al.* 1995). Los desembarques en toda la costa, desde Canadá hasta México, llegaron a cerca de 800,000 toneladas métricas (Marr, 1960; Murphy, 1966). Durante la década de 1930, esta pesquería presentó sus más altos rendimientos. Sin embargo, a partir de los cuarentas, las capturas disminuyeron drásticamente. Para la década de 1960, la pesquería en California y el norte de Baja California había sufrido un colapso (Wolf, 1992). Luego del colapso de la pesca de pelágicos menores en Canadá, Washington, Oregón, California y el noreste de México que ocurrió durante las décadas de 1940 y 1950 (Marr, 1960; Wolf, 1992) el rango geográfico de distribución de la sardina se contrajo hacia el sur (Marr, 1960), y las capturas se limitaban al sur de Baja California y al Golfo de California (Lluch-Belda *et al.* 1989).

A partir de los ochentas, se documentó un incremento gradual en la abundancia de la sardina en el norte de Baja California y sur de California, y la población explotable comenzó a incrementarse. Inicialmente, hubo un aumento en las descargas en el Puerto de El Sauzal, Ensenada, B.C., y la captura comercial se recuperó en su distribución norteña cinco años después (Hill *et al.* 2008). Actualmente, la sardina sustenta pesquerías de importancia en el Golfo de California, Bahía Magdalena, y Ensenada. En nivel nacional, la sardina aporta aproximadamente el 47% de la pesca de pelágicos menores en la zona noreste del país. En volumen, los pelágicos menores representan el 30% de la captura nacional por peso; esto equivale al 10% del valor de la pesca nacional (INP, 2000). En México, la pesca de la sardina se maneja con base en el monitoreo de la biomasa, una talla mínima de captura de 150 mm de longitud patrón (solo hasta el 30% de las capturas pueden ser de tallas menores) y con base en limitaciones al esfuerzo pesquero (INP 2006). La pesca de la sardina en EE. UU. se maneja con base en cuotas de captura derivadas de estimaciones de biomasa. Para EE. UU., durante 2007 la mayoría de las capturas se realizaron en el sur de California (41%), en segundo lugar Oregón (32%) y en tercer lugar en California central (27%) (Hill *et al.* 2008).

Como otras poblaciones de pelágicos menores asociadas a sistemas de surgencias, la sardina exhibe fluctuaciones temporales y espaciales en su abundancia (Baumgartner *et al.* 1992; Holmgren-Urba y Baumgartner, 1993). Esto ha sido relacionado a cambios en los regímenes oceanográficos de la región (Lluch-Belda *et al.* 1989; Baumgartner *et al.* 1992; Holmgren-Urba y Baumgartner, 1993; McFarlane *et al.* 2002) que originan fluctuaciones en las condiciones ambientales en diferentes escalas (Marr, 1960; Lluch-Belda *et al.* 1991, García-Franco *et al.* 2004). A pesar de que se considera que las variaciones en la abundancia de la sardina del Pacífico son consecuencia de procesos naturales a gran escala, es probable que el incremento de la presión por pesca haya contribuido al colapso (Radovich, 1982; Marr, 1960; Baumgartner *et al.* 1992; Lluch-Belda *et al.* 1992) en conjunto con procesos de menor escala (i.e. reclutamiento y procesos oceanográficos interanuales).

Se ha realizado un gran esfuerzo de investigación de la sardina del Pacífico durante el último siglo, pero aún existe incertidumbre sobre su estructura poblacional, la zona de crianza de individuos capturados en distintas regiones, la cantidad de mezcla entre las subpoblaciones potenciales y su capacidad migratoria. Esta incertidumbre se debe en parte a los cambios que se observan en la distribución y abundancia de la sardina, que son consecuencia de diferentes procesos que operan en distintas escalas de tiempo y espacio, además de su naturaleza altamente migratoria. Además, es posible que la estructura de la población de sardina del Pacífico sea distinta durante los periodos de expansión y contracción de su distribución (Wisner, 1960), por lo cual la evaluación actual de su estructura poblacional es de suma importancia para la elaboración de planes de manejo (Smith, 2005).

Actualmente, la sardina es utilizada como base para la fabricación de harina de pescado. También hay un mercado para la exportación de sardina congelada para carnada y parte de las capturas son procesadas para la venta de productos enlatados para consumo humano, ya que es una fuente importante de proteína de buena calidad. Además, sirve como materia prima para la producción de alimento balanceado para la industria avícola y porcina, así como carnada para pesca comercial, deportiva y artesanal. Es una fuente importante de empleos en la región noreste de México ya que genera alrededor de 5000 empleos (Programa Maestro Nacional de Pelágicos Menores, CEC-ITAM, 2006). La sardina también tiene un papel económico importante en Baja California, ya que se utiliza como alimento en la maricultura de atunes (Zertuche-González, *et al.* 2008).

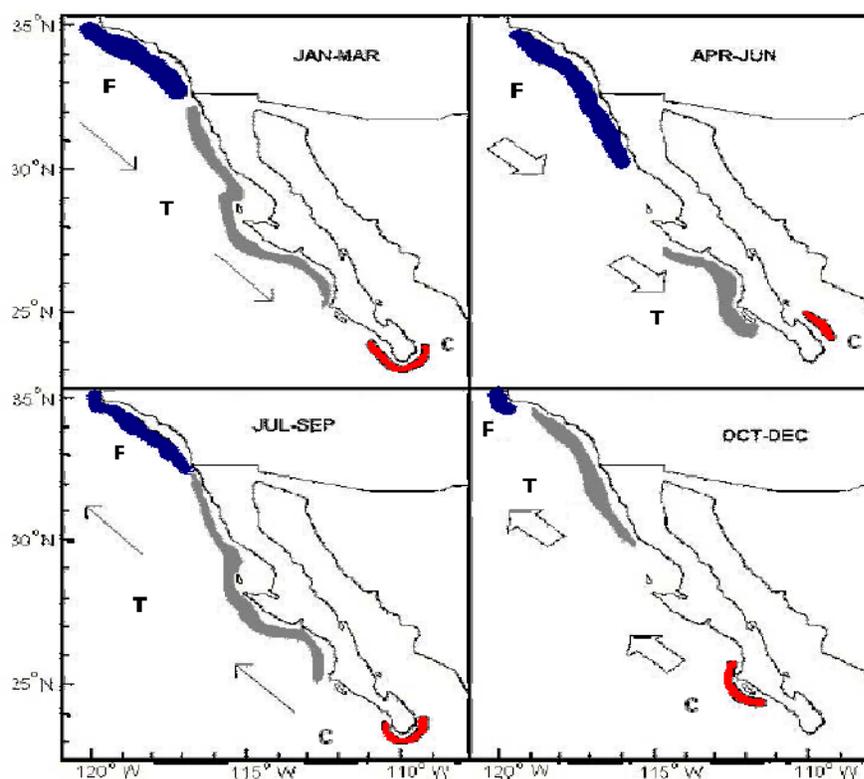
## **I.2 Biología y la estructura de la población de la sardina del Pacífico**

La sardina del Pacífico es un pelágico menor y oceanódromo que se distribuye en el sistema de la Corriente de California, desde el sur de Alaska hasta el sur de la península de Baja California y dentro del Golfo de California (Mar, 1960; Wolf, 1992; Nevárez-Martínez *et al.* 2001; McFarlane y Beamish, 2001; McFarlane *et al.* 2002; Emmett *et al.* 2005; McFarlane *et al.* 2005; Nevárez-Martínez *et al.* 2006). Pertenece a la Familia Clupeidae, alcanza una talla máxima de 395 mm de longitud estándar (Whitehead, 1985). El peso máximo es de 496 g de peso total (Hart, 1973), y la edad máxima registrada es 11 años (Felin y Phillips, 1948). En su etapa adulta habita de 0 a 200 metros de profundidad (Whitehead, 1985), forma densos cardúmenes y los rangos de temperatura en los que habita es entre 16 °C y 23 °C en verano y 10 °C a 18 °C en invierno (Félix-Uraga *et al.* 2004). Es un pez filtrador que se alimenta de crustáceos planctónicos y de fitoplancton, tiene una alta fecundidad, se reproduce por medio de fecundación externa, y sus larvas y huevos son pelágicos. Durante todas las fases de su ciclo de vida la sardina presenta un alto potencial de dispersión y migración.

A lo largo del tiempo, se han empleado diferentes métodos para caracterizar la estructura poblacional de la sardina del Pacífico y evaluar el grado de intercambio entre subpoblaciones (Marr, 1960; Murphy, 1996). Se han identificado movimientos latitudinales de las sardinias a través de marcado y recaptura en adultos (Clark y Marr, 1955; Marr, 1960), y se ha evaluado si hay evidencia de diferencias entre subpoblacionales por medio de conteos de vértebras y caracterización de la morfología de los otolitos (Clark, 1947; Marr, 1960; Félix-Uraga *et al.*, 2005), patrones de crecimiento de escamas (Radovich, 1982). También se han llevado a cabo análisis genéticos y serológicos con la finalidad de evaluar si hay evidencia de estructura genética (Vrooman, 1964; Hedgecock *et al.* 1989; Bowen y Grant, 1997; Lecmonte *et al.* 2004; Pereyra *et al.* 2004)

Con base en una revisión detallada de los resultados de diferentes estudios sobre la estructura poblacional de la sardina a través del tiempo. Por ejemplo, Smith (1981) sugirió la existencia de tres stocks basado en la temperatura del mar y la época de desove: la llamada subpoblación norteña que se extiende desde Punta Eugenia (Baja California) hasta San Francisco, una segunda subpoblación desde Punta Eugenia hasta el sur de la península, y una tercera dentro del Golfo de California. Lluch-Belda *et al.* (1991) documentaron que los picos de desove en el Pacífico mexicano ocurrían bajo condiciones intermedias de surgencias, y que se observaban picos de desove asociados a dos temperaturas (15 °C y 23 °C) en el sistema de la Corriente de California y a 19 °C en el Golfo de California, lo cual es consistente con la presencia de tres stocks.

Recientemente, Félix-Uraga *et al.* (2004) analizaron la relación entre los volúmenes de captura y la temperatura superficial del mar (TSM) en la Corriente de California e identificaron tres stocks potenciales: (1) un grupo cálido que se captura por encima de los 22 °C, (2) un grupo templado que se captura entre 17-22 °C, y (3) un grupo frío que se captura a temperaturas < 17 °C. La distribución geográfica de estos grupos varía en función de la época de año como consecuencia de cambios estacionales en la temperatura superficial del mar (TSM). Además, Félix-Uraga *et al.* (2005) mencionan que hay desplazamientos latitudinales estacionales de los tres stocks de la sardina del Pacífico. Estos movimientos ocurren en Columbia Británica en Canadá, en Estados Unidos y la costa de Baja California en México, y el Golfo de California. Toda la parte del Pacífico de la distribución de la sardina está asociada a las variaciones estacionales en las condiciones oceanográficas (principalmente temperatura) del sistema de la Corriente de California y una influencia de el Golfo de California en una época del año, pero los procesos dentro del golfo son influenciados por otras corrientes (Figura 1).



**Figura 1.** Modelo conceptual de la distribución espacio-temporal de la sardina del Pacífico en el cual se considera la existencia de tres stocks con base en sus afinidades de temperatura: uno de afinidad cálida (C) en rojo, uno de afinidad “templada” (T) en gris, y uno de de afinidad “fría” (F) en azul. El grosor y orientación de las flechas indican la intensidad y la dirección de las corrientes de California (hacia el sur) y Norecuatorial (hacia el norte). Tomado y modificado de Félix-Uraga *et al.* (2005).

Smith (2005) señaló que hay evidencia circunstancial que apoya la existencia de por lo menos tres subpoblaciones y menciona la necesidad de definir el límite entre el stock del Golfo de California y el stock costero de Baja California Sur, así como el límite entre este último y el stock “norteño” de la Corriente de California. Algunos de los estudios revisados por Smith (2005) han pretendido enlazar la estructura geográfica y variabilidad en la dinámica poblacional de la sardina con condiciones medioambientales. La temperatura del mar parece ser uno de los parámetros más importantes que influye, directa o indirectamente, sobre la abundancia y distribución de esta especie.

En la actualidad, se acepta que la población de sardina del Pacífico incluye varias subpoblaciones a lo largo de su distribución. Para la subpoblación “fría” o “norteña”, el hábitat de desove principal (considerado también como hábitat de crianza de larvas y juveniles tempranos) se presenta durante la primavera fuera de la costa de California en el Southern California Bight (SCB). Este probablemente se extiende hasta Oregon/Washington o más al norte durante el verano bajo ciertas conditions oceanográficas (Ahlstrom, 1954; Marr, 1960; Lluch-Belda *et al.* 1991; Lo *et al.* 1996; Checkley *et al.* 2000; MacFarlane y Beamish, 2001; Lynn 2003; Reiss *et al.* 2008). El hábitat de desove de la subpoblación “templada” se presenta desde primavera hasta el otoño en la zona central de Baja California (Ahlstrom, 1954; Marr, 1960; Baumgartner, com. pers). También se registran desoves en Bahía Magdalena y en la zona costera aledaña a este sistema, tanto en invierno como en verano (Hernández-Vázquez, 1994). Para la población calida, en el Golfo de California, el hábitat de desove ocurre principalmente en la región central durante el invierno (Hammann *et al.* 1998).

Estos estudios se han continuado a través del tiempo (Lluch-Belda *et al.* 1991; Lo *et al.* 1996; Checkley *et al.* 2000; Lynn, 2003 y Curtis, 2004). Con base en el monitoreo continuo de las zonas de desove y las condiciones oceanográficas en la región de muestreo de los programas oceanográficos CalCOFI (California Cooperative Fisheries Investigation) y el programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California), se han caracterizando consistentemente zonas específicas de desove y su temporalidad de las distintas subpoblaciones o stocks. Para la zona central de Baja California, Baumgartner (comunicación personal) documentó desoves de sardina durante todo el año con base en la abundancia de huevos estimada a través el método CUFES (Continuous Underway Fish Egg Sampler) encontrando una relación entre la presencia de huevos y ciertas características de las masas de agua, asociándolo a preferencias térmicas de cada las subpoblaciones “fría” y “templada”. Estas asociaciones se dan en diferente época del año con diferentes masas de agua pero en la misma zona geográfica, lo cual es consistente con la presencia de diferentes subpoblaciones.

### I.3 Otolitos como trazadores naturales de ambientes

Los otolitos son estructuras calcáreas que forman parte del oído interno de los peces óseos (Leta y Keim, 1992). El mayor componente de los otolitos es carbonato de calcio en forma de aragonito, y el resto consiste de una matriz proteica (Campana, 1999). Estas estructuras crecen continuamente por medio de la depositación de carbonato y son metabólicamente inertes durante la vida del pez, lo cual implica que no se reestructuran o reabsorben (Campana y Nielsen, 1985). Los patrones de depositación del carbonato varía en función de ritmos endógenos y los patrones de crecimiento estacionales, por lo cual se observan anillos periódicos de crecimiento diarios (fases larval y juvenil temprana) o estacional (anillos opacos y hialinos). Los anillos se utilizan para la determinación de edad mediante su recuento diario, estacional y anual. La formación de estos anillos es consecuencia de variaciones en la tasa de crecimiento de los peces, que a su vez es resultado de la interacción de cada individuo con el ambiente (temperatura, disponibilidad de alimento) y el metabolismo (Secor *et al.* 1991).

La presencia de anillos diarios en los otolitos fue descrita por Panella (1971), quien los asoció al crecimiento diario. Varios estudios han validado la depositación diaria en especies de Clupeidos, incluyendo *Clupea harengus* (Townsend y Graham, 1981) y *Sardinops sagax* (Castillo *et al.* 1985; Butler 1987; Martínez-Pecero, 2003). En términos estacionales, los anillos de crecimiento se observan como bandas translúcidas o hialinas alternadas (Leta y Keim, 1992). Las bandas hialinas están caracterizadas por capas delgadas, mientras que las bandas opacas se caracterizan por capas gruesas. Si se relacionan las bandas de los otolitos con el crecimiento del pez, se observa que las zonas opacas están asociadas con períodos de crecimiento rápido (verano, otoño) y que las zonas hialinas corresponden a períodos de crecimiento lento (invierno, primavera) (Leta y Keim, 1992). Por lo tanto, si se demuestra que una zona opaca y una zona hialina corresponden a un tiempo definido de un año, es posible determinar la edad de un pez con base en el conteo de anillos. En el caso de la sardina se han hecho varios estudios de edad y crecimiento y se ha comprobado que el

crecimiento de estos anillos tiene este patrón (Yaremko; 1996; Quiñónez-Velázquez *et al.* 2000; Quiñónez-Velázquez *et al.* 2002).

#### **I.4 Isótopos estables de oxígeno**

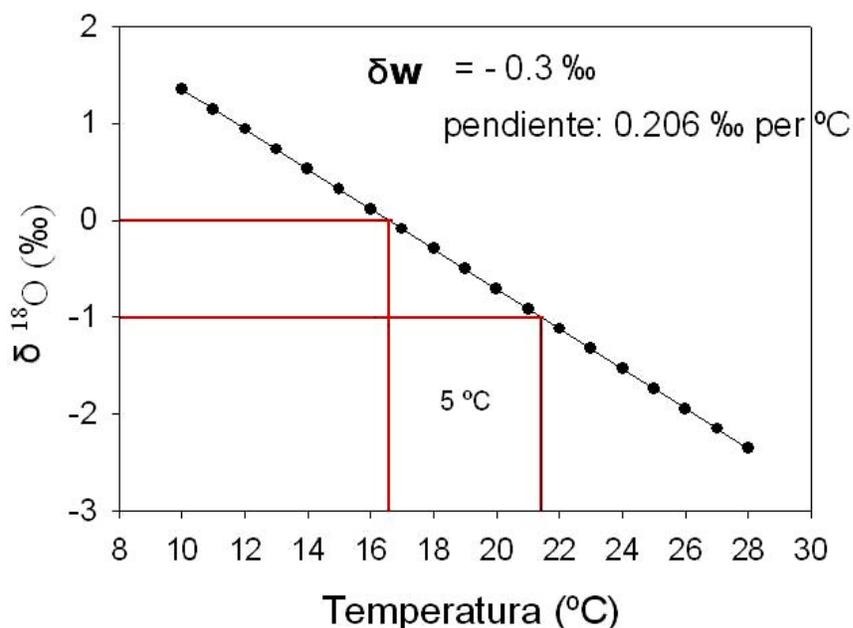
Durante las últimas décadas, la composición química de los otolitos de los peces ha sido utilizado como trazador natural de estructura de stocks, zonas de crianza y patrones de migración (Campana, 1999). Esto se basa en la premisa de que los otolitos registran de manera permanente las condiciones bajo las cuales se formaron, por lo cual los otolitos de peces que han crecido en aguas con diferentes propiedades exhiben diferentes señales o huellas químicas que permiten discriminar entre ellas.

Un enfoque de los análisis microquímicos de los otolitos es la medición de las razones isotópicas de oxígeno y carbono del carbonato de calcio. Estas razones se reportan en unidades  $\delta$  (delta). Los valores de  $\delta$  se calculan con base en la medición de la abundancia relativa del isótopo pesado al liviano (R) en una muestra con respecto a un estándar universal:  $\delta$  (‰) = (Rmuestra/Restándar -1) x 1000 (Epstein *et al.* 1953).

La composición isotópica de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de los otolitos ha sido empleada para distinguir entre poblaciones, caracterizar zonas de crianza, evaluar patrones de migración y reconstruir el historial térmico al cual estuvieron expuestos los peces durante el transcurso de su vida (Kalish, 1991b; Edmonds y Fletcher, 1997; Thorrold *et al.* 1997; Schwarcz *et al.* 1998; Ayvazian *et al.* 2004). Por ejemplo, Edmonds y Fletcher (1997) evaluaron la composición isotópica de los otolitos de sardinas australianas (*Sardinops sagax pilchardus*) colectadas en distintos puertos pesqueros e identificaron la presencia de distintos stocks.

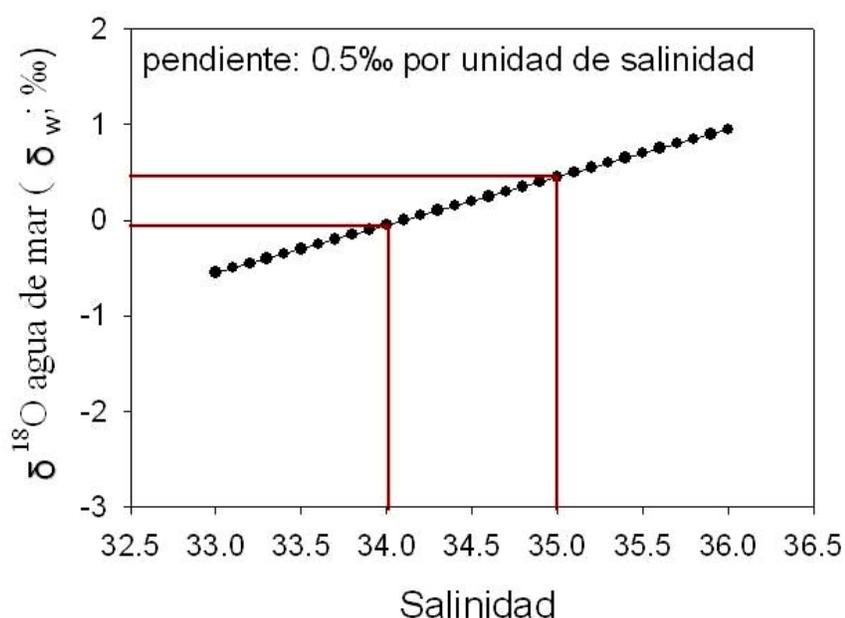
Diversos estudios demuestran que los isótopos estables de oxígeno ( $^{18}\text{O}$  y  $^{16}\text{O}$ ) se incorporan a los otolitos (y otras estructuras biogénicas de carbonato de calcio) en

equilibrio con su abundancia relativa en el agua de mar (Grossman y Ku, 1986; Kim y O'Neil, 1997; Thorrold *et al.* 1997; Begg y Weidman 2001). Sin embargo, hay mayor discriminación en contra del isótopo pesado a temperaturas más altas, por lo cual hay una relación negativa entre los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y la temperatura de depositación del carbonato (Kim y O'Neil, 1997; Thorrold *et al.* 1997; Campana, 1999). Dado que la discriminación isotópica en contra del  $^{18}\text{O}$  (fraccionamiento) en función de la temperatura es predecible, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  se pueden utilizar para estimar la temperatura a la cual se depositó el carbonato en los otolitos, siempre y cuando se utilicen los mismos valores  $\delta w$  para calcular la temperatura (Kalish, 1991a; Iacumin *et al.* 1992; Thorrold *et al.* 1997; Radke *et al.* 1998; Begg *et al.* 2005) (Figura 2).



**Figura 2.** Relación entre la temperatura y la composición isotópica de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de el carbonato de otolitos de peces con base en la ecuación de Campana (1999), quien la calculó a partir de evaluaciones empíricas y estudios de precipitación de carbonato realizados bajo condiciones controladas. Se observa una relación negativa entre la temperatura y la composición isotópica del oxígeno del carbonato (5 °C por cada 1 ‰) a un valor de  $\delta w$  constante.

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de los otolitos pueden ser utilizados como un registro de la temperatura muy precisos ( $\pm < 1\text{ }^\circ\text{C}$ ) cuando se conoce la composición isotópica del agua ( $\delta_w$ ) (Thorrold *et al.* 1997; Campana, 1999; Hoie *et al.* 2004a). Sin embargo, si se desconoce la composición isotópica del agua ( $\delta_w$ ) se puede usar la salinidad como indicador de la composición isotópica del agua (Craig y Gordon, 1965; Paul *et al.* 1999). Los valores de  $\delta_w$  covarían con la salinidad en el agua de mar, ya que los procesos de evaporación, precipitación y aporte de agua dulce influyen de manera similar sobre ambas variables (Craig, 1965; Craig y Gordon, 1965; Sharp, 2007). La relación entre la salinidad y la composición isotópica es positiva (Figura 3).



**Figura 3.** Relación entre la composición isotópica de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) del agua de mar ( $\delta_w$ ) con la salinidad (PSU) para aguas superficiales del noroeste del Pacífico presentada por Craig y Gordon (1965) y estudios recientes para latitudes medias (Paul *et al.* 1999). Se observa una relación positiva entre la salinidad y valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del carbonato con una pendiente de 1 PSU por cada 0.5 ‰.

En contraste, varios estudios indican que la incorporación de los isótopos estables de carbono ( $^{13}\text{C}$  y  $^{12}\text{C}$ ) a los otolitos no ocurre en estricto equilibrio isotópico con su composición en el agua de mar. Esto es consecuencia de la incorporación de carbono derivado del metabolismo durante el proceso de depositación del carbonato (Kalish, 1991b; Radke *et al.* 1998; Thorrold *et al.* 1997; Hoie *et al.* 2003). Se estima que la contribución del carbono proveniente del metabolismo es de aproximadamente 20-30%, y que el resto proviene del carbono disuelto en el agua (Weidman y Millner, 2000). Tanto la edad, la temperatura del ambiente, el nivel trófico y la profundidad del hábitat pueden influir sobre la composición isotópica del carbono de los otolitos (Hoie *et al.* 2003; Jamieson *et al.* 2004). Aunque la relación precisa entre la composición isotópica del carbono inorgánico en el agua, el alimento y el carbonato de los otolitos no ha sido bien establecida, es posible utilizar valores de  $\delta^{13}\text{C}$  para distinguir entre poblaciones de distintas áreas (Edmonds y Fletcher, 1997; Gao y Beamish, 1999; Gao *et al.* 2004).

Muchos de los estudios realizados hasta la fecha, especialmente en el caso de especies cuyos otolitos son de tamaño pequeño, reportan valores isotópicos correspondientes a otolitos enteros. Estos valores representan una integración del historial térmico en el cual habitó el organismo (Hoie y Folkvord, 2006; Valle y Herzka 2008). Valle y Herzka (2008) analizaron la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ) en otolitos enteros de sardinas jóvenes (aproximadamente de 1 año de edad) capturadas en distintas zonas a lo largo del Pacífico Mexicano y Golfo de California con la finalidad de evaluar si era posible discriminar entre subpoblaciones potenciales. Encontraron un alto nivel de variabilidad en los valores de  $\delta^{18}\text{O}$ , y sugirieron que esto es consistente con mezcla durante el primer año de la vida de las sardinas. Sin embargo, señalaron que las composiciones isotópicas correspondían a todo el periodo de vida de cada sardina, y que la resolución temporal que se puede obtener utilizando el otolito entero en cuanto a la identificación de la zona de crianza es limitada.

## **I.5 Planteamiento del problema y justificación**

El objetivo de este estudio es evaluar si las estimaciones de la temperatura de crianza de la sardina del Pacífico calculadas a partir de la composición isotópica del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) del carbonato del núcleo es útil para la identificar las zonas de crianza de la subpoblaciones “fría” y “templada”. Considerando que las sardinias capturadas durante la época de migración sureña de la subpoblación “fría” se encuentran frente a Ensenada durante el invierno/primavera, y que estas corresponden a la subpoblación “fría” y a la subpoblación “templada”, basandonos en las capturas asociadas a temperaturas que generaron el modelo de Felix-Uraga *et al.* 2004 y la variación morfométrica de otolitos que sugiere mezcla entre subpoblaciones en esa época. Por lo que se plantea la hipótesis de que las temperaturas retrocalculadas a partir de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del carbonato de los núcleos serán consistentes con la de las zonas de crianza propuestas para ambas subpoblaciones (para la subpoblación “fría” el rango de temperaturas es de 12 a 16 °C y para la subpoblación “templada” es de 18 a 22 °C).

## II. OBJETIVOS

### II.1 Objetivo General

Caracterizar la variación en los valores de la composición isotópica de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) del carbonato de núcleos de otolitos de sardinas capturadas por la flota de El Puerto del Sauzal, Baja California, en febrero del 2008 para evaluar si las temperaturas retrocalculadas a partir de estos valores son consistentes con las de la zona de crianza de las subpoblaciones “fría” y “templada”.

### II.2 Objetivos específicos

1. Determinar la edad de sardinas recolectadas en febrero del 2008 para calcular el año y la temporada de nacimiento.
2. Caracterizar las condiciones oceanográficas (salinidad y temperatura) del hábitat de crianza a las que estuvieron expuestas las sardinas durante su época de crianza
3. Estimar el periodo de tiempo que integra la señal isotópica obtenida de los núcleos de los otolitos por medio del análisis de su microestructura (mediciones del ancho de anillos diarios)
4. Retrocalcular la temperatura de crianza con base en valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del carbonato de los núcleos y relaciones regionales entre la composición isotópica del agua ( $\delta_w$ ) y la salinidad.
5. Comparar la temperatura retrocalculadas a partir de valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de los núcleos de las sardinas con las temperaturas superficiales del mar (TSM) correspondientes a las zonas de crianza de la subpoblación “fría” y “templada”.

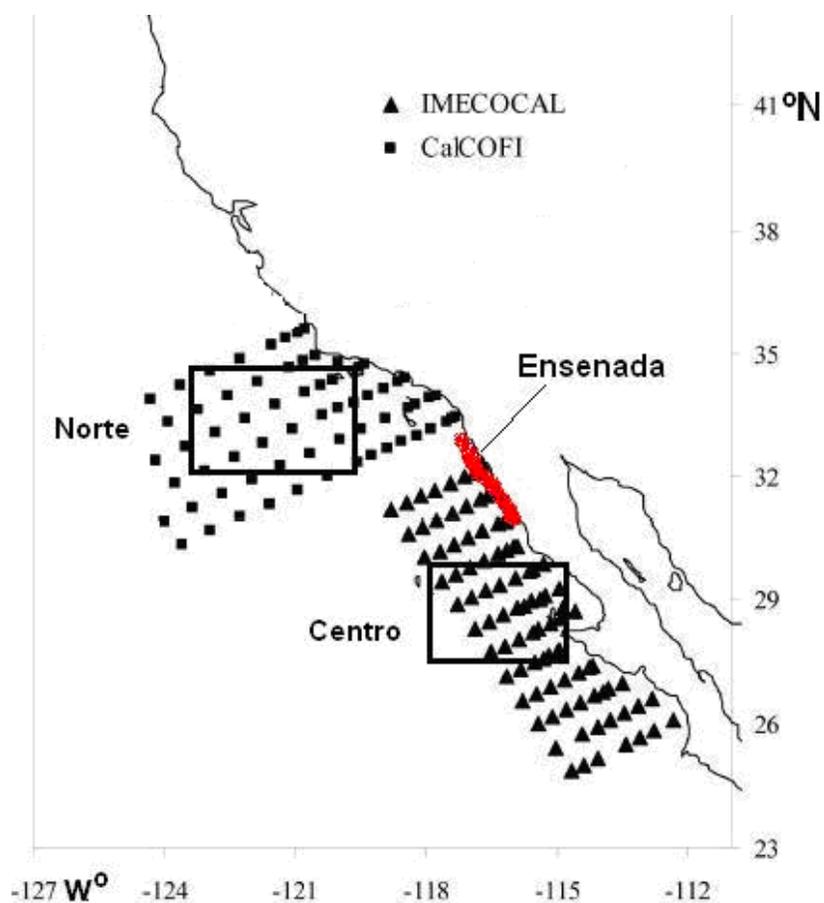
### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### III.1 Área de estudio

La Corriente de California (CC) se origina a los 50° N (Sverdrup *et al.* 1970) frente a Vancouver, Canadá y fluye en dirección al ecuador a lo largo de la costa oeste de EE.UU. y la costa de Baja California, México (Lynn y Simpson, 1987). Es una corriente superficial (0-300 m) que fluye de paralela a la costa con un ancho aproximado de 700 km. La región central y sur de CC presenta muchas de las características principales típicas de una corriente limitrofe de frontera oriental ya que presenta surgencias costeras (Huyer, 1983) con influencia hasta 25 km fuera de la costa (Amador Buenrostro, 1975) frente a Baja California en respuesta a vientos a lo largo de la costa. Tiene un flujo superficial predominante hacia el ecuador, y una contracorriente subsuperficial dirigida hacia el polo que fluye a lo largo del talud continental (Durazo y Baumgartner, 2002). Cerca de la superficie confluyen la masa de Agua Subártica (ASA) transportada hacia el sur por el flujo de la Corriente de California (CC), así como el Agua Tropical Superficial (ATS) y el Agua Subtropical Superficial (AStS) que provienen del sur y suroeste de la península (Lynn y Simpson 1987). Debajo de la superficie (100–400 m) el flujo hacia el polo de la Contracorriente de California (CCC) acarrea Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESs) (Durazo y Baumgartner, 2002; Durazo *et al.* 2010).

El área de estudio abarca las zonas de desove de la subpoblaciones “fría” (la zona “norte” en este estudio) y la “templada” (la zona “central”). La subpoblación “fría” está entre 35 ° N 123° O- 33° N 126° O y 32° N 120 ° O- 30° N 125 ° O (desde Punta Concepción, California, hasta el Southern California Bight (SCB) y la zona norte de Baja California. La zona de desove de la subpoblación “templada” está entre 31° N 119° O-30° N 121° O y 26 ° N 116° O- 25 ° 120 ° O entre los 30° y 35° N, y abarca desde Punta Baja hacia Punta Eugenia (Figura 4). Ambas regiones no están influenciadas por descargas continentales de agua y la época de surgencias es durante la primavera. Las zonas incluidas dentro del análisis excluyen las zonas de surgencia. La zona norte se caracteriza por tener una

circulación local caracterizada por un giro en el (SCB). Los cambios en las corrientes y la mezcla entre las masas de agua resultantes establecen muchas de las condiciones que modulan la diversidad biológica y la variabilidad química en la región (Durazo y Baumgartner 2002; Bograd y Lynn, 2003; Gaxiola-Castro *et al.* 2008).



**Figura 4.** Mapa de la zona de estudio. Se muestran las áreas que abarcan los datos usados para la estimación de salinidad de los reportes de CalCOFI y el área que abarcan las estimaciones de TSM de las imágenes de satélite. En los recuadros se indican la zona norte (35 ° N 123° O- 33° N 126° O y 32° N 120 ° O- 30° N 125 ° O) y la zona centro (31° N 119° O-30° N 121° O y 26 ° N 116° O- 25 ° 120 ° O entre los 30° y 35° N), en las cuales se han caracterizado los desoves de sardina. El área en la cual opera la flota pesquera del Puerto de El Sauzal está señalada con rojo. Modificado del CalCOFI Rep., Vol. 48, 2007.

### III.2 Obtención de muestras de sardina del Pacífico

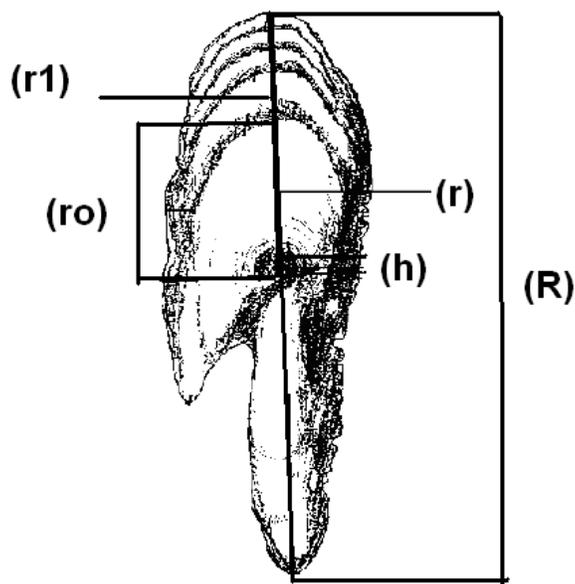
Las sardinas se colectaron aprovechando desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California. Se recolectaron 3600 sardinas de febrero de 2008 a marzo de 2009 en muestreos quincenales donde aproximadamente se recolectaron 150 sardinas por muestreo, se obtuvieron los registros de la zona de pesca y fecha de captura. Durante diferentes épocas del año la flota de Ensenada podría estar capturando la subpoblación “fría” (durante el invierno, primavera y verano), o la subpoblación “templada” (durante el verano, otoño e invierno) (Félix-Uraga *et al.* 2005). Las sardinas frescas fueron etiquetadas individualmente y se les midió la longitud total ( $LT \pm 1$  mm), la longitud estándar ( $LE \pm 1$  mm) y el peso total ( $\pm 1$  g). Posteriormente las sardinas se embolsaron y fueron almacenadas en un congelador.

Con base en la distribución de frecuencias de tallas de toda la muestra se seleccionaron las sardinas capturadas el 25 de febrero de 2008, considerando el modelo de estructura poblacional y patrones de migración propuestos por varios autores (Lluch-Belda *et al.*, 1991; Félix-Uraga *et al.*, 1996; Félix-Uraga *et al.* 2005), estas sardinas (las capturadas durante febrero de 2008) podrían ser representativas de la subpoblación “fría” (zona norte) y “templada” (zona centro). De la distribución de tallas, se eligió trabajar con sardinas escogidas al azar de las dos modas principales.

Utilizando los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  obtenidos por Valle y Herzka (2008), se hizo un análisis de poder para obtener una estimación del número de valores isotópicos necesarios para diferenciar estadísticamente entre subpoblaciones potenciales de sardinas ( $n=20$  de cada moda). Se seleccionaron veinte individuos al azar de cada moda para extraer los otolitos sagita de las sardinas utilizando un microscopio estereoscopio. Cada par de otolitos fue limpiado con un pincel y una solución jabonosa y se enjuagó con agua destilada para eliminar residuos orgánicos. Una vez secos, se colocaron en cápsulas de gel con etiquetas de identificación para su almacenamiento y posterior estimación de la edad.

### III.3 Estimación de la edad

La edad se determinó contando el número de bandas de crecimiento de los otolitos que se observan de manera alternada como una zona opaca y una traslucida (hialina) (Barnes y Foreman, 1994; Yaremko, 1996; Quiñónez-Velázquez *et al.* 2002). Dos lectores estimaron la edad de manera independiente y se registro el tipo de borde (opaco o hielino). Para estimar la naturaleza temporal de la formación de las bandas de crecimiento, se graficó por estación del año el porcentaje de otolitos con margen opaco. De las sardinas capturadas en febrerero se extrajeron un total de 40 pares de otolitos y se digitalizó la imagen del otolito derecho y sobre ella midieron los siguientes parámetros a lo largo de su eje principal: Diámetro ( $R \pm 1\mu\text{m}$ ), radio ( $r \pm 1\mu\text{m}$ ), distancia del centro al borde ( $h \pm 1\mu\text{m}$ ), desde el núcleo radio al primer opaco ( $r_0 \pm 1\mu\text{m}$ ) y radio al primer hialino ( $r_1 \pm 1\mu\text{m}$ ) (Figura 5). Las imágenes se tomaron con un sistema video-digitalizador del Laboratorio de Dinámica de Poblaciones del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional, y las mediciones se hicieron utilizando el programa SigmaScan Pro (Jandel Scientific, San Rafael CA 94912-7005).



**Figura 5.** Esquema de las mediciones realizadas a los otolitos de sardinas del Pacífico. Diámetro ( $R \pm 1\mu\text{m}$ ), radio ( $r \pm 1\mu\text{m}$ ), distancia del centro al borde ( $h \pm 1\mu\text{m}$ ), desde el núcleo radio al primer opaco ( $r_0 \pm 1\mu\text{m}$ ) y radio al primer hialino ( $r_1 \pm 1\mu\text{m}$ ). Modificado de Quiñónez-Velázquez *et al.* 2002.

#### III.4 Preparación de otolitos para análisis isotópicos

Los estudios realizados hasta la fecha indican la ausencia de diferencias isotópicas entre pares de otolitos sagita de un mismo pez (Iacumin *et al.* 1992, Thorrold *et al.* 1997, Hoie *et al.* 2003). Por lo tanto, se utilizó un otolito del par para su análisis isotópico. El procedimiento de limpieza de los otolitos tiene como finalidad eliminar tejido adherido y la matriz proteica asociada al carbonato de calcio. Los otolitos se colocaron en viales con tapa (previamente limpiados con jabón, enjuagados con agua y enjuagados finalmente con agua destilada) y se les agregó 200  $\mu\text{l}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 15% (Andrus *et al.* 2002). Los viales se colocaron en un sonicador (Ultrasonic Cleaner W/5 MIN TMR) por 4 a 5 minutos, y luego los otolitos fueron enjuagados varias veces con agua destilada y secados completamente en una estufa a 20 °C durante 30 min.

Para obtener acceso a material depositado durante el periodo en el que la sardina estuvo en el hábitat de crianza se montaron los 40 otolitos (de sardinas capturadas en febrero de 2008) en porta objetos de cristal con pegamento de contacto Krazy Glue y se pulió con lijas de 14.5  $\mu\text{m}$  y 6.5  $\mu\text{m}$  de porosidad con el fin de revelar el plano transversal en el cual los anillos diarios de crecimiento de la etapa larval (el núcleo) estén claramente expuestos (Weidman y Millner, 2000; Kennedy *et al.* 2002; Hoie *et al.* 2004b).

### **III.5 Análisis isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ de los núcleos**

Para la obtención de submuestras del núcleo de cada otolito, se utilizó el sistema MicroMill de New Wave Research (Merchantek Products). El sistema consiste en un estereoscopio de alta resolución acoplado a una cámara de video digital a color. El estereoscopio cuenta con una platina automatizada con un alto nivel de resolución espacial (0.25  $\mu\text{m}$ ) y con capacidad de movimiento en las direcciones XYZ y un microtaladro hecho de acero de cobalto controlado por computadora. El sistema cuenta con el programa necesario para controlar la platina y taladro. El área que se pretende taladrar es en promedio de 350  $\mu\text{m}$  x 350  $\mu\text{m}$  x 70  $\mu\text{m}$ . Los otolitos, el microtaladro y todo el instrumental fueron limpiados con helio a presión y limpiados con etanol con el fin de evitar la contaminación entre submuestras. Una vez que se obtuvo una la muestra, el carbonato del núcleo se transfiere a una porcelana (previamente pesado en la microbalanza) para así obtener el peso de cada muestra en la microbalanza ( $\pm 0.000001$  g), después es depositado en un vial especial (Wheaton 986253 0.3 ml V-Vial screw cap) para muestras pequeñas. El peso mínimo para poder analizar una muestra es de 20  $\mu\text{g}$ . Las muestras de carbonato tuvieron en promedio de 32  $\mu\text{g}$  el intervalo de peso de las muestras enviadas fue de 20  $\mu\text{g}$  a 62  $\mu\text{g}$

Para analizar la composición isotópica del carbonato de calcio de los otolitos, las muestras se enviaron al WHOI Micropaleontology Mass Spec Facility y fueron analizadas en el espectrómetro de masas MAT253/KielIV, con el cual se puede analizar muestras de  $\geq 20$   $\mu\text{g}$  con una precisión de  $\pm 0.07$  ‰ para oxígeno y de  $\pm 0.03$  ‰ para carbono. Durante el

análisis de muestras se analizaron muestras del estándar secundario de laboratorio NBS19. Los valores isotópicos de carbonato se reportan con respecto al estándar universal PDB.

### **III.6 Evaluación de la resolución temporal de las submuestras de otolitos**

Se obtuvieron imágenes de los otolitos de pulidos y con el núcleo expuesto. Esto se realizó utilizando el sistema de análisis de imágenes del Laboratorio de Ecología Pesquera del CICESE. El sistema consiste en un microscopio Leica con cámara de digital y una computadora con los programas necesarios para capturar imágenes, utilizando SigmaScan Pro (Jandel Scientific, San Rafael CA 94912-7005) se realizaron las mediciones del ancho de anillos diarios. Las imágenes que se utilizaron para las mediciones fueron las de 40x. Se estimó el ancho de los anillos diarios en el mismo eje trazado por la mitad del núcleo del otolito en dirección anterior a posterior (Figura 5 (R)), midiendo entre 10 y 15 anillos por imagen (n=50). Con base en el ancho entre anillos diarios que se depositan durante los primeros meses de vida (Butler, 1987) y el área que se taladró, se estimó la resolución temporal (días) que integró la señal del carbonato.

### **III.7 Estimación de los valores regionales de $\delta_w$**

Se usó la relación entre los valores de  $\delta_w$  y la salinidad con base a los datos propuestos por Craig y Gordon (1965) para aguas superficiales del Pacífico Oriental y Paul *et al.* (1999) para latitudes intermedias. Sin embargo, para estimar los valores isotópicos del agua que concuerden con la etapa larval (calculadas con las determinaciones de edad) de las sardinas capturadas el 25 de febrero de 2008 y tener mayor precisión, se generaron mapas de las regiones (zona norte: 35 ° N 123° O- 33° N 126° O y 32° N 120 °O- 30° N 125 ° O; zona centro: 31° N 119° O-30° N 121° O y 26 ° N116° O- 25 ° 120 °O) donde potencialmente cada subpoblación se crio durante la etapa larval y juvenil temprana con base en los criterios de selección (zonas reportadas por CALCOFI como centros de desove por la presencia de larvas y huevos) para los años en los que se estimó se pudieron desarrollar las

sardinias y excluyendo del hábitat las zonas de surgencias. Basado en las épocas en las que la sardina estuvo en su hábitat de crianza, se caracterizó el rango de salinidad y temperaturas observadas usando los datos obtenidos en los cruceros de CALCOFI e IMECOCAL para las temporadas y años. Con los datos de salinidad de los reportes de CALCOFI para la zona norte y la zona centro (definidas previamente) se estimó el intervalo de salinidades para las temporadas y regiones específicas en las que se estima que se criaron las sardinias. A su vez, esos intervalos se utilizaron para calcular valores  $\delta_w$ , y posteriormente estimar el un rango mínimo y máximo de temperatura en el cual pudieron desarrollarse las sardinias durante sus primeros 50 a 70 días. Esta estrategia se usó para tomar en consideración variaciones locales de  $\delta_w$  en los retrocálculos de temperatura.

### III.8 Reconstrucción de la temperatura

Campana (1999) propuso la siguiente ecuación para retrocalcular temperatura a partir de mediciones de la composición isotópica de oxígeno de los otolitos de peces óseos:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}} - \delta_w = 3.71 - 0.206 T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

La ecuación de Campana (1999) se deriva de la relación empírica derivada por Kim y O'Neil (1997), la cual se basa en el fraccionamiento que se observa durante la precipitación de calcita bajo condiciones controladas de temperatura. Campana (1999) adecuó esta ecuación para aragonito utilizando valores de fraccionamiento isotópico de la literatura. La ecuación de Campana (1999) es similar a la derivada empíricamente para diversas especies de peces marinos y otros organismos que depositan aragonito, como algunos moluscos y otras especies de peces (Grossman y Ku, 1986; Radtke *et al.* 1996; Thorrold *et al.* 1997; Hoie *et al.* 2004b), y por lo tanto refleja consideraciones termodinámicas. Para retrocalcular la temperatura, es necesario aplicar una corrección de +0.26 ‰ a los valores del agua ( $\delta_w$ ) para tomar en cuenta la diferencia en los estándares utilizados para reportar los valores isotópicos del agua y carbonatos biogénicos (V-SMOW vs. PDB Sharp, 2007). Los valores

de  $\delta^{18}\text{O}$  obtenidos se utilizaron para estimar las temperaturas de crianza (**TSal** <sub>MIN</sub>: temperatura estimada con salinidad mínima y **TSal** <sub>MAX</sub>: temperatura estimada con salinidad máxima) y así evaluar el hábitat de crianza potencial en los mapas generados previamente.

### **III.9 Evaluación de la variabilidad isotópica en los otolitos en función del hábitat de crianza**

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  obtenidos de los otolitos de sardinas (febrero 2008) se graficaron en función de la edad de cada individuo (Schwarcz *et al.* 1998; Gao, 1999; Gao *et al.* 2004). Dado que existen variaciones en la edad de las sardinas, se utilizaron las determinaciones de la edad y la fecha de captura para estimar las épocas en la que potencialmente nacieron las sardinas. Utilizando las temperaturas recalculadas con los valores  $\delta^{18}\text{O}$  de los núcleos de otolitos, se infirió la temperatura de hábitat de crianza de las sardinas, y se evaluó si éstas coinciden con las temperaturas correspondientes a los centros de desove reportados (Smith, 1981; Hammann *et al.* 1988; Lynn, 2003) para la subpoblación “fría” y “templada”.

Los otolitos (un total de 40) de sardinas capturadas en febrero de 2008 fueron usadas para el análisis de  $\delta^{18}\text{O}$  se clasificaron como pertenecientes a sardinas de la subpoblación “fría” y “templada” según el modelo de Félix-Uraga *et al.* (2005) y se evaluó si las temperaturas recalculadas a partir de los valores isotópicos  $\delta^{18}\text{O}$  son similares a los observados por imágenes de TSM.

Se generó una climatología de la temperatura superficial del mar (TSM) para el área de estudio a partir de imágenes de satélite de promedios mensuales para el periodo 2002 al 2009. Se generaron mapas usando las TSM de imágenes del satélite Aqua Modis (resolución de  $9\text{ km}^2$ ) para la costa oeste de EE.UU y México. Esta climatología se usó para Se usó la temperatura superficial del mar como una aproximación de la temperatura en la cual se desarrollaron las sardinas capturadas en febrero del 2008. Para evaluar si las

temperaturas retrocalculadas a partir de los valores isotópicos  $\delta^{18}\text{O}$  eran similares a las TSM, del año y temporada de nacimiento, se compararon las temperaturas retrocalculadas de los núcleos de otolitos con las TSM de cada temporada y región de estudio (38° N- 122° O a 38° N – 127° O y 22° - 110°O a 22° N - 127° O, zona norte y centro, respectivamente). Se analizaron los promedios mensuales y desviaciones estándar por temporada (primavera, verano y otoño), para comparar con los valores de temperatura reportados en literatura como característicos del hábitat de crianza para las subpoblaciones “fría” y “templada”. La desviación estándar de la TSM es indicativa del nivel de variabilidad regional y temporal.

Se usaron temperaturas retrocalculadas con los rangos mínimos y máximos de salinidad para cada zona (norte y centro), obteniendo cuatro valores de temperatura para cada sardina (dos valores pertenecientes a la zona norte asociada con los centros de desove de la subpoblación “fría” y los otros dos pertenecientes a la zona central asociada con la subpoblación “templada”).

## IV. RESULTADOS

### IV.1 Características biológicas de las sardinas

La longitud estándar (LE) de las 3600 sardinas recolectadas de los desembarques en el Puerto El Sauzal, Baja California, desde febrero del 2008 a marzo del 2009 varió entre un mínimo de 102 mm a un máximo de 229 mm con un promedio de 165 mm  $\pm$  15 de desviación estándar (DE) (Figura 6). Las sardinas más grandes (LE 183  $\pm$  10 mm) fueron capturadas el 29 de agosto del 2009 y las más pequeñas (147  $\pm$  6 mm) el 2 de abril y 5 de mayo, respectivamente (Tabla I). En general, las sardinas capturadas durante la transición de las estaciones invierno-primavera (capturadas el 25 de febrero de 2008) y verano-otoño (19 y 30 de septiembre de 2008) muestran un amplio intervalo de tallas y una mayor desviación estándar en comparación con las demás muestras, y exhiben distribuciones bimodales en sus estructuras de tallas (Figura 7 y Tabla I). Los análisis isotópicos  $\delta^{18}\text{O}$  se hicieron con otolitos de sardinas capturadas el 25 de febrero de 2008 (17  $\pm$  16 mm y un intervalo de tallas de 136 a 229 mm) para los análisis isotópicos. Este grupo de sardinas tenía una distribución bimodal en su estructura de tallas. Las dos modas de tallas (n= 20 de cada grupo) representaron sardinas chicas 159  $\pm$  4 mm LE con valores mínimos y máximos de 151 / 165 mm LE y sardinas grandes de 189  $\pm$  7 mm LE con valores mínimos y máximos de 182 / 205 mm LE (Tabla II).

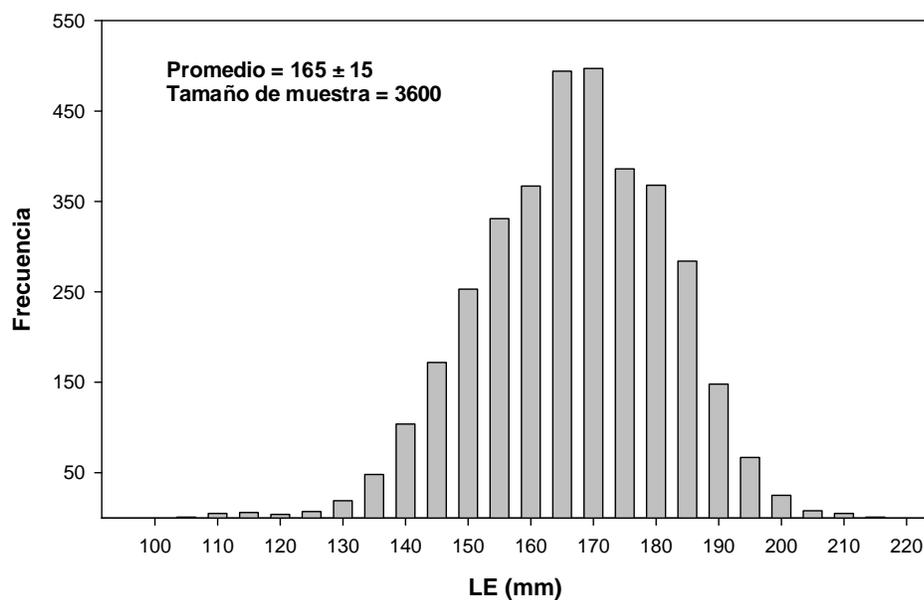
**Tabla I.** Fecha de captura, número, longitud estándar y peso total de la sardina del Pacífico *Sardinops sagax*, recolectadas de los desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, desde febrero del 2008 a marzo del 2009. En gris se señala la muestra de donde se obtuvieron los otolitos para realizar los para análisis isotópicos  $\delta^{18}\text{O}$  del carbonato de sus otolitos. **x**: media, **DE**: desviación estándar, **Min**: valor mínimo y **Max**: valor máximo.

Fecha de captura	Número de sardinas procesadas	Zona de Pesca	Longitud estándar (mm)		Peso (g)	
			x± DE	Min / Max	x± DE	Min /Max
16 febrero 2008	150	Rosarito	162 ± 6	147 / 184	50 ± 7	35 / 92
25 febrero 2008	119	La Misión	173±16	136 / 229	63 ± 19	27 / 138
4 marzo 2008	181	Rosarito	154 ± 9	133 / 188	41 ± 8	24 / 68
14 marzo 2008	150	Punta Colonet	163 ± 9	145 / 200	54 ± 11	34 / 102
2 abril 2008	150	Punta Colonet	147 ± 6	130 / 165	41 ± 6	27 / 61
15 abril 2008	150	La Soledad	148 ± 7	132 / 164	40 ± 7	26 / 58
5 mayo 2008	150	Bahía de Todos Santos	147 ± 6	129 / 166	39 ± 5	25 / 56
22 mayo 2008	140	Bahía de Todos Santos	165 ± 6	150 / 190	55 ± 7	41 / 90
2 junio 2008	160	Bahía de Todos Santos	164 ± 9	130 / 178	54 ± 8	27 / 69
26 junio 2008	150	Bahía de Todos Santos	158 ± 6	143 / 172	49 ± 6	35 / 63
17 julio 2008	150	La Misión	155 ± 7	127 / 168	48 ± 6	30 / 64
31 julio 2008	150	La Misión	173 ± 9	148 / 205	70 ± 12	40 / 116
21 agosto 2008	150	Punta Colonet	168 ± 7	152 / 184	66 ± 8	47 / 87
29 agosto 2008	150	Punta Colonet	183 ± 10	140 / 206	83 ± 13	33 / 112
19 septiembre 2008	150	Punta Colonet	153 ± 20	102 / 185	52 ± 20	13 / 90
30 septiembre 2008	150	Punta Colonet	165 ± 22	106 / 199	62 ± 21	14 / 122
20 octubre 2008	150	No reportado	172 ± 11	135 / 197	64 ± 12	28 / 95
30 octubre 2008	150	La Soledad	173 ± 11	142 / 194	62 ± 11	32 / 86

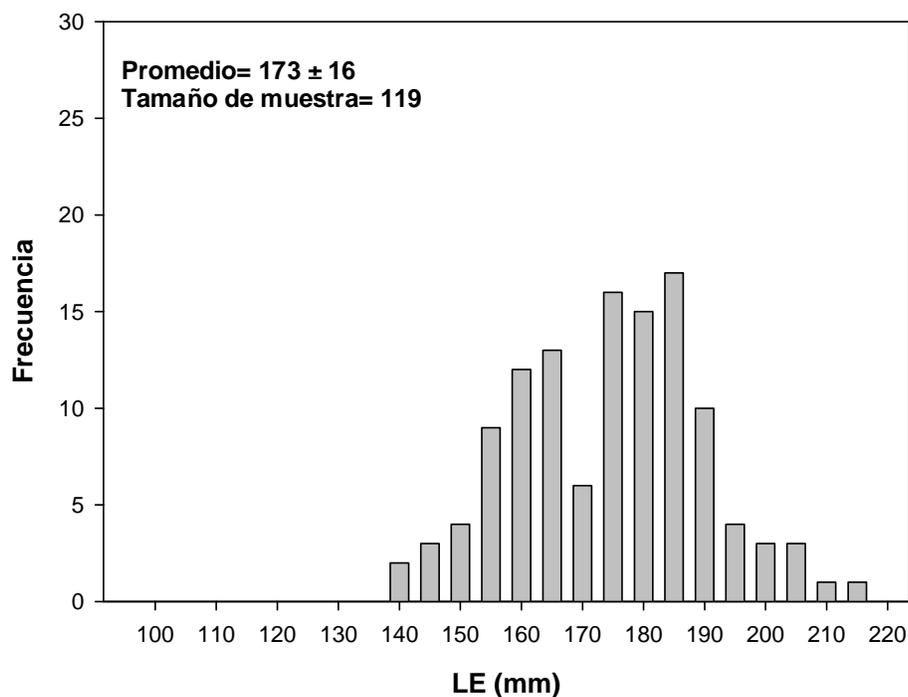
19 noviembre 2008	150	No reportado	176 ± 12	128 / 207	66 ± 13	27 / 102
11 diciembre 2008	150	No reportado	171 ± 11	125 / 193	62 ± 11	22 / 97
2 enero 2009	150	No reportado	175 ± 11	149 / 202	65 ± 11	39 / 94
23 de enero 2009	150	No reportado	175 ± 10	137 / 203	67 ± 11	27 / 110
30 de enero 2009	149	No reportado	177 ± 10	150 / 208	65 ± 11	42 / 103
18 de marzo 2009	151	No reportado	166 ± 7	144 / 187	59 ± 7	37 / 91
<b>Total</b>	<b>3600</b>	<b>Total</b>	<b>165 ± 15</b>	<b>102 / 229</b>	<b>57 ± 16</b>	<b>13 / 138</b>

#### IV.2 Edades y dimensiones de los otolitos

Las sardinas pertenecientes al grupo de tallas chicas (150 a 165 mm) fue homogéneo en cuanto a sus edades; se estimó una edad promedio de  $2.5 \pm 0$  años DE. Para el grupo de de tallas grandes (180 a 205 mm) se estimó una edad promedio de  $3.5 \pm 0.7$  años con un intervalo de edades de 2.0 hasta 4.5 años (Tabla II). Las edades de 2.5 y 3.5 años representaron el 76% de las sardinas de esta muestra (Figura 7). El 92% de los otolitos presentaron borde hialino. Al estimar la temporada en la cual las sardinas nacieron (con base en la edad) y se desarrollaron en el hábitat de crianza, observamos que el 90% se desarrolló desde finales del verano a principios de otoño de los años 2003, 2004 y 2005 (con un error de  $\pm 3$  meses aproximadamente).



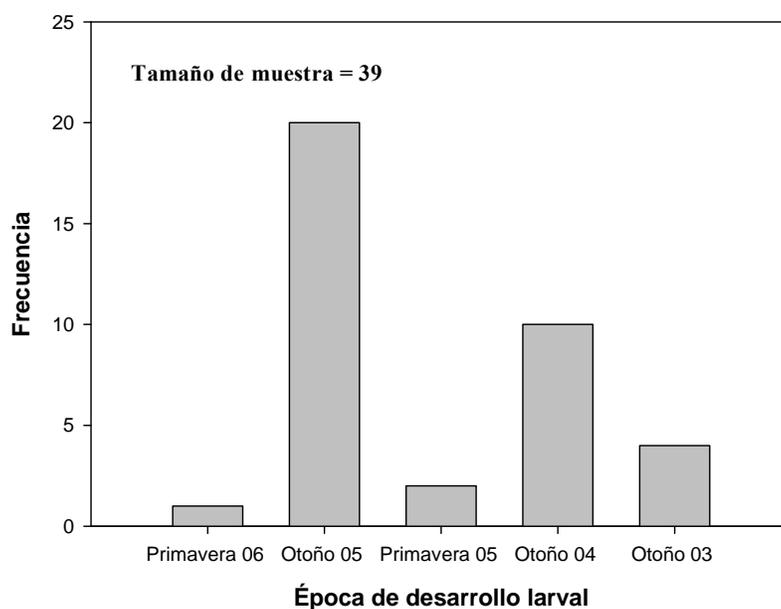
**Figura 6.** Distribución de frecuencias de tallas (LE= longitud estándar) de la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax*) recolectadas de desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México de febrero 2008 a marzo 2009. Se recolectaron ~150 sardinas cada dos semanas. Los intervalos de tallas son de 10 mm (e.g. 101-110 mm LE).



**Figura 7.** Distribución de frecuencias de tallas (LE= longitud estándar) de sardinas del Pacífico (*Sardinops sagax*) recolectadas de desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México del 25 de febrero 2008. Los intervalos de tallas son de 10 mm (e.g. 101-110 mm LE). Se seleccionaron 20 sardinas de las dos modas principales de la distribución para los análisis isotópicos: un grupo de sardinas de tallas chicas (150 mm a 165 mm LE) y uno de tallas grandes (180 mm a 205 mm LE).

**Tabla II.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  obtenidos del carbonato de los núcleos de otolitos (40 otolitos) de la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax*). Grupo de tallas chicas (150 a 165 mm LE) y tallas grandes (180 mm a 205 mm LE) colectadas el 25 de febrero del 2008 en desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México. **x**: media, **DE**: desviación estándar, **Min**: valor mínimo y **Max**: valor máximo.

<b>Chicas</b>	<b>x ± DE</b>	<b>Min / Max</b>
<b>LE (mm)</b>	159 ± 4	151 / 165
<b>Edad (años)</b>	2.5 ± 0	2.5 / 2.5
<b><math>\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}</math> (‰)</b>	-0.3 ± 0.4	-1.1 / 0.5
<b>Grandes</b>		
<b>LE (mm)</b>	189 ± 7	182 / 205
<b>Edad (años)</b>	3.5 ± 0.7	2 / 4.5
<b><math>\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}</math> (‰)</b>	-0.2 ± 0.4	-0.8 / 0.5



**Figura 8.** Número de sardinas (*Sardinops sagax*) clasificadas por estación del año (temporadas de crianza específica) con base en la fecha de captura y a la determinación de edad obtenida de la lectura de sus otolitos. Se evaluaron sardinas de tallas chicas (150 a 165 mm LE) y tallas grandes (180 a 205 mm LE) de una submuestra de las sardinas recolectadas el 25 de febrero del 2008 en desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México.

### **IV.3 Resolución temporal correspondiente a la zona de extracción de carbonato de los núcleos**

El ancho de los primeros diez anillos diarios de los núcleos de los otolitos varió entre 1 y 6  $\mu\text{m}$ , con un promedio de todas las mediciones de  $2.7 \pm 1 \mu\text{m}$ , lo cual es consistente con los valores reportados por Butler (1997) y Martínez-Pecero (2003) para larvas de sardina criadas bajo condiciones de laboratorio. Dado que de cada núcleo se extrajo carbonato de un área de  $350 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$  (ancho, largo y profundidad, centrado en el núcleo) estimamos que el carbonato analizado integra la temperatura de entre 50 y 70 días. Por lo

tanto, las temperaturas retrocalculadas a partir de los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  están dentro del tiempo que equivale la duración de una temporada o estación climática (Tabla III).

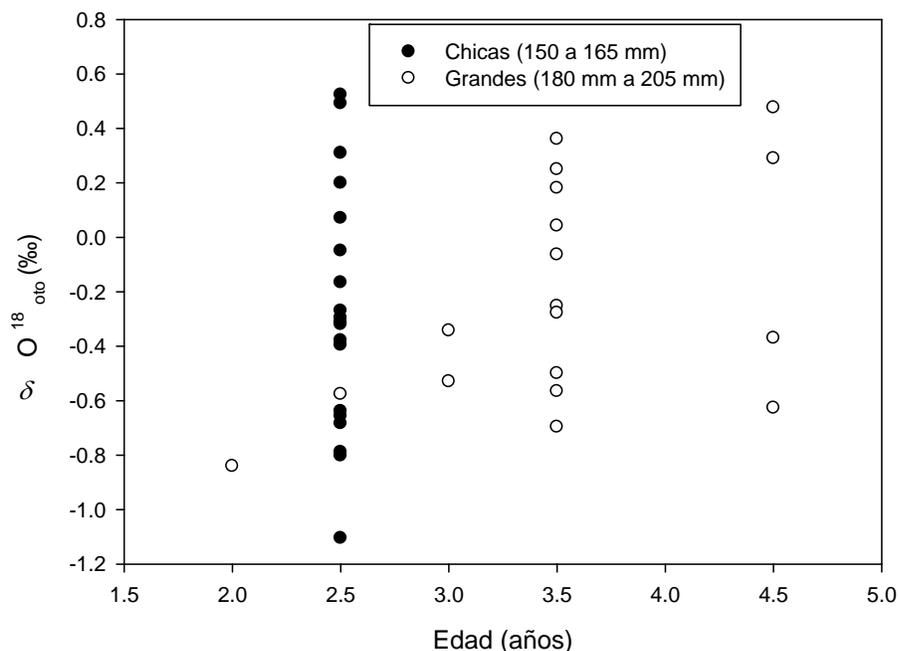
**Tabla III.** Ancho de anillos diarios del periodo larvario medido a lo largo del radio (ver figura metodología) en los núcleos de 50 otolitos de sardinas (*Sardinops sagax*) capturadas entre febrero 2008 y marzo de 2009. Los valores se presentan en micras. **x**: media, **DE**= desviación estándar, **Mi**: valor mínimo y **Max**: valor máximo.

Anillo ( $\mu\text{m}$ )	$x \pm \text{DE}$	Min / Max
<b>1</b>	$2.7 \pm 1$	1 / 5
<b>2</b>	$2.4 \pm 1$	1 / 5
<b>3</b>	$2.5 \pm 1$	1 / 5
<b>4</b>	$2.5 \pm 1$	2 / 6
<b>5</b>	$2.4 \pm 1$	2 / 5
<b>6</b>	$2.5 \pm 1$	2 / 5
<b>7</b>	$2.8 \pm 1$	2 / 5
<b>8</b>	$2.5 \pm 1$	2 / 6
<b>9</b>	$3.1 \pm 1$	2 / 6
<b>10</b>	$4 \pm 1$	2 / 6

#### IV.4 Valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$

El promedio de los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  de las 39 sardinas de febrero del 2008 fue de  $-0.5 \pm .4$  ‰ (DE) con un intervalo de  $-1.1$  ‰ a  $0.1$  ‰. El grupo de sardinas pequeñas presentó un mayor intervalo de valores ( $-1.1$  ‰ a  $0.5$  ‰) y una media de  $-0.3$  ‰, mientras que para el caso del grupo grande su intervalo de valores fue  $-0.8$  ‰ a  $0.5$  ‰ y su media  $-0.2$  ‰ (Tabla II). Agrupando los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  en función de la talla, observamos que no hay relación clara con los valores isotópicos (Figura 9). Por ejemplo, el 50% de los datos corresponden a sardinas de 2.5 años de edad (Figura 10), y estas exhiben un amplio rango de valores isotópicos ( $-1.1$  a  $0.5$  ‰). Las sardinas de 3.5 años presentaron un rango de valores un poco menor ( $-0.7$  ‰ a  $0.4$  ‰), y en el caso de las sardinas de 4.5 años de edad se observan dos pequeños grupos: unas con valores empobrecidos en  $^{18}\text{O}$  ( $-0.5$  ‰) y con valores más enriquecidos ( $0.4$  ‰), aunque para estas últimas hay muy pocos datos.





**Figura 10.** Valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  (‰) del carbonato extraído de los núcleos de otolitos de sardinas (*Sardinops sagax*) recolectadas el 25 de febrero del 2008 en desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México, en función de su edad. Tallas chicas (150 a 165 mm LE) y tallas grandes (180 a 205 mm LE).

#### IV.5 Variación en la salinidad

Para las temporadas en las cuales se estima que las sardinas estuvieron en su hábitat de crianza, la salinidad en la zona norte (subpoblación “fría”) y centro (subpoblación “templada”) no presentó diferencias absolutas mayores a 0.5 PSU, ni diferencias en la temperatura mayor a 4 °C a 10 m. La salinidad y temperatura en la zona centro (asociada con la zona de desove subpoblación “templada”) es la que presentó menos variación, recordando que los datos obtenidos de los reportes de CALCOFI excluyeron las zonas de surgencia (Tabla IV).

**Tabla IV.** Valores máximos y mínimos de salinidad y temperatura a 10 m de reportes de cruceros CALCOFI e IMECOCAL (Goericke *et al.* 2004; Goericke *et al.* 2005; Peterson *et al.* 2006; Goericke *et al.* 2007; (zona norte (subpoblación “fría”): 35 ° N 123° O- 33° N 126° O y 32° N 120 ° O- 30° N 125 ° O) (zona centro (subpoblación “templada”): 31° N 119° O- 30° N 121° O y 26 ° N 116° O- 25 ° 120 ° O). Se excluyeron las zonas de surgencia cercanas a la costa. Los periodos evaluados corresponden a las temporadas de crianza estimadas para sardinas de tallas chicas (150a 165 mm LE) y de tallas grandes (180a 205 mm LE) colectadas el 25 de febrero del 2008 de desembarques pesqueros en el Puerto El Sauzal, Baja California, México. **R:** valores mínimo y máximo reportados, **DA:** diferencia absoluta (valor mínimo – valor máximo). En gris se señalan las temporadas en las que se estima que las sardinas capturadas en febrero del 2008 estuvieron presentes en su hábitat de crianza.

Temporada	Salinidad (PSU)				Temperatura (°C)			
	Norte (subpoblación “fría”)		Centro (subpoblación “templada”)		Norte (subpoblación “fría”)		Centro (subpoblación “templada”)	
	R	DA	R	DA	R	DA	R	DA
<b>Primavera 03</b>	32.7-33.3	0.6	33.3-33.5	0.2	14.5-16	1.5	15-17.5	2.5
<b>Verano 03</b>	32.7-33.3	0.6	33.2-33.5	0.3	15-19	4	17.5-20	2.5
<b>Otoño 03</b>	32.8-33.2	0.4	33.1-33.5	0.4	15.5-19.5	4	19.5-22.5	3
<b>Primavera 04</b>	32.9-33.2	0.3	33.2-33.4	0.2	13.5-15.5	2	15-18	3
<b>Verano 04</b>	32.8-33.4	0.6	33.1-33.4	0.3	15-19	4	17-20	3
<b>Otoño 04</b>	32.8-33.3	0.5	33.2-33.5	0.3	15-19	4	18-21	3
<b>Primavera 05</b>	33-33.2	0.2	33.2-33.4	0.2	14-16	2	15-18	3
<b>Verano 05</b>	33-33.4	0.4	33.3-33.4	0.1	15-19	4	17-20	3
<b>Otoño 05</b>	33-33.4	0.4	33.3-33.5	0.2	15-17.5	2.5	18-20	2
<b>Primavera 06</b>	32.9-33.2	0.3	33.4-33.5	0.1	14-16.5	2.5	16-17.5	1.5

**Tabla V.** Temperaturas de crianza estimada usando la ecuación de Campana (1999), valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  de los núcleos de sardinas y la salinidad mínima y máxima reportadas para los cruceros CALCOFI o IMECOCAL. El carbonato de los núcleos se obtuvo de sardinas capturadas en el Puerto El Sauzal en febrero 2008. Se presentan las estimaciones de temperatura tanto por época de crianza como para la región norte (subpoblación “fría”) y central (subpoblación “templada”) calculadas con el mínimo y máximo de salinidad observada en cada época y región. **LE:** longitud estándar, **x:** media, **DE:** desviación estándar, **Min:** valor mínimo, **Max:** valor máximo, **TSal<sub>MIN</sub>:** temperatura estimada con salinidad mínima y **TSal<sub>MAX</sub>:** temperatura estimada con salinidad máxima.

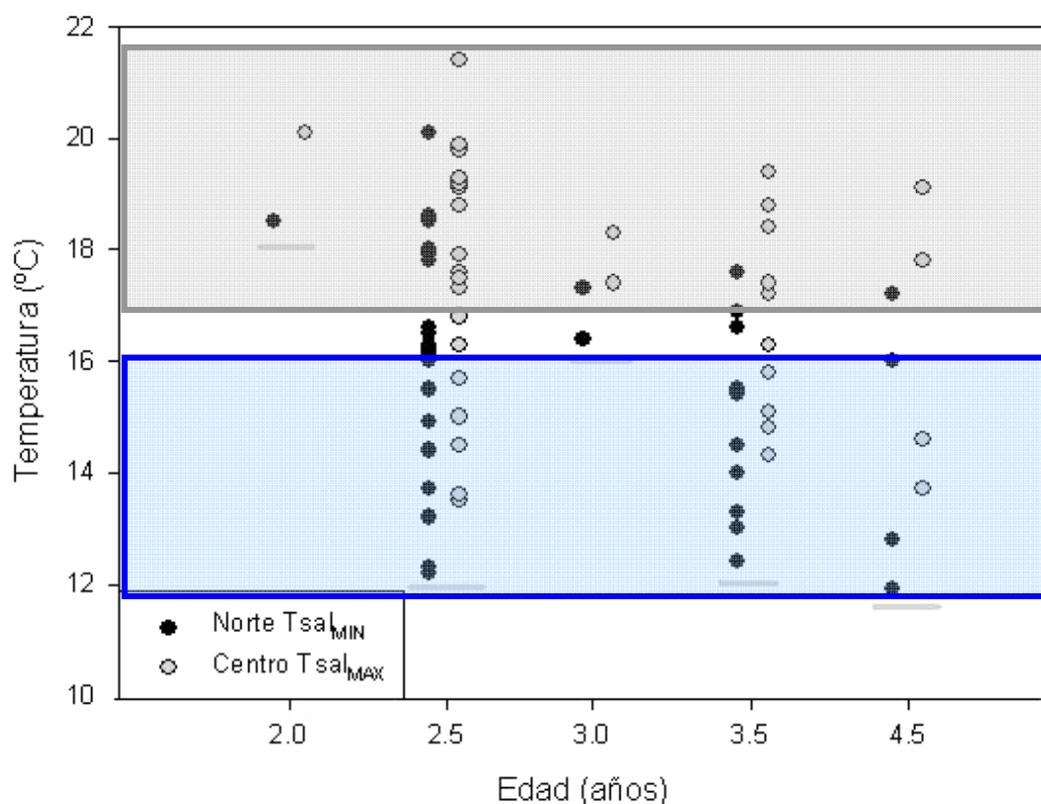
Temporada de crianza	LE (mm)	Edad (años)	Temperatura estimada Zona norte T(°C)		Temperatura estimada Zona central T(°C)	
			TSal <sub>MIN</sub>	TSal <sub>MAX</sub>	TSal <sub>MIN</sub>	TSal <sub>MAX</sub>
<b>Otoño 05</b>	165	2.5	17.8	18.9	18.6	19.1
	165	2.5	18.5	19.6	19.3	19.8
	155	2.5	18.6	19.7	19.4	19.9
	164	2.5	16.6	17.7	17.4	17.9
	151	2.5	13.7	14.8	14.5	15.0
	157	2.5	12.2	13.2	13.0	13.5
	162	2.5	16.5	17.6	17.3	17.9
	162	2.5	15.5	16.6	16.3	16.8
	155	2.5	14.4	15.4	15.2	15.7
	160	2.5	17.9	18.9	18.7	19.2
	163	2.5	20.1	21.1	20.9	21.4
	155	2.5	16.3	17.3	17.0	17.6
	164	2.5	18.0	19.1	18.8	19.3
	163	2.5	14.9	16.0	15.7	16.3
	157	2.5	16.0	17.1	16.8	17.3
	157	2.5	13.2	14.3	14.0	14.5
	154	2.5	16.2	17.3	17.0	17.5
	155	2.5	12.3	13.4	13.1	13.6
	162	2.5	16.1	17.2	16.9	17.5
185	2.5	18.0	18.6	18.3	18.8	
<b>Primavera 06</b>	185	2	18.5	19.3	19.8	20.1
<b>Primavera 05</b>	185	3	16.4	16.9	16.9	17.4
	202	3	17.3	17.8	17.8	18.3
<b>Otoño 04</b>	186	3.5	12.4	13.7	13.5	14.3
	195	3.5	13.3	14.6	14.4	15.1
	186	3.5	16.6	17.9	17.7	18.4
	185	3.5	15.4	16.7	16.5	17.2
	182	3.5	15.5	16.8	16.6	17.4
	184	3.5	14.5	15.8	15.5	16.3
	192	3.5	16.9	18.2	18.0	18.8
	184	3.5	13.0	14.3	14.0	14.8
	182	3.5	17.6	18.9	18.6	19.4
	198	3.5	14.0	15.3	15.0	15.8
<b>Otoño 03</b>	200	4.5	11.9	12.9	12.7	13.7
	190	4.5	17.2	18.3	18.0	19.1
	205	4.5	16.0	17.0	16.8	17.8
	184	4.5	12.8	13.8	13.6	14.6

<b>Min</b>			11.9	12.9	12.7	13.5
<b>Max</b>			20.1	21.1	20.9	21.4

#### IV.6 Reconstrucción de la temperatura con base en valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$

Usando la ecuación de Campana (1999), la salinidad mínima y la salinidad máxima para cada época de crianza, tanto en el caso de la zona norte (subpoblación “fría”) como de la zona central (subpoblación “templada”), se retrocalcularon las temperaturas correspondientes a cada valor de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  (Tabla IV). La variación en las estimaciones de las temperaturas de crianza calculadas para cada individuo (usando la salinidad máxima y mínima para cada zona) fue limitada (0.8 - 1.9 °C), lo cual es consistente con la variación limitada en la salinidad que se observa en la zona de estudio. Este fue el caso para las sardinias que supuestamente se criaron en diferentes épocas y años. Para tener una estimación conservadora de las temperaturas, graficas solo los valores más amplios (Tsal Min norte y Tsal mx centro) para la zona norte y para la zona centro con la fórmula de Campana (1999)

En general, las estimaciones con la Tsal<sub>MIN</sub> de la zona norte (asociado a la zona de desove de la subpoblación “fría”) presentaron los valores más bajos de temperaturas retrocalculadas y los valores estimados con la Tsal<sub>MAX</sub> en la zona centro fueron las temperaturas retrocalculadas más altas. La variación entre las temperaturas retrocalculados para sardinias de una misma zona y usando un mismo valor de salinidad indica, tanto para la zona norte como para la zona centro, un amplio intervalo de valores (11.9 °C a 21.4 °C; aproximadamente un rango de 8.2 °C) lo cual es consistente con condiciones térmicas de crianza diferentes (Tabla V).



**Figura 11.** Temperaturas para zona norte y centro estimadas con la salinidad (**Tsal<sub>MIN</sub>**: temperatura estimada con salinidad mínima y **Tsal<sub>MAX</sub>**: temperatura estimada con salinidad máxima para cada época y cada región). Para tener una estimación conservadora de las temperaturas, graficas solo los valores más amplios (Tsal min norte y Tsal max centro) para la zona norte y para la zona centro con la fórmula de Campana (1999). Los recuadros de color representan los intervalos de temperatura reportados como hábitat de crianza de las subpoblaciones “fría” y “templada” de las sardinas. El recuadro con borde claro es la asociada con la subpoblación “fría” y el recuadro con borde oscuro es la asociada las de la subpoblación “templada”.

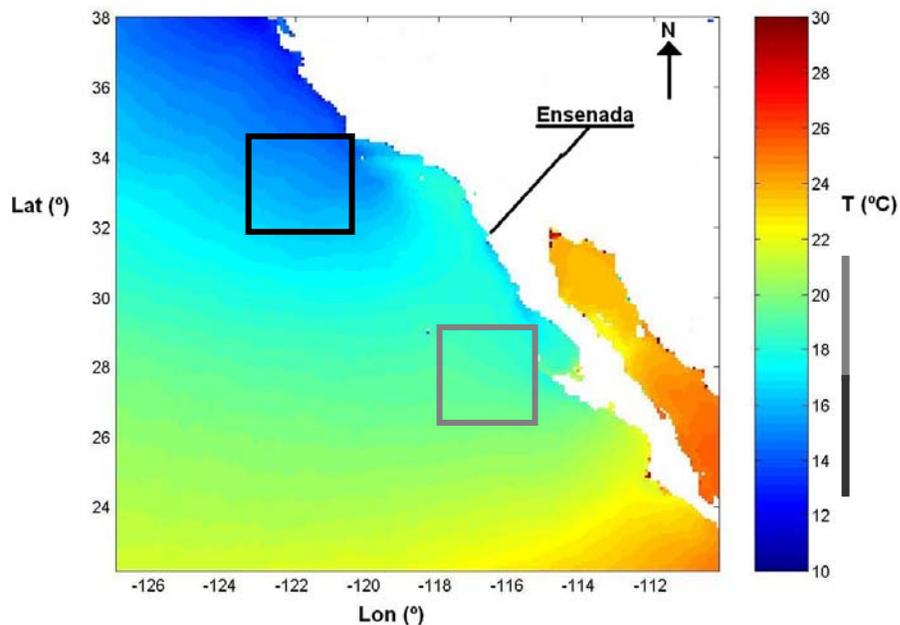
En la Figura 11, se pueden observar las temperaturas asociadas al hábitat de la sardina del Pacífico para cada subpoblación definida por Félix-Uraga *et al.* 2004 para la subpoblación “templada” (cuadro color oscuro) y “fría” (cuadro color claro). Sin embargo, las temperaturas reportadas para otras etapas en el ciclo de vida de la sardina, para la subpoblación fría son constantes por lo que parece existir cierta afinidad de las subpoblaciones a un intervalo de temperatura (Tabla VI). La variación en la temperatura calculada con la salinidad mínima y máxima para cada zona no cambia mucho el patrón general. Las sardinas de 2.5 y 3.5 años tienen una alta en los valores obtenidos para sus temperaturas retrocalculadas, y son consistentes con los hábitats térmicos en los que desovan ambas subpoblaciones (Figura 11).

#### **IV.7 Estimación de la TSM (temperatura superficial del mar) por medio de imágenes de satélite**

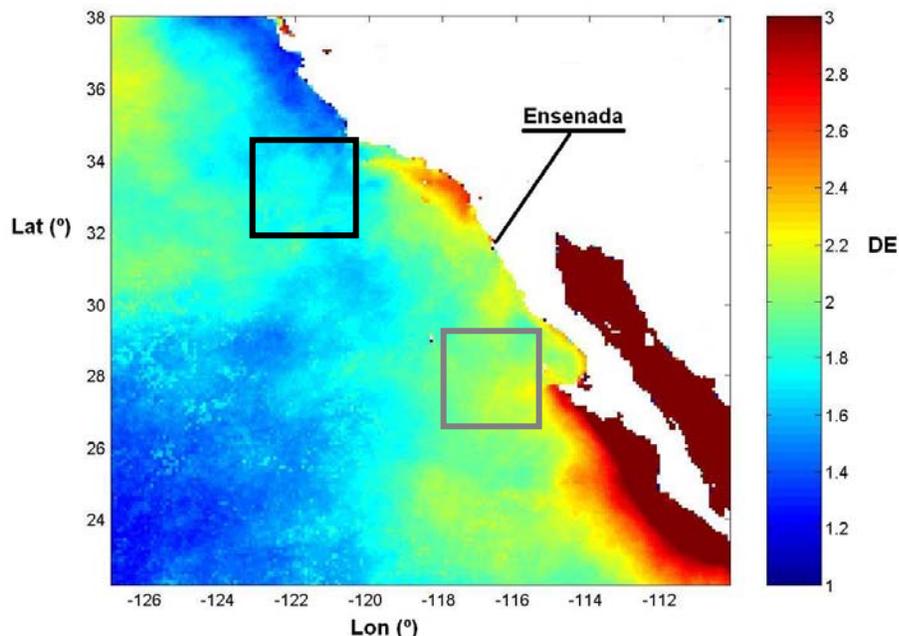
Los promedios anuales de la TSM para las zonas caracterizadas como hábitat de desove de la subpoblación “fría” (zona norte) y la subpoblación “templada” (zona centro) van desde los 12 °C a los 22 °C desde el norte hacia el sur (Figura 12). Las desviaciones estándar varían entre 1 °C y 2.2 °C, lo cual es indicativo del nivel de variación interanual en la TSM. En un cuadro de color oscuro, se muestra la zona de desove norteña, y en color claro, la zona centro. Estas zonas son las mismas para las cuales se estimaron las salinidades y temperaturas reportadas como centros de desove por los reportes de CALCOFI e IMECOAL (Figura 13) (Tabla IV).

**Tabla VI.** Características del hábitat térmico de la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax*) reportada en la literatura para diferentes regiones, épocas y subpoblaciones para diferentes etapas de ciclo de vida (huevos, larvas y adultos).

<b>Etapas del ciclo de vida</b>	<b>Región</b>	<b>Época (Subpoblación)</b>	<b>Temperaturas °C</b>	<b>Referencia</b>
<b>Huevos</b>	California sur y centro Baja California central	Abril –Junio ("fría")	13 hasta 24	Tibby, 1937
<b>Huevos</b>	California sur y centro Baja California central	Abril –Junio ("fría")	13 a 16	Ahlstrom, 1954 (para 1949)
<b>Huevos</b>	California sur y centro Baja California central	Abril –Junio ("fría")	12.5 a 16.0	Ahlstrom, 1954 (para 1950)
<b>Huevos</b>	California sur y centro Baja California central	Abril –Junio ("fría")	13.5 a 16.5	Ahlstrom, 1954 (para 1951)
<b>Huevos</b>	Baja California central	Abril ("fría")	12 a 17	Baumgartner (com. personal)
<b>Huevos</b>	Baja California central	Junio ("templada")	16 a 23	Baumgartner, (com personal)
<b>Huevos</b>	California sur y centro	Marzo-Abril ("fría")	11 a 17	Lynn, 2003
<b>Huevos</b>	California sur y centro	Abril ("fría")	13 a 17	Reiss <i>et al.</i> 2008
<b>Adultos</b>	California sur y centro Baja California central	Abril –Junio ("fría" y "templada")	13.5 a 25	Lluch-Belda <i>et al.</i> 1991
<b>Adultos</b>	Ensenada – San Pedro	Abril- Junio (Frio)	13 a 17	Félix-Uraga <i>et al.</i> 2004
<b>Adultos</b>	Ensenada – San Pedro – Cedros-Bahía Magdalena	Agosto – Diciembre (Templado)	17 a 22	Félix-Uraga <i>et al.</i> 2004
<b>Adultos</b>	Bahía Magdalena	Julio – Diciembre (Cálida )	22 a 27	Félix-Uraga <i>et al.</i> 2004

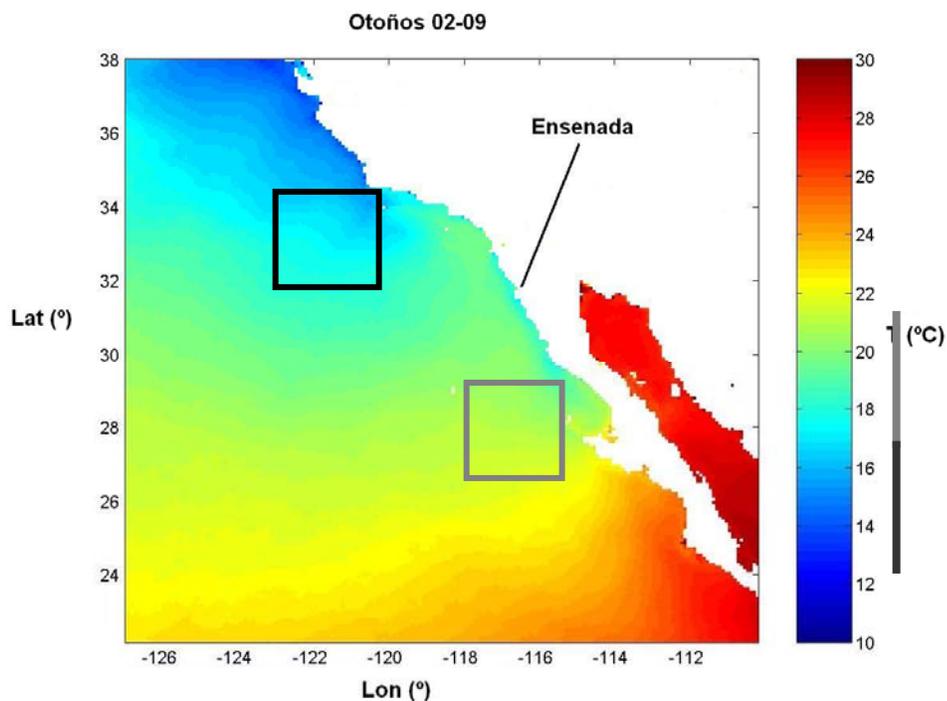


**Figura 12.** Climatología anual de la temperatura superficial del mar (TSM) para el periodo 2002-2009 calculada a partir de promedios mensuales. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis (imágenes de 9 km<sup>2</sup>) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. **Lat:** Latitud, **Lon:** Longitud y **T:** Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base a los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove. Las barras laterales junto al de gradiente de temperatura indica el rango de temperaturas esperadas para cada zona con base Félix-Uraga *et al.* 2004 (Tabla VII) para la subpoblación “templada” y “fría” son del mismo color que la zona de desove a la cual supuestamente pertenecen (círculos).

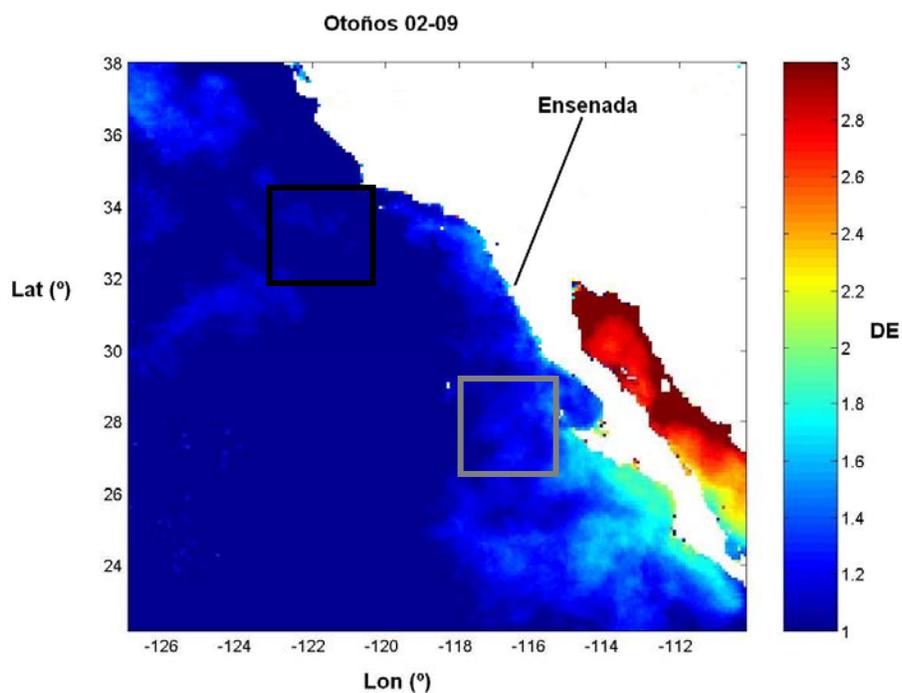


**Figura 13.** Desviación estándar (DE) de la temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para el periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis (imágenes 9 km<sup>2</sup>) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. **Lat:** Latitud, **Lon:** Longitud y **T:** Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove.

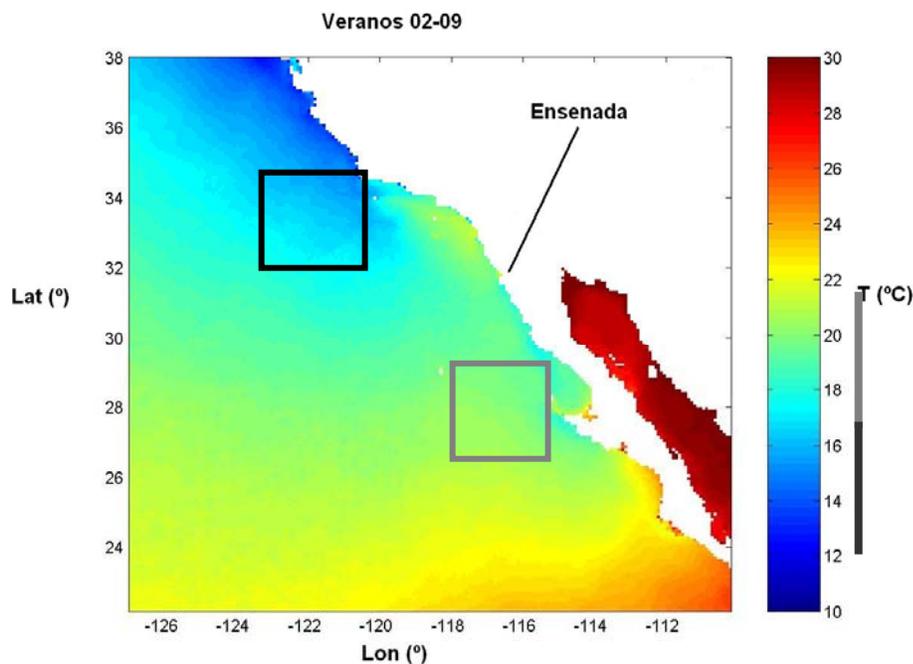
Para los otoños, en las zonas delimitadas por los cuadrados que corresponden a las zonas propuestas como hábitat de desove de la subpoblación “fría” y “templada”, los promedios de TSM corresponden a los rangos obtenidos por medio de los valores  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  del carbonato. Esto sugiere que las sardinas se criaron en una región amplia (Figura 14 y 15). En cambio, durante los veranos, en la zona central y norte, las temperaturas promedio de TSM son en su mayoría más altas que las estimaciones de las temperaturas retrocalculadas, por lo que estas sardinas no pudieron desarrollarse a esas temperaturas (Figura 16 y 17). Las temperaturas promedio estimadas de las imágenes para las primaveras se encuentran muy por debajo de la mayoría de las temperaturas con base en valores isotópicos (Figura 18 y 19).



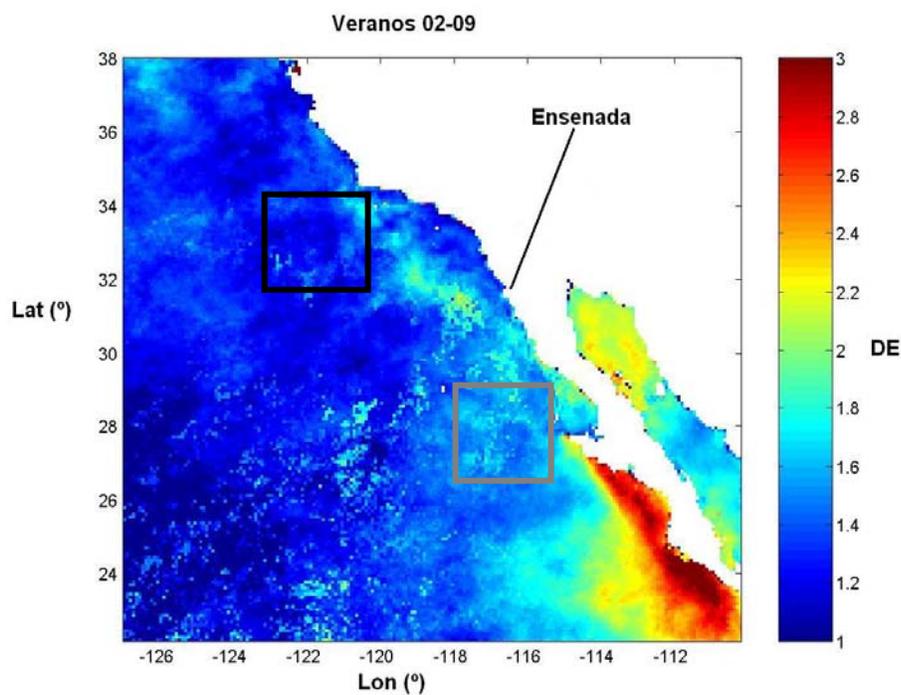
**Figura 14.** Temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para los otoños 2002-2009. La imagen se generó con base promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis ( $9\text{km}^2$ ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. **Lat:** Latitud, **Lon:** Longitud y **T:** Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base a los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove. Las barras laterales junto al de gradiente de temperatura muestra el rango de temperaturas esperadas para cada zona con base Félix-Uraga *et al.* 2004 (Tabla VII) para la subpoblación “templada” y “fría”, y son del mismo color que la zona de desove a la que pertenecen (cuadros).



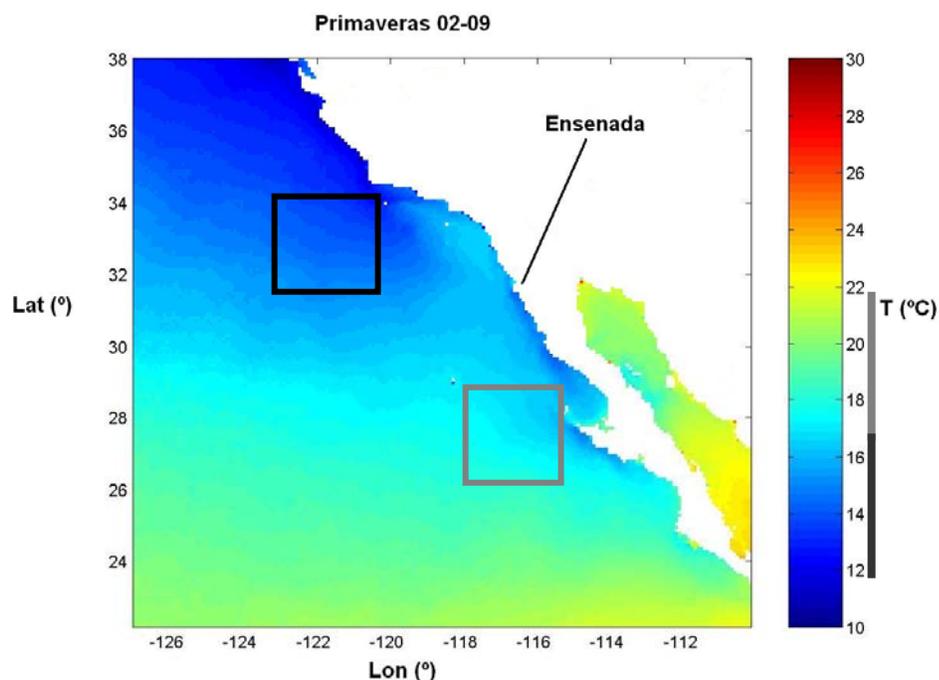
**Figura 15.** Desviación estándar de la temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para los otoños 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados s con el satélite Aqua Modis (9 km<sup>2</sup>) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. **Lat:** Latitud, **Lon:** Longitud y **T:** Temperatura. La zona norte (oscuro) y la zona centro (claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove.



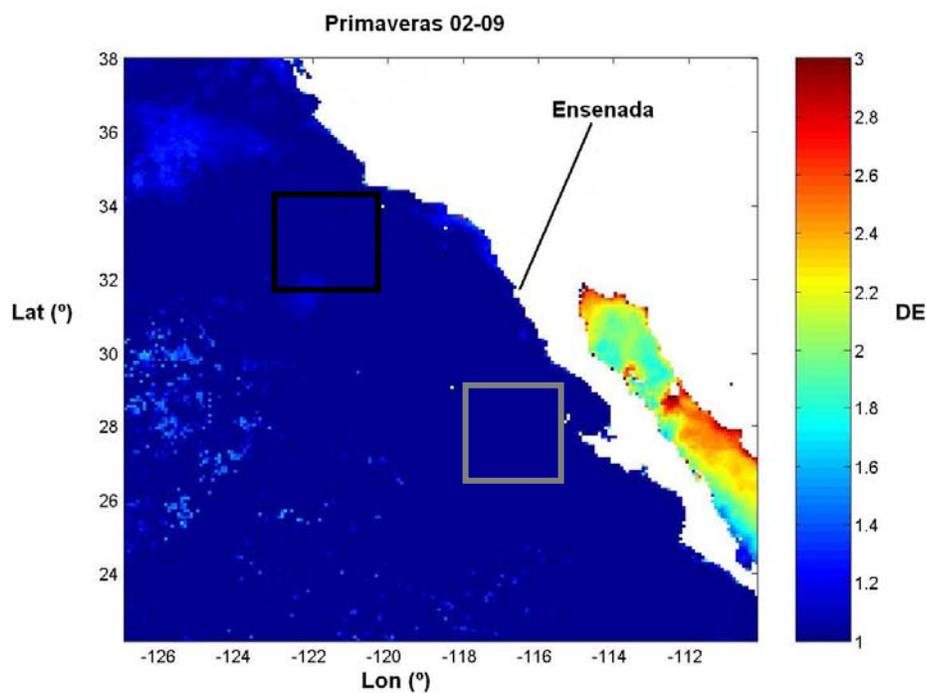
**Figura 16.** Temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para los veranos periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis ( $9 \text{ km}^2$ ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. **Lat:** Latitud, **Lon:** Longitud y **T:** Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove. Las barras laterales junto al de gradiente de temperatura muestra el rango de temperaturas esperadas para cada zona con base Félix-Uraga *et al.* 2004 (Tabla VII) para la subpoblación “templada” y “fría”, y son del mismo color que la zona de desove a la cual supuestamente pertenecen (cuadros).



**Figura 17.** Desviación estándar de la temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para los veranos periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados s con el satélite Aqua Modis ( $9 \text{ km}^2$ ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. **Lat:** Latitud, **Lon:** Longitud y **T:** Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove.



**Figura 18.** Temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para las primaveras periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados s con el satélite Aqua Modis (9 km<sup>2</sup>) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. **Lat:** Latitud, **Lon:** Longitud y **T:** Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base a los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove. Las barras laterales junto al gradiente de temperatura muestra el rango de temperaturas esperadas para cada zona con base Félix-Uraga *et al.* 2004 (Tabla VII) para la subpoblación “templada” y “fría”, y son del mismo color que la zona de desove a la que pertenecen (cuadros).



**Figura 19.** Desviación estándar de la temperatura superficial del mar (TSM) de promedios mensuales para las primaveras periodo 2002-2009. La imagen se generó con base en datos de promedios mensuales de TSM estimados con el satélite Aqua Modis ( $9 \text{ km}^2$ ) desde San Francisco, CA, EE.UU. hasta el sur de Bahía Magdalena, BC, México. **Lat:** Latitud, **Lon:** Longitud y **T:** Temperatura. La zona norte (cuadro oscuro) y la zona centro (cuadro claro) se definieron con base en los reportes CALCOFI de las zonas de previamente reportadas como principales zonas de desove.

## V. DISCUSIÓN

### V.1 Estructura de tallas y edades

Las sardinas capturadas el 25 de febrero de 2008 presentaron un promedio de longitud estándar de  $173 \pm 16$  mm y un intervalo de tallas de 136 a 229 mm LE. Por la fecha de captura, y de acuerdo al modelo de migración espacio-temporal propuesto por Félix-Uraga *et al.* (2005), estas sardinas deberían pertenecer a la subpoblación “fría” y “templada”. Este grupo de sardinas tuvo una distribución bimodal con un amplio rango de tallas: sardinas chicas ( $159 \pm 4$  mm LE) y sardinas grandes ( $189 \pm 7$  mm LE). Butler *et al.* (1993) registraron sardinas de un año de edad capturadas frente a Baja California con un promedio de 142 mm, otras capturadas frente a Monterey de 146 mm y de 164 mm para el sur de California. De las capturas de Ensenada, entre 1989 y 2002 Félix-Uraga (2006) registró tallas desde 100 mm a 260 mm LE y la mayoría de las sardinas tenían entre 150 mm y 220 mm. Para Bahía Magdalena, la talla de individuos varió entre 80 y 220 mm entre 1981 y 2002, aunque la mayoría presentaron entre 150 a 180 mm. Para San Pedro, el registro de las tallas de 1983 a 2002 fue desde 90 a 275 mm, aunque la mayoría de las tallas fueron entre 160 mm y 220 mm.

En este estudio, se registraron cuatro grupos de edades: los más frecuentes fueron 2.5 y 3.5 años. Las sardinas pertenecientes al grupo de tallas chicas (150 a 165 mm) tuvieron 2.5 años de edad, y para el grupo de tallas grandes se estimó una edad promedio de 3.5 años  $\pm$  0.7 años. Las sardinas de 3.5 años fueron las más abundantes entre las sardinas grandes. Félix-Uraga *et al.* (1996) reportaron que sardinas de  $173 \pm 16$  mm de LE se reclutan completamente a la pesquería, y que tienen 2 años de edad. Por lo tanto, las sardinas cuya composición isotópica fue analizada se consideran reclutas a la pesquería, tanto considerado sus tallas como con base en sus edades.

A pesar de haber capturado diferentes grupos de edades en febrero del 2008, las determinaciones de edad sugieren que el 76% de las sardinas se criaron durante el otoño

independientemente del año de nacimiento, y que el resto probablemente creció durante primavera. Las sardinas capturadas el 25 de Febrero 2008 pueden pertenecer a la subpoblación “fría” y “templada”, ya que se estimó que nacieron durante el otoño, aunque los picos de desove principal son en primavera y verano, los desoves se realizan durante casi todo el año.

## V.2 Variabilidad en los valores isotópicos de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ )

Las sardinas analizadas en este estudio son reclutas mayores a un año de edad, y tienen un potencial para migrar. Sin embargo, la metodología para extraer y analizar carbonato de los otolitos del material depositado durante los primeros 50 a 70 días incrementa la resolución de los análisis enfocándose en la primera etapa del ciclo de vida. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  mostraron un amplio intervalo de valores:  $-0.5 \pm 0.4$  ‰ (DE) con un intervalo (Min / Max) de  $-1.1$  ‰ a  $0.1$  ‰, independientemente de la talla o la edad de las sardinas. Si observamos los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  agrupados por edad, para las de 2.5 y 3.5 años la dispersión en los datos es similar al intervalo de los valores en general. Esto implica que las temperaturas del hábitat de crianza tienen un amplio intervalo de temperaturas, aunque se estima que nacieron durante la misma temporada (otoño).

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  reportados por Valle y Herzka (2008) tuvieron aproximadamente una dispersión de  $1$  ‰ a  $1.2$  ‰ entre individuos capturados en Ensenada durante diciembre de 2004. Otros estudios (Kalish, 1991a; Gao *et al.*, 2001; Beg y Weidman, 2001; Ayvazian *et al.* 2004) también han reportado una amplia variabilidad en valores isotópicos de otolitos enteros entre localidades. Sin embargo, el intervalo de variabilidad entre localidades no fue tan alto como los reportados por Valle y Herzka (2008). El amplio intervalo de valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  de los núcleos de los otolitos de las sardinas analizadas en este estudio sugiere que estas se nacieron y se desarrollaron en un hábitat amplio de temperaturas, o que puede haber mezcla en las subpoblaciones “fría” y “templada” durante el primer año de vida y

antes de reclutarse a la pesquería, lo cual es consistente con lo sugerido por Valle y Herzka (2008).

Uno de los factores que pueden contribuir a la variabilidad que se observó en los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  en este estudio es la variabilidad del hábitat térmico (gradiente latitudinal y profundidad en la columna de agua) que ocupan las larvas y juveniles tempranos de la sardina, así como de su potencial migratorio. La resolución temporal de las muestras de carbonato de los núcleos abarca entre los primeros 50 y 70 días de desarrollo. Quiñonez-Velázquez *et al.* (2000) estimó que a estas edades las sardinas pueden tener una longitud de entre 40 y 60 mm. El potencial de movimiento latitudinal de sardinas de tallas mayores (>250 mm de longitud total) es alto, ya que se ha demostrado que pueden migrar desde el sur de California a Columbia Británica, Canadá, en aproximadamente seis meses (Clark y Jansen, 1945). Sin embargo, sardinas de menor tamaño (<150 mm) no presentan migraciones extensas según Clark (1947). En cuanto al movimiento vertical de las larvas, depende de los procesos físicos que predominan en la columna de agua. Stenevik *et al.* (2003) reporta que para *Sardinops sagax* del norte de la Corriente de Benguela, la distribución vertical es importante para la retención de los huevos y larvas en zonas propicias para el crecimiento. Sus resultados indican que la mayoría de las larvas se encuentran entre los primeros 40 m de la columna de agua, y que casi el 70% de las larvas se encuentra en los primeros 20 metros.

Valle y Herzka (2008) hicieron una aproximación para evaluar cuánto es que la variabilidad aportada por diferencias verticales en las temperaturas en la columna de agua podía afectar la señal integrada por el carbonato de otolitos enteros. Para la zona del Pacífico frente a Baja California, estimaron que las diferencias absolutas de temperatura entre la superficie y la isoterma de 12 °C (límite inferior de las preferencia térmica de la sardina del Pacífico) fueron entre 4 a 6 °C en invierno y 8 a 12 °C en verano y notaron que la diferencia se incremento hacia latitudes menores. Sin embargo, la isoterma de los 12 °C se encuentra a los 100 m de profundidad frente a Ensenada, lo cual probablemente excede el intervalo de profundidades a los cuales se encuentran las larvas. Observando los datos de temperatura

reportados por Valle y Herzka (2008) hasta los 50 m, la isoterma es de 14 °C, lo cual reduce las diferencias en las temperaturas a las que pudieron estar expuestas las sardinas analizadas en nuestro estudio a menos de 2- 4 °C (suponiendo que crecieron en esta zona).

Así mismo, los reportes de CALCOFI (Goericke *et al.* 2004; Goericke *et al.*, 2005; Peterson *et al.*, 2006; Goericke *et al.* 2007) muestran que la variación de temperatura en las zonas de crianza comparando la superficial con la temperatura a 10 m es menor a 4 °C para la zona norte (correspondiente a la subpoblación “fría”) y de 3 °C para el hábitat de crianza de la zona centro (correspondiente a la subpoblación “templada”). Por lo tanto, la variabilidad vertical de la temperatura en la columna de agua en los primeros 50 m no explica toda la dispersión en los valores  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  (correspondería a una variación isotópica menor a 0.8 ‰). En otras palabras, las diferencias en la temperatura en la columna de agua podrían aportar sólo parte de a la variabilidad en la señal isotópica integrada por el carbonato.

### **V.3 Variación en la salinidad**

La composición isotópica del oxígeno del agua de mar ( $\delta_w$ ) esta relacionada directamente con los procesos que también influyen sobre la salinidad (evaporación, precipitación y aportes de agua dulce) (Craig y Gordon, 1965; Paul *et al.* 1999). Por lo tanto, la salinidad se puede utilizar para estimar  $\delta_w$ . Las estimaciones de la variabilidad en la salinidad de la época de crianza que estimé con base en la edad de las sardinas de febrero del 2008 no mostraron diferencias absolutas mayores a 0.5 PSU para la zona norte (equivalente a cuantas ppm isotópico). La variabilidad es aún menor en la zona centro. Para las temporadas en las que se estimó que se criaron las sardinas, se excluyeron las zonas de surgencias, ya que diversos estudios indican que los huevos y larvas de sardina no se encuentran dentro de estas zonas (Lo *et al.* 1996; Lynn, 2003; Curtis, 2004; Reiss *et al.* 2008). La variabilidad observada en los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  de los núcleos de otolitos de sardina no se puede explicar con base en la variación en la salinidad (y por ende en los  $\delta_w$ ). Las sardinas de 2.5 y 3.5 años de edad que se analizaron en este estudio exhiben una

dispersión y valores absolutos similares en sus valores isotópicos, lo cual sugieren que el hábitat térmico de crianza es geográficamente mucho más amplio de lo propuesto en la literatura y/o que hay mezcla entre subpoblaciones “fría” y “templada”.

#### **V.4 Reconstrucción de la temperatura con base en valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ y comparación de la TSM**

Las imágenes de satélite de la TSM que se usaron en este estudio se generan a partir de promedios de temporadas (tres meses), y con esos valores se calculan promedios mensuales. Cada temporada abarca aproximadamente 90 días. Los promedios de la TSM no necesariamente abarcan el mismo intervalo de tiempo al que registra el carbonato de los núcleos de los otolitos durante las etapas larvarias y juvenil temprana, ya que la temperatura superficial del mar tiene variaciones diurnas diferentes a las que puede estar sujeta una larva en la capa de mezcla y las señales estacionales dependen de la fecha exacta del desove y condiciones oceanográficas que ocurren en escalas más cortas que un promedio de tres meses. Sin embargo, estas estimaciones sí se pueden considerar como un proxy de las temperaturas presentes en el hábitat de crianza en un espacio geográfico determinado durante una temporada específica para fines de comparar con los valores de temperatura retrocalculados a partir de valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ . Usando una aproximación similar, Reiss *et al.* (2008) usaron TSM de imágenes de satélite junto con imágenes de Clorofila (Chl a) y muestreos de CUFES en la zona de CALCOFI para predecir el hábitat potencial de desove de la sardina del Pacífico. Encontraron que las temperaturas de desove son similares a lo largo de la zona de muestreo, pero la fecha de los desoves puede variar a lo largo de la costa, aunque las temperaturas que se observan son características del hábitat de desove de la subpoblación “fría” (12 a 15 °C).

Las sardinas de 2.5 años tuvieron temperaturas retrocalculadas que abarcaron un rango aproximado de 9 °C (12.2 °C a 21.1 °C) y para las sardinas de 3.5 años un rango de 7 °C (12.4 °C a 19.4 °C). Ambos grupos de edades de las sardinas analizadas en este trabajo se

criaron durante el otoño, considerando el error en la edad ( $\pm 3$  meses), las sardinas pudieron desarrollarse durante finales del verano y/o finales de otoño. Sin embargo, las comparaciones con las TSM generadas para verano no muestran en las zonas caracterizadas de desove un intervalo de temperatura similar al de las temperaturas retrocalculadas. Parte de la variación observadas en cada grupo de edad también puede deberse a que existe a que dentro de cada grupo existen diferencias en la época de nacimiento, sin embargo la variación de temperatura de una misma temporada no explicaría toda la variación dentro del grupo. Las temperaturas características del hábitat de crianza hecha por diferentes estudios en diferentes años para las distintas subpoblaciones de sardina del Pacífico muestra consistencia en las temperaturas a las cuales se han intentado asociar ciertas características biológicas de las subpoblaciones (i.e. estructura de tallas, número de vértebras, tasas de crecimiento, hábitat de crianza) (Ver Tabla VI). Los rangos de temperaturas para estas subpoblaciones corresponden a los intervalos de 12 a 16 °C para la “fría” y de 18 a 22 °C para la “templada” (Félix–Uraga, 2005; Smith, 2005). Los desoves en otoño corresponden al hábitat de crianza de la subpoblación “templada”, que según la literatura estaría dentro de los 18 a 22 °C. Nuevamente, los valores de la temperatura de crianza derivado de los otolitos sugieren que el hábitat de crianza tiene un intervalo de temperaturas más amplio para las sardinas desarrolladas en esa temporada de crianza o que la mezcla entre subpoblaciones se da entre los primeros años de vida. Nuestros datos sugieren que el hábitat de crianza de las sardinas capturadas durante el invierno abarca un amplio rango de temperaturas, lo cual sugiere que puede existir mezcla entre la subpoblación “fría” y “templada”.

La TSM para los otoños correspondientes al hábitat de crianza tanto de las zonas norte y centro abarca un intervalo similar al retrocalculado para los núcleos otolitos, e incluye el hábitat de crianza tanto de la subpoblación “fría” como de la “templada”. (Lo *et al.* 1996; Checkley *et al.* 2000; Baumgartner (com. personal); Lynn, 2003; Curtis, 2004; Reiss *et al.* 2008). En contraste, las temperaturas promedio de la TSM para el verano (Figura 14) o la primavera (Figura 16), que también son épocas en las que la sardina del Pacífico presenta desoves (primavera subpoblación “fría” y verano y primavera subpoblación “templada”),

no presentan valores de temperaturas promedio como las temperaturas retrocalculadas con base en los valores  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  de las sardinas nacidas en otoño (los únicos que coinciden son para las sardinas que se estimó que se criaron en la primavera, pero son muy pocos datos). Esto sugiere que estas sardinas realmente solo pudieron haber ocupado un hábitat de crianza correspondiente al otoño. Independientemente de la edad, el hábitat de crianza parece ser más amplio que el de las zonas definidas para la subpoblación “templada” por la literatura, lo cual puede ser consistente con la hipótesis de mezcla de las subpoblaciones.

## VI. CONCLUSIÓN

La variación en los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$  muestra un rango de dispersión de 0.8‰. Las temperaturas retrocalculadas indican que el hábitat de crianza de las sardinas capturadas en febrero 2008 tuvo un amplio rango de temperaturas, lo cual es consistente con la mezcla entre subpoblaciones (“fría” y “templada”). Las TSM de otoño en las dos zonas de desove reportadas por la literatura (zona norte y centro) son similares a las temperaturas retrocalculadas a partir de valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{oto}}$ . Los resultados indican que durante los primeros 50 a 70 días el hábitat de crianza térmico es amplio y abarca temperaturas asociadas a la subpoblación “fría” y “templada”. Las sardinas capturadas en el invierno frente a Ensenada presentan mezcla entre subpoblaciones (la “fría” y “templada”).

## VII. LITERATURA CITADA

- Ahlstrom, E.H. 1954. Distribution and abundance of egg and larval populations of the Pacific sardine. USFWS Fish Bull 93:83-140.
- Amador Buenrostro, A. 1975. Características de las áreas de surgencia en las aguas adyacentes a la Bahía de Todos Santos, Ensenada, Baja California. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada. 32p.
- Ayvazian, S.G., Bastow, T.P., Edmonds, J.S., How, J. y Nowara, G.B. 2004. Stock structure of Australian herring (*Arripis georgiana*) in southwestern Australia. Fish Res 67: 39 - 53.
- Barnes, T., McCall, A., Jacobson, L. y Wolf, P. 1992. Recent population trends and abundance estimates for the Pacific sardine (*Sardinops sagax*). Calif Coop Ocean Fish Invest Rep 33: 60-75.
- Barnes, J.T. y Foreman, T.J. 1994. Recent evidence for the formation of annual growth increments in the otoliths of Pacific sardines (*Sardinops sagax*). Calif Fish Game 80 (1): 29 - 35
- Baumgartner, T.R., Soutar, A. y Ferreira, V. 1992. Reconstruction of the history of Pacific sardine and northern anchovy populations over the past two millennia from sediments of the Santa Barbara Basin, California. Calif Coop Ocean Fish Invest Rep 33: 24 - 40.

- Begg, G.A., Campana, S.E., Fowler, A.J. y Suthers, I.M. 2005. Otolith research and application: current directions in innovation and implementation. *Mar. Freshwater Res.* 56:477- 483.
- Begg, G.A. y Weidman, C.R. 2001. Stable  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  isotopes in otoliths of haddock *Melanogrammus aeglefinus* from the northwest Atlantic Ocean. *Mar Ecol Prog Ser* 216: 223 - 233.
- Bograd, S.J., y R.J. Lynn, 2003. Long-term variability in the southern California Current System, *Deep-Sea Research II*, 50(14-16): 2355-2370.
- Bowen, B.W. y Grant, W.S. 1997. Phylogeography of the sardines (*Sardinops* spp.): assessing biogeographic models and population histories in temperate upwelling zones. *Evolution* 51: 1601-1510.
- Butler, J.L. 1987. Comparisons of the larval and juvenile growth and larval mortality rates of Pacific sardine and northern anchovy and implications for species interactions. PhD Thesis, Univ. Calif. San Diego. 240p
- Butler, J.L., P.E. Smith y N.C.H. Lo.1993. The effect of natural variability of life-history parameters on anchovy and sardine population growth. *CalCOFI Rep.* 34: 104 - 11
- Castillo, G., Aguilera, E., Herrera, G., Bernal, P., Butler, J.L., Chong, J., González, H., Oyarzú, C. y Veloso, C., 1985. Larval growth rates of the Pacific sardine *Sardinops sagax* off central Chile, determined by daily ring counts in otoliths. *Biol. Pesq. Serv. Nac. Pesca Santiago* 14: 3-10.
- Campana, S.E. 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Mar Ecol Prog Ser* 188:263-297.

- Campana, S.E. y Nielsen, J.D. 1985. Microstructure of fish otoliths. *Can J Fish Aquat Sci* 42: 1014 - 1032
- Checkley, D.M. Jr, Dotson, R.C. y Griffith, D.A. 2000. Continuous, underway sampling of eggs of Northern anchovy (*Engraulis mordax*) and Pacific Sardine (*Sardinops sagax*) in Spring 1996 and 1997 off Southern and Central California. *Deep Sea Research, the second volume of a special series on the California Current. Deep-Sea Research II*, 47: 1139-55.
- Cisneros-Mata, M.A., Nevárez-Martínez, M.O. y Hammann, M.G. 1995. Rise and fall of the Pacific sardine in the Gulf of California. *Calif Coop Ocean Fish Invest Rep* 36:136-142.
- Clark, F.N., Janssen, J.F. 1945. Movements and abundance of the sardine as measured by tag returns. *Calif. Fish Game* 61:1 - 42.
- Clark, F.N. 1947. Analysis of populations of the Pacific sardine on the basis of vertebral counts. *Calif. Fish Game* 65: 26 pp
- Clark, F. N. y J. C. Marr. 1955. Population dynamics of the Pacific sardine. *CalCOFI Prog. Rep.* 1 July 1953-31 March 1955: 11-48.
- Craig, H. 1965. The measurement of oxygen isotope paleotemperatur. *En: Tongiorgi E (ed) .CNR Lab. Geol. Nucl. Pisa. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. es. p 161-182.*
- Craig, H. y Gordon, L. 1965. Deuterium and oxygen-18 in the ocean and the marine atmosphere. *En: Tongiorgi, E. (ed) CNR Lab. Geol. Nucl. Pisa, Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures.. Spoleto, p 9 - 130.*

- Curtis, K.A. 2004. Fine scale spatial pattern of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) and northern anchovy (*Engraulis mordax*) eggs. Fish. Oceanogr. 13(4): 239-254. #
- CEC-ITAM, 2006. Comité Nacional de Pelágicos Menores. Programa Maestro Nacional de Pelágicos Menores. <http://www.sardinamexicana.com.mx/> Septiembre 2010.
- Durazo, R. y T.R. Baumgartner, 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California, 1997-1999. Progress in Oceanography. 54: 7-31.
- Durazo, R., Ramirez-Manguilar, A.M., Miranda, L.E. y Soto-Mardones, L.A. 2010. Climatología de variables hidrográficas. En: Gaxiola-Castro, G. y Durazo, R. (ed.) Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México. 25-49.
- Edmonds, J.S. y Fletcher, W.J. 1997. Stock discrimination of pilchards, *Sardinops sagax*, by stable isotope ratio analysis of otolith carbonate. Mar. Ecol. Prog. Ser. 152: 241 - 247.
- Emmett, R.L., Brodeur, R.D. Miller, T.W., Pool, S.S., Bentley, P.J., Krutzikowsky, G.K. y McCrae, J. 2005. Pacific sardine (*Sardinops sagax*) abundance, distribution, and ecological relationships in the Pacific Northwest. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 46: 122-143.
- Epstein, S., Buchsbaum, H.A., Lowenstam, H.A. y Urey, H.C. 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale. Bull. Geol. Soc. Am. 64: 1315-1326.
- Felin, F. E. y J. B. Phillips. 1948. Age and length composition of the sardine match off the Pacific coast of the United States and Canada, 1941-42 through 1946-47. Div. of Fish Game. Fish. Bull. 69: 122 pp.

- Félix-Uraga, R., Alvarado-Castillo, R.M. y Carmona-Piña, R. 1996. The sardine fishery along the western coast of Baja California, 1981 to 1994. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 37: 188 – 192.
- Félix-Uraga, R., Gómez-Muñoz, V.M., Quiñónez-Velázquez, C., Neri Melo-Barrera, F., García-Franco, W. 2004. On the existence of Pacific sardine groups off the west coast of Baja California and southern California. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 45: 146 - 151.
- Félix-Uraga, R., Gómez-Muñoz, V.M., Quiñónez-Velázquez, C., Neri Melo-Barrera, F., Hill, K., García-Franco, W. 2005. Pacific sardine (*Sardinops sagax*) stock discrimination off the west coast of Baja California and southern California using otolith morphometry. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 46: 113 -121.
- Félix-Uraga, R. 2006. Dinámica poblacional de la sardina del Pacífico *Sardinops sagax* (Jenyns 1842) (Clupeiformes:Clupeidae), en la costa oeste de la península de Baja California y el sur de California. Tesis de Doctorado. CICIMAR-IPN.
- Gao, Y.W. 1999. Micromilling of fish otoliths: a comparison between DM 2800 and Dremel in stable isotope analysis. Environ. Biol. Fish 55: 443-448.
- Gao, Y.W. and Beamish, R.J. 1999. Isotopic composition of otoliths as a chemical tracer in population identification of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). Can J Fish Aquat Sci 56: 2062 - 2068.
- Gao, Y.W., Scharcz, H.P., Brand, U., Moksness, E. 2001. Seasonal stable isotope records of otoliths from ocean-pen reared and wild cod, *Gadus morhua*. Environ. Biol. Fish 61:445 - 453.

- Gao, Y.W., Joner, S., Svec, R.A., Weinberg, K.L. 2004. Stable isotopic comparison in otoliths of juvenile sablefish (*Anoplopoma fimbria*) from waters off the Washington and Oregon coast. *Fish Res.* 68: 351 - 360.
- García-Franco, W., Alvarado-Castillo, R.M., Quiñónez-Velázquez, C., Félix-Uraga, R. 2004. La pesquería de pelágicos menores en la costa occidental de la Península de Baja California y Golfo de Baja California. En: Quiñónez-Velázquez, Elorduy-Gayar JF. CICIMAR-IPN. Ambiente y Pesquería de Pelágicos Menores en el Noroeste de México. 57-68
- Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., Lavaniegos, B., De La Cruz-Orozco M.E., Millán-Núñez, E., Soto-Mardones, L., Cepeda-Morales, J. 2008. Respuesta del ecosistema pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas.* 34(2): 263-270.
- Goericke, R., Venrick, E., Mantyla, A., Bograd, S.J., Schwing, F.B., Huyer, A., Smith, R.L., Wheeler, P.A., Hooff, R., Peterson, W.T. Gaxiola-Castro, G. Gómez-Valdes, J., Lavaniegos, B.E. Hyrenbach, K.D. y Sydemann, W.J. 2004. The State of the California Current, 2003-2004: A rare “normal” year. *Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep.* 45: 27 -59.
- Goericke, R., Venrick, E., Mantyla, A., Bograd, S.J., Schwing, F.B., Huyer, A., Smith, R.L., Wheeler, P.A., Hooff, R., Peterson, W.T., Chavez, F., Collins, C., Marinovic, B., Lo, N., Gaxiola, G., Durazo, R., Hyrenbach, K.D. y Sydemann, W.J. 2005. The state of the California Current, 2004-2005: still cool? *Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep.* 46: 32 -71.
- Goericke, R., Venrick, E., Koslov, T., Sydemann, W., Schwing, F.B., Bograd, S.J., Peterson, B., Emmett, R., Lara-Lara, J.R., Gaxiola-Castro, G., Gómez-Valdez, J., Hyrenbach, K.D., Bradley, R.W., Weise, M.J., Harvey, J., Collins, C. y Lo, N.C.H. 2007. The

- State of the California Current, 2006-2007: Regional and local processes dominate. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 48: 33 -66.
- Grossman, E.L. y Ku, T.L. 1986. Oxygen and carbon isotopic fractionation in biogenic aragonite: Temperature effects. Chem. Geol. 59: 59-74.
- Hart, J.L. 1973. Pacific fishes of Canada. Fisheries Research Board of Canada. 100-103 pp.
- Hammann, M.G., Nevárez-Martínez, M.O. y Green-Ruíz, Y. 1998. Spawning habitat of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California: Egg and larval distribution 1956-1957 and 1971-1991. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 39: 169-179.
- Hedgecock, D., Hutchinson, E., Li, G., Sly, F. y Nelson, K. 1989. Genetic and morphometric variation in the Pacific sardine, *Sardinops sagax caerulea*: comparisons and contrasts with historical data and with variability in the Northern anchovy *Engraulis mordax*. Fish Bull. 87: 653-671.
- Hernández-Vázquez, S. 1994. Distribution of eggs and larvae from sardine and anchovy off California and Baja California, 1951 - 1989. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 35: 94 - 107.
- Hill, K.T., Dorval, E., Lo, C.H., Macewics, B.J., Show, C. y Félix-Uraga, R. 2008. Assessment of the Pacific sardine resource in 2008 for US management in 2009. NOAA Technical Memorandum NMFS.
- Hoie, H., Folkvord, A. y Otterlei, E. 2003. Effect of somatic and otolith growth rate on stable isotopic composition of early juvenile cod (*Gadus morhua* L) otoliths. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 4108: 1-18.

- Hoie, H., Otterlei, E. y Folkvord, A. 2004a. Temperature-dependent fractionation of stable oxygen isotopes in otoliths of juvenile cod (*Gadus morhua*). ICES J. Mar. Sci. 61:243-251.
- Hoie, H., Andersson, C., Folkvord, A. y Karlsen, O. 2004b. Precision and accuracy of stable isotope signals in otoliths of pen-reared cod (*Gadus morhua*) when sampled with a high-resolution micromill. Mar. Biol. 144(6):1039-1049.
- Hoie, H. y Folkvord, A. 2006. Estimating the timing of growth rings in Atlantic cod otoliths using stable oxygen isotopes. J. Fish Biol. 68:829-837
- Holmgren-Urba, D y Baumgartner, T.R. 1993. A 250-year history of pelagic fish abundances from the anaerobic sediments of the central Gulf of California. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 34:60-68.
- Huyer, A. 1983. Coastal upwelling in the California Current System. Prog. Oceanogr. 12: 259-284 p.
- Jamieson, R.E., Schwarcz, H.P. y Bratney, J. 2004. Carbon isotopic records from the otoliths of Atlantic cod (*Gadus morhua*) from eastern Newfoundland, Canada. Fish Res. 68:83-97.
- Iacumin, P., Bianucci, G. y Longinelli, A. 1992. Oxygen and carbon isotopic composition of fish otoliths. Mar. Biol. 113: 537-542.
- Kalish, J.M. 1991a. Oxygen and carbon stable isotopes in the otoliths of wild and laboratory-reared Australian salmon (*Arripis trutta*). Mar. Biol. 110: 37-47.
- Kalish, J.M. 1991b.  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  isotopic disequilibria in fish otoliths: metabolic and kinetic effects. Mar. Ecol. Prog. Ser. 75: 191-203.

- Kim, S.T., y O'Neil, J.R. 1997. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates. *Geoch. Cosmoch. Acta* 61(16): 3461 - 3475.
- Kennedy, B. P., Klaue, A., Blum, J.D., Folt, C. L. y Nislow, K. H. 2002. Reconstructing the lives of fish using Sr isotopes on otoliths. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59: 925-929.
- Lecomte, F., Grant, W.S. y Dodson, J.J., Rodríguez-Sánchez, R., Bowens, B.W. 2004. Living with uncertainty: genetic imprints of climatic shifts in East Pacific anchovy (*Engraulis mordax*) and sardine (*Sardinops sagax*). *Mol. Ecol.* 13:2169-2182.
- Leta, H. y Keim, A. 1992. Otolith removal and preparation for microstructural examination. FAO Technical document for fisheries.
- Lluch-Belda, D., Crawford, J., Kawasaki, T., MacCall, A., Parrish, R., Schwatzlose, R. y Smith, P.E. 1989. World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *S. Afr. J. Mar. Sci.* 8: 195 - 205.
- Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D., Hernandez, S. y Salinas, C. 1991. Sardine and anchovy spawning as related to temperature and upwelling in the California Current System. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.* 32: 105-111.
- Lluch-Belda, D., Hernández-Vázquez, S., Lluch-Cota, D.B. y Salinas-Zavala, C.A. 1992. The recovery of the California sardine as related to global change. *33:50-59.*
- Lo, N.C.H., Green Ruiz, Y.A., Cervantes, M.J, Moser, H.G. y Lynn, R.J. 1996. Egg production and spawning biomass of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in 1994, determined by the daily egg production method. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.* 37, 160-74

- Lynn, R.J. y Simpson, J.J. 1987. The California Current system: The seasonal variability of its characteristics. *J.Geoph. Res.*92 (C12): 12947-12966p.
- Lynn, R.J. 2003. Variability in the spawning habitat of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) off southern and central California. *Fish.Oceanogr.* 12: 541-553.
- Martínez-Pecero, R.E. 2003. Validación de la edad en larvas de tres especies de sardine de las costas de Baja California Sur *Sardinops caeruleus*, *Opisthonema libertate* y *Harengula thrissina* (Pisces:CLUPEIDAE). Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN.
- McGarigal, K., Cushman, S. y Stafford, S. 2002. *Multivariate Statistics for Wildlife and Ecology Research*. Springer, Alemania. 283 p.
- McFarlane, G.A. y Beamish, R.J. 2001. The re-occurrence of sardines off British Columbia characterizes the dynamic nature of regimes. *Prog. Oceanogr.* 49:151-165.
- McFarlane, G.A., Smith, P.E., Baumgartner, T.R. y Hunter, J.R. 2002. Climate variability and Pacific sardine populations and fisheries. *Am. Fish. Soc. Symp.* 32: 195-214.
- McFarlane, G.A., MacDougall, L., Schweigert, J. y Hrabok, C. 2005. Distribution and biology of Pacific sardines (*Sardinops sagax*) off British Columbia, Canada. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.* 46:144-160.19
- Nevárez-Martínez, M.O., Lluch-Belda, D., Cisneros-Mata, M.A., Santos-Molina, J.P., Martínez-Zavala, M.A. y Lluch-Cota, S.E. 2001. Distribution and abundance of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California and their relation with the environment. *Prog Oceanogr* 49: 565 – 580.

- Nevárez-Martínez, M.O., Martínez-Zavala, M.A., Coto-Altamirano, C.E., Jacob-Cervantes, M.L., Green-Ruiz, Y., Gluyas-Millán, G., Cota-Villavicencio, A. y Santos Molina, J.P. 2006. Peces Pelágicos Menores. En: Sustentabilidad
- Peterson, B., Emmett, R., Goericke, R., Venrick, E., Mantyla, A., Bograd, S.J., Schwing, F.B., Hewitt, R., Lo, N., Watson, W., Barlow, J., Lowry, M., Ralston, S., Forney, K.A., Lavaniegos, B.E. Hyrenbach, K.D., Sydeman, W.J., Bradley, R.W., Warzybol, P. Chavez, F., Hunter, K., Benson, S., Weise, M., Harvey, J., Gaxiola, G. y Durazo, R. 2006. The State of the California Current, 2005-2006: Warm in the north, Cool in the South. Calif. Coop. Ocean Fish Invest. Rep. 47: 30 -74.
- Marr, J. 1960. The causes of major variations in the catch of the Pacific sardine, *Sardinops caeruleus* (Girard). Rosa H, Murphy GI (eds) En: Proceedings of the World Scientific meeting on the Biology of Sardines and Related Species. FAO III: 667 - 791.
- Murphy, G.I. 1966. Population biology of the Pacific sardine (*Sardinops caerulea*). Proceedings of the California Academy of Sciences 34:1-84.
- Panella, G. 1971. Fish otoliths: Daily growth layers and periodic patterns. Science (Wash. D.C.) 173:1124-1127.
- Paul, A., Mulitza, S., Patzold, J. y Wolff, T. 1999. Simulation of oxygen isotopes in a global ocean model. En: Fisher G, Wefer G. Springer-Verlag (eds). Berlin. Use of proxies in paleoceanography: Examples from the South Atlantic. 665-686.
- Pereyra, R. T., Saillant, E., Pruett, C. L., C. E. Rexroad III, Rocha-Olivares, A. y Gold, J. R. 2004. Characterization of polymorphic microsatellites in the Pacific sardine *Sardinops sagax sagax* (Clupeidae). Molecular Ecology Notes 4: 739-741

- Quiñónez-Velázquez, C. Nevarez-Martínez, M.O. y Gluyas-Millan, M.G. 2000. Growth and hatching dates of juvenile pacific sardine *Sardinops caeruleus* in the Gulf of California. *Fisheries Research*. 48: 99-106
- Quiñónez-Velázquez, C., Alvarado-Castillo, R. y Félix-Uraga, R. 2002. Individual growth and population abundance relationship in the Pacific sardine *Sardinops caeruleus* (Pisces: Clupeidae) (Girard 1856) from Isla de Cedros, Baja California, Mexico. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* 37(1): 1 - 8.
- Radtke, R.L., Showers, W., Moksness, E. y Lenz, P. 1996. Environmental information stored in otoliths: insights from stable isotopes. *Mar. Biol.* 127: 161-170.
- Radovich, J. 1982. The collapse of Californian sardine fishery. What have we learned? *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.* 23: 56-79.
- Reiss, C.S., Checkley, D.M. y Bograd, S.J. 2008. Remotely sensed spawning habitat of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) and Northern anchovy (*Engraulis mordax*) within the California Current. *Fish. Oceanogr.* 17:2. 126-136.
- Secor, D.H., Dean, J.M. y Laban, E.H. 1991. Manual for otolith removal and preparation for microstructural examination. Electric Power Research Institute and the Belle W. Baruch Institute for Marine Biology and Coastal Research. 1-84.
- Schwarcz, H.P., Gao, Y., Campana, S., Browne, D., Knyf, M. y Brand, U. 1998. Stable carbon isotope variations in otoliths of Atlantic cod. *Can. J. Fish. Aquatic. Sci.* 55:1798- 1806.
- Sharp, Z. 2007. Principles of stable isotope geochemistry. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.

- Lasker R (editor) Marine Fish Larvae. Washington Sea Grant Program. En: Morphology, ecology and relation to fisheries. Smith, P.E. 1981. Coastal Pelagic Schooling Fish. 1-32.
- Smith, P.E. 2005. A history of proposals for subpopulation structure in the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) population off western North America. Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep. 46: 75-82.20
- Stenevik, E. K., Skogen, M., Sundby, S. y Boyer, D. 2003. The effect of vertical and horizontal distribution on retention of sardine (*Sardinops saxax*) larvae in the Northern Benguela – observations and modeling. Fish. Oceangr. 12:3, 185-200.
- Sverdrup, H.V., M.W. Jhonson y R.H. Fleming. 1970. The oceans: Their Physics chemistry and general biology. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1942. 1088pp.
- Takasuka, A., Oozeki, Y., Aoki, I., Kimura, R., Kubota, H., Sugisaki, H. y Akamine, T. 2008. Growth effect on the otolith and somatic size relationship in Japanese anchovy and sardine larvae. Fisheries Science. 74: 308-313.
- Thorrold, S.R., Campana, S.E., Jones, C.M. y Swart, P.K. 1997. Factors determining  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  fractionation in aragonitic otoliths of marine fish. Geochim. Cosmochim. Acta 61: 2909-2919.
- Valle, S. y Herzka, S. 2008. Reconstruction of temperature history and natal origin of the Pacific sardine in Mexican waters based on otolith  $\delta^{18}\text{O}$ . ICES J. Mar. Sci. doi:10.1093/icesjms/fsn001
- Vrooman, A. 1964. Serologically differentiated subpopulations of the Pacific sardine, *Sardinops caerulea*. J. Fish. Res. Board of Canada. 21: 691-701.

- Friedland, K.D., Waldman, J.R. Elsevier, Amsterdam 7-16. Walther, B.D., Thorrold, S.A. y Olney, J.E. 2008. Geochemical Signatures in Otoliths Record Natal Origins of American Shad. *Trans. of the Am. Fish. Soc.* 137: 57-69
- Waldman, J.R. 2005. Definition of Stocks: An evolving concept. En: Cadrin SX (ed) *Stock identification methods, Applications to Fishery Science.*
- Weidman, C.R. y Millner, R. 2000. High-resolution stable isotope records from North Atlantic cod. *Fish. Res.* 46:327-342.
- Whitehead, P.J. 1985. Clupeoid fishes of the World (suborder Clupeiidae). *FAO Fish. Synop.* 125:1-303.
- Wolf, P. 1992. Recovery of the Pacific sardine and the California sardine fishery. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.* 33: 76-86.
- Wisner, R.L. 1960. Evidence of northward movement of stocks of the Pacific sardine based on the number of vertebrae. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.* 8:75-82.
- Yaremko, M.L. 1996. Age determination in Pacific sardine, *Sardinops sagax*. US Dep. Commer. NOAA Tech Memo NOAA TM NMFS SWFSC 223 p.
- Zertuche-González, J. A.; Sosa-Nishizaki, O., Vaca Rodriguez, J. G.; del Moral Simanek, R.; Yarish, C. y Costa-Pierce, B. A. 2008. Marine science assessment of capture-based tuna (*Thunnus orientalis*) aquaculture in the ensenada region of northern Baja California, México. *Publications.* [http://digitalcommons.uconn.edu/ecostam\\_pubs/1](http://digitalcommons.uconn.edu/ecostam_pubs/1)

