



**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS  
OSCILACIONES DEL ATLÁNTICO NORTE  
SOBRE LA BIOLOGÍA DE PEQUEÑOS  
TÚNIDOS EN UN CONTEXTO DE CAMBIO  
CLIMÁTICO**

**MEMORIA DE TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR**

**Pedro Muñoz Expósito**

**DIRIGIDA POR**

**D. José Carlos Báez Barrionuevo y D. Ángel David Macías López**

**Programa de Doctorado de Diversidad Biológica y Medio Ambiente**

**Facultad de Ciencias**

**Universidad de Málaga**

**Año 2021**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Pedro Muñoz Expósito

 <https://orcid.org/0000-0001-7832-8792>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)



**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS  
PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

D./Dña Pedro Muñoz Expósito

Estudiante del programa de doctorado Diversidad Biológica y Medio Ambiente de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: “EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS OSCILACIONES DEL ATLÁNTICO NORTE SOBRE LA BIOLOGÍA DE PEQUEÑOS TÚNIDOS EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO”

Realizada bajo la tutorización de D. Raimundo Real Giménez, y dirección de D. José Carlos Báez Barrionuevo y D. Ángel David Macías López

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 15 de junio de 2021

Fdo.: Pedro Muñoz Expósito Doctorando/a	Fdo.: Raimundo Real Giménez Tutor/a
Fdo.: José Carlos Báez Barrionuevo y Ángel David Macías López Director/es de tesis	

## **AGRADECIMIENTOS**

Un trabajo de estas características implica, no sólo al autor si no también a muchas otras personas que, de manera directa o indirecta han sido claves para la consecución del mismo. Soy enormemente afortunado, por lo que sería imposible enumerar a todas estas personas; mi más profundo agradecimiento a todos de antemano.

Quisiera agradecer al Dr. Raimundo Real Giménez, catedrático del Departamento de Biología Animal de la Universidad de Málaga por darme la oportunidad de realizar este proyecto y ayudarme a cumplir una de mis grandes metas personales, tutorizando este trabajo.

También me gustaría mencionar en conjunto a todo el personal del Instituto Español de Oceanografía de Málaga por acogerme de la mejor manera posible y prestar una inestimable ayuda en todo momento.

A todo el equipo de tñidos del centro por darme la oportunidad de hacer de mi estancia junto a ellos un periodo de aprendizaje productivo. Siempre me hicieron sentir uno más de su equipo. A su responsable, el Dr. Ángel David Macías López por las labores de dirección y enseñanza desde que nos conocimos y por hacerme mi labor más fácil cada día y ceder los datos que han sido empleados en este estudio.

No hay nadie que me haya influido profesionalmente más que el Dr. José Carlos Báez Barrionuevo, director de este trabajo, mentor y amigo. Su gran entusiasmo y pasión por las ciencias marinas han sido de gran importancia para la realización y consecución de este proyecto. Siempre ha sido una mano amiga y un referente. Muchas gracias por todo.

A mis amigos. Gracias. Quiero agradecerles a todos el estar conmigo siempre pero no puedo dejar de mencionar a Daniel y a David. Gracias por ser siempre un punto de apoyo y consejo y por no permitir que una distancia física sea una verdadera distancia.

También quería tener una última mención para todos aquellos amigos y compañeros que no estoy mencionando en estas líneas y que de una manera u otra me han apoyado durante este proyecto y tantos otros. Por fortuna para mí son muchos y no podría mencionarlos a todos; aun así, los tengo en el recuerdo y tienen toda mi gratitud. Muchas gracias.

A toda mi familia por ayudarme y apoyarme en buenos y malos momentos. A mis abuelos, por ser el más fuerte referente que pude tener. No hay día que no piense en ellos. No hay día que no les agradezca.

A quienes no están y a quienes estuvieron. La verdad es que, para mí, siempre están.

A mi madre y a mi hermana: ejemplo de lucha, entrega y sacrificio, y otros tantos valores por los que nunca podré agradecer lo suficiente. No concibo la consecución de ninguna meta personal sin su esfuerzo y dedicación. A mis sobrinos, Pedro y Helena, por que, sin saberlo, también me hicieron crecer, me alegraron cada día y me sostuvieron en los momentos más complicados.

Y por último a Noelia. Ella ha sido mi mejor casualidad durante estos años. Siempre estuvo a mi lado en los buenos y en los malos momentos. Fue confidente, amiga y compañera. Siempre creyó en mí con una fe ciega y se involucra en cada proyecto mío como si fuera propio. Gracias por todo.

Si vi más allá, fue por estar a hombros de gigantes.

*Isaac Newton* (s. XIII)



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



Los doctores Raimundo Real Giménez, Catedrático de Universidad del Departamento de Biología Animal de la Universidad de Málaga, y José Carlos Báez Barrionuevo y Ángel David Macías López, Investigadores Titulares del Instituto Español de Oceanografía

HACEN CONSTAR

Que la presente memoria titulada **“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS OSCILACIONES DEL ATLÁNTICO NORTE SOBRE LA BIOLOGÍA DE PEQUEÑOS TÚNIDOS EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO”**, presentada por el licenciado **Pedro Muñoz Expósito** para optar al grado de doctor, ha sido realizada bajo su tutorización y dirección, respectivamente, y, dada la idoneidad del trabajo, cumple las condiciones exigidas para su presentación, la cual autorizan.

Para que así conste a los efectos oportunos, firman la presente en Málaga a 15 de junio de 2021.

*Tutor:*

*Dr. Raimundo Real Giménez*

*Director:*

*Dr. José Carlos Báez Barrionuevo*

*Dep. Biología Animal, Facultad de  
Ciencias, Universidad de Málaga*

*Centro Oceanográfico de Málaga  
(Fuengirola, Málaga), Instituto Español  
de Oceanografía*

*Director:*

*Dr. Ángel David Macías López*

*Centro Oceanográfico de Málaga (Fuengirola, Málaga),  
Instituto Español de Oceanografía*



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## GLOSARIO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- **AO:** Siglas en inglés correspondientes a “*Arctic Oscillation*”; en referencia a la Oscilación Ártica.
- **AMO:** Siglas en inglés correspondientes a “*Atlantic Multidecadal Oscillation*”; en referencia a la Oscilación Atlántico Mutidecadal.
- **CMS:** Siglas en inglés correspondientes a “*Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals*”; en referencia a la Convención sobre la Conservación de las Especies Migratorias de Animales Silvestres.
- **ENSO:** Siglas en inglés correspondientes a “*El Niño Southern Oscillation*” referentes a la oscilación atmosférica provocada por el fenómeno de El Niño.
- **FAO:** Siglas en inglés correspondientes a “*Food and Agriculture Organization of the United Nations*”; en referencia a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- **ICCAT:** Siglas en inglés correspondientes a “*Internacional Commission for the Conservation of the Atlantic Tunas*”; en referencia a la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico.
- **IEO:** Instituto Español de Oceanografía.
- **IGS:** Índice Gonadosomático.
- **IPCC:** Siglas en inglés correspondientes a “*Intergovernmental Panel on Climate Change*”; en referencia al Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.
- **MJO:** Siglas en inglés correspondientes a “*Madden-Julian Oscillation*”; en referencia a la Oscilación de Madden-Julian.
- **NAO:** Siglas en inglés correspondientes a “*North Atlantic Oscillation*”; en referencia a la Oscilación del Atlántico Norte.
- **NAO<sub>acum</sub>:** Siglas en inglés correspondientes a “*North Atlantic Oscillation accumulated*”; en referencia a la Oscilación del Atlántico Norte acumulada.
- **NAO<sub>pw</sub>:** Siglas en inglés correspondientes a “*North Atlantic Oscillation previous winter*”; en referencia a la Oscilación del Atlántico Norte del invierno previo.

- **NAO<sub>w</sub>**: Siglas en inglés correspondientes a “*North Atlantic Oscillation winter*”; en referencia a la Oscilación del Atlántico Norte durante el periodo de invierno.
- **NAO<sub>py</sub>**: Siglas en inglés correspondientes a “*North Atlantic Oscillation previous year*”; en referencia a la Oscilación del Atlántico Norte del año previo.
- **NOAA**: Siglas en inglés correspondientes a “*National Oceanic and Atmospheric Administration*”; en referencia a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.
- **PSU**: Siglas en inglés correspondientes a “*practical salinity units*”; unidades de salinidad prácticas.
- **UICN**: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.
- **UNCLOS**: Siglas en inglés correspondientes a “*United Nations Convention on the Law of the Sea*”; en referencia al Convenio de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar.

## RELACIÓN DE FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS

- **Figura 1.1:** Apariencia externa de la melva, *Auxis rochei* (Risso, 1810). Fuente: FAO, 2010. **Página 13**
- **Figura 1.2:** Distribución geográfica de *Auxis rochei*. Fuente: Valeiras & Abad (2006). **Página 14**
- **Figura 1.3:** Distribución interanual de las capturas en kilogramos de *Auxis rochei* en el Océano Atlántico y el mar Mediterráneo. Fuente: FAO. **Página 14**
- **Figura 1.4:** Apariencia externa de la bacoreta, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque, 1810). Fuente: FAO. **Página 17**
- **Figura 1.5:** Distribución geográfica de *E. alletteratus*. Fuente: Valeiras & Abad (2006). **Página 17**
- **Figura 1.6:** Distribución interanual de las capturas en kilogramos de *Euthynnus alletteratus* en el Océano Atlántico y el mar Mediterráneo. Fuente: Valeiras & Abad (2006). **Página 19**
- **Figura 1.7:** Apariencia externa del bonito, *Sarda sarda* (Bloch, 1793). Fuente: FAO. **Página 20**
- **Figura 1.8:** Distribución geográfica de *S. sarda*. Fuente: Valeiras & Abad (2006). **Página 21**
- **Figura 1.9:** Distribución interanual de las capturas en kilogramos de *Sarda sarda* en el Océano Atlántico y el mar Mediterráneo. Fuente: Valeiras & Abad (2006). **Página 23**
- **Figura 1.10:** Representación esquemática de ambas fases de la Oscilación del Atlántico Norte. Fuente: NOAA. **Página 27**
- **Figura 2.1:** Áreas de captura de los ejemplares de melva en el mar de Alborán (cuadrado azul) y Mediterráneo occidental (cuadrado rojo). Fuente: www.seaturtle.org. **Página 36**

- **Figura 2.2:** Mapa del mar de Alborán en el que se muestran los giros que originan los afloramientos. El área gris muestra las principales áreas de productividad de fitoplancton. Fuente: Hauschildt *et al.*, (1999). **Página 38**
- **Figura 3.1:** Detalle de los lugares de captura de los ejemplares a lo largo de la costa del mar de Alborán y el Mediterráneo occidental. Clave: CE=Ceuta; FU=Fuengirola; MA=Málaga; MO=Motril; AL=Almería; AZ=La Azohía; SP=Santa Pola; CA=Calpe; PF=Pobla de Farnals; PM=Palma de Mallorca. Fuente: [www.seaturtle.org](http://www.seaturtle.org). **Página 45**
- **Figura 3.2:** Detalle del proceso de medición de los individuos. **Página 46**
- **Figura 3.3:** Detalle de la apariencia externa de las gónadas de *A. rochei*. A) Gónada femenina; B) Gónada masculina. **Página 47**
- **Figura 3.4:** Relaciones talla-peso anuales y general para *A. rochei* pre-reproductor. **Página 54**
- **Figura 3.5:** Relaciones talla-peso para hembras (A) y machos (B) pre-reproductores. **Página 56**
- **Figura 3.6:** Relaciones talla-peso para las diferentes clases de edad. A: Edad 1; B: Edad 2 and C: Edad 3+. **Página 58**
- **Figura 3.7:** Relación talla-peso para los ejemplares de melva post-reproductores en el mar Mediterráneo. **Página 60**
- **Figura 3.8:** Relaciones talla-peso para hembras (A) y machos (B) post-reproductores. **Página 61**
- **Figura 3.9:** Relaciones talla-peso para todas las clases de edad. A: Edad 1; B: Edad 2 y C: Edad 3+. **Página 62**
- **Figura 4.1:** Localización geográfica de la almadraba de La Azohía donde se realizaron las capturas de *E. alletteratus*. **Página 73**
- **Figura 4.2:** Relaciones talla-peso anuales y general de *E. alletteratus* capturadas en la almadraba de La Azohía en el periodo 2003-2016. **Página 79**
- **Figura 4.3:** Relaciones talla-peso para las hembras y machos de *E. alletteratus* capturadas en La Azohía durante el periodo 2003-2016. **Página 81**

- **Figura 4.4:** Relaciones talla-peso por clase de edad. A: Edad 1; B: Edad 2; C: Edad 3; D: Edad 3+. **Página 82**
- **Figura 5.1:** Relaciones talla-peso anuales y general de *S. sarda* capturadas en la almadraba de La Azohía en el periodo 2003-2016. **Página 95**
- **Figura 5.2:** Relaciones talla-peso para las hembras (arriba) y machos (debajo) de *S. sarda* capturados en La Azohía durante el periodo 2003-2016. **Página 96**
- **Figura 5.3:** Relaciones talla-peso para las distintas clases de edad de los ejemplares de *S. sarda* capturados en la Azohía durante el periodo 2003-2016. Edad 1: arriba izquierda; Edad 2: arriba derecha; Edad 3: Abajo. **Página 97**
- **Figura 6.1:** Localización geográfica de las capturas de *E. alletteratus*, *A. rochei* y *S. sarda*. **Página 106**

## **TABLAS**

- **Tabla 1.1:** Posición taxonómica de los túnidos. **Página 10**
- **Tabla 3.1:** Clave talla-edad con el porcentaje de individuos por clases de edad en relación con la longitud furcal expresada en centímetros. **Página 48**
- **Tabla 3.2:** Procedencia de los 2357 individuos de melva tras la filtración. Clave: “Localización” corresponde al lugar de descarga de cada individuo; “Arte de Pesca” se refiere al método de pesca empleado para su captura; y “Subtotal” y “Total” son las cantidades parciales y totales de *A. rochei* por arte de pesca y localización. **Página 51**
- **Tabla 3.3:** Coeficientes de regresión obtenidos por año para la melva pre-reproductora, así como los índices de condición anuales, donde se muestra el número de individuos analizados cada año. Clave: “a” y “b” son los coeficientes de regresión,  $R^2$  es el coeficiente de determinación y K-mean y LeCren representan los factores de condición medios por año. **Página 55**
- **Tabla 3.4:** Correlaciones estadísticas encontradas entre los índices de condición y los atmosféricos. Se muestran únicamente los resultados para los cuales se da que  $p\text{-value} < 0.01$ . **Página 55**
- **Tabla 3.5:** Coeficientes de regresión e índices de condición obtenidos para machos y hembras pre-reproductores. **Página 57**

- **Tabla 3.6:** Correlaciones estadísticas entre el índice  $K_{\text{mean}}$  para machos y hembras y los índices atmosféricos. Únicamente se muestran los resultados con un valor de p-value inferior a 0.01. **Página 57**
- **Tabla 3.7:** Parámetros de regresión y factores de condición medios por clase de edad. Clave: % representa el porcentaje de melvas distribuidos en las diferentes clases de edad, “b” y “ $R^2$ ” son los coeficientes de regresión y  $K\text{-mean}$  y  $\text{LeCren}$  representan el factor de condición por año. **Página 58**
- **Tabla 3.8:** Correlaciones establecidas entre la condición física y los índices atmosféricos para las 3 clases de edad. Solo se muestran los resultados con un p-value inferior a 0.01. **Página 59**
- **Tabla 3.9:** Coeficientes de regresión e índices de condición promedio para machos y hembras post-reproductores. **Página 62**
- **Tabla 3.10:** Coeficientes de regresión e índices de condición promedio para las diferentes clases de edad. Clave: % representa el porcentaje de ejemplares que se distribuyen en cada una de las clases de edad, “b” y “ $R^2$ ” son los coeficientes de regresión y  $K\text{mean}$  y  $\text{LeCren}$ , los factores de condición promedio. **Página 63**
- **Tabla 3.11:** Resultados estadísticamente significativos tras el test de para el índice  $K\text{mean}$  y los ejemplares de la clase de edad 3+.  $P < 0.05$ . **Página 63**
- **Tabla 4.1:** Clave talla-edad donde se representa el porcentaje de individuos de *E. alletteratus* por clases de edad en relación con la longitud furcal expresada en centímetros. **Página 75**
- **Tabla 4.2:** Coeficientes de regresión obtenidos por año para la bacoreta pre-reproductora, así como los índices de condición anuales, donde se muestra el número de individuos analizados cada año. Clave: “a” y “b” son los coeficientes de regresión,  $R^2$  es el coeficiente de determinación y  $K\text{-mean}$  y  $\text{LeCren}$  representan los factores de condición medios por año. **Página 80**
- **Tabla 4.3:** Correlaciones estadísticas entre los índices de condición y los atmosféricos. Se muestran únicamente los resultados que cumplen: p-value  $< 0.01$ . **Página 80**

- **Tabla 4.4:** Coeficientes de regresión e índices de condición obtenidos para los machos y hembras de *E. alletteratus* capturados en La Azohía durante el periodo entre 2003-2016. **Página 81**
- **Tabla 4.5:** Parámetros de regresión y factores de condición promedio por clases de edad. Clave: % representa el porcentaje de melvas distribuidos en las diferentes clases de edad, “b” y “R<sup>2</sup>” son los coeficientes de regresión y K y LC representan el factor de condición por año. **Página 82**
- **Tabla 4.6:** Resumen de las correlaciones establecidas entre la condición física y los índices atmosféricos para las 3 clases de edad de *E. alletteratus*. Solo se muestran los resultados con un p-value inferior a 0.01. **Página 83**
- **Tabla 5.1:** Clave talla-edad donde se representa el porcentaje de individuos de *S. sarda* por clases de edad en relación con la longitud furcal expresada en centímetros. **Página 95**
- **Tabla 5.2:** Coeficientes de regresión obtenidos por año para *S. sarda*, así como los índices de condición anuales, donde se muestra el número de individuos analizados cada año. Clave: “a” y “b” son los coeficientes de regresión, R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación y K-mean y LeCren representan los factores de condición medios por año. **Página 97**
- **Tabla 5.3:** Coeficientes de regresión e índices de condición obtenidos para los machos y hembras de *S. sarda* capturados en La Azohía durante el periodo entre 2003-2016. **Página 98**
- **Tabla 5.4:** Parámetros de regresión y factores de condición promedio por clases de edad. Clave: % representa el porcentaje de melvas distribuidos en las diferentes clases de edad, “b” y “R<sup>2</sup>” son los coeficientes de regresión y K y LC representan el factor de condición promedio por año. **Página 98**
- **Tabla 6.1:** Parámetros de las relaciones talla-peso por especie. **Página 106**

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto global	2
1.2 Migraciones marinas frente al cambio global	5
1.3 Túnidos	8
1.3.1 Pesquerías de túnidos	8
1.3.2 Ficha descriptiva de la melva ( <i>Auxis rochei</i> )	12
1.3.3 Ficha descriptiva de la bacoreta ( <i>Euthynnus alletteratus</i> )	16
1.3.4 Ficha descriptiva del bonito ( <i>Sarda sarda</i> )	19
1.4 Oscilaciones atmosféricas	23
1.5 Objetivos	32
<b>2. MATERIAL Y MÉTODOS</b>	<b>34</b>
2.1 Área de estudio	35
2.1.1 La cuenca hidrográfica del mar Mediterráneo	36
2.1.2 La cuenca hidrográfica del mar de Alborán	38
2.1.3 La cuenca hidrográfica del Mediterráneo noroccidental	39
2.2 Adquisición de los datos atmosféricos	39
2.3 La almadraba de La Azohía	40
<b>3. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN FÍSICA DE LA MELVA (<i>Auxis rochei</i>)</b>	<b>43</b>
3.1 Contexto general	44
3.2 Metodología	44
3.2.1 Cálculo de los índices de condición	49
3.2.2 Procedimiento de eliminación de valores atípicos	50
3.2.3 Análisis de los datos	51
3.3 Resultados	52
3.3.1 Relaciones talla-peso e índices de condición	52
3.3.1.1 Individuos pre-reproductores	52
3.3.1.2 Individuos post-reproductores	60
3.4 Discusión	64
3.4.1 Resultados biológicos	64
3.4.2 Proyecciones futuras	69
3.4.3 Efectos de las proyecciones futuras de calentamiento global sobre la biología de <i>Auxis rochei</i> .	69
<b>4. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN FÍSICA DE LA BACORETA (<i>Euthynnus alletteratus</i>)</b>	<b>71</b>
4.1 Contexto general	72

4.2 Metodología	73
4.2.1 Cálculo de los índices de condición	76
4.2.2 Análisis de los datos	76
4.3 Resultados	77
4.3.1 Relaciones talla-peso e Índices de condición	77
4.4 Discusión	83
4.4.1 Resultados biológicos	83
4.4.2 Proyecciones futuras	86
4.4.3 Efectos de las predicciones futuras de calentamiento global sobre la biología de <i>Euthynnus alletteratus</i>	87
<b>5. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN FÍSICA DEL BONITO (<i>Sarda sarda</i>)</b>	<b>88</b>
5.1 Contexto general	89
5.2 Metodología	90
5.2.1 Cálculo de los índices de condición	91
5.2.2 Análisis de los datos	92
5.3 Resultados	93
5.3.1 Relaciones talla-peso e Índices de condición	93
5.4 Discusión	99
5.4.1 Resultados biológicos	99
5.4.2 Proyecciones futuras	101
<b>6. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD REPRODUCTORA DE MELVA (<i>Auxis rochei</i>), BONITO (<i>Sarda sarda</i>) Y BACORETA (<i>Euthynnus alletteratus</i>)</b>	<b>102</b>
6.1 Contexto general	103
6.2 Metodología	104
6.3 Resultados	106
6.4 Discusión	108
<b>7. DISCUSIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS</b>	<b>110</b>
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>117</b>
<b>9. REFERENCIAS</b>	<b>120</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>133</b>

## **RESUMEN**

El objetivo primordial de este estudio es explorar los efectos que las oscilaciones climáticas pueden ocasionar sobre la biología de tres especies de túnidos: la melva (*Auxis rochei*), la bacoreta (*Euthynnus alletteratus*) y el bonito (*Sarda sarda*) durante los movimientos migratorios característicos que estas especies llevan a cabo en el océano Atlántico oriental y el Mediterráneo occidental, así como en el área del estrecho de Gibraltar, que conecta naturalmente ambas cuencas marinas. De manera complementaria, se pretende establecer una serie de medidas de gestión de las poblaciones de estas tres especies en relación a su respuesta a la prevalencia de unas ciertas condiciones atmosféricas.

Este objetivo se enmarca en un contexto generalizado marcado de sobreexplotación de los recursos pesqueros a nivel global, con especial incidencia en la cuenca mediterránea. Por ello es preciso asignar recursos a una serie de organismos internacionales, comunitarios, organizaciones regionales de ordenación pesquera u organismos nacionales en los que se definen cuales han de ser los objetivos de los estados en pro de la conservación de sus recursos pesqueros. Especial atención merecen aquellas especies o grupos de especies *altamente migratorias*, entendidos como recursos compartidos por las jurisdicciones de varios estados, tales como túnidos, tortugas o varias especies de tiburones pelágicos, y que precisan por lo tanto de planes de gestión y recuperación específicos e internacionales.

En un contexto general, las variaciones en los factores oceanográficos y climáticos tienen una influencia directa sobre diversos aspectos de la biología de estas especies migradoras. En el ámbito geográfico de este estudio, las variaciones climáticas más importantes vienen definidas por la Oscilación del Atlántico Norte, fenómeno definido como la diferencia de presiones atmosféricas entre la zona de bajas presiones en torno a Islandia en el Atlántico norte y la zona de bajas presiones localizada en el archipiélago de las Azores que ha sido utilizada para explicar gran parte de la variabilidad atmosférica observada en el área del Atlántico norte y Mediterráneo occidental.

El Mediterráneo occidental se caracteriza por presentar condiciones climáticas e hidrodinámicas que favorecen la reproducción y alevinaje de especies migratorias. Estas condiciones son variables en temporalidad e intensidad. Por ello, a fin de testar la posible conexión entre los factores climáticos de la zona y la fenología de estas tres

especies de túnidos se analizaron las capturas comerciales de las mismas a lo largo de la costa mediterránea española. Cada ejemplar fue medido, pesado, sexado y le fue asignada una clase de edad a través de métodos indirectos. Para la estimación de la edad se empleó una clave talla-edad publicada para cada especie en la zona del Mediterráneo, de modo que para un cierto rango de longitud furcal a cada ejemplar se le asigna una clase de edad teórica. A continuación, una vez obtenida la relación talla-peso por año, sexo y clase de edad se obtuvieron los diferentes índices de condición física por especie, sexo, clase de edad y año. Además, se calculó el índice gonadosomático individual de las hembras en cada caso.

Por otro lado, se tomaron de manera mensual los datos atmosféricos del índice NAO del sitio web de la agencia NOAA (de las siglas en inglés *National Oceanic and Atmospheric Administration*). A continuación, se calculó el promedio anual y, teniendo en cuenta que durante los meses de invierno es cuando este índice presenta una mayor variabilidad se propusieron una serie de modificaciones temporales de este índice para adecuarlo a los meses de invierno. A tal efecto, se consideró el periodo invernal el periodo de tiempo comprendido entre los meses de octubre del año previo y marzo del año en curso. Estas modificaciones tienen por finalidad, además de evaluar la influencia de los meses de invierno, poder establecer un lapso temporal entre la prevalencia de unas determinadas condiciones climáticas en la zona y las consecuencias biológicas que se observaron en los ejemplares de las tres especies evaluadas.

Posteriormente se procedió al análisis de los datos, testando en primer lugar la normalidad de los mismos mediante un test de Kolmogorov-Smirnov, así como la variabilidad temporal tanto del índice NAO como los índices de condición. A continuación, se llevó a cabo un test no paramétrico de Mann-Whitney ( $\alpha=0.05$ ) para testar posibles diferencias significativas en ambos índices de condición por sexo y antes y después de la época de puesta. Finalmente, se realizó un test de correlación de Spearman ( $\alpha=0.01$ ) para testar la correlación entre la variabilidad atmosférica observada y los dos índices de condición antes y después de la puesta, por sexo y por edad.

Los resultados obtenidos reflejan una fuerte influencia de las oscilaciones climáticas tanto en el índice de condición de las tres especies como en el índice gonadosomático de las mismas, obteniendo además de manera general diferencias significativas en ambos índices para las diferentes fases del índice NAO. Se encontraron patrones muy similares para la bacoreta y el bonito, especies para las que se encontraron correlaciones positivas

del índice de condición y gonadosomático. En contraposición se encontraron resultados diferentes para el caso de la melva, especie para la que se obtuvieron correlaciones negativas entre NAO y ambos índices evaluados. Así pues, estos resultados sugieren, en concordancia con lo publicado por otros autores la existencia de diferentes estrategias entre estas especies en lo que respecta a la inversión energética empleada en la migración reproductora y posterior desove. Las diferencias observadas entre la melva y las otras dos especies pueden deberse a un periodo reproductivo más largo o a una mayor retención de la grasa debido al menor tamaño corporal. No obstante lo anterior, queda patente por un lado que durante las fases positivas del índice NAO se facilitarían la migración reproductiva de estas especies y, además, la existencia de un desfase temporal entre la situación atmosférica y las consecuencias biológicas ocasionadas. Una situación desfavorable afectaría en mayor medida a melva y bonito, puesto que sus capturas se centran en una o dos clases de edad, lo que modificaría la estructura poblacional y pondría en riesgo el éxito reproductivo, el posterior reclutamiento y en consecuencia el estado de sus stocks. En definitiva, estos resultados deben servir para tomar las medidas de gestión oportunas a corto, medio y largo plazo para la conservación de estas especies.

Este estudio aporta resultados concluyentes acerca de la influencia de las variaciones climáticas sobre la biología de los túnidos de menor tamaño durante los movimientos migratorios que estas especies realizan en el área del Mediterráneo occidental y su posterior salida hacia el océano Atlántico a través del estrecho de Gibraltar. No obstante, siguen existiendo lagunas en el conocimiento pleno de la biología de este grupo de especies y de especies con un comportamiento migratorio similar y de la influencia que los factores climáticos y ambientales podrían tener sobre ellas en un contexto global donde existe una creciente preocupación general por el calentamiento global. Por ello, se hace necesario ahondar en el conocimiento científico en esta línea para determinar los efectos del cambio climático sobre la sostenibilidad de la explotación de especies altamente migratorias en un contexto de cambio climático,

## **SUMMARY**

The major aim of this study is to explore the possible effects that climatic oscillations may trigger over different aspects of the biology of three different small-sized tuna species such as bullet tuna (*Auxis rochei*), little tunny (*Euthynnus alletteratus*) and mediterranean bonito (*Sarda sarda*) during their distinctive migratory movements that this group of species perform in the area of the Eastern Atlantic Ocean and Mediterranean Sea, as well as the Strait of Gibraltar that naturally connects these marine basins.

Thus, it is intended, on the one hand to fulfill those knowledge gaps that nowadays entail certain aspects of the biology of this species, as well as to obtain the necessary tools to infer the state of the populations of this group of species and related, depending on the climatic oscillations forecasts. Moreover, to establish the time lag between the prevalence of a certain climatic conditions and the biological response triggered in the assayed species is also aimed. Finally, this study pretends to establish some management policies of these species linked to their response to the prevalence of these atmospheric conditions.

This study takes place within a framework where most of fisheries resources are highly overexploited worldwide; situation otherwise enhanced in semi-closed marine basins such as the Mediterranean Sea, where the overexploitation levels are, by far, higher than those observed in other basins. Therefore, it is necessary to resort to a wide range of regulations at the international level, such as the Bonn Convention, UNCLOS convention, or other european instruments such the International Union for Conservation of Nature (IUCN), the International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT) as well as other national plans, in which the objectives in pursuit of the conservation of fisheries resources are detailed.

Those considered as highly migratory species deserve special attention, in which numerous institutions put great efforts for their conservation since they are resources shared between the jurisdictions of different states. For this reason group of species like tunas, sea turtles or pelagic sharks among others are prone to overexploitation and

hence they need specific management and conservation programs. In this context, tuna species are a key group of species in fisheries worldwide and no less important for Spanish fisheries, since they attain high market values in some cases and they constitute a very important socioeconomic resource in many coastal areas. This group of species is characterized by a huge fishing pressure worldwide but also by a strong influence of environmental factors over their phenology, reproduction, recruitment, distribution or abundance among others; as proven by several scientific studies. Thus, variations in oceanographical features such as water temperature, salinity or intensity and direction of oceanic currents are extremely important in the biology of migratory species, otherwise linked to atmospheric and hence weather variations. In this study, these variations are indexed by the North Atlantic Oscillation (NAO), defined by a difference of atmospheric pressure between the low pressure center located around Iceland and the high pressure center usually identified close to the Azores archipelago. This index has been widely used to denote the atmospheric variability observed in the area of the north Atlantic Ocean and the western Mediterranean Sea.

Considering this framework, three different small tuna species have been chosen for this study: bullet tuna (*Auxis rochei*), little tunny (*Euthynnus alletteratus*) and mediterranean bonito (*Sarda sarda*). This choice has been taken due to the high presence of these species among Spanish fleet commercial catches, and the lack of knowledge between the interaction of climatic variations and the biology of these species; unlike large tuna species, whose scientific knowledge is larger. Thus, the specimens of the three studied species were collected in commercial catches by the Spanish fleet from the western Mediterranean coast during the migratory movements that, similarly, these species perform towards their spawning grounds located in the Mediterranean Sea, and the way back towards the Atlantic Ocean for wintering and feeding purposes. This study takes in the westernmost part of the Mediterranean Sea, an area characterized by hydrodynamic and temperature regimes that make them suitable for the spawning and reproduction of tuna species, highly influenced by sea temperature. Nonetheless, the Alboran Sea spot is featured by the presence of an intense current off the Mediterranean Sea towards the Atlantic Ocean, which combined with the orography lead to a raise of deep waters rich in nutrients. This enhances on the one hand the post reproductive migration of tuna species and on the other hand, it acts as a feeding and recovery ground after spawning. These hydrodynamic structures are fluctuating regarding intensity and seasonality as a

function of several climatic factors, according to a large number of scientific publications on the matter.

Atmospheric data relative to the NAO index were taken from the website of the NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) agency. Firstly, the annual average was obtained and posteriorly, considering that this index experiences its greatest variability during winter months, a series of seasonal modifications of this index were proposed to improve accuracy of the further analysis. For this reason, winter period was considered from October of the previous year to march of the current year. These modifications aim to assess the influence of winter months in the biology of tuna species, as well as to establish a time lag between the prevalence of a certain climatic conditions and the biological consequences triggered.

To evaluate the physical condition of the bullet tuna and its linkage with climate factors, a total of 2381 specimens were considered. These were collected in different spots of the Spanish mediterranean coast and the Alboran Sea. Catches were collected in two different periods: between 1983 and 1984, and from 2003 to 2015 aiming to assess all records collected by the Spanish Institute of Oceanography. They were collected following a random stratified sampling protocol implemented by the ICCAT. Each specimen was measured to the fork up to the closest centimeter, weighted to the nearest gram and sexed by visual exploration of the gonad. Posteriorly, an age class (1, 2 or 3+) was endorsed to each individual according to the observed length by using an age-length key as an indirect estimating method. After that, a potential length weight relationship was obtained per year that allowed, once obtained the regression parameters, to determine the physical condition indexes individually. Finally, and prior statistical analysis, the whole database was filtered aiming to remove outliers taking into account the LeCren index, resulting in a total of 2357 records remaining.

Regarding the other two species, sampling procedure was alike. In this case, both little tunny and Atlantic bonito were always collected in the trap of La Azohía, during the period from 2003 to 2016. A total of 561 individuals of little tunny were collected whereas a final amount of 703 specimens of mediterranean bonito were finally considered during the period of study. As detailed for the bullet tuna, each fish was measured to the fork, weighted and sexed by visual exploration of the gonad and an age class was endorsed to every specimen by mean of an age length key published for each

species in the Mediterranean Sea. As a final step, annual potential length-weight relationships were obtained, which allowed estimating condition indexes individually.

To analyze the data, a Kolmogorov-Smirnov test was conducted in first place in order to test normality of the set, as well as the temporal variability of both the NAO index and the condition indices. Posteriorly, a Mann-Whitney non parametric test ( $\alpha=0.05$ ) was performed aiming to test significant differences in both condition indexes by sex and before and after the spawning period. Finally a Spearman correlation test ( $\alpha=0.01$ ) was implemented to test the correlation between atmospheric variability and the two condition indexes by sex, age and before and after the spawning period.

Results reveal a strong influence of the climatic oscillations over the physical condition and migratory behavior of *A. rochei*, where a better condition is generally observed before the spawning season, enhanced by positive phases of NAO index and a time lag is detected in all cases for the three species. These results are consistent with those obtained for other larger tuna species such as bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) or albacore (*Thunnus alalunga*). Therefore, according to climate forecasts, and in the light of these results, a worse condition status for bullet tuna populations in this area is expected, which subsequently would lead to a lower reproductive success, lower recruitment rates and hence a decrease in abundance, and even it may trigger shifts in the migratory behavior of these species. Nonetheless, there are still several gaps of knowledge that need to be fulfilled for a better understanding of the dynamics of these species.

The last part of this study aims to assess the reproductive capacity of these species (bullet tuna, little tunny and mediterranean bonito), collected in La Azohia trap located in southestern part of the Spanish mediterranean coast following an anual sampling protocol desgined by the ICCAT and implemented by the Spanish Institute of Oceanography. Thus, individuals were collected in a variable amount per species and year within the period comprised between 2003 and 2015. Both individual fork lentgth and weigth were determined and each individual was sexed by visual exploration of the gonad and female were only selected for this study, since the number and quality of the oocytes is the factor that most determines reproductive success. After that, gonads were weighted to the nearest gram.

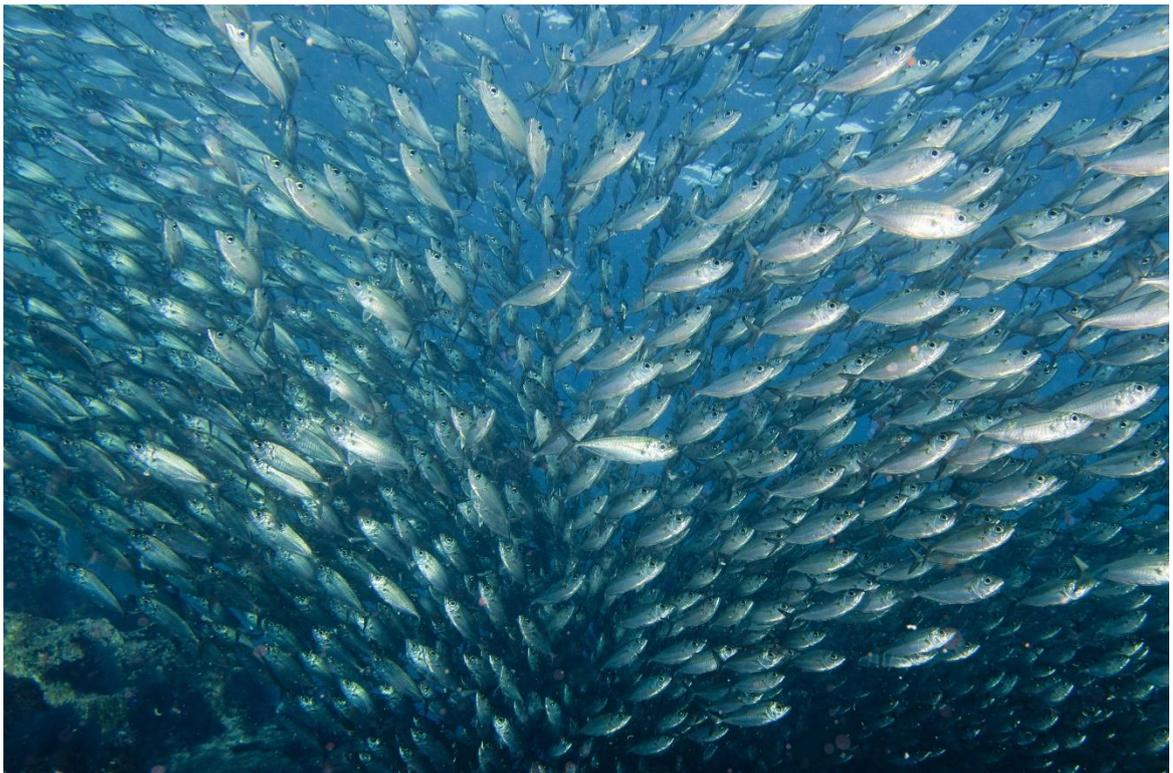
Potential length-weight relationships were obtained per species, and by using the regression coefficients, an annual LeCren condition index as well as the individual gonadosomatic index were calculated per species. Finally a non parametric U-Mann Whitney test ( $\alpha=0.05$ ) was performed aiming to test correlations between different phases of the NAO index and the variability observed in both LeCren condition index and gonadosomatic index.

The results obtained denote a strong influence of the climatic oscillations for both the LeCren condition index and gonadosomatic index for the three species, whereas in a general way, significant differences in both indices for the different phases of the NAO index were also obtained. Similar patterns for both little tunny and mediterranean bonito were found, species for which positive correlations of the condition index and gonadosomatic were found. On the contrary, slightly different results were found for the case of melva, species for which negative correlations were found between NAO and both evaluated indices. These results therefore suggest, accordingly with those results obtained by other authors, the existence of different strategies among these species regarding the energy investment used in reproductive migration and subsequent spawning. The observed differences between the bullet tuna and the other two species might be due to a wider reproductive period or even to increased fat retention due to its body size. Nonetheless, it is clear, on the one hand, that during the positive phases of the NAO index, the reproductive migration of these species would be facilitated and, furthermore, the existence of a time lag between the atmospheric situation and the biological consequences caused. In this context, an unfavorable situation would affect bullet tuna and mediterranean bonito to a greater extent, since their catches are focused on one or two age classes, which would modify the population structure and put at risk reproductive success, recruitment and, ultimately, fish stocks. Ultimately, these results should serve to take appropriate management measures in the short, medium and long term for the conservation of these species.

This study provides conclusive results about the influence of climatic variations on the biology of smaller tuna species during the migratory movements that these species carry out in the western Mediterranean area and their subsequent exit towards the Atlantic Ocean through the Strait of Gibraltar. However, there are still several gaps in the full knowledge of the biology of this group of species and of species with a similar migratory behavior and of the influence that climatic and environmental factors could

have on them in a global context where there is a growing general concern about climate change. This is a key reason that justifies the need to continue this branch of research that allows deepening in scientific knowledge.

# **1. INTRODUCCIÓN**



## **1.1 Contexto General**

El aprovechamiento de los recursos marinos ha permitido a lo largo de la historia obtener una multitud de beneficios de los ecosistemas marinos. Esta afirmación representa un patrón que prevalece hasta la actualidad (Luebbbers, 1978; Veski *et al.*, 2005; Báez *et al.*, 2018; Duarte *et al.*, 2020; Piroddi *et al.*, 2020; Cochrane, 2021). De acuerdo con las Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), adscrita a la Organización de las Naciones Unidas, una importante proporción de los alimentos consumidos en todo el mundo procede del mar, ya sea de una manera directa o indirecta. Esto queda reflejado en el informe SOFIA realizado por la FAO acerca del estado mundial de las pesquerías y recursos acuícolas. En este informe se presenta, con carácter bianual, los niveles de producción pesquera y acuícola, explotación de los recursos marinos y el consumo directo e indirecto de los productos pesqueros, entre otros muchos datos de interés (FAO, 2020).

Desafortunadamente, durante las últimas décadas hasta la actualidad, el desarrollo humano, así como el incremento de la población mundial han originado una situación de sobreexplotación de muchos ecosistemas en general (Vitousek *et al.*, 1997) y marinos en particular (McCauley *et al.*, 2005; Báez *et al.*, 2018). Esta situación general se ve especialmente agravada en aquellos países considerados en vías de desarrollo, que basan una parte de su fuente de ingresos en la pesca (Tidd *et al.*, 2018; FAO, 2020). En este contexto, los ecosistemas pelágicos constituyen una fuente socioeconómica importante de recursos para la humanidad (Würtz, 2010; FAO, 2020). Por ello, han ido surgiendo diversos instrumentos de conservación y gestión en el ámbito de la cooperación con el objetivo de establecer un marco legal para la protección de estos ecosistemas, así como los recursos pelágicos vivos y no vivos. En algunos casos estos instrumentos aparecen como meras declaraciones de intención en pro de la colaboración, y en otros casos son organismos internacionales de naturaleza vinculante como la Conservación para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT) o la Comisión para el Atún del Océano Índico (IOTC); esta última organización, auspiciada por la FAO (Organización para la Alimentación y la Agricultura), dependiente de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Otro de los instrumentos adoptados por la ONU ante una situación de crecimiento exponencial de la población mundial y la consecuente sobreexplotación de los ecosistemas tanto marinos como terrestres, es la conocida como “Agenda 2030”, un

ambicioso programa adoptado en 2015, que compromete a los estados a llevar a cabo una serie de acciones en pro de la prosperidad económica, el desarrollo sostenible, la explotación racional de los recursos y la conservación de especies y ecosistemas entre otros objetivos. No obstante, para el año 2020 se ha notado que no se avanza adecuadamente hacia el cumplimiento de tales objetivos. Esto queda de manifiesto en la última versión del informe SOFIA (FAO, 2020), que se publica con carácter bianual y de donde se obtienen una serie de conclusiones acerca del estado generalizado de los recursos pesqueros y acuícolas, y cuáles deben ser las líneas generales de actuación para la conservación de estos recursos, toda vez que se garantice la explotación sostenible de los mismos. En primer lugar, se observa un incremento generalizado de la producción pesquera que, en 2018 un 35% de la producción pesquera mundial fue capturada en China, lo que da una idea del elevado nivel de sobreexplotación de las poblaciones en esta región. Además, este informe concluye que el estado de los principales recursos pesqueros ha seguido empeorando en aquellas regiones del planeta en las que no se han tomado las medidas de gestión oportunas o su implantación es deficiente, mientras que en aquellos lugares donde se han tomado, se ha observado una mejora del estado de poblaciones; en consonancia con los resultados obtenidos por Hilborn *et al.*, 2020. En este apartado destacan el mar Mediterráneo y el mar Negro, en cuyas cuencas se estima que más del 60% de las especies están explotadas a niveles insostenibles. Este desequilibrio entre el estado de los recursos pesqueros y los niveles de sobreexplotación se espera que sea especialmente severos en aquellos países denominados “en vías de desarrollo”, puesto que las posibilidades de derivar sus fuentes de ingresos y alimentación hacia otras vías son más reducidas y por tanto son más dependientes de la actividad pesquera.

Ante esta situación, el cambio climático global toma un cariz aún más importante. Este es un proceso a escala global que lleva asociado un cambio drástico en los patrones climáticos generales como las precipitaciones, temperatura o densidad de las masas, que ejercen una influencia directa sobre los ecosistemas marinos. Como resultado, se espera a medio y largo plazo una fluctuación de los stocks, en un contexto generalizado en el que la comunidad científica apuesta mayoritariamente por una tendencia hacia condiciones más extremas a medio y largo plazo (Báez *et al.*, 2021a).

En este sentido la FAO alerta de una variación interanual de las capturas bastante significativa de especies muy dependientes de las variaciones climáticas como son la

anchoveta peruana (*Engraulis ringens*) y el listado (*Katsuwonus pelamis*), muy importantes en el ámbito socioeconómico para muchas regiones del sudeste asiático y la costa pacífica de Sudamérica.

Por otro lado, a nivel nacional, la pesca en España constituye una actividad económica tanto directa como indirecta muy importante para un gran número de regiones costeras, aunque en los últimos años haya perdido importancia. Así pues, España es el primer productor de la Unión Europea al contar con más del 20% de la flota comunitaria, y ocupa el puesto 19 del mundo en cuanto a producción pesquera. Esto se debe a una flota pesquera integrada por casi 9000 unidades de las cuales el 96% faenan en aguas nacionales y en cuyas capturas, aunque son muy variadas, abundan principalmente las distintas especies de túnidos y especies migratorias afines tales como pez espada, marlines o tiburones pelágicos.

Ante esta situación, el artículo 64 de UNCLOS establece cuales han de ser los derechos y obligaciones que los estados firmantes deben cumplir en lo que respecta a la gestión y conservación de los recursos, centrándose en las conocidas como “*especies altamente migratorias*”, ya que se ha demostrado que aquellos stocks sobre los que se aplican planes de gestión son menos propensos a sufrir sobreexplotación (Hilborn *et al.*, 2020), por lo que la gestión y el control de las pesquerías son cruciales en este sentido (Tidd *et al.*, 2018). La lista de estas especies migratorias aparece reflejada en el anexo I de UNCLOS, e incluye 11 especies distintas de túnidos (Scombridae), 12 especies de peces de pico (Istiophoridae, Xiphiidae), el género *Trachinotus*, cuatro especies de saurios, llampugas (*Coryphaena* spp.), tiburones oceánicos y algunas especies de cetáceos. Además, la CMS (Convención sobre la Conservación de las Especies Migratorias de Animales Silvestres) también incluye en su ámbito de regulación a tortugas, mamíferos y aves marinas.

De un modo más particular, la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT en lo sucesivo -de sus siglas en inglés), centra sus esfuerzos en la gestión de los stocks pesqueros de túnidos y las especies asociadas a sus pesquerías, tales como marlines o tiburones pelágicos entre otras (pertenecientes a diferentes familias y órdenes). Estas especies se caracterizan principalmente por su marcado comportamiento migratorio que hace más difícil su gestión, ya que se simultanean las aguas jurisdiccionales de diferentes países y aguas internacionales. Estos grandes pelágicos migradores comparten diferentes fases oceánicas durante su ciclo vital,

realizando tanto migraciones genéticas como tróficas, siendo expuestos a la actividad pesquera tanto directa como inintencionadamente (Southall *et al.*, 2006; Robinson *et al.*, 2009). La ICCAT incluye la mayoría de las especies anteriormente mencionadas, siendo estas analizadas globalmente por el grupo de trabajo de ecosistemas y capturas accesorias de esta comisión, con el objetivo de conservar las especies, y la recuperación de las poblaciones.

Diversos autores han remarcado el hecho de que las especies migratorias pueden responder a las oscilaciones climáticas, alterando su fenología (Chaloupka *et al.*, 2008; Mazaris *et al.*, 2008), abundancia (Báez *et al.*, 2011a; Báez *et al.*, 2021a), distribución y reclutamiento (Borja & Santiago, 2002; Mejuto, 2003; Kell *et al.*, 2005; Goñi & Arrizabalaga, 2006; Graham & Harrold, 2009; Báez *et al.*, 2018), así como el valor comercial de las capturas (Fernandez *et al.*, 2020), e incluso su distribución vertical (Reglero *et al.*, 2018a). A pesar de estos progresos, los efectos del clima sobre las fases vitales de estas especies están aún por determinar, así como las alteraciones que las actuales predicciones del cambio climático pueden ocasionar en los medios naturales (Robinson *et al.*, 2009). Por ello, es necesario considerar el cambio en las condiciones climáticas a la hora de evaluar los stocks pesqueros de las especies migratorias para, en función de este factor, establecer los pertinentes instrumentos de gestión, ya que estos pueden modular la distribución de especies altamente migratorias y generar cambios repentinos en su abundancia a escala regional (Faillettaz *et al.*, 2019). Por esta razón, Organizaciones Regionales de Ordenación Pesquera como ICCAT recomiendan el estudio y análisis de las posibles relaciones entre las condiciones climáticas y la biología de las grandes especies migratorias. En consonancia ya se han realizado en la actualidad diversos esfuerzos por incorporar la variabilidad climática a los modelos de evaluación de stock (Wang *et al.*, 2018; Tsiklirasa *et al.*, 2019; Gutiérrez-Estrada *et al.*, 2020).

## **1.2 Migraciones Marinas frente al Cambio Global**

Se puede definir el concepto de migración, tal y como lo plantea Robinson *et al.*, 2009 como una estrategia para explotar ambientes estacionales, por lo que las especies migratorias tiene una presencia heterogénea en latitudes más altas y en hábitats que exhiben una marcada estacionalidad en la disponibilidad de recursos. Estas pueden ocurrir tanto a una escala local como a una escala mayor, incluso transoceánica.

Además, estos movimientos se pueden clasificar de acuerdo a su objetivo biológico. Así, las migraciones reproductivas, o genéticas ocurren hacia áreas donde las condiciones oceanográficas permiten asegurar el éxito del proceso reproductivo, así como el posterior alevinaje, que permite mantener los niveles de reclutamiento de la especie. En este contexto, el mar Mediterráneo representa uno de los principales destinos migratorios para un amplio número de especies para fines reproductivos.

Por el contrario, las migraciones tróficas tienen lugar hacia áreas caracterizadas por una elevada productividad primaria, clave para el desarrollo de las cadenas tróficas, donde el elevado aporte de nutrientes garantiza, o bien la recuperación tras la época de puesta en caso de los ejemplares maduros, o bien un aporte de nutrientes suficiente en caso de individuos inmaduros. Dentro de este contexto de rutas migratorias, el mar Mediterráneo, definido en numerosas ocasiones como una de las mayores áreas marinas oligotróficas en todo el mundo, presenta unas características oceanográficas que aseguran el éxito de la reproducción y alevinaje para una gran cantidad de especies migratorias (Würtz, 2010) donde las especies de túnidos, como se mencionaba anteriormente, cobran una especial atención por su elevado interés socioeconómico.

Así, por ejemplo, especies muy cotizadas comercialmente tales como el atún rojo *Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758), y las especies de túnidos de menor tamaño que son objeto del presente estudio como la melva *Auxis rochei* (Risso, 1810), la bacoreta *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque, 1810) y el bonito del sur o bonito atlántico *Sarda sarda* (Bloch, 1793), que realizan migraciones anuales hacia sus áreas de reproducción y puesta localizadas en distintos puntos del mar Mediterráneo, donde se dan temperaturas superiores a 24°C (Schaefer, 2001). Posteriormente, en su migración de vuelta hacia el Atlántico, se benefician de los numerosos afloramientos existentes en el mar de Alborán, donde se concentran una gran cantidad de nutrientes, donde se alimentan tras la reproducción (Parrilla & Kinder, 1987; Würtz, 2010). En esta situación, el estrecho de Gibraltar es geográficamente la única entrada y salida natural de las rutas migratorias en el Mediterráneo, no solo para las especies de túnidos anteriormente mencionadas sino también para tortugas marinas y cetáceos; si bien cada especie presenta sus propias particularidades en lo que respecta a su comportamiento migratorio. Por ello, es un área de especial interés para la conservación.

Por otro lado, el Cambio Climático se presenta habitualmente como un conjunto de procesos climatológicos de carácter natural que ocurren a diferentes escalas espaciales y

temporales, si bien durante las últimas décadas estos se han intensificado por la acción antropológica (Keller, 2007; Hamza *et al.*, 2020). Esta amalgama de procesos climáticos ejerce un fuerte control sobre las condiciones hidrodinámicas no solo de las cuencas oceánicas (Drinkwater *et al.*, 2003), sino también de cuerpos de agua dulce (Straile *et al.*, 2003) y sobre ecosistemas terrestres (Mysterud *et al.*, 2003) De esta manera, las dinámicas naturales de los cuerpos de agua serán menos predecibles y con unos procesos biológicos desacoplados en el tiempo, con el consiguiente impacto sobre las especies migratorias marinas (Robinson *et al.*, 2009) y la producción pesquera a diferentes escalas espaciales y temporales (Finney *et al.*, 2002).

En el campo de la investigación pesquera, el conocimiento de las interacciones entre las situaciones climáticas y los efectos que estos tengan sobre los movimientos migratorios de las especies y la capacidad de previsión de los eventos a medio y largo plazo ayudará a determinar la capturabilidad, distribución, supervivencia o reclutamiento e inferir en definitiva la disponibilidad de los recursos pesqueros y permitir a los organismos gestores actuar en consecuencia para su conservación. Por ello, el estudio de estos procesos a diferentes escalas ha centrado el interés de la comunidad científica durante las últimas décadas. De esta manera, las fluctuaciones en las capturas de atún rojo a corto y largo plazo han sido asociadas a una gran diversidad de procesos biogeológicos, así como a distintos factores climáticos en el área del estrecho de Gibraltar (Báez *et al.*, 2013a; Ganzedo *et al.*, 2016). Estos hallazgos son también aplicables a otras especies de túnidos, por ejemplo, al bonito del norte (*Thunnus alalunga*), cuya abundancia se relaciona estrechamente con cambios en las condiciones climáticas dominantes (Báez *et al.*, 2011a), u otras especies de pequeños túnidos como melva, bonito y bacoreta (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017; Báez *et al.*, 2019), todas ellas relacionadas con la Oscilación del Atlántico norte (NAO por sus siglas en inglés) a escala interanual. No obstante, estas correlaciones también existen a escalas temporales más amplias, tal y como se atestigua en numerosos estudios al respecto. Así, por ejemplo, en Failletaz *et al.*, (2019) se establece una correlación a escala secular entre la abundancia de atún rojo y las condiciones climáticas dadas por el índice AMO (de *Atlantic Multidecadal Oscillation*) y que condiciona la intensidad y migración de las migraciones de esta especie a nivel de cuenca oceánica, algo que podría hacerse extensible a otras especies de túnidos. Esto además podría generar efectos no solo a niveles poblacionales sino

también a nivel de ecosistema puesto que modela la abundancia y distribución de depredadores apicales en los mismos (Ottersen *et al.*, 2001).

### **1.3 Los túnidos**

#### **1.3.1 Pesquerías de túnidos**

Las especies de túnidos constituyen una fuente socioeconómica importante para muchas regiones costeras, no solo por el volumen anual de capturas si no también por el elevado valor comercial que muchas especies alcanzan (FAO, 2020). Por este motivo, la explotación de tales especies se ha intensificado durante las últimas décadas, originando una severa reducción en la abundancia (Myers & Worm, 2003). Esta situación ha originado el establecimiento de diferentes medidas de gestión según la especie en cuestión, tales como cierres temporales de las pesquerías, vedas, tasas anuales de capturas o planes de recuperación, como es el caso del atún rojo, y a pesar de que la variabilidad natural es una de las características inherentes a las pesquerías, por medio de la gestión se pueden minimizar los efectos que esta variabilidad en el medio trae asociada (Tidd *et al.*, 2018).

La explotación de las poblaciones de túnidos a nivel mundial aparece ampliamente detallada en el informe SOFIA que elabora la FAO (FAO, 2020). De acuerdo con este instrumento, las capturas de este grupo de especies continúan en aumento a nivel mundial pese a la cantidad vigente de instrumentos normativas para su reducción que, no obstante, sí que han demostrado ser eficaces en el ámbito de la Unión Europea. Las capturas de este grupo de especies en 2018 ascienden a 8 millones de toneladas, de las que el 58% se corresponde al atún rojo y al rabil (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788). Por otro lado, la FAO advierte que un tercio de las poblaciones de las 7 principales especies de túnidos en cuanto a capturas (atún rojo; bonito del norte; patudo –*Thunnus obesus*; bacoreta; rabil; listado y atún rojo del sur –*Thunnus macoyii*) están en la actualidad explotadas a niveles insostenibles pese a que son ampliamente conocidas, estudiadas y evaluadas desde multitud de foros y a través de un marco normativo internacional muy denso. Esto sin embargo no ocurre con las especies de túnidos menores, pese a que su demanda a nivel mundial es igualmente elevada. Así pues, desde este instrumento se exhorta a los estados a establecer una ordenación eficaz de los estos recursos a fin de restablecer las poblaciones sobreexplotadas y mantener las restantes en niveles biológicamente sostenibles.

En España la pesca de diversas especies de atún y especies afines adquiere una importancia preponderante en el ámbito socioeconómico para muchas regiones costeras, con una fuerte tradición en la captura de estas especies mediante una gran variedad de artes de pesca. Destacan los artes de almadraba, cuyo principal ejemplo se encuentra en Barbate (Cádiz) donde se intercepta el paso migratorio de estas especies (principalmente atún rojo) hacia el Mediterráneo, a donde se dirigen por motivos reproductivos. También destaca la flota atunera vasca que representa, en términos de arqueos (capacidad) el 20% de la flota pesquera nacional con apenas 200 unidades, en torno al 60% de la flota atunera europea y casi el 10% de la flota atunera mundial (FAO, 2020). Los datos pesqueros, ofrecidos por el Plan Estadístico Nacional, responsabilidad del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, revelan para el año 2018 un total de más de 343.000 toneladas en peso fresco de diferentes especies de atunes y especies afines como agujas. Esto supone un incremento respecto de otros años en parte debido a la mejora de los stocks tras la implantación de medidas de gestión y recuperación y el consiguiente aumento de las cuotas de captura. Las especies más capturadas durante 2018 fueron el listado, con casi 200 toneladas de peso fresco, seguida de otras como el rabil (62 toneladas), o el atún rojo (3.2 toneladas) entre otras; mientras que las capturas de melva, bacoreta y bonito ascendieron a menos de una tonelada por especie.

Los túnidos, cuya posición taxonómica se muestra en la tabla 1.1, se caracterizan por un marcado comportamiento migratorio con varias finalidades biológicas. Bien hacia las áreas de puesta y alevinaje, lugares donde las condiciones oceanográficas favorecen el éxito de estos procesos biológicos; o bien hacia la recuperación tras la puesta e invernada, caracterizadas por una producción primaria elevada donde la biomasa de presas es abundante.

Tabla 1.1: Posición taxonómica de los túnidos.

PHYLUM	<b>Chordata</b>
SUBPHYLUM	<b>Vertebrata</b>
SUPERCLASE	<b>Gnathostomata</b>
CLASE	<b>Osteichthyes</b>
SUBCLASE	<b>Actinopterygii</b>
ORDEN	<b>Perciforms</b>
SUBORDEN	<b>Scombroidei</b>
FAMILIA	<b>Scombridae</b>
TRIBU	<b>Thunnini</b>

Esta biología migratoria ha sido fuertemente correlacionada por parte de la comunidad científica con las oscilaciones de las condiciones climáticas, si bien es cierto que en este ámbito aún quedan muchos interrogantes por elucidar. En esta línea, diversos autores, tales como Báez *et al.* (2013a) obtuvieron una relación directa entre la condición física del atún rojo y la Oscilación del Atlántico Norte; lo que afecta a las pesquerías al verse afectadas las migraciones, bien sea cambiando las rutas migratorias o modificando la condición física de los individuos (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017). Faillettaz *et al.*, (2019) propuso una relación directa entre el índice AMO entre la abundancia y distribución espacial a nivel de cuenca oceánica del atún rojo aumentando de este modo la escala espacial y temporal de la correlación. En esta misma línea de investigación se han establecido correlaciones entre los índices PDO (Pacific Decadal Oscillation) y SOI (Southern Oscillation Index) y las variabilidad de las capturas de túnidos a nivel mundial, reclutamiento y supervivencia de las larvas (Báez *et al.*, 2020) e incluso relacionan episodios de acidificación de los océanos, una de las efectos asociados al cambio climático con la distribución, intensidad y éxito de los procesos reproductivos o tamaño de las larvas de túnidos (Bromhead *et al.*, 2015).

Todo lo mencionado anteriormente es igualmente válido para el caso de las especies de túnidos de menor tamaño, que centra la atención de este estudio. En este caso, también son conocidos sus hábitos migratorios hacia sus áreas de puesta e invernada (García *et al.*, 2005; Sabatés & Recasens, 2008), y son igualmente existentes las carencias actuales de conocimiento de varias fases del ciclo vital de las mismas que serían de utilidad a la hora de gestionar las poblaciones, pese a la elevada abundancia de estas especies,

mucho mayor que las de especies de mayor tamaño. Estas especies constituyen una importante fracción de las pesquerías de túnidos, lo que queda ejemplificado en el listado (Linnaeus, 1758), que refleja claramente esta situación, pues las pesquerías de esta especie son las más importantes de túnidos en todo el mundo, además de ser la cuarta pesquería en volumen de capturas. En el caso de la melva, esta especie constituye un importante recurso pesquero a escala global ya que sus pesquerías suponen una importante fracción del total de las pesquerías de túnidos en todo el mundo (FAO, 2020). Estas especies, al igual que otras especies de túnidos son muy dependientes de las variables medioambientales que les rodean (Schaefer, 2001), tal y como se reflejan estudios que revelan que parámetros como la abundancia, reclutamiento y capturabilidad están fuertemente controladas por las oscilaciones atmosféricas que alteran el medio marino circundante (Forchhammer *et al.*, 2002) y que influyen en la condición física de las mismas (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017), condicionando en mucho caso el éxito reproductivo y el buen estado de las poblaciones.

Así pues, en un contexto de rápido crecimiento poblacional, se prevé una mayor presión pesquera sobre las especies de túnidos de todo el mundo, llegando incluso al colapso de algunos stocks (Mullon *et al.*, 2017; FAO, 2020).

Se estima unas predicciones de cambio climático a medio plazo marcadas por un ascenso generalizado de la temperatura (hasta 3°C), y un descenso en el pH del agua de mar (acidificación de los océanos) y de la concentración de oxígeno disuelto en el agua; lo que originaría una estratificación de las masas de agua (Sobrino *et al.*, 2020). Teniendo en cuenta que las especies de túnidos son especialmente sensibles a las variaciones de temperatura (Deary *et al.*, 2015) y de pH (Bromhead *et al.*, 2015), se prevé una posible redistribución de los recursos pesqueros.

Así pues, desde el punto de vista de la gestión, es pertinente conocer los procesos macroecológicos que se acoplan a la dinámica de poblaciones (Newman *et al.*, 2016). Por ello, uno de los grandes retos de la gestión pesquera pasa por tener la capacidad de gestionar la presión pesquera sobre los túnidos, teniendo en cuenta además que los túnidos tropicales se prevé que sean clave para la seguridad alimentaria (Báez *et al.*, 2018) y poder, en base a las predicciones futuras de cambio climático, adoptar herramientas de explotación sostenible sobre las especies de túnidos que mayor presión pesquera soportan.

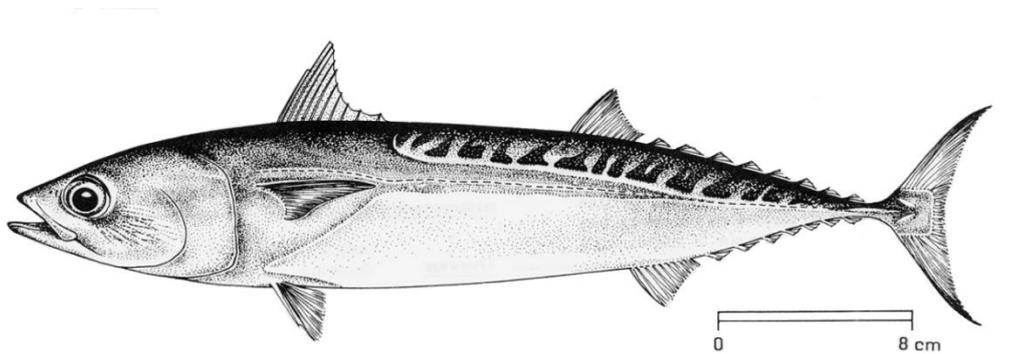
### **1.3.2 Ficha descriptiva de la melva (*Auxis rochei*)**

La melva (*Auxis rochei*) es una de las especies de menor tamaño dentro de la tribu Thunnini y la familia Scombridae, cuya posición taxonómica se detalla en la tabla 1.1; si bien su correcta identificación ha sido comúnmente confundida con la especie *Auxis thazard* (Lacepède, 1800). Los valores máximos y promedio de talla y peso de esta especie difieren en función del área de captura. Así, su talla máxima medida hasta la horquilla de la aleta caudal ha sido reportada en el Atlántico este en 51 cm (Neves dos Santos & García, 2006), mientras que en el estrecho de Gibraltar es de 47 cm y un peso máximo de 1.9 kilogramos (Rodríguez-Roda, 1983). La moda está en 35 cm de acuerdo con Collette & Nauen, 1983. La apariencia externa de la melva (Figura 1.1) presenta una serie de particularidades que aparecen descritas en la ficha técnica de las especies que elabora la Convención ICCAT (Valeiras & Abad, 2006a).

En lo que respecta a la apariencia externa, esta es una especie que presenta un cuerpo fusiforme, robusto y redondo con un color predominantemente azul brillante en el dorso, tornándose a púrpura e incluso negro hacia la parte anterior, donde se sitúa la cabeza. Este patrón se mezcla con al menos 15 líneas oblicuas (casi verticales) u onduladas de color oscuro, solo presentes en la zona donde no hay escamas por encima de la línea lateral. Por el contrario, la parte ventral es de color blanco, sin presencia de manchas o rayas. Respecto de las aletas, la apariencia externa de estas presenta una coloración púrpura, si bien los bordes internos son más oscuros. Además, también es característica la presencia de una mancha negra cercana al ojo, más concretamente en el borde ventral y posterior del mismo.

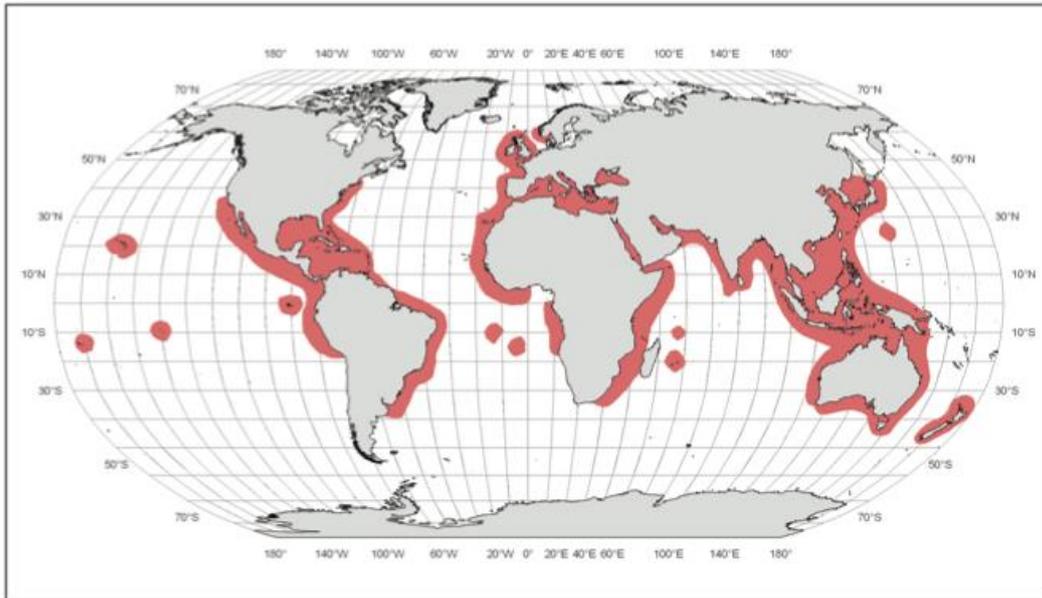
La melva no presenta escamas, salvo en el corselete, donde generalmente presenta el ancho de 10 a 15 escamas bajo la segunda aleta dorsal. Aparece además una quilla mediana muy desarrollada a cada uno de los lados del pedúnculo caudal, que aparece a su vez entre dos quillas de menor tamaño. Además, aparecen dos aletas dorsales, que cuentan con entre 10 y 12 radios dorsales, y separadas entre sí por un espacio amplio, aunque la segunda dorsal es ligeramente más baja que la primera y aparece seguida de 8 pínulas. La aleta caudal aparece seguida de 7 pínulas y la pectoral es corta y cuenta con un número variable de radios pectorales (entre 22 y 25). Finalmente, esta especie cuenta con un variable entre 38 y 47 branquiaspinas en el primer arco branquial.

En cuanto a las características internas, esta especie se caracteriza, al igual que otras especies del mismo grupo taxonómico, por la ausencia de vejiga natatoria. También característica la asimetría del hígado, cuyo lóbulo derecho aparece muy elongado y ocupa una gran fracción de la cavidad visceral, quedando el lóbulo izquierdo muy reducido. Finalmente destaca un total de 39 vértebras y la presencia de arterias cutáneas, que se dividen en ramas dorsales y ventrales, quedando estas últimas poco desarrolladas.



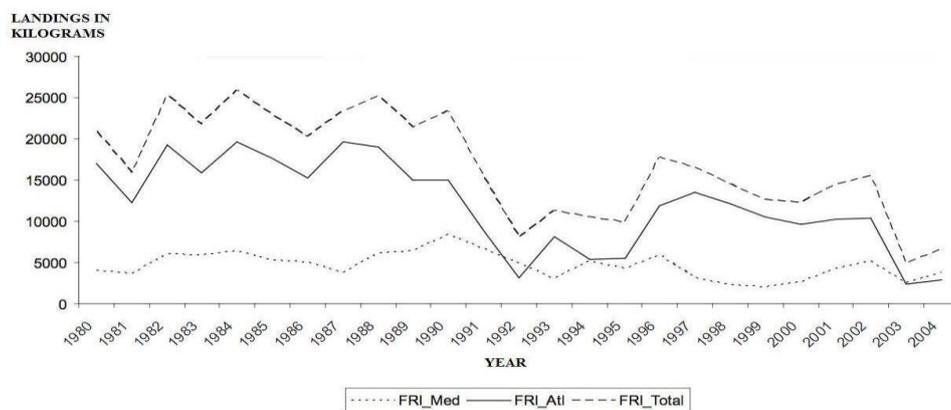
*Figura 1.1: Apariencia externa de la melva, Auxis rochei (Risso, 1810). Fuente: FAO, 2010.*

Esta especie está presente en las áreas costeras tanto de aguas tropicales como subtropicales de todo el mundo, asociada a las plataformas continentales (ver figura 1.2). Está presente en el océano Atlántico, incluyendo el mar Mediterráneo, si bien es cierto que la confusión existente en cuanto a su correcta identificación y hace pensar que su distribución incluya el mar Caribe y el golfo de Méjico. La distribución latitudinal se comprende entre las latitudes 45°N y 35°S, si bien también ha sido encontrada en latitudes más al norte de Noruega e incluso Sudáfrica o las costas de Argentina como límite meridional.



**Figura 1.2:** Distribución geográfica de *Auxis rochei*. Fuente: Valeiras & Abad (2006).

La melva es una especie nerítica y epipelágica que habita aguas templadas que oscilan entre los 21.6 y los 30.5 °C (aunque su rango óptimo de temperatura es 27-27.9°C), y una fuerte tendencia a formar cardúmenes. Esto hace que esta especie sea especialmente susceptible de ser capturada por artes de pesca tales como cercos, almadrabas o palangres (la evolución de las capturas se muestra en la Figura 1.3). Sin embargo, la información de que se dispone en la actualidad acerca del reclutamiento de esta especie durante los primeros estadios vitales es aún muy escasa, ya que los juveniles no son capturados por las pesquerías comerciales. Los individuos inmaduros entran en las pesquerías comerciales con una talla aproximada de 25 cm.



**Figura 1.3:** Distribución interanual de las capturas en kilogramos de *Auxis rochei* en el océano Atlántico y el mar Mediterráneo. Fuente: [www.fao.org](http://www.fao.org).

La melva es una especie que se encuentra en el Mediterráneo occidental en un *sex ratio* de 1:1.7 (Macías *et al.*, 2005a), cuya biología reproductiva se caracteriza por un desarrollo asincrónico de los ovocitos. Presenta un periodo de puesta variable según la zona geográfica; no obstante, en el Mediterráneo aparecen individuos maduros en las pesquerías a partir de mayo, mientras que diversos autores coinciden que su periodo de puesta ocurre en esta zona entre junio y septiembre (Piccinetti *et al.*, 1996; Alemany, 1997; Macías *et al.*, 2005a; Kahraman *et al.*, 2010). Alcanza la madurez sexual a una longitud (medida hasta la horquilla de la aleta caudal) de 34.4 cm sin que exista diferenciación de sexo, con una fecundidad promedio de 233.941 ovocitos por cada episodio de puesta múltiple. Además, la temperatura, tal y como ocurre con otras especies, constituye uno de los principales factores que influyen en el éxito reproductivo, ya que realiza sus migraciones hacia sus áreas de puesta donde la temperatura exceda los 24°C (Schaefer, 2001).

En lo que respecta a la dieta, el tamaño del alimento se selecciona de acuerdo al tamaño de las branquias. Así, según Mele *et al.* (2014) existe un cambio en la composición de la dieta de la melva con el tamaño corporal. Esta especie se alimenta de pequeños crustáceos, cefalópodos, y especies de pequeños pelágicos como anchoas y clupeidos (Etchevers, 1957; Mele *et al.*, 2014). Debido a su elevada abundancia, la melva es considerado como un elemento importante de las cadenas tróficas, constituyendo una presa importante para otras muchas especies comerciales tales como otros túnidos, tiburones pelágicos, peces de pico u otras especies pelágicas de gran tamaño (Olson, 1982; Mostarda *et al.*, 2007).

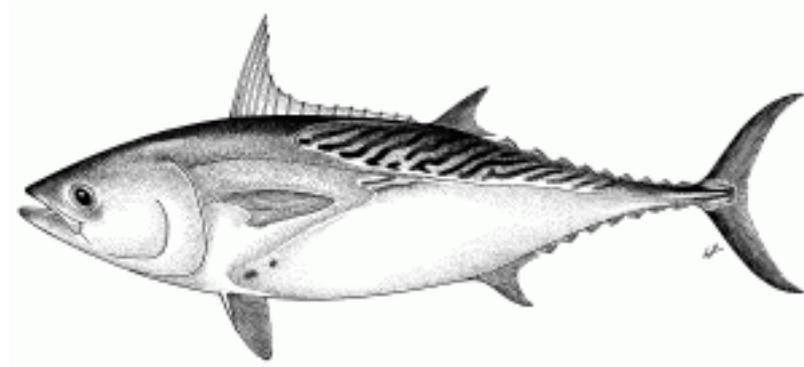
Este pequeño túnido realiza migraciones anuales hacia sus áreas de puesta en aguas en torno a las Islas Baleares (García *et al.*, 2005; Sabatés & Recasens, 2008). A pesar de que el comportamiento migratorio aún no es completamente conocido, diversos autores coinciden en apuntar que estas migraciones estarían afectadas de algún modo por las oscilaciones atmosféricas que modulan las condiciones ambientales. El ciclo migratorio se compone de un movimiento masivo hacia aguas del Mediterráneo en torno al archipiélago balear y aguas circundantes, seguido de un movimiento de salida hacia el océano Atlántico a través del estrecho de Gibraltar. Ambas migraciones ocurren cerca de las líneas de costa, donde son capturadas principalmente por las almadrabas. Además, la melva también realiza migraciones a una escala más local entre las áreas de puesta en hábitats neríticos, a pesar de que aún se conoce poco acerca de esto (Reglero

*et al.*, 2012). No obstante, tal y como se ha mencionado anteriormente, ya que el comportamiento migratorio de la melva no se conoce completamente, no se puede descartar la existencia de otras áreas de puesta e invernada en el mar Mediterráneo.

### **1.3.3 Ficha descriptiva de la bacoreta (*Euthynnus alletteratus*)**

En cuanto a la bacoreta, (ver posición taxonómica en la tabla 1.1), se trata de una especie de pequeño túnido. No obstante, su tamaño máximo registrado varía de un área geográfica a otra. Así, mientras que en el Atlántico este han sido registrados ejemplares de 90 cm de longitud a la horquilla, en el Mediterráneo existen registros de ejemplares de 100 cm de longitud y en torno a 12 kg de peso máximo. El tamaño más común registrado de esta especie se sitúa en 85 cm de longitud y alrededor de unos 7 kilogramos de peso (Collette & Nauen, 1983; Collette, 1986).

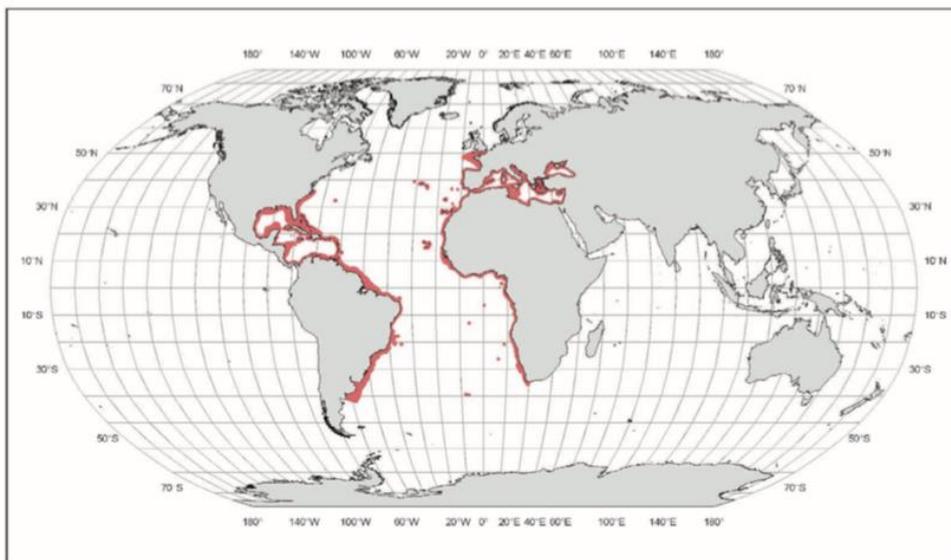
Las características propias de esta especie se reflejan en Valeiras & Abad (2006b). Externamente, la bacoreta presenta un color dorsal azulado, donde también se observa un complejo diseño de rayas que en ningún caso aparece más hacia delante de la primera aleta dorsal. Por el contrario, las zonas ventrales presentan coloraciones claras y plateadas. Además de la coloración la bacoreta presenta una apariencia externa caracterizada por un cuerpo fusiforme y robusto en el que no aparecen escamas, excepto en la zona del corselete y la línea lateral. Posee un pedúnculo caudal delgado y una quilla sobresale entre dos quillas más pequeñas. También aparecen dos aletas dorsales mínimamente separadas: la primera tiene unos radios más largos (entre 10 y 15) que hacen que la aleta adopte una forma marcadamente cóncava, mientras que la segunda dorsal es mucho más baja y seguidos de 8 pínulas. La aleta anal tiene entre 11 y 15 radios y está seguida de 7 pínulas, mientras que la aleta pectoral es de tamaño reducido y con 26 o 27 radios pectorales. Finalmente, el primer arco branquial aparece compuesto por un número variable de branquiespinas entre 37 y 45.



**Figura 1.4:** Apariencia externa de la bacoreta, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque, 1810). Fuente: FAO.

Las características internas de la bacoreta son similares a las del resto de especies de escómbridos: 1) la ausencia vejiga natatoria; 2) asimetría hepática, donde el lóbulo derecho es mucho más alargado que los lóbulos medio e izquierdo; 3) un número variable de vértebras entre 37 y 39; y 4) por la presencia de una arteria cutánea, ausente en otras especies de peces.

Esta especie presenta una distribución global (Figura 1.5) a ambos lados del océano Atlántico, tanto en latitudes tropicales como subtropicales, donde se incluyen el mar Caribe, el golfo de Méjico y el Mediterráneo; así como la costa este de Estados Unidos y Canadá y la costa de Brasil o Uruguay en Sudamérica. Latitudinalmente esta especie encuentra su límite septentrional en la cuenca de Skaggerak, en aguas noruegas, mientras que el límite meridional se sitúa en aguas de Sudáfrica.



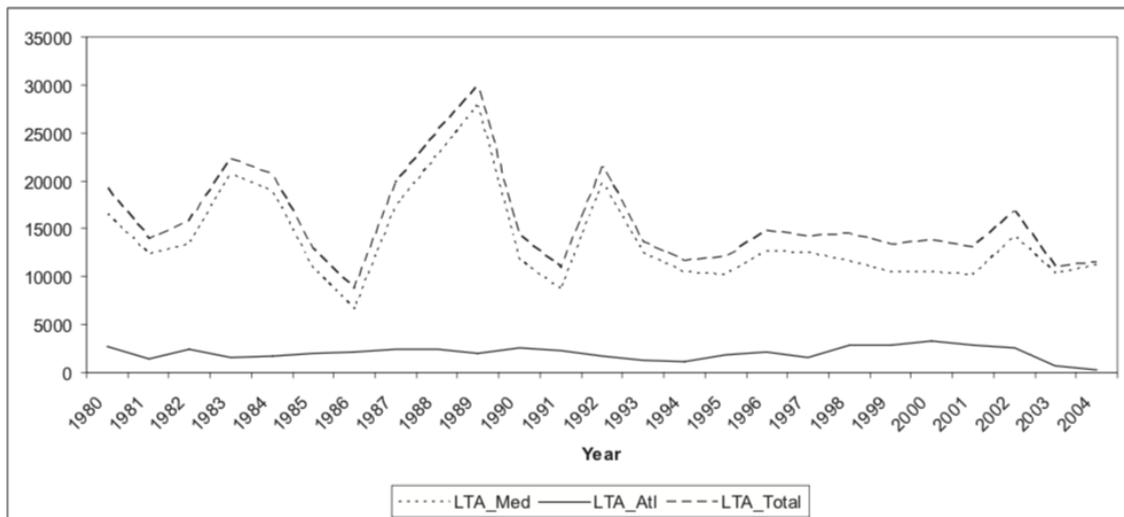
**Figura 1.5:** Distribución geográfica de *E. alletteratus*. Fuente: Valeiras & Abad (2006).

Se trata de una especie epipelágica y nerítica con una presencia más litoral que otras especies de túnidos. Esta especie se agrupa en cardúmenes por tallas junto a otras especies de túnidos en torno a aguas litorales con corrientes litorales y alrededor de aguas más cálidas y zonas de afloramientos de aguas profundas ricas en nutrientes. Es especialmente abundante en el Atlántico tropical, donde las temperaturas oscilan entre 24°C y 30°C (Chur, 1973). No obstante, aún son muchos los aspectos del comportamiento migratorio y reclutamiento de la bacoreta que no se conocen plenamente tales como el ciclo vital de los juveniles o el reclutamiento, si bien existen registros de ejemplares inmaduros en las pesquerías a partir de los 30 cm de longitud, pese a que los estudios de crecimiento han confirmado una edad máxima comunicada de 8 años (Landau, 1965; Johnson, 1983; Cayré & Diouf 1993; Kahraman, 1999). Otro aspecto clave de la biología de esta especie en relación a este estudio es el carácter migratorio de la misma. A este respecto se sabe que la bacoreta, aunque tiene un marcado componente migratorio al igual que otras especies de túnidos, estos movimientos migratorios son menos intensos y frecuentes que otras especies del mismo grupo. No obstante, este comportamiento migratorio aún no se conoce plenamente.

En lo que respecta a la reproducción, la bacoreta realiza diversas puestas durante la temporada reproductiva que varía según el área geográfica. Así, en el Mediterráneo occidental sucede entre mayo y julio (Macías *et al.*, 2006); mientras que en el Mediterráneo central este periodo se extiende de junio a septiembre (Hajjej *et al.*, 2010). En el área de estudio, han sido registrados individuos sexualmente maduros de 56 y 57 cm para machos y hembras respectivamente (Rodríguez-Roda, 1966) encontrándose en un sex-ratio donde predominan ligeramente las hembras sobre los machos, a pesar de que en estadios juveniles la ratio está en torno 1:1.

En lo relativo a la dieta, esta especie es considerada como un depredador oportunista, ya que se alimenta de cualquier grupo de especies que hubiera disponible ya sean crustáceos, peces, cefalópodos, heterópodos o tunicados; si bien los peces clupeidos constituyen un componente alimentario importante, de acuerdo con lo publicado en Etchevers, 1976 o Menezes & Aragão, 1980 entre otros. Por su parte, la bacoreta constituye una presa para varias especies de tiburones, otras especies de túnidos como el rabil o los marlines. No obstante, en la actualidad aún existen ciertos aspectos de la biología de la bacoreta sobre los cuales no existe un conocimiento pleno tales como fisiología, comportamiento o mortalidad natural.

En cuanto a las pesquerías de esta especie, la bacoreta es una especie explotada por pesquerías costeras y, frecuentemente artesanales donde se capturan ejemplares principalmente mediante artes de almadraba, redes de enmalle, cerco y curricán entre otros; aunque también es una especie muy común en la pesca deportiva. De acuerdo con la ICCAT, las capturas de bacoreta (ver figura 1.6) alcanzaron en el año 1989 un máximo histórico de 29855 toneladas, con un valor promedio en el Mediterráneo de 20071 toneladas, si bien las cantidades desembarcadas en el Atlántico son en cierta medida desconocidas, debido a la falta de control existente de las pesquerías artesanales.



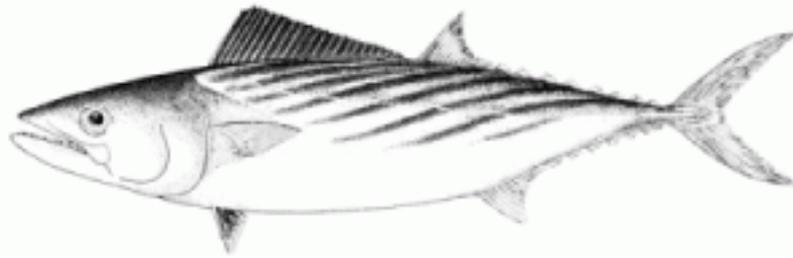
**Figura 1.6:** Distribución interanual de las capturas en kilogramos de *Euthynnus alletteratus* en el océano Atlántico y el mar Mediterráneo. Fuente: Valeiras & Abad (2006).

### **1.3.4 Ficha descriptiva del bonito (*Sarda sarda*)**

En cuanto al bonito, *Sarda sarda* (Bloch, 1973), sus características biológicas y descripción se detallan en Valeiras & Abad (2006c). Se trata de una especie de túnido de pequeño tamaño con una talla y un peso máximo publicados de 91.4 cm de longitud a la horquilla y 5.4 kg de peso en el Atlántico y un peso máximo publicado de 11 kg.

Externamente (figura 1.7), presenta una coloración azul metálico en el dorso y plateada en la parte ventral. Los ejemplares adultos tienen de 5 a 11 rayas oscuras oblicuas en dirección oblicua hacia el dorso y la parte anterior. Las aletas dorsal y caudal aparecen de color oscuro y la aleta pectoral de color pálido; mientras que las demás aletas presentan una coloración más o menos plateadas. Además de la coloración, el bonito presenta otras características externas tales como un cuerpo fusiforme y ligeramente comprimido, así como, al contrario que las otras dos especies anteriores, la presencia de

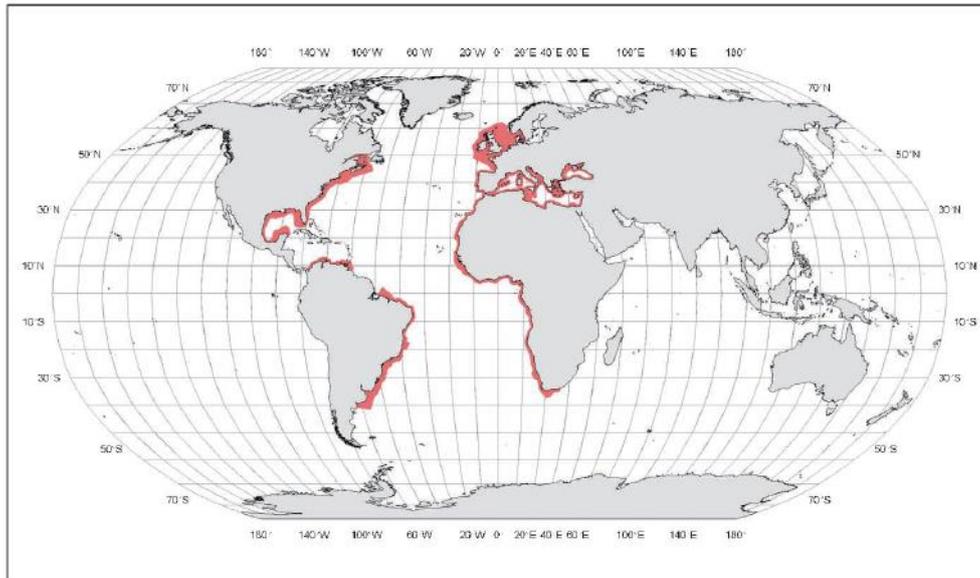
escamas, aunque de muy pequeño tamaño. Estas se distribuyen a lo largo de todo el cuerpo, salvo en el corselete. También es característico el pedúnculo caudal, muy delgado, y una quilla lateral poco desarrollada entre dos quillas menores. La configuración de las aletas es también característica: la primera aleta dorsal es larga, alcanzando casi la segunda dorsal, con un número de radios entre 20 y 23; mientras que la aleta anal presenta un número variable de radios entre 14 y 17. Finalmente, hay que resaltar una boca moderadamente grande con entre 10 y 26 dientes cónicos en la mandíbula superior y de 12 a 24 en la mandíbula inferior. Sin dientes en la lengua. Además, presenta entre 22 y 23 laminillas en la roseta olfativa.



**Figura 1.7:** Apariencia externa del bonito, *Sarda sarda* (Bloch, 1793). Fuente: FAO.

Internamente, el bonito se caracteriza por: 1) carecer de vejiga natatoria y arteria cutánea; 2) poseer un bazo largo y prominente desde una perspectiva ventral; 3) un hígado con los lóbulos derecho e izquierdo alargados mientras que el lóbulo central es de medio tamaño y; 4) un número de vértebras que oscila entre 50 y 55.

Se trata de una especie presente a ambos lados del océano Atlántico tropical y subtropical entre los 65° N y 45° S de latitud y 98° W y 42° E de longitud, aunque está ausente en la mayor parte del mar Caribe. En el Atlántico oriental su distribución (Figura 1.8) abarca desde aguas de Noruega hasta Sudáfrica, incluyendo el Mediterráneo y el mar Negro:



**Figura 1.8:** Distribución geográfica de *S. sarda*. Fuente: Valeiras & Abad (2006).

El bonito es una especie epipelágica distribuida en aguas templadas y subtropicales con hábitos migratorios que se agrupa en cardúmenes a lo largo de la zona nerítica, pudiendo entrar en los estuarios y entre los 80 y los 200 metros de profundidad. La distribución del bonito, está fuertemente condicionada por la temporada al igual que se observa para otras especies de túnidos, capaces de adaptarse a temperaturas entre 12 y 27° C. Además, esta especie presenta capacidad de adaptación a salinidades en el rango de 14 a 39 p.s.u. (unidades de salinidad practicas) (Bianchi *et al.*, 1999).

Si bien se sabe que el bonito es una especie migratoria, poco se sabe aún acerca de los patrones migratorios de esta especie. En este sentido, los estudios de marcado y recaptura confirman que el bonito realiza largas migraciones a lo largo de las costas en el Mediterráneo occidental (Rey *et al.*, 1984) y, en el contexto de este estudio, una migración reproductiva desde el Atlántico hasta el mar de Alborán durante los meses de finales de primavera y los meses iniciales del verano con un pico de actividad en junio (Macías *et al.*, 2005b); posteriormente, tras la época de puesta, el bonito realiza la migración en sentido opuesto. No obstante, otros estudios como Sabatés & Recasens, 2001 sugieren que esta especie podría pasar todo el año en aguas del Mediterráneo occidental y que los ejemplares maduros migrarían hacia mar abierto para desovar.

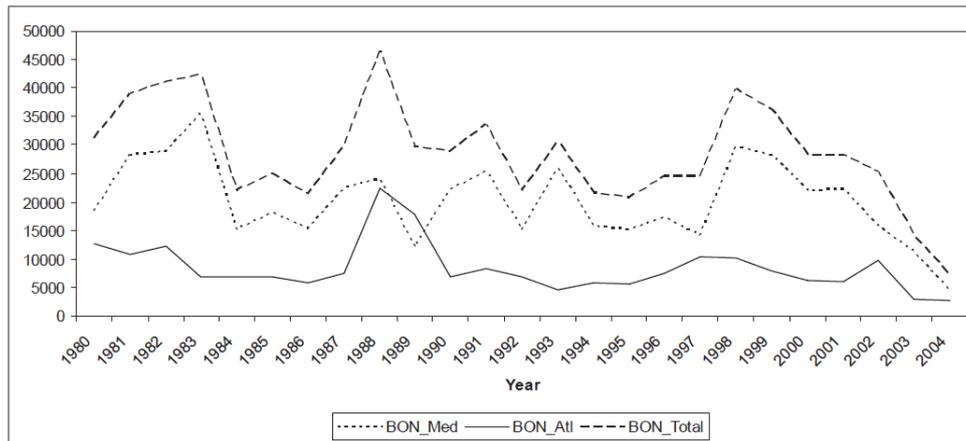
Al igual que lo que sucede con el comportamiento migratorio, el conocimiento sobre los primeros estadios vitales del bonito es aún muy escaso y basado inicialmente en meras asunciones ya que, al no ser capturados durante estos estadios, se desconoce su historia vital. En este sentido, se asume que el periodo larvario es corto y el comienzo de la

etapa juvenil se establece arbitrariamente a partir de las tallas que escapan de las redes de plancton (unos 2 cm). Los ejemplares inmaduros aparecen en las pesquerías con una longitud en torno a los 15 cm (Zengin, 2005), mientras que la mayor edad sobre la que se ha informado es de 5 años.

Los ejemplares adultos se alimentan de un amplio abanico de especies de pequeños pelágicos que se agrupan en cardúmenes tales como la sardina, la caballa o la anchoa y otras especies de hábitos gregarios similares entre otras muchas especies. Finalmente, en lo relativo a otros aspectos de la biología del bonito tales como la fisiología, el comportamiento o la mortalidad natural la información científica contrastada de la que se dispone en la actualidad es muy escasa.

En el aspecto reproductivo, el bonito atlántico se caracteriza por un desove múltiple hasta en 3 o 4 episodios de desove durante la época reproductora, que se extiende de mayo a julio en el mar Mediterráneo pero que varía en el tiempo según la cuenca oceánica, y un desarrollo asíncrono de los ovocitos. En el caso del Mediterráneo, las áreas de puesta más conocidas de esta especie se sitúan en torno a las islas Baleares, al igual que sucede con otras especies de túnidos, aunque también ocurre en otras zonas como la costa argelina o siciliana.

Finalmente, respecto de las pesquerías, el bonito es una especie capturada principalmente en pesquerías costeras y, a menudo, artesanales donde, principalmente en el Mediterráneo (aunque también en el mar Negro) adquiere una relativa importancia, siendo capturada mediante almadrabas, enmalles, cercos, trasmallos e incluso artes de anzuelo. Además, el bonito es también capturado asiduamente en pesca deportiva (ICCAT, 2006). Las capturas de bonito (figura 1.9) en el Mediterráneo se sitúan en un promedio de 20.071 toneladas anuales mientras que en el Atlántico son ligeramente inferiores. No obstante, el bonito aparece como captura accesoria en numerosas pesquerías de cerco en cantidades no estimadas.



**Figura 1.9:** Distribución interanual de las capturas en kilogramos de *Sarda sarda* en el océano Atlántico y el Mar Mediterráneo. Fuente: Valeiras & Abad (2006).

### **1.4 Oscilaciones Atmosféricas**

El conocimiento de los principios que dan lugar a las oscilaciones atmosféricas, su variabilidad interanual y los efectos a corto, medio y largo plazo que causan sobre los ecosistemas, ha acaparado el foco de numerosos estudios científicos durante las últimas décadas. No obstante, ya en los siglos IX y IX d.C, los primeros pueblos nórdicos que habitaban la península escandinava eran plenos conocedores de la variabilidad climática en la zona debido a sus frecuentes travesías marítimas en el Atlántico norte; claramente condicionadas por las condiciones climatológicas. Sin embargo, en la comunidad científica se considera al profesor, físico, climatólogo, meteorólogo y estadístico británico Gilbert Walker (1868-1958), como el precursor en el estudio científico de las oscilaciones atmosféricas; conocido por impulsar la descripción de los parámetros atmosféricos en diferentes puntos terrestres. Una de las grandes consecuciones radica en el conocimiento pionero del fenómeno meteorológico de El Niño, uno de los mayores eventos climáticos en todo el mundo con una elevada incidencia en la climatología del Pacífico sur; así como por la gran aportación en el avance del estudio de la climatología global y sus múltiples efectos.

Así pues, estas oscilaciones climáticas podrían definirse como un patrón de anomalías climáticas teleconectadas espacialmente de modo que mientras en un área geográfica determinada se suceden una serie de eventos climatológicos, en la zona interconectada opuesta se observa la situación contraria. Esto es conocido como *seesaw effect*. Así pues, para tratar de explicar este patrón de variabilidad se han desarrollado diferentes índices climáticos, cuya aplicación difiere en función del área de estudio y de la escala

temporal y espacial en que tales eventos se suceden. De este modo, a partir del estudio de las oscilaciones climáticas, se puede llegar a comprender la resiliencia de las poblaciones ante diversos episodios climáticos.

En la actualidad, la comunidad científica acepta de un modo casi unánime que el planeta experimenta diversos episodios sucesivos de calentamiento global (Oreskes, 2004). Estos, son considerados como procesos naturales, aunque potenciados por el efecto de la actividad antropogénica (Keller, 2007). No obstante, pese a que el interés por el estudio de las fluctuaciones climáticas y sus consecuencias ha aumentado en interés (Stenseth *et al.*, 2003), aún su conocimiento no es pleno. En el ámbito de la ecología y biología pesquera, y a pesar de esta creciente preocupación (Yatsu *et al.*, 2005), es aún difícil predecir cómo las oscilaciones atmosféricas podrían modificar la biodiversidad marina; si bien la gran cantidad de literatura existente en la actualidad demuestra que estas pueden provocar una serie de alteraciones en las corrientes marinas y el medio circundante en general; y repercutir así en la supervivencia de los estadios larvarios y juveniles de muchas especies, duración e intensidad de las migraciones, o éxito reproductivo entre muchas otras. Esto es así debido a la influencia directa de las oscilaciones climáticas sobre los patrones de vientos, afloramiento de aguas profundas, o régimen de precipitaciones entre otros. En este sentido, estudios recientes han postulado que los ecosistemas acuáticos podrían tornarse menos predecibles y modificar la sincronización de ciertos procesos, que se podrían desacoplar con las dinámicas biológicas (ver por ejemplo Muñoz-Expósito *et al.*, 2017 o Báez *et al.*, 2019 para el caso de pequeños túnidos) llevadas a cabo por las especies migratorias (Robinson *et al.*, 2009).

En esta línea, se han propuesto diversos índices de oscilaciones climáticas para describir los cambios puntuales en las condiciones atmosféricas dependiendo de la región estudiada y la escala temporal. Estos índices denotan cambios en las condiciones atmosféricas que a su vez desencadenaría una serie de reacciones en cadena sobre los regímenes de temperatura y disponibilidad de nutrientes; entre otros. La elección de los índices climáticos, de entre la multitud de índices existentes para evaluar los cambios que se produzcan en los ecosistemas y en las poblaciones, depende en muchos casos de la escala espacial y temporal a la que se pretenda realizar estas evaluaciones. Sin embargo, entre la comunidad científica aún no existe un consenso acerca del criterio

para el uso de uno u otro índice, para el que se han descrito una relación de pros y contras (Stenseth *et al.*, 2003; Straile & Stenseth, 2007).

De manera general, en el hemisferio norte para el área del océano Atlántico y mar Mediterráneo, los índices más empleados para modelar los efectos de las oscilaciones climáticas y la variabilidad climática en el Atlántico son la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y la Oscilación Ártica (AO). No obstante, existen una gran variedad de índices en esta área, así como unos patrones de teleconexión entre ellos, definidas estas en Stenseth *et al.* (2003) como variaciones físicas simultáneas que ocurren en el clima en distintas partes del planeta. En el caso del hemisferio norte se han descrito más de una docena de patrones de teleconexión climática de manera que las variaciones climáticas observadas en respuesta a la variabilidad en un índice climático tendrán su influencia en otra localización geográfica. Por ello, la respuesta del clima a un valor determinado de cualquier índice dependerá de la localización geográfica.

De acuerdo con Stenseth *et al.* (2003) la mayoría de meses o estaciones del año no están dominadas por un régimen climático concreto por lo que la relación clima-índices climáticos no alcanzaría a explicar la totalidad de la variabilidad climática observada, por lo que se debe profundizar en el conocimiento climático antes que recurrir a la elección de un índice arbitrariamente. No obstante, este estudio concluye aconsejando el uso de índices climáticos ya que resuelve el problema de elegir parámetros, menos correlacionados comúnmente con fenómenos ecológicos, más predecibles y más disponibles. Además, explican los patrones de interacción atmósfera-océano mejor que las variables simples, ya que las oscilaciones climáticas afectan a muchas de estas variables meteorológicas simultáneamente y a sus respuestas ecosistémicas (Bastos *et al.*, 2016).

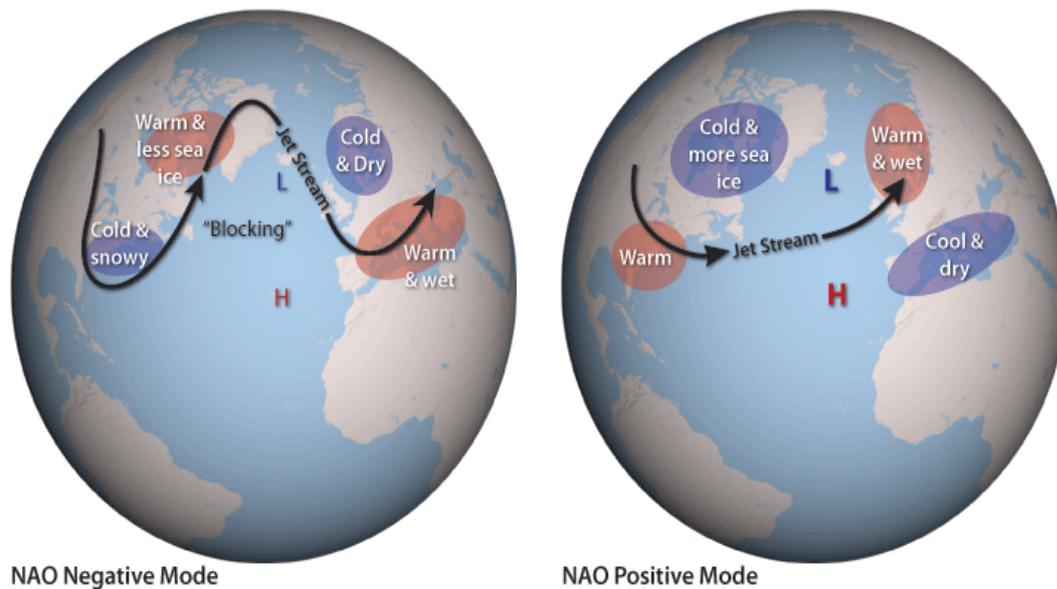
La teleconexión climática en el Atlántico norte ya había sido postulada desde hace varios siglos por parte de las civilizaciones nórdicas que habitaban el norte de Europa para entender la variabilidad climática y consecuencias asociadas (Stephenson *et al.*, 2013). Esta puede considerarse una primera aproximación del fenómeno de la NAO ya que, debido a las numerosas travesías que realizaban hacia Groenlandia, eran plenamente conscientes de las relaciones climáticas existentes entre las diferentes zonas del Atlántico norte y las masas de tierra circundantes. Tras establecerse en la isla de Groenlandia, los nórdicos realizaban continuas travesías durante las épocas de verano cuando la climatología les era más favorable, por lo que eran plenos conocedores de la

climatología del Atlántico norte, tal y como se refleja en los manuscritos que aún a día de hoy se conservan. Es precisamente en uno de estos manuscritos, conocido como *Speculum Regale* (obra que data en torno al año 1250 y cuya autoría permanece en el anonimato) donde se demuestra que los nórdicos conocían el hecho de que los inviernos más fríos se asociaban con una mayor presencia de tormentas en la zona, uno de los aspectos más importantes de la NAO (Rogers, 1977). Además, estas civilizaciones contaban con una gran experiencia en navegaciones trasatlánticas, lo que les hizo posible reconocer relaciones climáticas a una escala espacial mucho mayor entre diferentes áreas del Atlántico norte. Todos estos registros rudimentarios sirvieron de base para que los primeros científicos abordaran la cuestión de la climatología en el Atlántico norte.

En la actualidad la Oscilación del Atlántico Norte es un fenómeno atmosférico muy estudiado y su definición empírica, modelado, efectos sobre los ecosistemas y patrones de teleconexión muy conocidos y documentados en una literatura descriptiva sumamente extensa. Este índice viene dado por una diferencia entre las presiones atmosféricas entre el centro de altas presiones, localizado sobre el archipiélago de las Azores, y el centro de bajas presiones en el Atlántico sobre Islandia. Fue postulado en una primera instancia por Gilbert Walker como “el balance de presiones atmosféricas entre Islandia y el archipiélago de las Azores” (Walker, 1932); y representa la principal fuente de variabilidad climática en el Atlántico norte (Serrano & Trigo, 2011), modificando la dirección e intensidad de los vientos alisios (Hurrell, 1995). El índice NAO alcanza a explicar el clima mejor que otros índices locales ya que integra aspectos climáticos como temperatura del aire, velocidad del viento y precipitación de un modo eficaz (Stenseth & Mysterud, 2005).

Tal y como ocurre con todos los índices atmosféricos, NAO tiene dos fases (ver figura 1.10), una positiva y una negativa, además de una gran variabilidad espacial y anual. Ambas fases, se asocian con cambios de los patrones normales de transporte de calor y humedad (Hurrell, 1995), lo que lleva asociados cambios en los patrones de temperatura y precipitación que se extienden desde América del norte hasta toda Europa (Báez *et al.*, 2021a). Así pues, por un lado, la fase positiva se caracteriza por un refuerzo del centro de las altas presiones, dando como resultado unas condiciones ambientales con un clima soleado y seco, así como una intensificación de los vientos de componente oeste. En contraposición, la fase negativa se caracteriza por un movimiento de los ciclones hacia

el sur, lo que incrementa las precipitaciones en el área del Mediterráneo occidental, lo que a su vez lleva asociado un descenso en la salinidad. Además, de acuerdo con Trigo *et al.* (2002) también existe una alteración de la nubosidad y por tanto de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre, con el consiguiente efecto sobre las temperaturas.



**Figura 1.10:** Representación esquemática de ambas fases de la Oscilación del Atlántico Norte. Fuente: NOAA.

En lo que respecta al índice NAO, se ha demostrado que durante el periodo invernal existe una mayor variabilidad en este índice (Hurrell, 1995), de modo que los fenómenos que controlan el clima están más influenciados por el índice NAO que en verano (Ottersen *et al.*, 2001). Según esto, la mayor variabilidad observada dentro del índice NAO para un mismo año ocurre durante los meses de invierno, que a su vez condicionarán la climatología del resto del año. Las fluctuaciones en el valor del índice NAO son mayores durante el periodo comprendido entre noviembre y abril, cuando la atmósfera es más dinámicamente activa, originando unos cambios de fase que se relacionan con cambios en la velocidad del viento y dirección, humedad o intensidad y número de tormentas; así como en otras áreas árticas y subárticas en base a patrones de teleconexión entre distintas áreas geográficas (Stenseth *et al.*, 2003; Hefferman *et al.*, 2014). En esta línea, las diferencias en la crudeza de los inviernos pueden influir en la respuesta de las tasas metabólicas y tasas de supervivencia de numerosos grupos de especies (Thieltges *et al.*, 2004), incluidos los tñidos. No obstante, además de lo anterior, ha de considerarse un desfase temporal a la hora de analizar los efectos

biológicos provocados por las oscilaciones atmosféricas, ya que estas oscilaciones e impactos podrían estar desacoplados en el tiempo (Robinson *et al.*, 2009), entre la prevalencia de unas determinadas condiciones climáticas y los efectos que se produzcan en el medio.

Son numerosos los efectos relacionados con el índice NAO tanto a escala macroecológica como a nivel de ecosistema, poblacional e incluso individual, tal y como se ha mencionado en líneas anteriores. Estos son, por ejemplo: variaciones en el periodo reproductivo y éxito del mismo, modificación temporal y espacial de las rutas migratorias, abundancia, capturabilidad, o cambios en la fenología por citar algunos. Sin embargo, en Ottersen *et al.*, (2001) se propone una clasificación de los efectos biológicos relacionados con la NAO. Se establecen así en primer lugar los efectos directos, entendidos como los mecanismos que implican una respuesta ecológica directa a uno de los parámetros ambientales acoplados al índice NAO, como por ejemplo el efecto de NAO sobre las tasas metabólicas a través de la temperatura; los efectos indirectos, más complejos y que involucran varios pasos intermedios físicos o biológicos entre NAO y la respuesta ecológica. Por último, se definen los efectos integrados como aquellos que implican respuestas ecológicas simples que pueden ocurrir durante y después del año de un extremo NAO. Este es el caso en el que una población tiene que verse afectada repetidamente por una situación ambiental particular antes de que el cambio se puede percibir (lo que se conoce como inercia biológica) o cuando el parámetro ambiental que afecta a la población es en sí mismo modulado durante varios años.

En el caso del Mediterráneo, ya son varios los impactos biológicos que han sido relacionados positivamente con cambios en el índice NAO. Por ejemplo, y de manera específica en las pesquerías Báez *et al.*, (2014) estableció una relación positiva entre las descargas anuales del besugo de la pinta *Pagellus bogaraveo* (Brünnich, 1768) y una fase positiva del índice NAO en el área del estrecho de Gibraltar. Además, el factor de condición del atún rojo, uno de los recursos pesqueros más valoradas, es significativamente más alto durante fases positivas de NAO (Báez *et al.*, 2013a). En la actualidad, se acepta que la cuenca mediterránea se ha constituido como uno de los “puntos calientes” más importantes en lo relativo al cambio climático en todo el mundo, cuyas dinámicas aún están por comprender plenamente. De acuerdo con Robinson *et al.*, 2009, los procesos naturales que ocurren en cuerpos de aguas cerradas o semicerradas

(como el mar Mediterráneo) podrían volverse menos predecibles y temporalmente desacoplados. Sin embargo, las últimas tendencias revelan un cambio hacia una climatología más seca y cálida; lo que dará lugar a cambios en los patrones de circulación que afectarán al medio natural y a las diversas actividades socioeconómicas de la zona (figura 1.11).

Otro de los índices climáticos más estudiados en el área del océano Atlántico es el índice de Oscilación Ártica, también denotado como NAM (de Northern Hemisphere Annular Mode). Este índice determina en la práctica la intensidad del vórtice polar y viene dado por el gradiente de presiones entre la parte interna del vórtice polar, donde se encuentran las presiones negativas, y la parte externa del mismo, donde se dan las altas presiones. Así pues, la inestabilidad de este sistema atmosférico origina, al igual que ocurre con el índice NAO, dos fases claramente diferenciadas: una fase positiva y una negativa (ver figura 1.11). Durante la fase positiva, se produce un refuerzo del vórtice polar dando lugar a un incremento de las precipitaciones en el Atlántico norte y sequías en el mar Mediterráneo; mientras que la fase negativa se caracteriza por un debilitamiento del vórtice polar que ocasiona un incremento de las precipitaciones sobre el área del Mediterráneo (Baldwin & Dunkerton, 1999). Sin embargo, la oscilación ártica es una de las principales fuentes de variabilidad en el índice NAO (Serrano & Trigo, 2011), ejerciendo una influencia directa sobre la Oscilación del Atlántico Norte. En este sentido existe una propuesta científica que propone una interconexión extensa entre ambos índices atmosféricos (Báez *et al.*, 2013b). No obstante, los patrones de conectividad entre ambos índices atmosféricos están aún por esclarecer, por lo que en la actualidad se hace complicado e impreciso establecer una correlación directa entre la variabilidad observada en las series temporales del índice AO y las posibles consecuencias que se desarrollen en el medio ambiente y en las comunidades, poblaciones y ecosistemas, tanto marinos como terrestres.

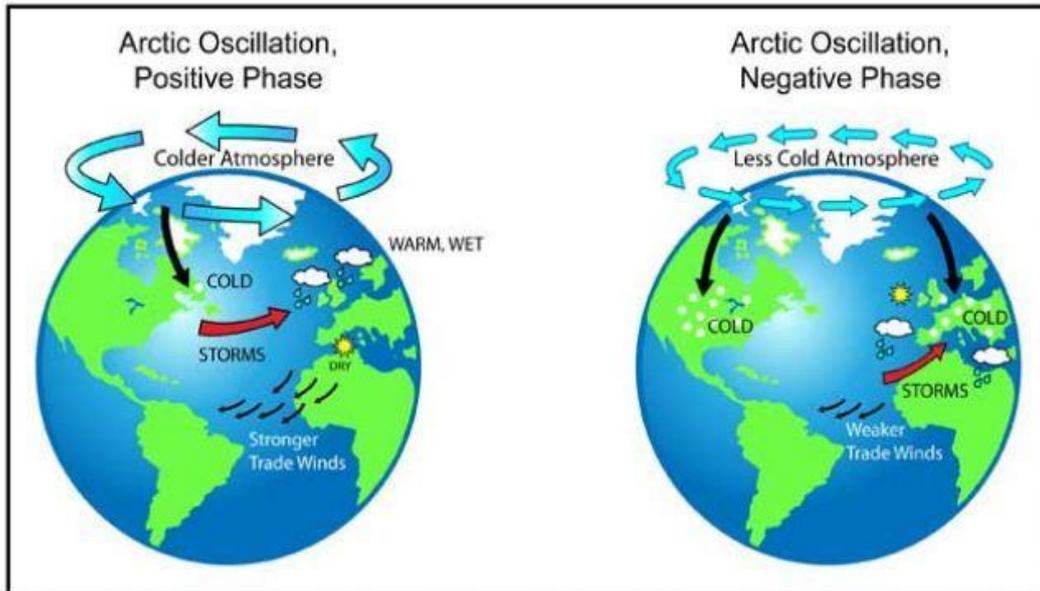


Figura 1.11: Representación esquemática de ambas fases de la oscilación ártica. Fuente: NOAA.

El índice AO presenta una estructura espacial compartida parcialmente con NAO por lo que la correlación entre ambos índices es muy estrecha (Báez *et al.*, 2013a). Esto hace que se planteara entre la comunidad científica la conveniencia de utilizar un índice u otro.

También en el área del Atlántico, aunque a una escala temporal muy superior, se ha descrito el índice AMO, para el que se han definido igualmente una fase negativa y otra positiva. Pese a que los mecanismos físicos que controlan la variabilidad de este índice aún no son conocidos (Abiy *et al.*, 2019), se han descrito algunos de sus efectos sobre los ecosistemas. Así pues, por ejemplo, Faillettaz *et al.*, (2019) establece que las mayores variaciones de las capturas de atún rojo a escala secular a nivel de la cuenca del océano Atlántico quedan explicadas por el índice AMO, en las que las fases positivas de este índice se correspondían con una mayor abundancia de atún rojo y viceversa. El índice AMO se relaciona con el índice NAO mediante un patrón de teleconexión climática que controla una gran cantidad de efectos sobre las comunidades biológicas (Ottersen *et al.*, 2001)

Por otro lado, en las zonas tropicales, se contempla el índice MJO (Madden-Julian Oscillation). Este se define como una fluctuación atmosférica interanual, responsable de la mayor parte de la variabilidad atmosférica en estas regiones, ya que engloba en su definición (Madden & Julian, 1971; Madden & Julian, 1972) numerosos e importantes parámetros atmosféricos y oceánicos como la dirección e intensidad del viento,

precipitaciones, o temperatura de la superficie del mar entre otros. Este fenómeno climático se caracteriza por el desplazamiento hacia el este de las precipitaciones tropicales, principalmente sobre el Índico y el Pacífico, siendo un componente importante en la distribución de masas en latitudes tropicales. No obstante, a medida que este dipolo se desplaza hacia el Pacífico central, las estructuras atmosféricas se hacen menos reconocibles.

Este índice presenta, de acuerdo con los datos proporcionados por la agencia estadounidense NOAA, una elevada variabilidad interanual, al observarse períodos de una elevada actividad seguidos de periodos menos intensos o ausentes. Estas anomalías del estado atmosférico se asocian con una gran cantidad de impactos a varios niveles como por ejemplo modular la intensidad y el “timing” de los monzones en áreas de norteamérica y sudamérica y el sudeste asiático.

El índice MJO está intensamente conectado con el índice ENSO (El Niño Southern Oscillation). Este índice denota una variabilidad atmosférica de carácter interanual (Katz, 2002) de una gran importancia en términos de impacto en la región del Pacífico sur. Este índice viene dado por la diferencia entre las presiones atmosféricas de las islas de Tahití (sobre la que se localiza el centro de bajas presiones del Pacífico) y la de Darwin (donde se ubica el centro de altas presiones).

Durante su fase positiva, la climatología dominante se caracteriza por un movimiento de las masas de aguas cálidas hacia la costa pacífica de Sudamérica con un incremento sustancial de las precipitaciones, lo que se conoce como El Niño. Esta situación origina unas condiciones medioambientales que hacen aumentar la abundancia, reclutamiento y capturabilidad de muchos recursos pesqueros con un elevado valor comercial. En este sentido, el mejor ejemplo es el del atún listado en la costa suroriental del océano Pacífico (Lehodey *et al.*, 1997; Ñiquen & Bouchon, 2004). Al contrario, la fase negativa (La Niña) se asocia con un sistema de presiones atmosféricas deprimidas en el área de Australia e Indonesia que originan un aumento en la nubosidad y las precipitaciones en la parte occidental del Pacífico sur y un descenso generalizado de la temperatura del mar en el área oriental del Pacífico sur. Estos cambios atmosféricos están fuertemente relacionados con numerosos impactos en la zona y especialmente en la biología pesquera.

## **1.5 Objetivos**

El principal objetivo de este estudio es dilucidar una posible conexión entre las oscilaciones atmosféricas con mayor variabilidad interanual en el Atlántico norte, y los efectos observados en la biología de las tres especies de pequeños túnidos de mayor importancia comercial en el litoral español: la melva, la bacoreta y el bonito. Para ello, se testó el valor promedio de diversos índices biológicos frente a los índices de oscilación atmosférica propuestos y, en el caso de la melva se consideraron ambas fases migratorias de modo independiente, ya que llevan a cabo movimientos migratorios anuales hacia sus áreas de puesta en el mar Mediterráneo, y en el sentido opuesto realiza migraciones anuales hacia sus áreas de invernada fuera del mediterráneo.

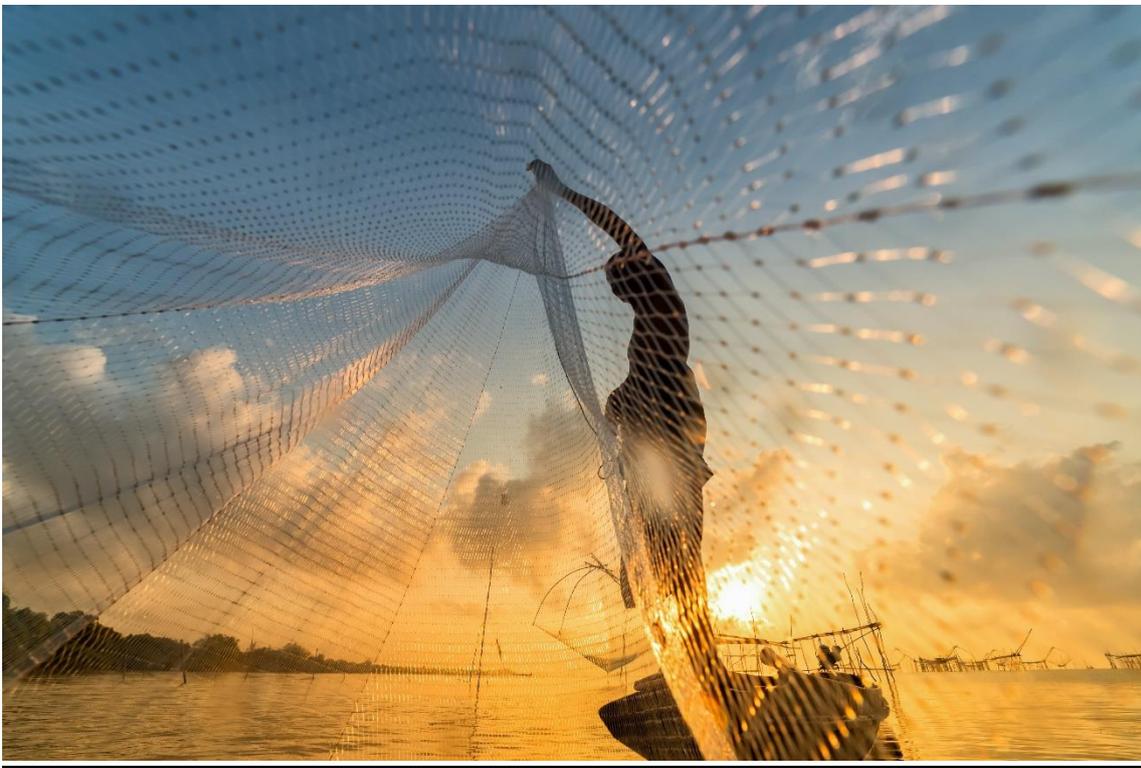
Adicionalmente, se persigue ahondar en el conocimiento de la influencia de las condiciones climáticas sobre la condición física de las especies migradoras, toda vez que en la actualidad existe una escasa literatura que relacione esta variabilidad climática con la condición física de grandes migradores. Además, este estudio pretende contextualizar las dinámicas ecológicas y biológicas de estas especies y su posible perspectiva futura frente a las previsiones de calentamiento global.

Finalmente, se pueden establecer una serie de objetivos específicos en el contexto de este estudio:

1. Proporcionar las relaciones talla peso (LWR en adelante) interanuales, lo que permitirá estimar los parámetros de condición física individualmente (Kmean y LeCren) para que estos puedan ser testados frente a los índices de oscilaciones atmosféricas, ya que las LWR son una herramienta cuantitativa importante a la hora de inferir sobre ciertas dinámicas biológicas tales como la esperanza de vida, crecimiento o estadio reproductivo.
2. Establecer una serie temporal de los índices de condición de las especies en estudio, de manera que se pueda relacionar su variabilidad con la prevalencia de unas ciertas condiciones climáticas.
3. Modelar las relaciones directas entre la biología de melva, bacoreta y bonito y las oscilaciones atmosféricas propuestas.

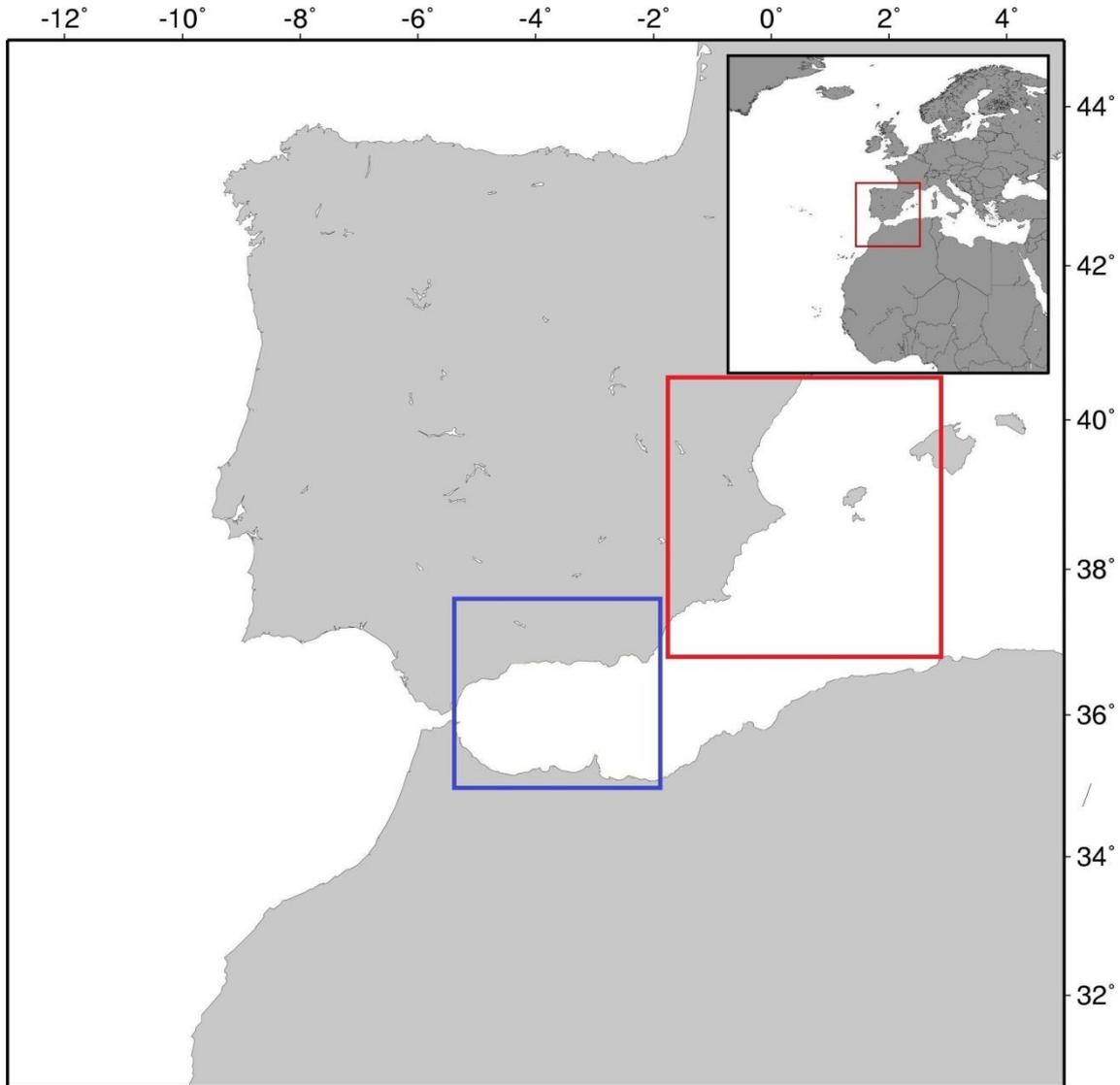
4. Explorar una posible conexión entre la capacidad reproductora de melva, bacoreta y bonito y su correlación con las variaciones climáticas que vienen dadas por el índice NAO.
5. Realizar predicciones a medio y largo plazo sobre la situación de los stocks pesqueros y reclutamiento de melva, bacoreta y bonito en relación a las previsiones climáticas a fin de ser capaces de desarrollar propuestas de gestión encaminadas a la conservación de estas especies.

## **2. MATERIAL Y MÉTODOS**



## **2.1 Área de estudio**

El área de estudio cubre la parte de la costa mediterránea española (ver figura 2.1) y más específicamente en las subcuencas del mar de Alborán y el Mediterráneo occidental, que presentan características propias, pero también un cierto grado de conexión entre ellas. Este hecho hace que ambas cuencas jueguen un papel importante en las diferentes fases vitales de los ejemplares las tres especies consideradas en el presente estudio. A continuación, se detallan las características tanto de la cuenca mediterránea en general como de las dos principales subcuencas (la cuenca del mar de Alborán y la cuenca del Mediterráneo noroccidental) que ostentan un papel primordial en este estudio, con el objetivo de poder desglosar de un modo más eficiente y poder detallar las características que hacen que la cuenca mediterránea sea de vital importancia para este grupo de especies.



*Figura 2.1: Áreas de captura de los ejemplares de melva en el mar de Alborán (cuadrado azul) y Mediterráneo occidental (cuadrado rojo). Mapa proporcionado por seaturtle.org/maptool (2017).*

### **2.1.1 La cuenca hidrográfica del mar Mediterráneo**

La cuenca Mediterránea es considerada una cuenca interna del océano Atlántico con una superficie aproximada de 2.5 millones de kilómetros cuadrados y un volumen estimado de 3.7 millones de kilómetros cúbicos, en la que el estrecho de Gibraltar es la única conexión natural con el océano Atlántico. Tiene una profundidad promedio cercana a los 1400 metros, mientras que la profundidad máxima conocida es de 5121 en la fosa Helénica (Rodríguez, 1982).

El mar Mediterráneo presenta un balance hídrico negativo, lo que implica que las pérdidas por evaporación exceden a las precipitaciones y escorrentías. Esta situación origina un sistema de corrientes característico en el Mediterráneo, caracterizado por una

corriente somera que penetra en el Mediterráneo desde el Atlántico; mientras que una corriente de mayor densidad fluye en profundidad hacia el Atlántico. Esto es comúnmente conocido como circulación termohalina, lo que hace que la zona geográfica del estrecho de Gibraltar sea una zona especialmente productiva.

Esta situación provoca que la productividad primaria de la cuenca esté heterogéneamente distribuida a lo largo de la cuenca; estando está altamente influenciada por las corrientes marinas, aportes de agua dulce y procesos de mezcla verticales, estos últimos muy relacionados con la intensidad de los vientos locales (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2008). Este hecho provoca un gradiente de nutrientes hacia el este dentro de la cuenca mediterránea en la que la cantidad de nutrientes es mayor en la parte oeste (Krom *et al.*, 1991), a pesar de que el Mediterráneo haya sido definido como una cuenca oligotrófica (Würtz, 2010).

El mar Mediterráneo presenta un régimen de temperaturas templado durante todo el año, con mínimas entre 12.5 y 13°C a cualquier profundidad, lo que hace que sea considerado como un mar templado. La temperatura media en superficie oscila entre 21°C en la cuenca este y 15.5°C en la cuenca oeste. Por otro lado, los valores de salinidad en la superficie oscilan entre 36 y 38 p.s.u. (Rodríguez, 1982), con un gradiente creciente hacia el este.

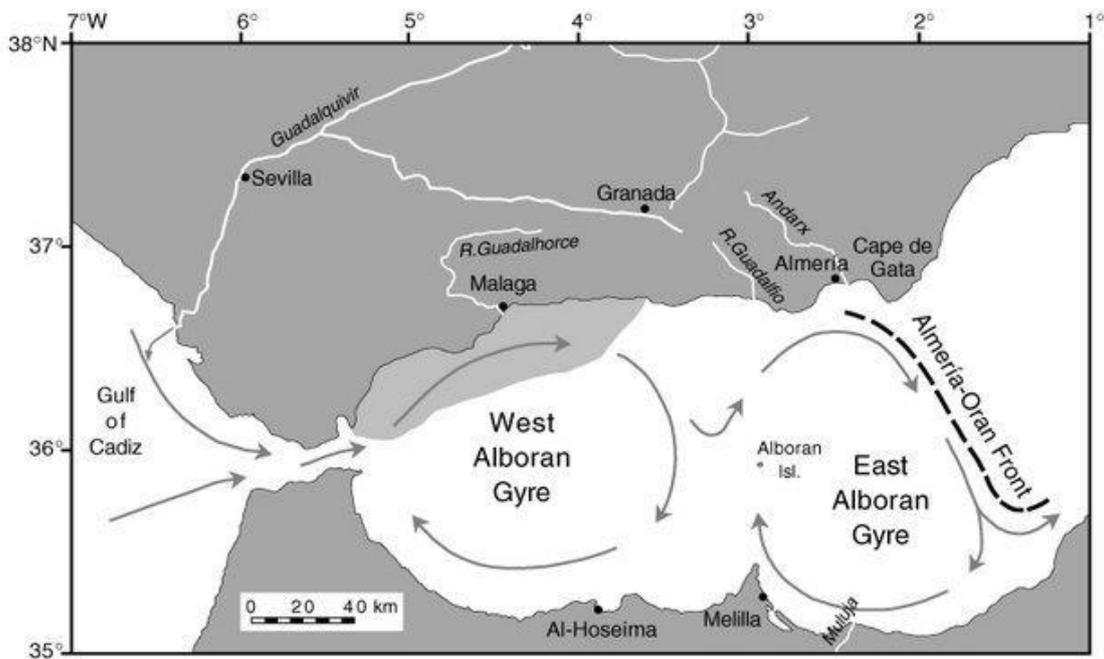
Además, la variedad de situaciones hidrológicas y climáticas presentes en el ecosistema pelágico en el Mediterráneo permite la presencia de especies tanto templadas como subtropicales. En lo que respecta a la biodiversidad, el mar Mediterráneo acoge un amplio número de especies diferentes, a pesar de que las aguas mediterráneas constituyen únicamente el 0.82% del área y el 0.32% del volumen de agua total de todos los océanos (Defant, 1961). En lo relativo a la riqueza de especies, el mar Mediterráneo acoge aproximadamente unas 8500 especies marinas macroscópicas, de las cuales el 30% son pelágicas (Ribera *et al.*, 1992), y la cuarta parte son endémicas (Fredj *et al.*, 1992).

Finalmente, los escenarios actuales se caracterizan por un incremento de la actividad antropogénica, lo que ha originado una serie de impactos en los recursos tanto físicos, como químicos y biológicos. Esta situación, combinada con un elevado número de valores ambientales en el Mediterráneo ha dado lugar al establecimiento de Áreas

Marinas Protegidas, en las que la actividad humana está restringida, con el objetivo de proteger y conservar tales valores.

### **2.1.2 La cuenca hidrográfica del mar de Alborán**

El área del mar de Alborán comprende una pequeña cuenca mediterránea ubicada entre el sur de Europa y el norte de África, y entre el estrecho de Gibraltar y el frente de Almería-Orán (**Figura 2.2**), lo que constituye un importante frente termohalino (Parrilla & Kinder, 1987), que habitualmente ha sido considerado como referencia para establecer el límite este de esta sub-cuenca.



*Figura 2.2: Mapa del mar de Alborán en el que se muestran los giros que originan los afloramientos. El área gris muestra las principales áreas de productividad de fitoplancton. Fuente: Hauschildt et al., (1999).*

El sistema de corrientes originado por la circulación termohalina es el origen de los giros anticiclónicos que aparecen en la costa española del mar de Alborán, lo que desencadena una serie de afloramientos de aguas profundas que a su vez favorecen la distribución de agua hacia el este. El elevado aporte de nutrientes hace que el mar de Alborán sea un área más productiva que el resto del Mediterráneo. Esta es una de las principales razones por las que la biodiversidad en el mar de Alborán es mayor que en otras subcuencas en el Mediterráneo y por las que constituye un área de alimentación para muchas especies migratorias (Würtz, 2010).

En lo que respecta a las características oceanográficas, el mar de Alborán presenta unos valores de temperatura en superficie entre 15 y 21°C en invierno y verano respectivamente; y unos valores de salinidad entre 36.6 y 37.2 p.s.u. en otoño y primavera respectivamente. Además, debido al gradiente longitudinal anteriormente mencionado, el mar de Alborán es ligeramente más frío y salado que el resto del mar Mediterráneo. Finalmente, la profundidad media de la cuenca de Alborán está en torno a 1000 metros, donde una plataforma continental estrecha favorece la aparición de afloramientos de nutrientes con especial intensidad. En el contexto de este estudio, el mar de Alborán juega un papel importante, ya que constituye una importante ruta migratoria para la melva hacia sus áreas de puesta (Valeiras & Abad, 2006).

### **2.1.3 La cuenca hidrográfica del Mediterráneo noroccidental**

El Mediterráneo noroccidental se extiende más allá del cabo de la Nao y el archipiélago balear, incluyendo la costa este española y la parte noroccidental de la isla de Córcega. Cubre un área aproximada de 87500 km<sup>2</sup>, con una plataforma continental amplia, a pesar de que en algunas zonas es más reducida (Astraldi *et al.*, 1999). Oceanográficamente, esta área está altamente influenciada por el intenso aporte de aguas continentales procedentes de las escorrentías fluviales. Esto produce un aumento del material particulado en suspensión y, por lo tanto, un aumento de la producción primaria y una reducción parcial de la salinidad. Además, los afloramientos de carácter estacional mantienen una elevada productividad y diversidad biológica. En el marco de este estudio, esta área es importante ya que constituye una importante área de puesta para muchas especies de túnidos, que realizan migraciones anuales a esta sub-cuenca con fines reproductivos (García *et al.*, 2005; Sabatés & Recasens, 2008).

### **2.2 Adquisición de los datos atmosféricos**

Los datos atmosféricos son proporcionados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), disponibles en el sitio web oficial (ver <http://www.noaa.gov>). Así pues, se obtuvieron de este sitio web los valores promedio mensuales tanto para el índice NAO durante el periodo temporal estudiado, y posteriormente se obtuvo la media anual. Tras esto, y ya que se ha demostrado que es durante el periodo invernal cuando la variabilidad climática es mayor, y que además es probable que exista un desacople

temporal entre la prevalencia de unas condiciones atmosféricas y sus consecuencias biológicas, se proponen las siguientes modificaciones de las oscilaciones atmosféricas:

- NAO: Se corresponde con el valor promedio de cada índice calculado para el año en curso, sin alteraciones temporales.
- NAO<sub>acum</sub>: Estos índices se corresponden con el valor individual medio de cada índice según la edad asignada a cada individuo. Esta modificación establece una aproximación acerca de las oscilaciones atmosféricas que cada ejemplar ha experimentado durante su ciclo de vida.
- NAO<sub>py</sub>: Esta modificación se corresponde con el valor promedio del índice observado durante el año anterior a su captura. Por tanto, se establece un desfase temporal de un año entre unas ciertas condiciones atmosféricas y las consecuencias biológicas desencadenadas.
- \*NAO<sub>pw</sub>: Esta modificación se calcula como el valor medio del índice durante los meses de invierno del año previo. En este caso se asume un desfase temporal de seis meses entre la condición atmosférica y la respuesta biológica, considerando solamente los meses de invierno en los que la variabilidad es mayor.
- \*NAO<sub>w</sub>: Se corresponde con el valor medio durante los meses de invierno considerando los meses de invierno tanto del año anterior como del año en curso.

*\* El periodo de invierno abarca entre el mes de octubre de años previos y el mes de marzo del año en curso.*

Los índices de oscilaciones atmosféricas presentan a lo largo de su serie temporal, no solo una variación interanual si no variaciones temporales y como una periodicidad entre las fases positivas y negativas. La decisión de contemplar una serie modificada de estos índices para los meses de invierno se explica por el hecho de que, de acuerdo con Hurrell, 1995 es en durante los meses invernales cuando estos índices presentan una mayor variabilidad.

### **2.3 La almadraba de La Azohía**

La mayor parte de las muestras recogidas para llevar a cabo este estudio proceden de la almadraba situada en La Azohía, localizada en el sector suroeste del litoral español. Fundada en 1947 y gestionada a modo de empresa familiar, cuenta con la

correspondiente licencia expedida por la ICCAT y la Secretaría General de Pesca del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, y se trata de la única almadraba española localizada en el mar Mediterráneo. Además, tiene la particularidad de ser la única almadraba en España que cuenta con una lonja para la primera venta de sus productos.

Funciona del mismo modo que el resto, si bien es cierto que tiene unas dimensiones ligeramente menores en comparación con otras almadrabas, como por ejemplo las localizadas en Tarifa o Barbate, para la captura de atún rojo en el área del estrecho de Gibraltar. Así pues, el arte de almadraba, como cualquier otro arte de pesca pasivo se deja calado frente a la costa, y la finalidad del mismo es interceptar a las especies objetivo a través de largos paños de red y conducir a las capturas hacia una zona donde no pueden salir a través de una serie de cámaras. Una vez allí, una red llamada copo se iza verticalmente forzando a las capturas a ascender a la superficie donde son capturadas y sacrificadas.

Los meses de máxima actividad son de febrero a julio si bien, al igual que puede ocurrir con cualquier almadraba, la fecha de inicio de la temporada es variable y depende de factores muy variados como mareas, corrientes, las fases del ciclo lunar e incluso las condiciones climáticas dominantes que afectan enormemente a las especies con hábitos migratorios. La almadraba de La Azohía está localizada en la zona de paso migratorio de las especies de túnidos empleadas en este estudio. Por ello, en el contexto del programa de seguimiento de datos pesqueros que implemente la ICCAT, el Instituto Español de Oceanografía (IEO) realiza muestreos estratificados periódicos tanto de melva como de bonito y bacoreta con el objetivo de cubrir todo el rango de tallas de las capturas comerciales de estas especies.

Entre las principales capturas obtenidas en la almadraba de La Azohía destacan las especies de túnidos de pequeño tamaño. Así pues, las tres especies utilizadas para este estudio (melva, bacoreta y bonito atlántico) constituyen un alto porcentaje del total de las capturas. Sin embargo, la diversidad de especies capturadas es elevada, ya que no solo aparecen túnidos de pequeño tamaño, si no que especies como el atún rojo (*Thunnus thynnus*), pez espada (*Xiphias gladius*) o el atún blanco (*Thunnus alalunga*) son ocasionalmente capturadas. Además, aparecen muchas otras especies de otros grupos taxonómicos, tales como: caballa (*Scomber colias*), pez limón (*seriola dumerii*),

dentón (*Dentex dentex*), palometa (*Brama brama*), lacha (*Sardinella aurita*) o jurel (*Trachurus sp.*).

No obstante, durante el año 2018, la almadraba de La Azohía obtuvo una cantidad total de capturas que ascendió a 363 toneladas, una cifra ligeramente superior a las de años previos, si bien la tendencia es bastante constante. De esa cantidad, 224 toneladas (61.7%) corresponden a capturas de melva (*Auxis rochei*), seguido de 91 toneladas (25%) de bacoreta (*Euthynnus alletteratus*) y 36 toneladas (9.9%) de bonito (*Sarda sarda*). Se observa por lo tanto una predominancia de capturas de especies de pequeños túnidos en esta localización, ya que constituyen el 96.6% del peso total de las capturas registradas durante el año 2018.

### **3. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN FÍSICA DE LA MELVA (*Auxis rochei*)<sup>(1)</sup>**



*Foto obtenida de: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)*

(1) Capítulo publicado como: Muñoz-Expósito, P., Macías, D., Ortiz de Urbina, J.M., García-Barcelona, S., Gómez, M.J. & Báez, J.C. (2017). North Atlantic Oscillation affects the physical condition of migrating bullet tuna *Auxis rochei* (Risso, 1810) from the western Mediterranean Sea. *Fisheries Research*, 194: 84-88.

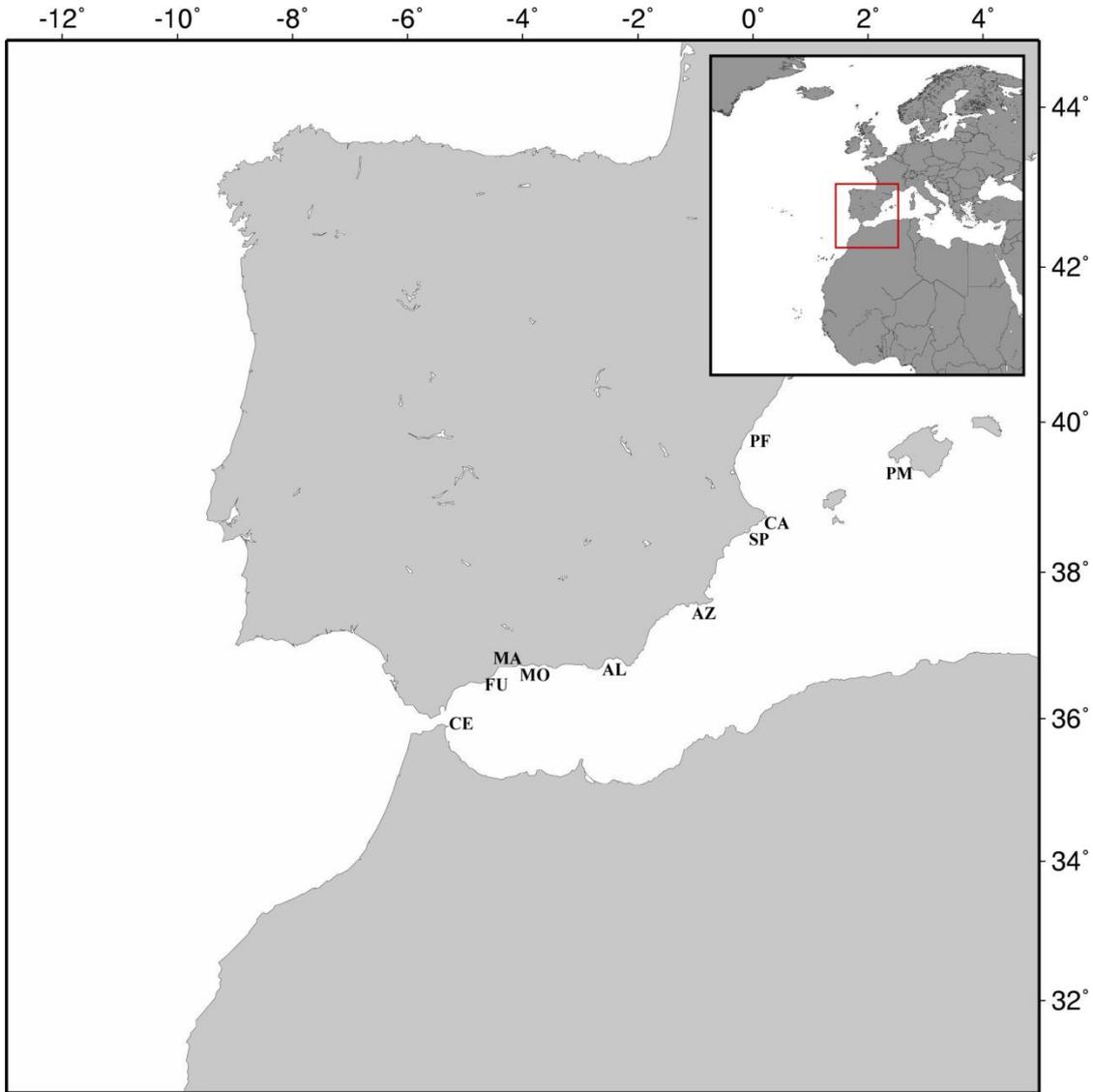
### **3.1 Contexto General**

La melva (*Auxis rochei*), el ejemplar de menor tamaño del grupo taxonómico de los túnidos, constituye un recurso pesquero de gran importancia en todo el mundo (Valeiras & Abad, 2006a; Collette *et al.*, 2011). Además, debido a su abundancia y su marcado carácter migratorio, esta especie ocupa un lugar muy importante dentro de las cadenas tróficas, ya que es una presa importante para un gran número de especies comerciales tales como otras especies de túnidos, tiburones pelágicos y otras especies pelágicas de gran tamaño (Olson, 1982; Mostarda *et al.*, 2007). Además, es conocido que esta especie realiza migraciones genéticas hacia sus áreas de puesta en el mar Mediterráneo, concretamente en áreas en torno a las Islas Baleares (García *et al.*, 2005) y cercanas a la costa (ver por ejemplo Álvarez-Berasategui *et al.*, 2014); donde las condiciones de salinidad y temperatura son óptimas para la puesta (Schaefer, 2001). No obstante, el comportamiento migratorio de esta especie aún no ha sido esclarecido completamente (Reglero *et al.*, 2012).

A la vista de lo anterior, diversos autores han postulado, y en gran medida confirmado, la hipótesis de que las especies marinas migratorias podrían responder a las oscilaciones climáticas alternando sus características fenológicas, abundancia, distribución o reclutamiento (Mejuto, 2003; Chaloupka *et al.*, 2008; Mazaris *et al.*, 2008; Graham and Harrold, 2009; Báez *et al.*, 2011a). A pesar de ello, los estudios sobre los efectos de la variabilidad climática sobre la condición física de las especies marinas migratorias son escasos en la actualidad. Por ello, uno de los objetivos de este estudio es evaluar una posible conexión entre las fuentes de variabilidad climática y la condición física de la melva durante su migración genética hacia el Mediterráneo.

### **3.2 Metodología**

Se capturaron un total de 2381 individuos de la melva en diferentes localizaciones a lo largo de la costa mediterránea española (figura 3.1). Estas zonas de capturas quedaron espacialmente divididas entre el mar de Alborán y el Mediterráneo occidental, tal y como se refleja en la figura 2.1:



**Figura 3.1:** Detalle de los lugares de captura de los ejemplares a lo largo de la costa del mar de Alborán y el Mediterráneo occidental. Clave: CE=Ceuta; FU=Fuengirola; MA=Málaga; MO=Motril; AL=Almería; AZ=La Azohía; SP=Santa Pola; CA=Calpe; PF=Pobla de Farnals; PM=Palma de Mallorca. Mapa proporcionado por [seaturtle.org/maptool](http://seaturtle.org/maptool) (2017).

Los ejemplares de melva capturados en este estudio fueron capturados por pesquerías comerciales durante dos periodos de tiempo diferentes. El primero de ellos está comprendido entre 1983 y 1984; mientras que el otro periodo está comprendido entre 2003 y 2015.

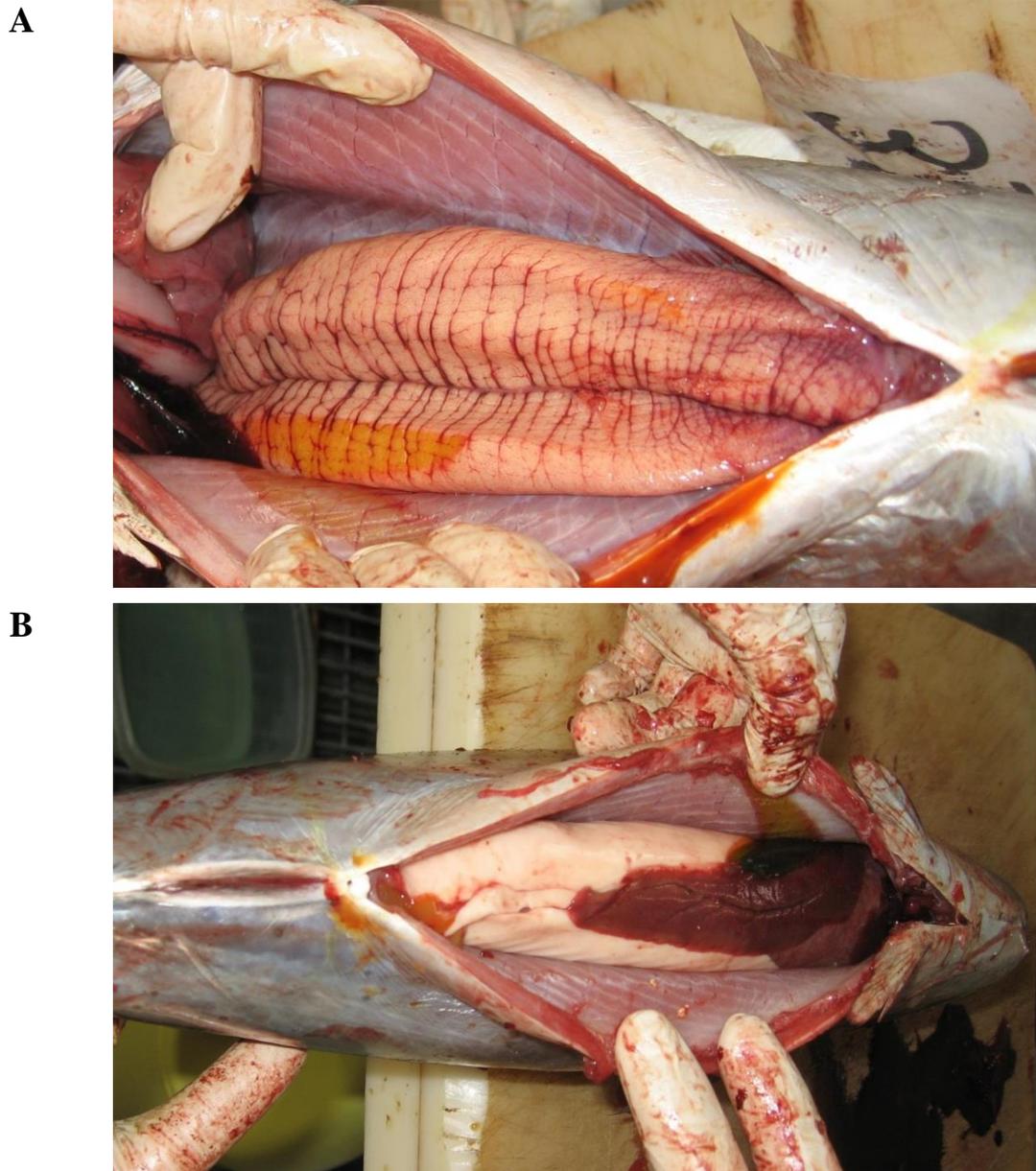
El muestreo de estos ejemplares se realizó de acuerdo a un diseño aleatorio estratificado que cubría todo el rango de longitudes para esta especie en el área estudiada, dentro del marco del programa nacional de seguimiento, desarrollado e implementado por la ICCAT, lo que elimina cualquier posible sesgo en la condición física. Cada individuo

fue medido hasta la horquilla hasta el centímetro más cercano (figura 3.1), y pesados hasta el gramo más próximo:



*Figura 3.2: Detalle del proceso de medición de los individuos.*

Posteriormente, cada individuo fue eviscerado y sexado mediante exploración visual de las gónadas (en la figura 3.3 se aprecian los detalles macroscópicos de la gónada de ambos sexos), y se le asignó una edad estimada a cada individuo mediante el empleo de una clave talla edad para esta especie, publicada en Valeiras *et al.* (2008a).



**Figura 3.3:** Apariencia externa de las gónadas de *A. rochei*. A) Gónada femenina; B) Gónada masculina.

El uso de la clave talla-edad (ver tabla 3.1) se basa en asignar una clase de edad a cada uno de los individuos mediante la lectura de los otolitos y reflejando posteriormente la proporción de individuos asignados a cada clase de edad por cada centímetro de longitud a la horquilla. Esto permite asignar una edad a cada ejemplar teniendo en cuenta únicamente la longitud de los mismos. A efectos de este estudio, se asignaron de manera individual 3 clases de edad diferentes: 1, 2 y 3+, donde la clase de edad 3+ incluye a los individuos de edad 3 y posteriores. Esta simplificación tiene por objetivo minimizar el error asociado al hecho de establecer una edad a individuos con una talla mayor, que podrían ser incluidos en más de una clase de edad.

Tabla 3.1: Clave talla-edad donde se representa el porcentaje de individuos de *A. rochei* por clases de edad en relación con la longitud furcal expresada en centímetros.

Longitud Furcal (cm)	Edad 1	Edad 2	Edad 3+
<34	100	0	0
35	96	4	0
36	93	7	0
37	80	20	0
38	69	31	0
39	7	61	32
40	0	57	43
41	0	29	71
42	0	25	75
43	0	17	83
>43	0	0	100

Posteriormente, se obtuvo una relación talla peso anual, ajustada a una curva de regresión potencial de la forma:  $Peso = a * Longitud^b$  (ecuación 1); en la que “a” y “b” son los coeficientes de la regresión potencial, y “Peso” y “Longitud” son el peso de los individuos expresados en gramos (g) y la longitud de los peces, expresado en centímetros (cm), respectivamente.

El parámetro “b” proporciona información sobre ciertas dinámicas biológicas de la especie. Referente a esto, y de acuerdo con la ley del cubo, revisada en Froese (2006), el parámetro “b” debería tener un valor próximo a 3 para las especies con un crecimiento isométrico (esto se refiere a que los individuos crecen en la misma proporción en las tres dimensiones espaciales), que presentan la misma condición y forma tanto para los especímenes de mayor y menor tamaño. Al contrario, si “b” fuese distinto de 3, se asumiría un crecimiento alométrico.

De acuerdo con esto, un valor de b mayor que 3 se interpreta como un crecimiento alométrico positivo en el que los individuos de mayor tamaño han aumentado más su tamaño en cuanto a la altura o anchura que en cuanto a la longitud. Esto puede explicarse o bien por cambios ontogénicos (lo cual es raro) o bien porque los individuos de mayor tamaño eran más gruesos que los pequeños (bastante frecuente). Finalmente, un valor de b inferior a 3 puede interpretarse como un crecimiento alométrico negativo

y por tanto los individuos de mayor tamaño habrían cambiado su forma hasta ser más elongados, o bien presentar un mejor estado nutricional o condición física que los pequeños.

### **3.2.1 Cálculo de los índices de condición**

Se calcularon a continuación dos índices de condición diferentes de manera individual, usando los coeficientes de regresión anuales obtenidos previamente de las relaciones talla-peso.

Por un lado, se calculó índice de condición de Fulton modificado de acuerdo con la siguiente expresión (en Froese, 2006) (ecuación 2):

$$K_{mean} = 100 * (a * L^{(b-3)})$$

Ecuación 2: Expresión para el cálculo del índice de condición promedio ( $K_{mean}$ ); donde: “a” y “b” son los coeficientes de regresión, y L es la longitud de cada individuo expresada en centímetros.

Este índice ( $K_{mean}$ ) es equivalente al índice de condición de Fulton, y proporciona una información importante acerca del estado nutricional y físico de cada ejemplar (Sutton *et al.*, 2000). Además, este índice permite eliminar el efecto del cambio de peso de los individuos y permite la estimación de un índice de condición a una cierta longitud (Froese, 2006).

Se calculó también el índice de condición relativo de LeCren de acuerdo con la ecuación 3 (ver Froese, 2006). Esta expresión representa una relación entre el peso empírico (medido *in-situ*) y el peso estimado por medio de las relaciones talla-peso (LeCren, 1951; revisado en Froese, 2006):

$$LC = W / (a * L^b)$$

Ecuación 3: Expresión para el cálculo del índice de condición de LeCren; donde: “a” y “b” son los coeficientes de regresión, L es la longitud de cada individuo expresada en centímetros, y W es el peso expresado en gramos.

Este índice expresa una relación entre el peso observado en gramos (W) y el obtenido por medio de las relaciones talla-peso ( $a*(L^b)$ ). Esta expresión representa un factor de condición relativo que compensa cualquier cambio en la forma o condición provocados por un incremento en la longitud. Así, este índice “mide la desviación de cualquier individuo de su peso promedio para una cierta longitud” (Froese, 2006).

Tras esto, se creó una base de datos, perteneciente al archivo interno del Instituto Español de Oceanografía, en la que se registró el total de 2381 registros, donde se

registró el número de ejemplares de melva capturados en cada localización por año y también por arte de pesca utilizado para su captura. Sin embargo, antes del análisis estadístico, esta base de datos fue filtrada con el objetivo de detectar y eliminar aquellos registros que representen valores atípicos y que por tanto pudieran interferir en el resultado de tales análisis.

### **3.2.2 Procedimiento de eliminación de valores atípicos**

La base de datos fue filtrada de acuerdo con el valor del índice de LeCren calculado individualmente. Este índice proporciona información acerca de la relación entre el peso observado y aquel esperable aplicando la expresión de ajuste matemático. En primer lugar, el total de los 2381 registros fueron ordenados de acuerdo al valor del índice de LeCren y, a continuación, se eliminó el 1% de los registros con valores más altos y más bajos. Para saber el porcentaje de registros que debían ser eliminados (10%, 5%, 2% y 1%) se calculó el p-value de una distribución  $\chi^2$  hasta que no se obtuvieron diferencias significativas entre el valor observado y el esperado.

Tras la eliminación de los valores atípicos, se mantuvieron un total de 2357 registros en la base de datos anteriormente creada (se eliminaron por tanto 24 registros).

Tabla 3.2: Procedencia de los 2357 individuos de melva tras la filtración. Clave: “Localización” corresponde al lugar de descarga de cada individuo; “Arte de Pesca” se refiere al método de pesca empleado para su captura; y “Subtotal” y “Total” son las cantidades parciales y totales de *A. rochei* por arte de pesca y localización.

LOCALIZACIÓN	ARTE DE PESCA	SUBTOTAL	TOTAL
Almería	Cerco	75	75
Calpe	Curricán	4	4
Ceuta*	Almadraba	151	151
Fuengirola	Cerco	99	99
La Azohía	Almadraba	1845	1918
	Curricán	19	
	Palangre	2	
La Pobra de Farnals	Curricán	6	6
Málaga	Cerco	7	7
Motril	Cerco	24	24
Palma	Curricán	4	62
	Cerco	58	
Santa Pola	Curricán	2	2
“Sin localización registrada”	Curricán	6	9
	Almadraba	3	

### 3.2.3 Análisis de los datos

En primer lugar, se testó la normalidad de los datos por medio de un test no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (Sokal & Rohlf, 1995) mediante el empleo del software IBM SPSS Statistics software v.19. Tras esto, se testó la dependencia con el tiempo de las series de datos con el objetivo de obtener una variabilidad interanual cíclica por medio de un análisis espectral (Hammer *et al.*, 2001) tanto para los datos atmosféricos como para los datos biológicos.

Se realizó un test no paramétrico de Mann-Whitney estableciendo un intervalo de confianza del 95 % ( $\alpha=0.05$ ) con el objetivo de explorar posibles diferencias significativas en los factores de condición de machos y hembras. El mismo test se repitió para testar diferencias significativas en los índices  $K_{\text{mean}}$  y LeCren entre los individuos antes y después de la puesta.

A continuación, también se realizó un test no paramétrico de Spearman al 99% de confianza ( $\alpha=0.01$ ) con el objetivo de correlacionar la variabilidad observada en los índices de oscilación atmosférica con la variabilidad observada en los factores de condición. Esta operación se realizó para los individuos capturados antes y después del periodo reproductivo de manera separada. El mismo test se repitió para todo el conjunto de datos, filtrando el sexo de los individuos y, finalmente, de acuerdo a la edad asignada a los mismos.

Se escogió un intervalo de confianza del 99% con el objetivo de minimizar el error tipo 1 asociado con este test debido al elevado número de registros que constituyen el conjunto de datos.

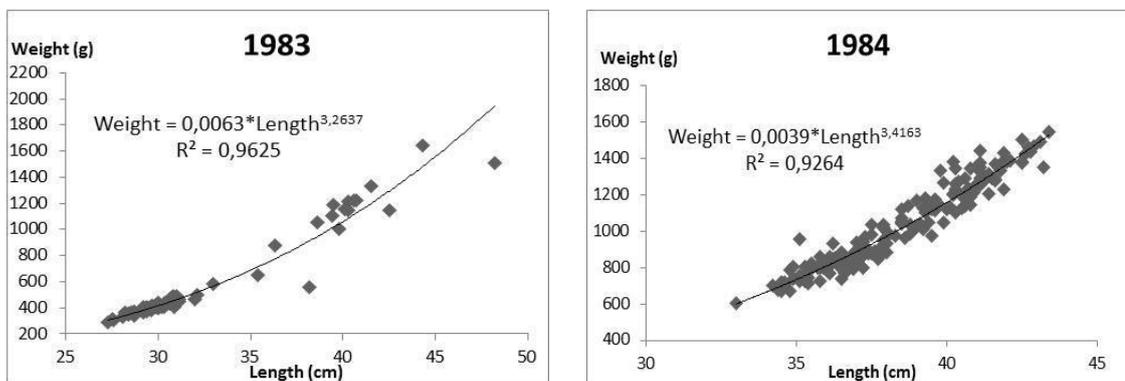
### **3.3 Resultados**

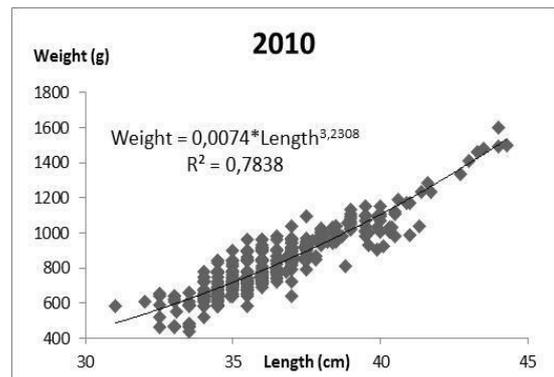
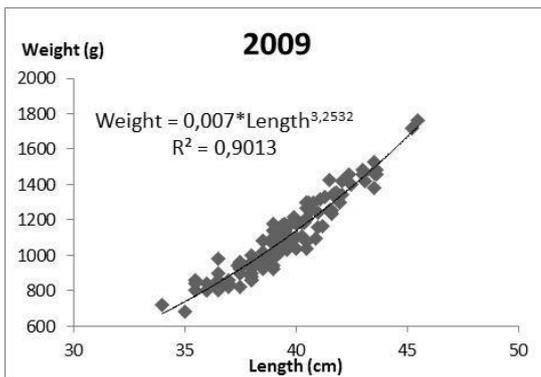
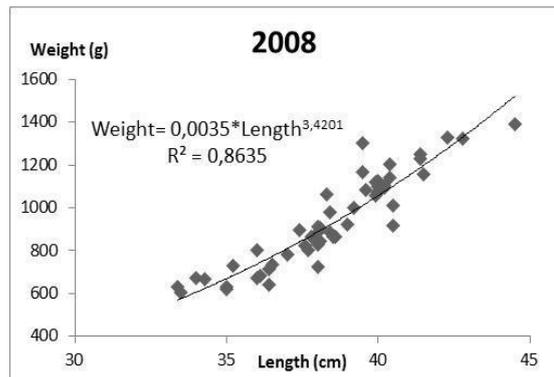
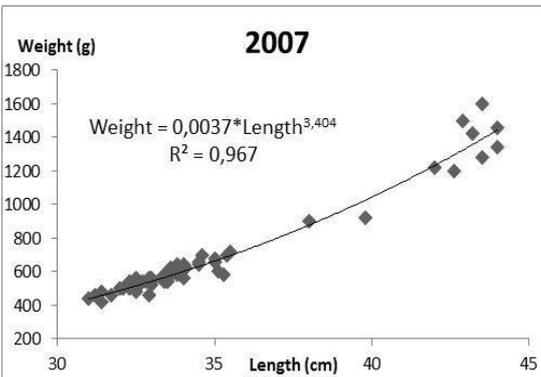
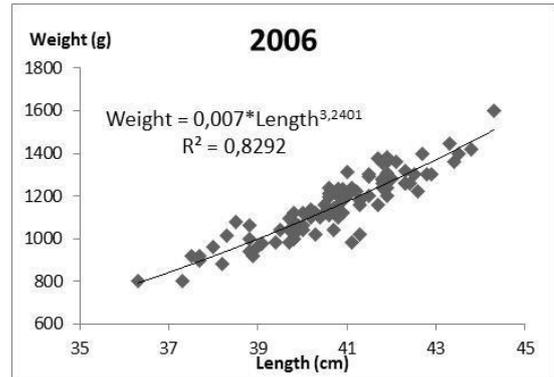
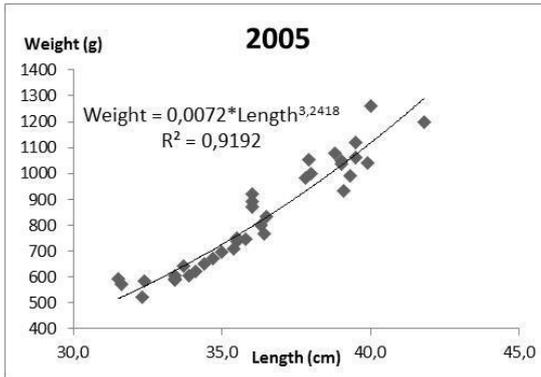
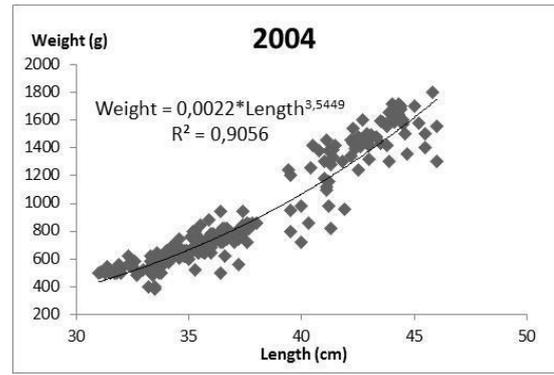
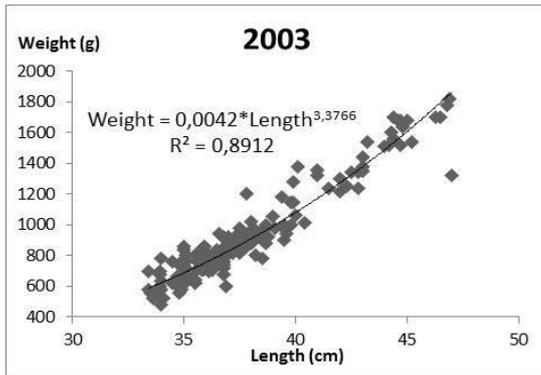
De manera general, no se demostró normalidad en ninguna de las distribuciones examinadas por medio del test de Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha=0.05$ ), lo que condicionó el uso de test estadísticos no paramétricos. No se encontró ninguna tendencia temporal a lo largo de la serie histórica para el índice NAO, ni para las componentes de invierno del mismo que fueron propuestas.

#### **3.3.1 Relaciones talla-peso e Índices de condición**

##### **3.3.1.1 Individuos Pre-reproductores**

Se obtuvieron las relaciones talla-peso para aquellos individuos capturados antes del periodo reproductivo ( $N_{total}=2206$ ). Estas, se representan anualmente en las figuras a continuación (figura 3.4):





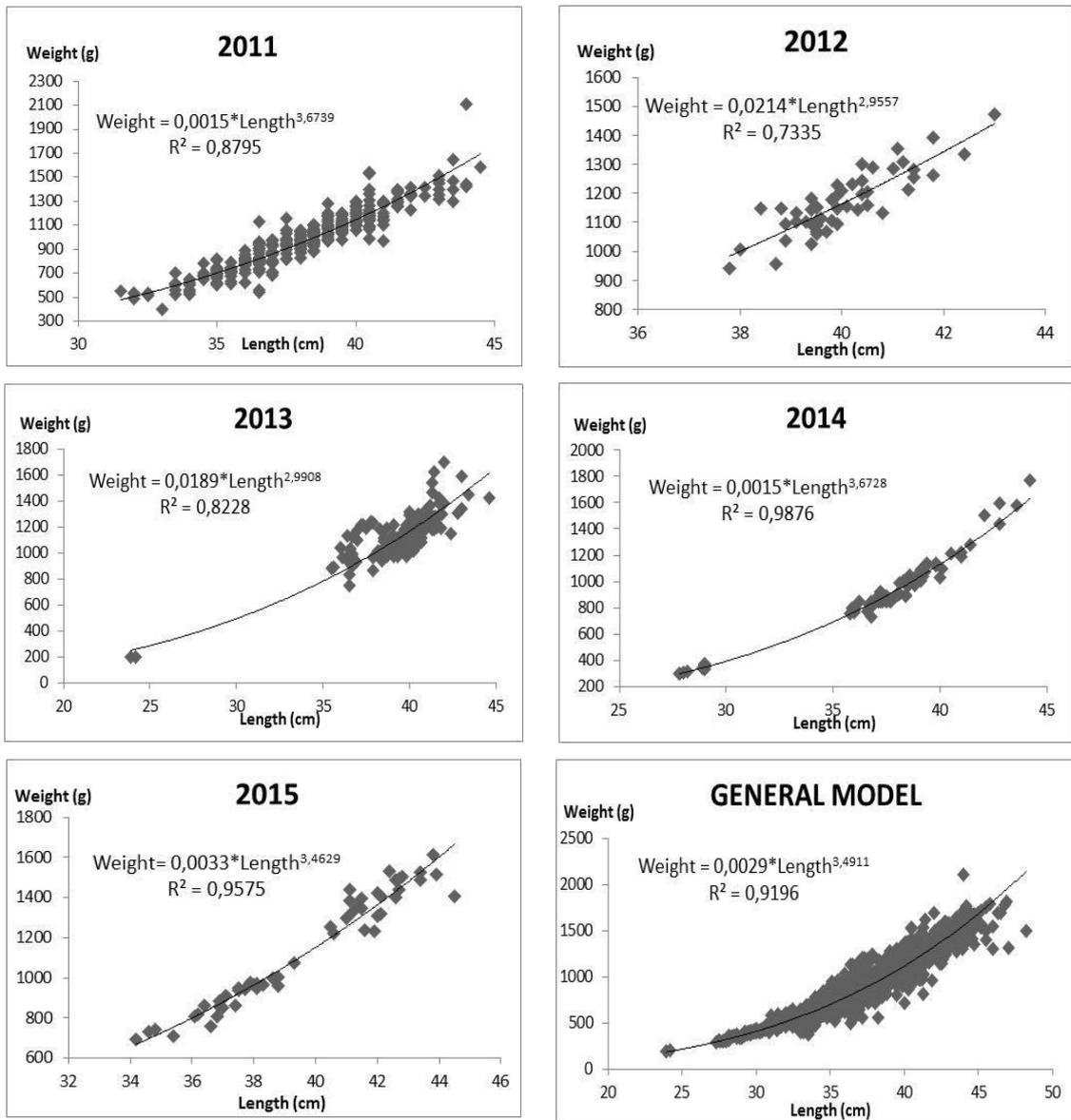


Figura 3.4: Relaciones talla-peso anuales y general para *A. rochei* pre-reproductor.

La tabla 3.3 resume los valores de los coeficientes de regresión obtenidos en cada relación talla-peso, donde también se muestran los valores promedio del índice de condición  $K_{mean}$  y  $LeCren$  para cada año, calculados por medio de las ecuaciones 2 y 3. El valor medio del parámetro  $b$  (3.343) refleja que la melva en estado pre-reproductor presenta un crecimiento alométrico positivo. Adicionalmente, también se obtuvieron los valores medios de ambos índices de condición: en el caso de  $K_{mean}$  fue de 1.697, mientras que el valor medio de  $LeCren$  fue 1.004.

Tabla 3.3: Coeficientes de regresión obtenidos por año para la melva pre-reproductora, así como los índices de condición anuales, donde se muestra el número de individuos analizados cada año. Clave: “a” y “b” son los coeficientes de regresión, R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación y K-mean y LeCren representan los factores de condición medios por año.

AÑO	a	b	R <sup>2</sup>	K-Mean	LeCren
1983 (N=77)	0.0063	3.26	0.9625	1.485	1.054
1984 (N=180)	0.0039	3.41	0.9264	1.779	1.0008
2003 (N=173)	0.0042	3.37	0.8912	1.649	1.006
2004 (N=226)	0.0022	3.54	0.9056	1.579	1.023
2005 (N=37)	0.0072	3.24	0.9192	1.713	0.997
2006 (N=94)	0.007	3.24	0.8292	1.704	0.999
2007 (N=124)	0.0037	3.4	0.967	1.549	0.996
2008 (N=51)	0.0035	3.42	0.8635	1.619	1.005
2009 (N=115)	0.007	3.25	0.9013	1.775	0.999
2010 (N=445)	0.0074	3.23	0.7838	1.694	1.0001
2011 (N=359)	0.0015	3.67	0.8795	1.746	0.997
2012 (N=50)	0.0214	2.95	0.7335	1.817	1.001
2013 (N=152)	0.0189	2.99	0.8228	1.827	1.0024
2014 (N=71)	0.0015	3.67	0.9876	1.704	0.988
2015 (N=52)	0.0033	3.46	0.9575	1.792	1.0007

A continuación, en lo que respecta a una posible correlación entre ambos índices de condición y los índices atmosféricos; estos aparecen reflejados en la tabla 3.4, en la que se muestran únicamente las correlaciones para las cuales se obtuvieron unas correlaciones estadísticamente significativas tras empleo del test de Spearman ( $\alpha=0.01$ ):

Tabla 3.4: Correlaciones estadísticas entre los índices de condición y los atmosféricos. Se muestran únicamente los resultados que cumplen:  $p\text{-value} < 0.01$

Índice de Condición	Índice de Oscilación Atmosférica	Rho Spearman
K <sub>mean</sub>	NAO <sub>py</sub>	0.318

Las diferentes relaciones talla-peso se obtuvieron tanto para hembras como para machos (Figura 3.5):

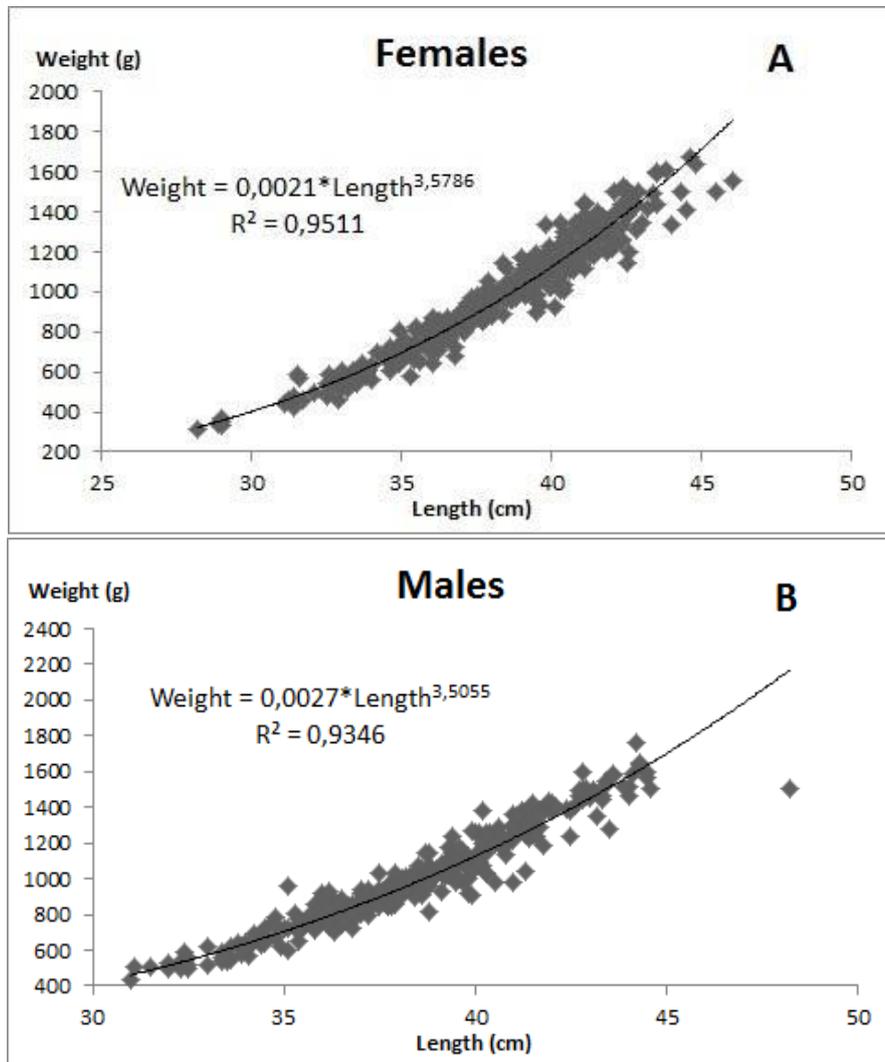


Figura 3.5: Relaciones talla-peso para hembras(A) y machos (B) pre-reproductores.

Tanto machos como hembras presentan un crecimiento alométrico positivo (sus valores b promedio son 3.505 y 3.578 respectivamente). Se obtuvo un valor de  $K_{mean}$  para los machos de 1.733 y 1.713 para hembras. En cuanto al valor del índice de LeCren, en el caso de los machos se obtuvo un valor para este índice de 1.006, mientras que en el caso de las hembras se obtuvo un valor de 1.002. Se analizaron un total de 376 hembras y 307 machos (en el resto de los registros no se determinó el sexo), lo que dio como resultado un valor de *sex ratio* de 1:1.224. Finalmente, se obtuvieron diferencias significativas entre los índices de condición  $K_{mean}$  para ambos sexos ( $\alpha = 0.035$ ,  $U = 5.217E^4$ ), lo que indica que la condición física de la melva en estado pre-reproductor depende del sexo de los individuos. En contraste, no se encontraron

diferencias en el factor de condición entre ambos sexos cuando se analizó el índice de LeCren ( $\alpha = 0.390$ ,  $U = 5.563E^4$ ). Estos resultados se muestran en la tabla 3.5:

Tabla 3.5: Coeficientes de regresión e índices de condición obtenidos para machos y hembras pre-reproductores.

Sexo	b	R <sup>2</sup>	K-mean	LeCren
Machos (N=307)	3.505	0.934	1.733	1.006
Hembras (N=376)	3.578	0.951	1.713	1.002

No se obtuvieron correlaciones significativas entre ninguno de los índices atmosféricos y el índice de condición de LeCren para ninguno de los dos sexos. Sin embargo, sí que se obtuvieron resultados significativos en caso del índice  $K_{mean}$  (ver tabla 3.6):

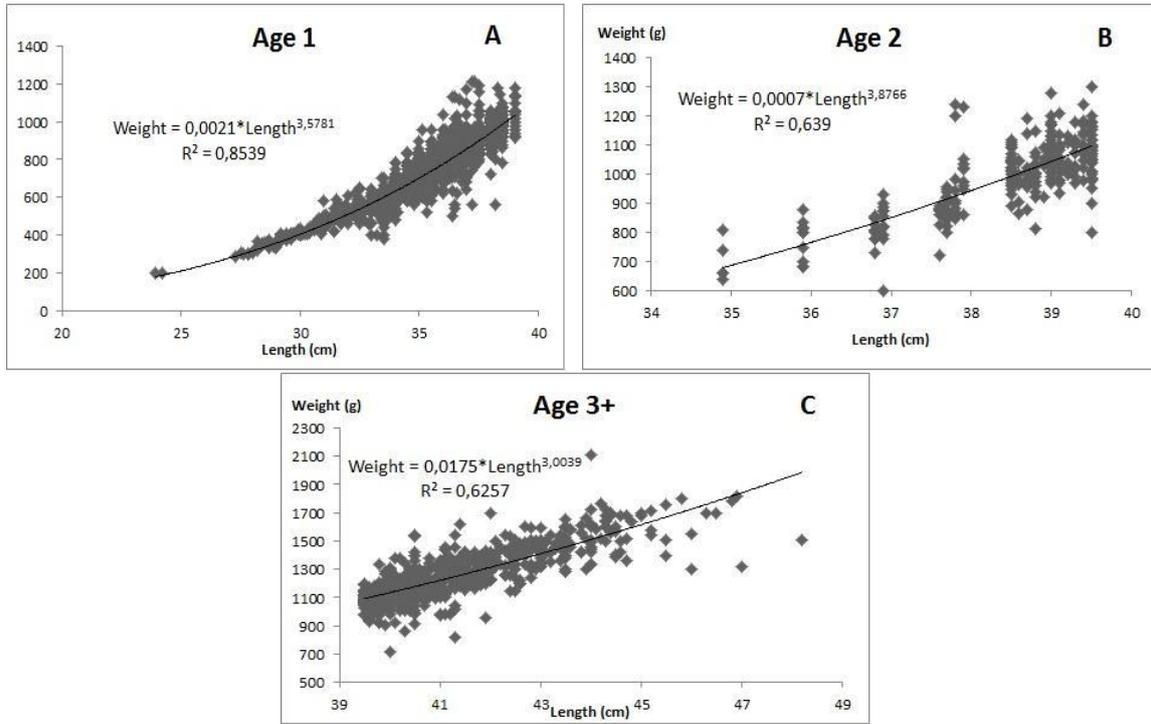
Tabla 3.6: Correlaciones estadísticas entre el índice  $K_{mean}$  para machos y hembras y los índices atmosféricos. Únicamente se muestran los resultados con un valor de p-value inferior a 0.01.

Índice de Oscilación Atmosférica	Rho Spearman
<b>HEMBRAS</b>	
NAO <sub>py</sub>	0.268
NAO	0.139
<b>MACHOS</b>	
NAO <sub>py</sub>	0.287
NAO	0.247
NAO <sub>pw</sub>	0.289

Estos resultados confirman una relación directa entre las oscilaciones atmosféricas y el índice de condición tanto para machos como para hembras. El índice NAO es el índice que explica la mayor parte de la variabilidad observada en el índice  $K_{mean}$  (26.8% en el caso de las hembras y 28.7% en el caso de los machos, considerando la NAO del año previo). Así, estos resultados confirman la existencia de un desfase temporal de un año entre los cambios ambientales y la respuesta biológica apreciada. En el caso de los machos, el componente ambiental del invierno previo también aparece estadísticamente correlacionado con la variabilidad de  $K_{mean}$ , periodo en el que la variabilidad del estado atmosférico es la más alta. En el caso de las hembras, la oscilación ártica también está

positivamente correlacionada con la condición física, ya que esta oscilación atmosférica actúa directamente sobre la Oscilación del Atlántico Norte. En todos los casos, las correlaciones obtenidas son positivas.

La figura a continuación (Figura 3.6) muestra las relaciones talla-peso para las tres clases de edad:



**Figura 3.6:** Relaciones talla-peso para las diferentes clases de edad. A: Edad 1; B: Edad 2 y C: Edad 3+.

La tabla 3.7 detalla el valor promedio de los índices de condición y el coeficiente de regresión b para cada clase de edad:

*Tabla 3.7: Parámetros de regresión y factores de condición promedio por clase de edad. Clave: % representa el porcentaje de melvas distribuidos en las diferentes clases de edad, “b” y “R<sup>2</sup>” son los coeficientes de regresión y K y LC representan el factor de condición por año.*

Clase de Edad	%	b	K	LC
1 (N=1272)	57.66	3.578	1.664	1.006
2 (N=274)	12.44	3.876	1.742	1.001
3+(N=660)	29.9	3.004	1.781	0.999

La población de melva está dominada por la clase de edad 1, siendo esta la más abundante (57.66%). Todas las clases de edad presentan un crecimiento alométrico positivo, a pesar del cambio en el tipo de crecimiento que ocurre para los individuos más longevos (clase de edad 3+), que representan el 29.9% del total de la población; este hecho sugiere que existe un cambio en el tipo de crecimiento cuando los ejemplares

aumentan su longitud, siendo estos más gruesos que elongados. En lo que respecta a los índices de condición, en el caso del índice de LeCren se obtuvieron valores similares para las 3 clases de edad (1.0066, 1.0013 y 0.999 para las clases de edad 1, 2 y 3+, respectivamente). Sin embargo, se observa un ligero incremento de  $K_{\text{mean}}$  con la edad. Finalmente, en la tabla 3.8 se muestran los resultados obtenidos entre la Oscilación del Atlántico Norte y ambos índices de condición:

Tabla 3.8: Correlaciones establecidas entre la condición física y los índices atmosféricos para las 3 clases de edad. Solo se muestran los resultados con un p-value inferior a 0.01.

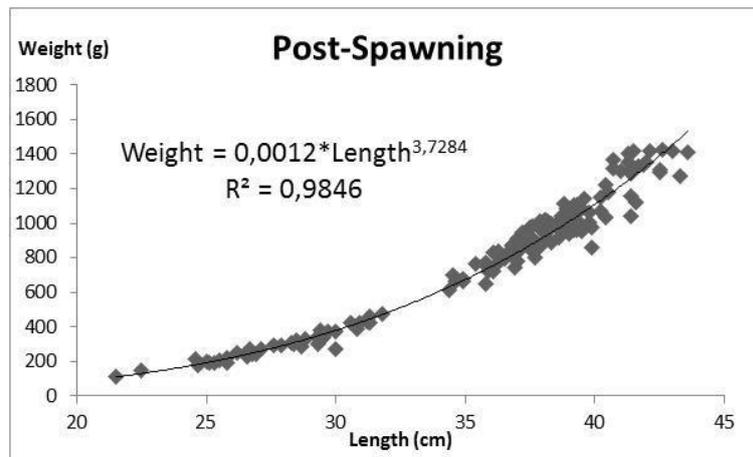
Índice de Oscilación Atmosférica	Índice de Condición	Rho Spearman
<b>Clase de Edad 1</b>		
$NAO_{py}$	LeCren	0.257
$NAO_{acum}$	LeCren	0.256
$NAO_{py}$	$K_{\text{mean}}$	0.312
NAO	$K_{\text{mean}}$	0.316
$NAO_{acum}$	$K_{\text{mean}}$	0.281
<b>Clase de Edad 2</b>		
$NAO_{py}$	LeCren	0.333
$NAO_w$	LeCren	0.336
$NAO_{pw}$	LeCren	0.302
$NAO_{acum}$	LeCren	0.295
NAO	$K_{\text{mean}}$	0.413
$NAO_w$	$K_{\text{mean}}$	0.268
<b>Clase de Edad 3+</b>		
NAO	$K_{\text{mean}}$	0.673
$NAO_w$	$K_{\text{mean}}$	0.302

Se estableció una correlación directa para las tres clases de edad con ambos índices atmosféricos propuestos. En el caso de la clase de edad 1, el índice  $K_{\text{mean}}$  es el que más fuertemente está correlacionado con los índices atmosféricos, mientras que en el caso de edad 2, esto ocurre con el índice de LeCren. Finalmente, en el caso de la clase de edad 3+, únicamente el índice de  $K_{\text{mean}}$  está estadísticamente correlacionado con la

variabilidad atmosférica. En cualquier caso, existe un desfase temporal entre la situación ambiental y la respuesta biológica.

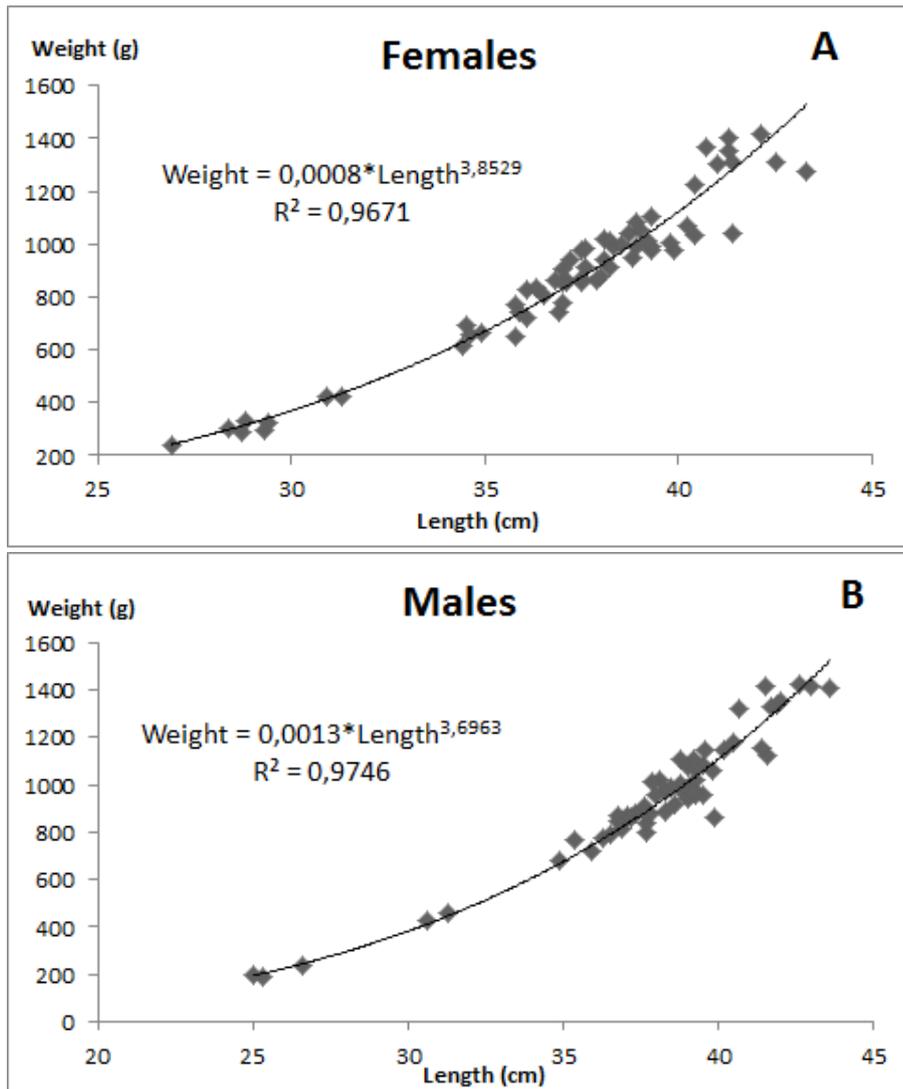
### **3.3.1.2 Individuos Post-reproductores**

Se analizaron un total de 151 individuos tras el periodo reproductivo. Todos estos individuos fueron capturados en la almadraba emplazada frente a la costa de Ceuta, en el norte de África. En la figura 3.7 se muestra la relación talla-peso para los individuos post-reproductores.



**Figura 3.7:** Relación talla-peso para los ejemplares de melva post-reproductores en el mar Mediterráneo.

En el caso de la melva post-reproductor se obtiene el valor más alto para el parámetro de crecimiento, y por lo tanto el crecimiento alométrico positivo más alto. Por otro lado, se obtuvieron los valores promedio de ambos índices de condición, obteniendo 1.6559 y 0.9645 para  $K_{mean}$  y  $LeCren$ , respectivamente. Se obtuvo además una correlación estadísticamente significativa entre las fases negativas de  $NAO_{acum}$  y  $K_{mean}$  ( $\alpha = 0.05$ ) ( $Rho Spearman = -0.185$ ;  $P = 0.023$ ) para los ejemplares post-reproductores. La figura 3.8 muestra las relaciones talla-peso para machos y hembras tras el periodo reproductor:



**Figura 3.8:** Relaciones talla-peso para hembras (A) y machos (B) post-reproductores.

Se examinaron un total de 64 hembras y 54 machos (los 29 registros restantes no fueron sexados). Se obtuvo un valor de sex-ratio fue de 1:1.1. Se obtuvo un valor de  $K_{mean}$  de 1.708 en el caso de las hembras y 1.722 para los machos, mientras que en el caso del índice de LeCren se obtuvieron 0.9854 y 0.9846 para hembras y machos respectivamente.

No se encontraron diferencias significativas ni para el factor de condición,  $K_{mean}$  ( $U=0.202$ ,  $P=1610$ ); ni para el índice de LeCren ( $U=0.628$ ,  $P=1761$ ) para ninguno de los dos sexos. Tampoco se obtuvieron correlaciones estadísticamente significativas entre ninguno de los índices atmosféricos y los índices de condición para ninguno de los dos sexos. Esto aparece reflejado en la tabla 3.9:

Tabla 3.9: Coeficientes de regresión e índices de condición promedio para machos y hembras post-reproductores.

Sexo	b	R <sup>2</sup>	K <sub>mean</sub>	LeCren
Machos (N=58)	3.696	0.974	1.722	0.984
Hembras (N=64)	3.852	0.967	1.708	0.985

Además, se obtuvieron las relaciones talla-peso para cada una de las clases de edad (figura 3.9).

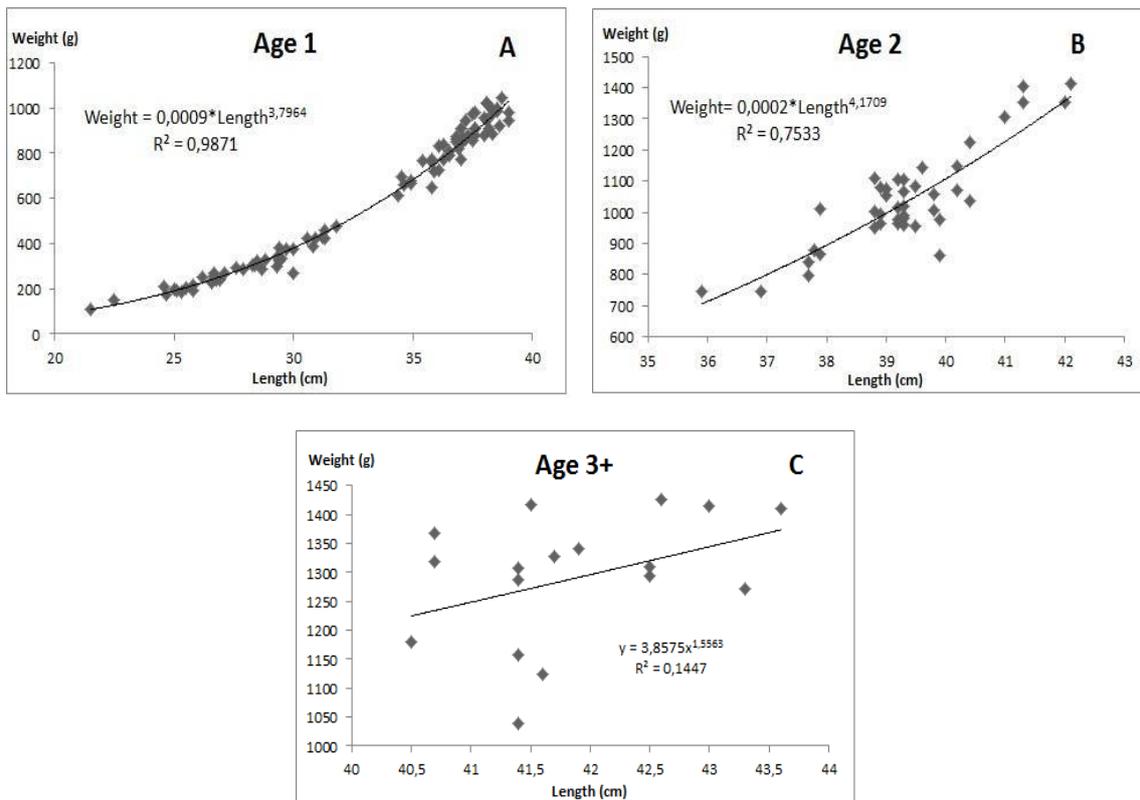


Figura 3.9: Relaciones talla-peso para todas las clases de edad. A: Edad 1; B: Edad 2 y C: Edad 3+.

La clase de edad 1 es la más abundante (N=93), representando un 61.58% del total de la población. Se obtuvo un crecimiento alométrico positivo para las clases de edad 1 y 2; mientras que, al igual que en el caso de los ejemplares pre-reproductores, se observa un cambio en el tipo de crecimiento en la clase de edad 3+. Además, se obtuvieron valores crecientes del índice de condición de LeCren con la edad (0.959, 0.9703 and 0.9804 para las clases de edad 1, 2 y 3+). Los valores de K<sub>mean</sub> promedio también presentaban esta tendencia (1.587 para la clase de edad 1, 1.752 para la clase de edad 2 y 1.801 para la clase de edad 3+). La tabla 3.10 resume estos resultados:

Tabla 3.10: Coeficientes de regresión e índices de condición promedio para las diferentes clases de edad. Clave: representa el porcentaje de ejemplares que se distribuyen en cada una de las clases de edad, “b” y “R<sup>2</sup>” son los coeficientes de regresión y K<sub>mean</sub> y LeCren representan los factores de condición promedio.

Clase de Edad	%	b	R <sup>2</sup>	K <sub>mean</sub>	LeCren
1 (N=93)	61.58	3.769	0.987	1.587	0.959
2 (N=41)	27.15	4.171	0.753	1.751	0.970
3+(N=17)	11.27	1.556	0.145	1.801	0.980

No se encontraron relaciones estadísticamente significativas para ninguna de las clases de edad entre los índices atmosféricos y los índices de condición, excepto para la clase de edad 3+. En este último, caso sólo el índice K<sub>mean</sub> fue significativamente correlacionado con el índice NAO (95% de confianza). Este resultado se muestra en la tabla 3.11:

Tabla 3.11: Resultados estadísticamente significativos tras el test de para el índice K<sub>mean</sub> y los ejemplares de la clase de edad 3+. P < 0.05.

Índice de Oscilación Atmosférica	
	Rho Spearman
<b>EDAD 3+</b>	
NAO <sub>py</sub>	0.502

Únicamente la clase de edad 3+ está influenciada por las oscilaciones atmosféricas. No se obtuvieron relaciones significativas al considerar el índice de LeCren. No obstante, en todos los casos se observan desfases temporales. Finalmente, no se obtuvo ninguna diferencia significativa entre los índices de condición K<sub>mean</sub> promedio de las melvas antes y después de la época reproductora. (P= 0.477; U= 1.608E<sup>5</sup>). Sin embargo, sí que se encontraron diferencias significativas al considerar el índice de condición de LeCren para estas dos distribuciones (P= 6.016E-9; U= 1.195E<sup>5</sup>).

### **3.4 Discusión**

#### **3.4.1 Resultados Biológicos**

Las melvas capturadas antes del periodo de puesta presentan una mejor condición física de acuerdo con el índice de LeCren ( $1.004 \pm 0.085$ ) al compararse con los ejemplares en post-puesta ( $0.964 \pm 0.064$ ). Esto podría corresponder con el incremento de peso debido al desarrollo de las gónadas antes del periodo reproductor, ya que el índice gonadosomático de la melva en el Mediterráneo oscila entre 2.2% y 16.1% (Macías *et al.*, 2005). Por el contrario, los ejemplares capturados durante la migración post-reproductora presentaban un índice de LeCren promedio significativamente inferior. Este hecho, añadido a la mayor tasa de crecimiento de los individuos post-reproductores, se podría explicar por la pérdida de peso que se produce durante el periodo reproductivo y la consiguiente migración trófica, tal y como ocurre con otras especies de túnidos (Schäfer, 2001).

Se halló la existencia de una influencia directa con el índice NAO para los ejemplares de la clase de edad 1, lo que significa que las condiciones atmosféricas, y por tanto el medio ambiente circundante dominante durante los estadios larvarios y juveniles afectan a la condición física en estadios posteriores. En este sentido, se obtuvo que durante las fases positivas de la Oscilación del Atlántico Norte se observaba una mejor condición física de los ejemplares. El índice NAO explica un importante porcentaje de la variabilidad observada en  $K_{\text{mean}}$  (entre el 28% y el 34%). Además, se obtuvo un desfase temporal de un año entre la prevalencia de unas condiciones atmosféricas y las respuestas biológicas que estas desencadenan.

Este hecho refuerza lo comentado anteriormente acerca de que las condiciones ambientales dominantes durante los primeros estadios vitales ejercen una influencia en la condición física de la melva para la clase de edad 1, ya que estas determinan la supervivencia o la disponibilidad de nutrientes, que ulteriormente condicionan el éxito del reclutamiento. De acuerdo con esto, las fases positivas del índice NAO, caracterizadas por la intensificación de los vientos del oeste, originan corrientes que facilitarían la migración a los ejemplares de melva en su proceso de migración a través del estrecho de Gibraltar hacia las áreas de puesta, y por lo tanto se reduce el gasto energético que invierten durante el movimiento migratorio, con la subsiguiente mejora en la condición física (Báez *et al.*, 2013a).

En el caso de los individuos de edad 2 pre-reproductores, se obtuvieron correlaciones intensas entre  $K_{\text{mean}}$  y los índices NAO y  $\text{NAO}_w$  (41.3% y 26.8% de la variabilidad observada para  $K_{\text{mean}}$ ). Además, el índice de condición de LeCren también estaba altamente correlacionado con los índices de oscilación atmosféricas cuya capacidad de explicar la variabilidad en el índice de LeCren oscilaba entre el 29.5% en caso de  $\text{NAO}_{\text{acum}}$  y el 33.6% en caso de  $\text{NAO}_w$ . Estas correlaciones positivas con el índice NAO se podrían explicar por el incremento en la intensidad de los vientos del oeste que favorecerían una mejor condición física; así como por el incremento del aporte de nutrientes en el mar de Alborán como resultado de la combinación entre los vientos del alisios y un descenso en la temperatura del agua (Mercado *et al.*, 2005; Báez *et al.*, 2013b).

En comparación con los individuos de la clase de edad 1, la disponibilidad de nutrientes podría ser uno de los factores más importantes a la hora de determinar la condición física de individuos más longevos (clase de edad 2). Por el contrario, la condición física de los ejemplares más jóvenes podría estar más influenciado por la inversión energética realizada durante la migración. Una mejor condición física ( $K_{\text{mean}}$ ), asociada con una mayor cantidad de grasa corporal (Sutton *et al.*, 2000) durante la migración reproductiva podría relacionarse con un mejor estado reproductivo y por tanto con un mayor éxito reproductivo.

Finalmente, el índice de condición de LeCren únicamente aparecía estar correlacionado con el índice NAO durante la fase reproductiva para los ejemplares post reproductores de la clase de edad 3+. Así, la correlación entre el índice de LeCren y el índice  $\text{NAO}_{\text{py}}$  explica el 50.2% de la variabilidad observada en el índice de LeCren. Por el contrario, el índice  $K_{\text{mean}}$  en caso de los individuos pre-reproductores estaba intensamente correlacionado con el índice NAO (67.3%) y  $\text{NAO}_w$  (30.2%). Estas diferencias entre las dos fases reproductivas revelan: en primer lugar, que la cantidad de grasa ( $K_{\text{mean}}$ ) es uno de los factores clave que determinan el éxito de la migración pre-reproductora y el proceso de puesta, mientras que el índice de LeCren es el índice que más influye durante la fase post-reproductiva debido a la pérdida de peso que se produce tras el periodo reproductivo; y en segundo lugar, que durante las fases positivas del índice NAO se mejora la condición física, ya que favorece el movimiento migratorio de entrada en el mar Mediterráneo.

En el caso de los individuos pertenecientes a la clase de edad 3+, se obtuvieron los casos en los que las oscilaciones atmosféricas explicaban el mayor porcentaje en la variabilidad de la condición física de la melva. Esto podría relacionarse con una mayor inversión energética durante la reproducción llevada a cabo por los ejemplares más longevos. Por lo tanto, estos últimos serían más sensibles a cambios en el medio ambiente circundante que los ejemplares más jóvenes y, por lo tanto, los cambios en las condiciones atmosféricas producirían una mayor variabilidad en su condición física. En esta misma línea, diversos autores han remarcado el hecho de que, al aumentar la edad del individuo, también lo hace el gasto energético que emplean para fines reproductivos, dando como resultado un aumento de la cantidad y calidad de las larvas producidas (Berkeley *et al.*, 2004a; Berkeley *et al.*, 2004b).

En lo relativo al sexo de los individuos, antes del periodo reproductor, ambos sexos aparecían estar altamente influenciados por el efecto de las oscilaciones atmosféricas. En esta línea, el índice  $NAO_{py}$  explicaba el 26.8% y 28.7% de la variabilidad observada para el índice  $K_{mean}$  tanto para machos como para hembras, respectivamente. Además, el índice NAO explicaba el 13.9% y el 24.7% de la variabilidad de  $K_{mean}$  en machos y hembras. Esta correlación positiva con NAO y  $NAO_{py}$  muestra, por un lado, la presencia de un desfase temporal entre la prevalencia de las condiciones ambientales y las consecuencias biológicas que estas desencadenan y, por otro lado, confirma que durante las fases positivas de NAO se favorece la migración biológica hacia las áreas de puesta debido a la intensificación de los vientos del oeste que podría reducir el gasto energético de la migración. Adicionalmente, se obtuvo un valor promedio de  $K_{mean}$  significativamente mayor para las hembras en relación al de los machos. Esto podría sugerir que el esfuerzo reproductivo es mayor en el caso de las hembras (Adams & Huntingford, 1997).

Sin embargo, tras la puesta, machos y hembras no presentaban diferencias significativas para ninguno de los dos índices de condición analizados. Además, no se obtuvieron correlaciones significativas entre ninguno de estos índices de condición y las oscilaciones atmosféricas. Estos resultados confirman que el sexo no es un factor influyente a la hora de evaluar la condición física de la melva durante el periodo post-reproductor, ya que ambos sexos están igualmente influenciados por las variables ambientales y siguen las mismas dinámicas biológicas sin distinción.

Analizando las dinámicas de crecimiento de la melva, esta especie presenta un crecimiento alométrico positivo sin diferenciación entre los diferentes estadios reproductivos, sexo o clases de edad. No obstante, en todos los casos se obtuvieron valores del parámetro de crecimiento mayores para el caso de individuos post-reproductores. Esto podría relacionarse con la pérdida de peso que ocurre durante la puesta. Además, se obtuvieron cambios significativos en el tipo de crecimiento a lo largo de las diferentes clases de edad tras el periodo reproductor hasta un crecimiento alométrico negativo en caso de la clase de edad 3+, lo que sugiere que los individuos de mayor edad realizan una mayor inversión energética para fines reproductivos, o que pueda existir un cambio en las necesidades alimenticias cuando el individuo crece, si bien este resultado también puede explicarse por la pequeña cantidad de ejemplares (N=17) disponibles para esta clase de edad. Esto, tal y como se ha mencionado anteriormente, daría lugar a un mayor número y calidad de las larvas producidas. Finalmente, los cambios interanuales en la disponibilidad de nutrientes podrían causar un efecto sobre el peso de los individuos y por lo tanto el índice de LeCren (que por definición es un cociente entre los pesos teóricos y empíricos) se vería afectado.

No obstante, en todos los casos la estructura de edad de la melva estaba dominada por los ejemplares de la clase de edad 1. Sin embargo, a pesar de que las clases de edad 1 y 2 presentaban un crecimiento alométrico, los individuos de clases de edad 3 mostraron una reducción en la tasa de crecimiento. Este cambio en la tasa de crecimiento se explica por la propia dinámica de los individuos ya que una vez que alcanzan su máxima longitud, estos dejan de crecer en peso o longitud. Así, los individuos de la clase de edad 3+ en adelante tienden a convertirse más elongados que gruesos. Esta estructura resulta obvia debido al alto nivel de reclutamiento que presenta esta especie (Valeiras & Abad, 2006) y en concordancia con la teoría propuesta por von Bertalanffy (1938) y las dinámicas biológicas que presentan muchas otras especies de peces (Pauly, 1980).

De un modo general, el índice de condición de los individuos pre-reproductores se demostró que estaba altamente correlacionado con las condiciones atmosféricas. Se obtuvo una correlación positiva entre  $NAO_{py}$  (31.8% de la variabilidad). Estos resultados confirman, por un lado, la existencia de un desacople temporal entre las condiciones ambientales y la aparición de las respuestas biológicas. Por otro lado, clarifica el hecho de que las fases positivas del índice NAO favorecen la condición

física de la melva ya que el refuerzo de los vientos del oeste reduce el esfuerzo migratorio.

Por el contrario, se obtuvo una correlación negativa entre las melvas post-reproductoras entre el índice de condición de Fulton ( $K_{\text{mean}}$ ) y el índice  $\text{NAO}_{\text{acum}}$ . Esta correlación explicaba el 18.5% de la variabilidad observada en  $K_{\text{mean}}$ . De acuerdo con esto, las fases positivas de NAO, durante las cuales se produce una intensificación de los vientos alisios, interferirían negativamente en la migración hacia el océano Atlántico a través del estrecho de Gibraltar. Por lo tanto, los individuos en puesta cuyo valor de NAO acumulado corresponda a un valor positivo son más tendentes a presentar índices de condiciones más bajos. Estos resultados están en concordancia con los presentados por Báez *et al.*, (2013a) en los que el estatus físico del atún rojo pre-reproductor estaba positivamente correlacionado con las fases positivas del índice NAO.

A la luz de estos resultados, queda claro que la condición física de la melva está influenciada por las variaciones en el ambiente circundante; indicadas por la Oscilación del Atlántico Norte. De un modo general, en lo que respecta a la migración reproductiva hacia las áreas de puesta cerca de las Islas Baleares, se obtuvo que esta está favorecida por las fases positivas de NAO. Adicionalmente, se obtuvo que  $K_{\text{mean}}$  es el índice de condición más afectado durante la migración previa a la puesta ya que este índice puede entenderse como una aproximación a la cantidad de grasa contenida en los tejidos, factor clave en el éxito de la migración reproductiva; mientras que el índice de LeCren es el más influido durante el periodo post-reproductivo debido a la pérdida de peso que ocurre durante la puesta.

Además, estos resultados están principalmente asociados con un cierto desfase temporal entre la prevalencia de las condiciones ambientales y las respuestas biológicas que se suceden. Esto además puede ser aplicable como una explicación plausible para explicar las variaciones en las descargas interanuales de melva, ya que esto puede afectar a la disponibilidad y capturabilidad de los individuos, no viéndose afectados directamente por las condiciones ambientales.

Todos estos resultados también van en concordancia con los obtenidos por Báez *et al.* (2013a) en el caso del atún rojo, cuyos índices aparecían estar estrechamente correlacionados con las condiciones atmosféricas, donde el índice NAO explicaba entre el en torno al 70% de la variabilidad observada para el índice de LeCren, con la

existencia de un desfase temporal de seis meses entre la ocurrencia de unas ciertas condiciones ambientales y las consecuencias biológicas que se observan en los individuos. Además, la condición física de otras especies como el atún blanco, *Thunnus alalunga*, también están estrechamente influenciada por el efecto de los cambios en el medio, que directamente se relacionan con el índice NAO (Báez *et al.*, 2011a), cuya abundancia por clase de edad responde directamente a los efectos acumulativos de los cambios en el índice NAO.

### **3.4.2 Posible evolución de la población de *Auxis rochei* en un contexto de Cambio Global**

A pesar de que la melva no alcanza ni el valor comercial ni la importancia socioeconómica de otras especies de túnidos, sí que es cierto que es una especie muy conocida en el ámbito de la biología pesquera, sobre la que se conocen muchos aspectos de su biología (tales como dieta, reproducción, o crecimiento). No obstante, aún existen diversos aspectos de la biología de esta especie por dilucidar. En esta línea, aún no se conoce completamente todo el comportamiento migratorio, ya que, a pesar de que se conoce que esta especie realiza migraciones reproductivas hacia las áreas de puesta localizadas en las aguas en torno a las Islas Baleares y posteriormente salen de nuevo al Atlántico, el resto de movimientos migratorios es aún incierto. Hasta la fecha, no se han realizado estudios de marcado y recaptura con esta especie. En este contexto, se hace necesario este tipo de estudios con esta especie, con el objetivo de conocer los aspectos de la biología de la melva que aún se desconocen tales como el comportamiento biológico, lo que ayudaría a tomar medidas de conservación y gestión de un modo más efectivo, ya que este tipo de estudios proporcionarían acerca de las migraciones de esta especie de un modo más preciso, así como su conexión con las oscilaciones climáticas.

### **3.4.3 Efectos de las predicciones futuras de calentamiento global sobre la biología de *Auxis rochei***

Tal y como se ha mencionado en la sección introductoria, la Tierra se encuentra experimentando continuos episodios de Calentamiento Global (Oreskes, 2004), favorecidos por la intensa actividad antropogénica. También es de sobra conocido el hecho de que el calentamiento global producirá un cambio repentino en las tendencias de NAO (y también de la Oscilación Ártica) hacia valores más negativos de estos

índices (Vicente-Serrano *et al.*, 2011). En este contexto, la climatología predominante en el área de estudio se tornará hacia un ambiente más seco y frío con descensos marcados en las temperaturas superficiales del mar. También es de esperar un incremento de la presencia de tormentas en el sur de Europa, así como la intensificación de los vientos del oeste y alisios.

Así, de acuerdo con las predicciones de calentamiento global, así como con los resultados obtenidos en este estudio, se espera que fases más negativas del índice NAO afecte a la condición física de la melva durante la migración reproductiva hacia el mar Mediterráneo. En este sentido, los ejemplares de melva maduros presentarán una peor condición física para afrontar el periodo de puesta, lo que podría interferir con el éxito de la reproducción, así como la producción y supervivencia de un gran número de larvas, lo que se traducirá en un descenso en las futuras tasas de reclutamiento y por tanto un descenso del stock pesquero. Sin embargo, esta situación de NAO negativa, que da lugar a un incremento en la temperatura del agua, también podría originar cambios en el comportamiento reproductivo de esta especie, tales como alteraciones del periodo y áreas de puesta, ya que los túnidos son un grupo de especies muy influenciados por la temperatura del agua en lo que respecta al proceso reproductor (Schaefer, 2001). Además, a la luz de estos resultados, se espera un descenso en la disponibilidad de nutrientes tras la puesta, debido a cambios en los vientos predominantes, así como a cambios en las condiciones oceanográficas del mar de Alborán. Por lo tanto, los ejemplares de melva tras la puesta presentarán una peor condición física en el Mediterráneo, lo que podría ser clave para que estos cambiaran su migración trófica hacia otras áreas de alimentación.

**4. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN**  
**FÍSICA DE LA BACORETA (*Euthynnus***  
***alletteratus*)**



*Foto obtenida de: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)*

#### **4.1 Contexto General**

La bacoreta, (*Euthynnus alletteratus*) junto con la melva (*Auxis rochei*) y el bonito (*Sarda sarda*), las especies de túnidos más abundantes en el área del Mediterráneo occidental, destino de los movimientos migratorios que, con fines reproductivos, efectúan desde el océano Atlántico a través del estrecho de Gibraltar. Su elevada abundancia y el carácter migratorio de la misma hacen que la bacoreta sea una especie con una elevada presencia en las capturas comerciales de la flota española, que la captura mayoritariamente en almadrabas, aunque también con otros artes de pesca diversos (Smederevac-Lalic & Regner, 2019).

Esta especie se caracteriza, al igual que las demás especies de túnidos, por un marcado carácter migratorio hacia sus áreas de puesta, donde desovan entre los meses de junio y agosto, con una mayor actividad observada durante el mes de julio en el área del Mediterráneo occidental (Saber *et al.*, 2018). Estas áreas de puesta, al igual que para otras especies de túnidos de pequeño y gran tamaño se sitúan a todo lo largo de la costa occidental española y en torno a las islas baleares, y se caracterizan por unas condiciones hidrodinámicas favorables para el éxito reproductivo y posterior alevinaje (Schaefer, 2001).

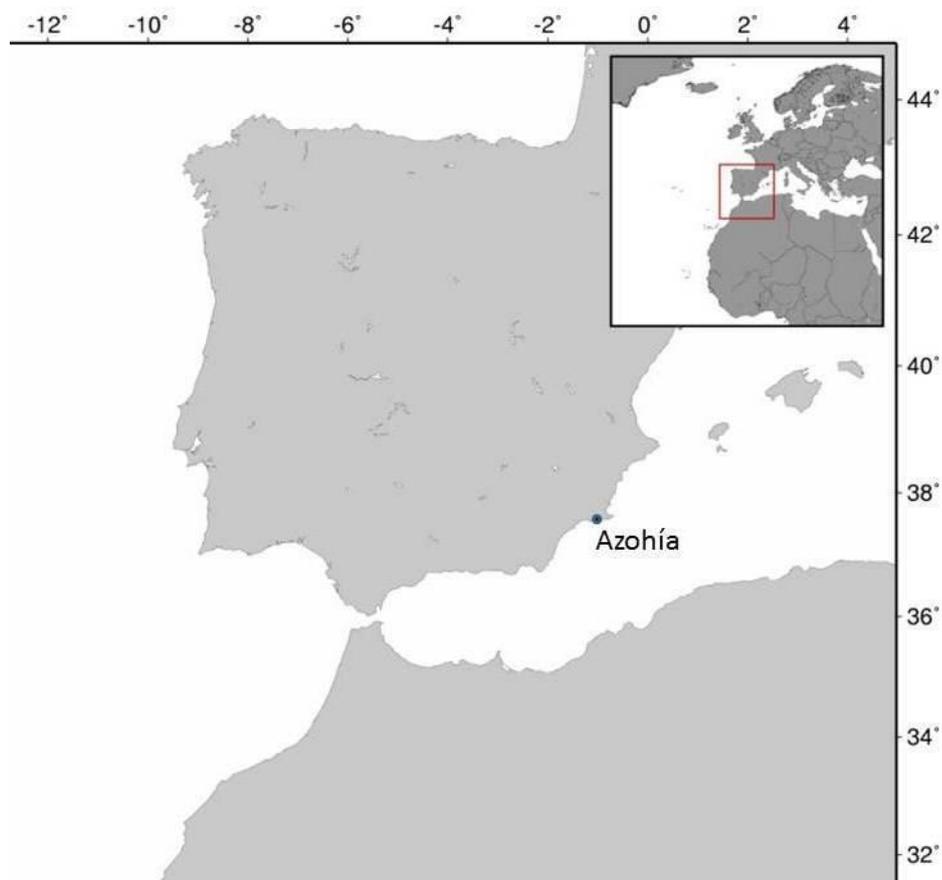
En un contexto donde los episodios de cambio global se suceden a una gran velocidad, diversos autores han hipotetizado un impacto de estos episodios sobre la biología migratoria y reproductora de las especies marinas con un especial énfasis sobre las especies migradoras. De acuerdo con estas hipótesis, y en consonancia con el fenómeno comentado en la sección introductoria de este trabajo, las oscilaciones climáticas alterarían la fenología, abundancia, reclutamiento o condición física de las especies migradoras, provocando un consiguiente impacto sobre poblaciones, llegando a poner en riesgo los stocks pesqueros que son por un lado una fuente socioeconómica importante en esta zona y por otro lado un recursos biológico importante en el ecosistema pelágico del Mediterráneo occidental.

Aun con todo lo anterior, queda claro que en la actualidad existen aún diversos patrones biológicos de la bacoreta en el Atlántico oriental y Mediterráneo occidental sobre los que no se tiene un conocimiento pleno, como por ejemplo la posible influencia de las variaciones climáticas en el medio como fuente de variabilidad de la condición física; con el siguiente impacto sobre los stocks pesqueros. Es por ello que uno de los objetivos

de este estudio es esclarecer esta posible relación, aumentando el conocimiento sobre la biología de la bacoreta y compararla, además, con otras especies cercanas y poder tomar medidas efectivas para la gestión y conservación de sus stocks pesqueros en funciones de las previsiones climáticas a corto, medio y largo plazo.

#### **4.2 Metodología**

Un total de 561 ejemplares de bacoreta fueron capturados durante los meses de primavera (fundamentalmente mayo y junio) en la almadraba de La Azohía, cuya localización geográfica se representa en la figura 4.1 durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 2003 y 2016 ambos inclusive. Este muestreo es realizado anualmente por el IEO en base a un diseño aleatorio estratificado, a fin de eliminar un posible sesgo y con el objetivo de cubrir todo el rango de tallas de esta especie en las pesquerías de la zona de acuerdo con el programa nacional de seguimiento que desarrolla e implementa la ICCAT.



**Figura 4.1:** Localización geográfica de la almadraba de La Azohía donde se realizaron las capturas de *E. alletteratus*. Mapa proporcionado por [seaturtle.org/maptool](http://seaturtle.org/maptool) (2017).

Se midió cada ejemplar hasta la horquilla, redondeando la medición hasta el centímetro más próximo y posteriormente los ejemplares fueron pesados hasta el gramo más próximo. A continuación, cada ejemplar fue eviscerado y sexado mediante exploración visual de la gónada; además se estableció una clase de edad a cada ejemplar en base a la clave talla-edad publicada en Valeiras *et al.* (2008b). Este procedimiento, al igual que lo reflejado en la sección 3.1 de este estudio para el caso de la melva, persigue asignar una clase de edad a cada ejemplar teniendo en cuenta únicamente la longitud del mismo.

Se establecieron 4 clases de edad diferentes: 1, 2, 3 y 3+, en la que la clase de edad 3+ engloba a clases de edad superiores a la 3, a fin de reducir el sesgo asociado a poder establecer una clase de edad a un ejemplar de mayor talla al que podría asignarse más de una clase edad. La proporción de individuos por cada clase de edad en función del intervalo de longitud de los mismos se resume en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Clave talla-edad donde se representa el porcentaje de individuos de *E. alletteratus* por clases de edad en relación con la longitud furcal expresada en centímetros.

Longitud Furcal (cm)	Edad 1	Edad 2	Edad 3	Edad 3+
<48	100	0	0	0
49-57	0	100	0	0
58	0	50	50	0
59	0	33	67	0
60	0	80	20	0
61	0	25	75	0
62	0	100	-	0
63	0	40	60	0
64	0	-	100	0
65	0	50	50	0
66	0	25	75	0
67	0	0	100	0
68	0	0	80	20
69	0	0	100	-
70	0	0	-	100
71	0	0	25	75
72	0	0	13	87
73	0	0	60	40
74	0	0	20	80
75	0	0	-	100
76	0	0	-	100
77	0	0	50	50
78	0	0	17	83
79	0	0	0	100

A continuación, se obtuvo una relación talla-peso anual, que se ajustó a una curva de regresión potencial de la misma forma que la ecuación 1 (i.e.  $\text{Peso} = a * \text{Longitud}^b$ ; donde a y b son los coeficientes de la regresión potencial talla-peso, expresados en gramos y centímetros respectivamente) y de la que se deduce la misma interpretación de los parámetros de regresión aplicada al caso de la melva y que se presenta en Froese (2006). Este proceso se realizó para cada uno de los años de la serie temporal y, posteriormente se obtuvo una relación talla- peso general para machos y hembras y otra

para cada una de las clases de edad que fueron asignadas a los ejemplares de acuerdo con el procedimiento anterior.

#### **4.2.1 Cálculo de los índices de condición**

Una vez obtenidos los parámetros de regresión anual de las relaciones talla-peso, se calcularon, de manera individual los dos mismos índices de condición que en el caso de la melva: 1) por un lado se calculó el índice de condición de Fulton modificado que se propone en Froese (2006) de acuerdo con la ecuación 2 planteada anteriormente:  $K_{mean} = 100 * (a * L^{(b-3)})$ ; donde a y b son los coeficientes de regresión y L es la longitud individual expresada en centímetros. Este índice, de acuerdo con Sutton *et al.*, (2000) proporciona una información importante acerca del estado físico y nutricional de cada ejemplar, y permite eliminar el efecto del cambio de peso en los ejemplares y estimar una condición física a una longitud dada (Froese, 2006).

Igualmente, se calculó posteriormente el índice de condición de LeCren (ver ecuación 3), que denota la relación entre el peso empírico de cada ejemplar medido *in situ* y el peso teórico que este debería tener en base a unas relaciones talla-peso en las que el propio ejemplar ha sido incluido [ $LC = W/(a * L^b)$ ]; donde a y b son los coeficientes de regresión, y W y L son el peso en gramos y la longitud furcal en centímetros, respectivamente]. Este índice expresa, de acuerdo con Froese (2006) la desviación de cualquier individuo del que debería de ser su peso promedio para un rango de longitud determinada.

A diferencia de lo que ocurría para el caso de la melva, en la que los ejemplares procedían de diferentes localizaciones a lo largo de la costa del Mediterráneo español y de un gran número de artes de pesca diferentes esto no ocurre con los ejemplares de bacoreta, que procedían de una única localización y todos del mismo arte de pesca. Por ello, no se realizó el filtrado de los datos que sí se realizó en el caso de la melva a fin de detectar la existencia de posibles valores atípicos que pudieran interferir en el resultado de los análisis estadísticos posteriores.

#### **4.2.2 Análisis de los datos**

El primer paso del análisis de los datos recabados fue testar la normalidad de los mismos. Esto se realizó por medio de un test no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (Sokal & Rohlf, 1995). A continuación, se testó, la dependencia con el tiempo de las

series de datos a fin de obtener una ciclicidad en la variabilidad interanual de los mismos por medio de un análisis espectral. Este paso se realizó tanto para los datos atmosféricos como para los datos biológicos.

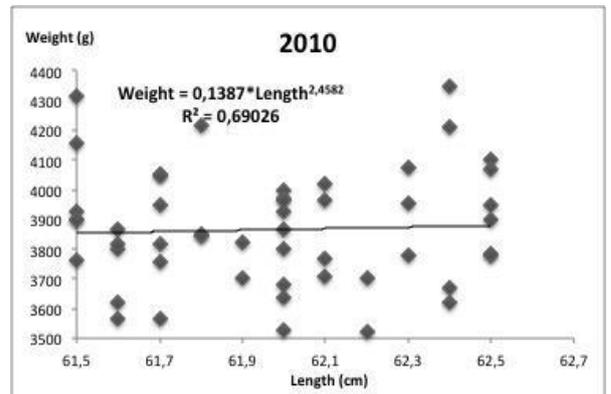
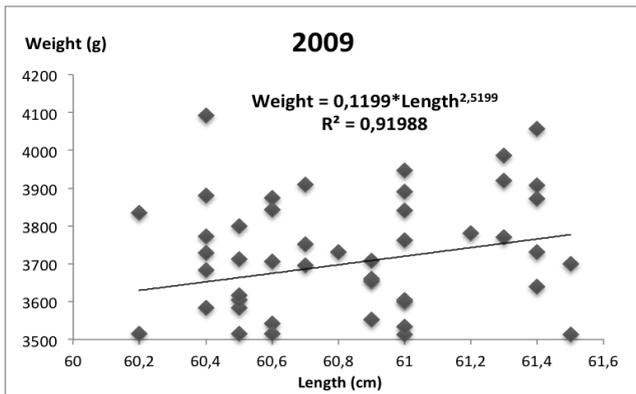
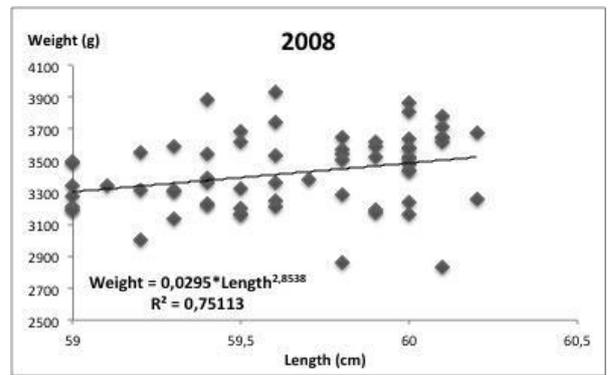
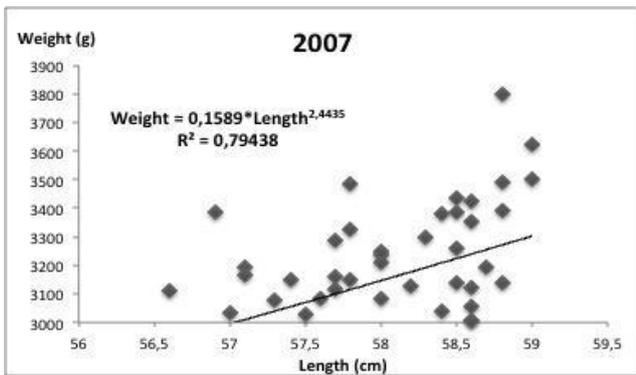
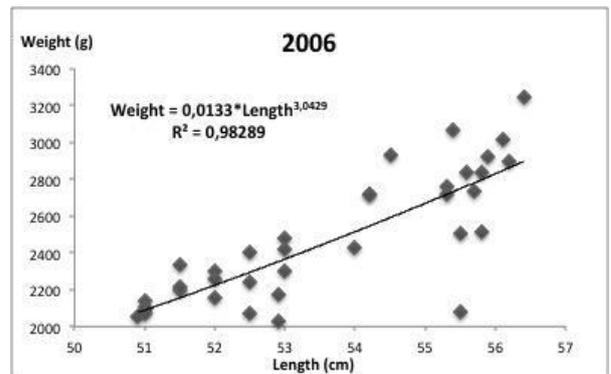
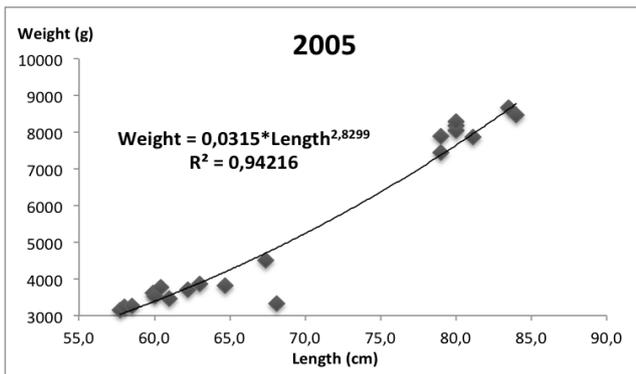
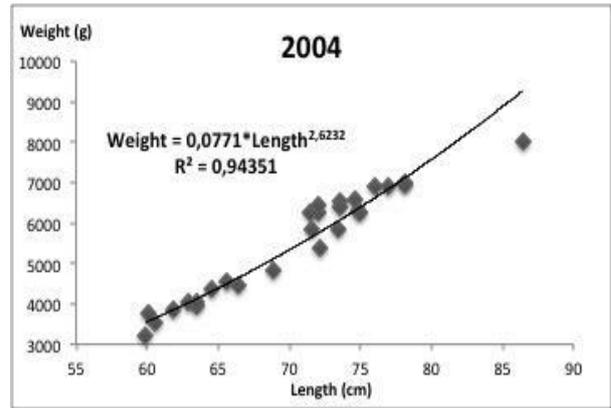
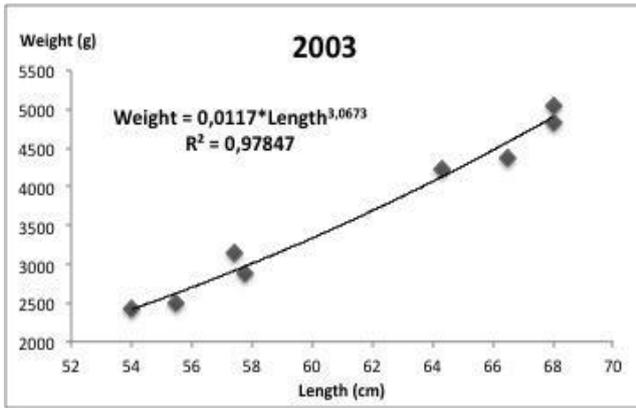
Posteriormente, se realizó un test no paramétrico de Mann-Whitney ( $\alpha=0.05$ ) con el fin de detectar posibles diferencias significativas entre los factores de condición de machos y hembras. Finalmente, se realizó un test no paramétrico de Spearman ( $\alpha=0.01$ ) con el objetivo de detectar las posibles correlaciones entre la variabilidad observada en los índices atmosféricos propuestos y los factores de condición previamente calculados. Se repitió este test tanto para todo el conjunto de datos en general como para cada una de las clases de edad asignadas y por último filtrando para machos y hembras.

### **4.3 Resultados**

No se halló normalidad en ninguna de las distribuciones examinadas, lo que condicionó el uso de una estadística no paramétrica para los sucesivos test que se emplearon. Además, no se estableció ninguna tendencia temporal para ninguno de los índices atmosféricos propuestos.

#### **4.3.1 Relaciones talla-peso e Índices de condición**

Se obtuvieron las relaciones talla-peso anuales para el total de 561 ejemplares de bacoreta durante el periodo 2003-2016, así como para el conjunto global de ejemplares. Estas se representan en la figura 4.2.



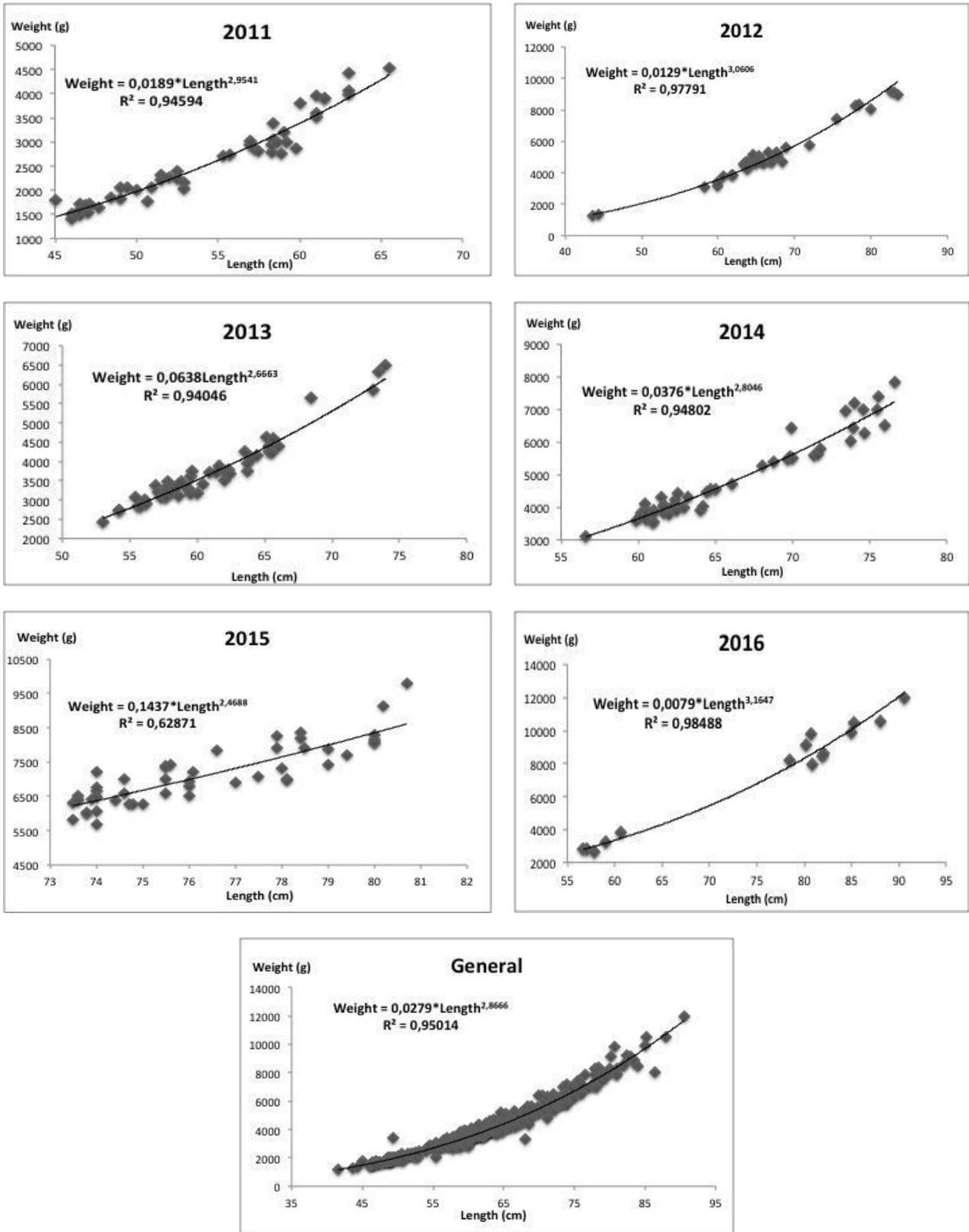


Figura 4.2: Relaciones talla-peso anuales y general de *E. alletteratus* capturadas en la almadraba de La Azohía en el periodo 2003-2016.

En la tabla 4.2 se muestran los coeficientes de regresión de las relaciones talla-peso anteriores, así como los índices de condición  $K_{\text{mean}}$  y LeCren promedio para cada año obtenidos por medio de las ecuaciones mencionadas en la sección anterior (ecuaciones 2 y 3). Se halló un valor promedio de  $b$  (2.8666) que refleja un crecimiento alométrico negativo del stock de bacoreta en el Mediterráneo occidental durante la época previa a la reproducción. Los índices de condición promedio que se obtuvieron fueron de 1,6083 y 1,0037 para  $K_{\text{mean}}$  y LeCren respectivamente.

Tabla 4.2: Coeficientes de regresión obtenidos por año para la bacoreta pre-reproductora, así como los índices de condición anuales, donde se muestra el número de individuos analizados cada año. Clave: "a" y "b" son los coeficientes de regresión,  $R^2$  es el coeficiente de determinación y  $K\text{-mean}$  y LeCren representan los factores de condición medios por año.

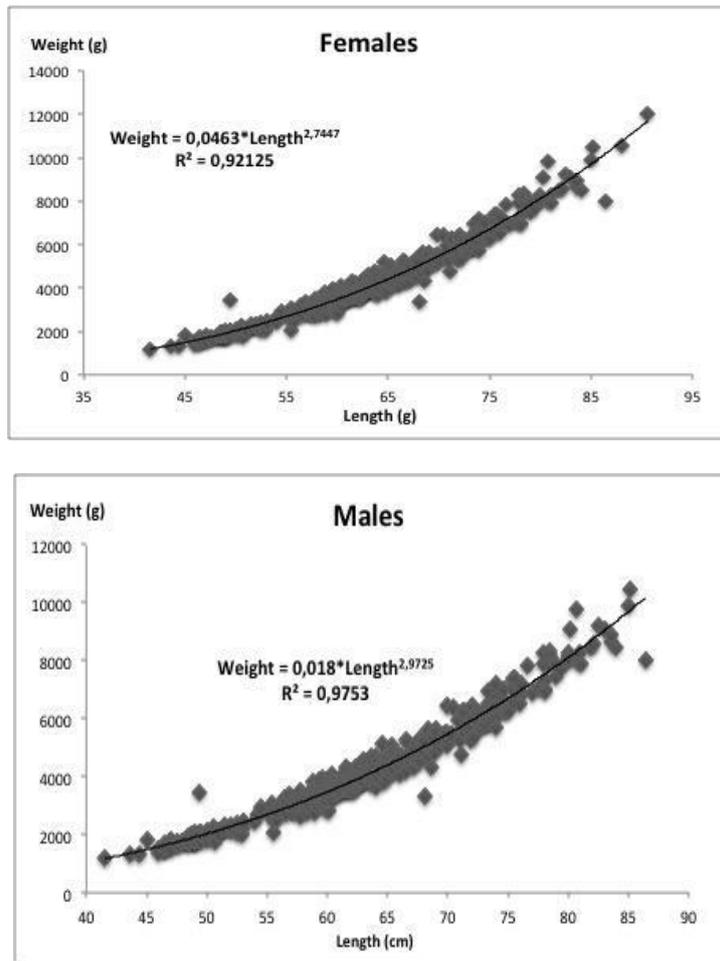
AÑO	N	a	b	R2	Kmean	LeCren
2003	8	0,0117	3,0673	0,9784	1,5433	1,003
2004	27	0,0771	2,6232	0,9435	1,5565	1,0021
2005	20	0,0315	2,8299	0,9421	1,5345	1,0031
2006	36	0,0133	3,0429	0,9828	1,5943	1,0022
2007	51	0,1589	2,4435	0,7943	1,5836	1,0012
2008	65	0,0295	2,8538	0,7511	1,6186	1,0001
2009	50	0,1199	2,5199	0,9199	1,5803	1,0011
2010	50	0,1387	2,4582	0,6902	1,6484	1,0213
2011	50	0,0882	2,5712	0,8653	1,6001	1,0084
2012	40	0,0129	3,0606	0,9779	1,6629	1,0004
2013	51	0,0638	2,6663	0,9404	1,6219	1,0016
2014	49	0,0376	2,8046	0,948	1,6593	1,0014
2015	49	0,1437	2,4688	0,6287	1,6301	1,0018
2016	15	0,0079	3,1647	0,9848	1,4683	1,0008
<b>General</b>	<b>561</b>	<b>0,0279</b>	<b>2,8666</b>	<b>0,9501</b>	<b>1,6083</b>	<b>1,0037</b>

Las correlaciones entre los índices de condición y atmosféricos a escala general se muestran en la tabla 4.3. De manera general, se obtuvo una correlación estadísticamente significativa y negativa entre el índice de condición de LeCren para las bacoretas empleadas en este estudio y el índice NAOw:

Tabla 4.3: Correlaciones estadísticas entre los índices de condición y los atmosféricos. Se muestran únicamente los resultados que cumplen:  $p\text{-value} < 0.01$

Índice de Condición	Índice de Oscilación Atmosférica	Rho Spearman
LeCren	NAO <sub>w</sub>	-0.688

En lo relativo al análisis por sexos de los ejemplares de bacoreta, en la figura 4.3 se representan las relaciones talla-peso para ambos sexos de esta especie:



**Figura 4.3:** Relaciones talla-peso para las hembras (arriba) y machos (debajo) de *E. alletteratus* capturadas en La Azohía durante el periodo 2003-2016.

Se analizó un total de 288 hembras y 273 machos para un sex ratio de 1:1.05. Para ambos sexos se obtuvo un valor del parámetro  $b < 3$ , lo que denota un crecimiento alométrico negativo (2.9725 y 2.7467 para machos y hembras respectivamente). Se obtuvo un valor de  $K_{mean}$  promedio de 1.6134 para los machos y 1.6034 para el caso de los machos mientras que en el caso del índice de condición de LeCren se obtuvieron unos valores promedio de 0.9962 y 1.0014 respectivamente. Estos resultados se reflejan en la siguiente tabla (tabla 4.4).

**Tabla 4.4:** Coeficientes de regresión e índices de condición obtenidos para los machos y hembras de *E. alletteratus* capturados en La Azohía durante el periodo entre 2003-2016.

Sexo	b	R2	K	LC	N
Machos	2,9725	0,9753	1,6134	0,9962	288
Hembras	2,7467	0,9215	1,6034	1,0014	273

En este caso, no se obtuvieron correlaciones estadísticamente significativas entre los índices atmosféricos propuestos y ninguno de los dos índices de condición que se calcularon para ambos sexos.

La figura que se presenta a continuación (figura 4.4) expresa las relaciones talla-peso para las diferentes clases de edad que fueron asignadas a los ejemplares de bacoreta:

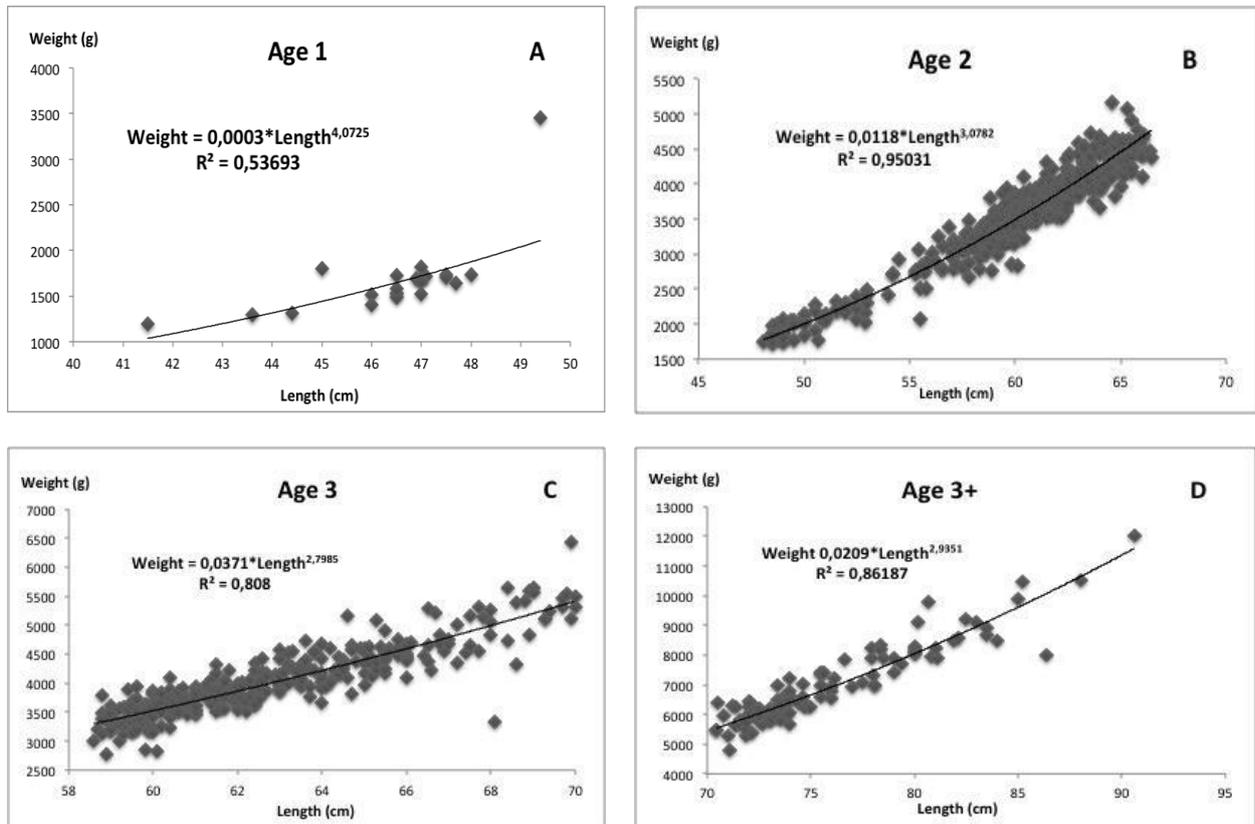


Figura 4.4: Relaciones talla-peso por clase de edad. A: Edad 1; B: Edad 2; C: Edad 3; D: Edad 3+.

Adicionalmente, en la siguiente tabla (tabla 4.5) se detalla el valor promedio de los dos índices de condición, así como el parámetro de regresión b para cada clase de edad.

Tabla 4.5: Parámetros de regresión y factores de condición promedio por clases de edad. Clave: % representa el porcentaje de muelas distribuidos en las diferentes clases de edad, "b" y "R<sup>2</sup>" son los coeficientes de regresión y K y LC representan el factor de condición por año.

Clase de edad	b	K	Lc	N	%
1	4.0725	1.7224	1.0614	23	4.0998
2	3.0782	1.6215	0.9999	248	44.2068
3	2.7985	1.6094	1.0018	187	33.3333
3+	2.9351	1.5494	1.0037	103	18.3601

Los resultados muestran que el stock pesquero de *E. alletteratus* en el Mediterráneo occidental está dominado por una mayor proporción de ejemplares de la clase de edad 2

(44.2%), seguido de los ejemplares de la clase de edad 3, que representan un 33.3% de la población total. Por el contrario, los ejemplares de menor edad y los más longevos son los menos abundantes (4% y 18.3% respectivamente). Además, se observa un tipo de crecimiento alométrico positivo en las dos clases de edad menores, muy acentuado en el caso de los ejemplares de edad 1, y un cambio en el tipo de crecimiento en los ejemplares de las clases de edad 3 y 3+. Los índices de condición obtenidos reflejan un valor similar en el caso del índice de LeCren para todas las clases de edad y un ligero descenso del valor de  $K_{mean}$ .

Tabla 4.6: Resumen de las correlaciones establecidas entre la condición física y los índices atmosféricos para las 3 clases de edad de *E. alletteratus*. Solo se muestran los resultados con un p-value inferior a 0.01.

Índice de Condición	Índice de Oscilación Atmosférica	Rho Spearman
<b>CLASE DE EDAD 3</b>		
$K_{mean}$	NAO <sub>w</sub>	0.745
$K_{mean}$	NAO <sub>py</sub>	0.613

Se estableció una correlación directa entre la condición física de los ejemplares de la clase de edad 3, dada por el índice  $K_{mean}$ , y los índices de variabilidad climática propuestos (tabla 4.6). No obstante, no se estableció ninguna correlación para ninguna otra clase de edad de las que se propusieron. Así mismo, tampoco se estableció correlación significativa alguna donde estuviera involucrado el índice de LeCren.

#### 4.4 Discusión

##### 4.4.1 Resultados biológicos

De manera general, la variabilidad en la condición física de bacoreta está correlacionada negativamente con las variaciones atmosféricas denotadas por el índice NAO<sub>w</sub> a través del índice de LeCren. Esto confirma la dependencia de la condición física de la bacoreta de las oscilaciones climáticas de manera que, durante las fases negativas del índice NAO se obtuvo una mejor condición física de los ejemplares. Estos resultados están en concordancia con los obtenidos en el caso de otras especies de túnidos, como por ejemplo la melva (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017), o el atún rojo (Báez *et al.*, 2013a); así

como para otros grupos de especies como marlines, tiburones pelágicos o tortugas marinas (Smederevac-Lalic & Regner, 2019; Báez *et al.*, 2021b).

Además, se obtuvo un desfase temporal entre la prevalencia de las condiciones atmosféricas y el efecto que esto provoca en la condición física de bacoreta durante su migración reproductora en el área del Mediterráneo occidental en la misma línea que lo obtenido en el caso de otras especies según lo referenciado en el párrafo anterior, y que tendrá que ser considerado a la hora de tomar las pertinentes medidas de gestión de las poblaciones.

No obstante, en el caso de la bacoreta, se obtuvo de manera general una correlación negativa entre los índices atmosféricos y la condición física de los ejemplares. Esto contrasta con los resultados obtenidos en el caso de la melva, en cuyo caso la correlación obtenida era de signo positivo. Esto puede deberse a un carácter migratorio menos acentuado en el caso de la bacoreta en comparación con otras especies de túnidos de pequeño tamaño. Esta es una hipótesis postulada por varios autores, véase por ejemplo Mele *et al.* (2016) o Gaykoz & Bokhanov (2008). No obstante, este extremo aún está por confirmar, si bien este resultado podría suponer un argumento a favor de esta hipótesis. Además, el índice sobre el cual se obtuvo la correlación con las condiciones climáticas fue el índice de LeCren, que denota un cociente entre el peso teórico y el observado empíricamente. Esto se explica por la pérdida de peso corporal que se produce durante el periodo reproductor, y no así del acúmulo de grasas del que estos ejemplares hacen acopio para afrontar las migraciones previas al periodo reproductor, y que se denotan a través del índice de condición  $K_{\text{mean}}$  (Sutton *et al.*, 2000).

Por otro lado, no se obtuvo ninguna correlación en cuanto a la condición física respecto de las variables climáticas respecto de los machos y hembras de bacoreta. Si bien no existe una explicación plausible y confirmada que apoye este resultado, sí que es cierto que contrasta con lo obtenido en el caso de melva, donde tanto machos como hembras presentaban una dependencia de las condiciones climáticas. Esto puede suponer un nuevo argumento a favor de las hipótesis que sostienen que la bacoreta, si bien se caracteriza por un comportamiento migratorio, estas migraciones podrían no ocurrir con la intensidad que en un principio se había postulado, o incluso ocurrir a una escala menor, incluso local o regional, tal y como se plantea en Mele *et al.* (2016).

En cuanto a la estructura por edad, únicamente se observó una correlación estadísticamente significativa entre las condiciones climáticas y el índice de condición  $K_{\text{mean}}$  para los ejemplares de la clase de edad 3, que representan el 33.3% de las capturas totales de bacoreta. Estas correlaciones fueron establecidas para los índices atmosféricos  $NAO_w$  y  $NAO_{py}$  ( $Rho_{\text{Spearman}} = 0.745$  y  $0.613$ , respectivamente). Esto, en concordancia con el resultado general para el conjunto de los ejemplares de melva confirma la existencia de un desfase temporal entre la prevalencia de las condiciones climáticas y el efecto biológico que estas tienen en los ejemplares de bacoreta en el Mediterráneo occidental. A la vista de estos resultados, podría estimarse este lapso temporal entre 6 y 12 meses.

Los resultados revelan que únicamente los ejemplares de la clase de edad 3 están influenciados de una manera significativa por las condiciones climáticas. Aunque todos los ejemplares contemplados en este estudio superan la talla de primera madurez, estimada en 50.1 cm para las hembras y 43.4 cm (longitud a la horquilla), en el Mediterráneo occidental (Saber *et al.*, 2018), los resultados podrían explicarse por una mayor inversión energética por parte de aquellos ejemplares de mayor edad. Además, el índice estadísticamente correlacionado es el índice  $K_{\text{mean}}$ , que hace referencia a la pérdida de grasa corporal acumulada para la migración previa a la reproducción. Por ello, durante las fases positivas del índice NAO, se esperarían ejemplares de bacoreta con una mejor condición física, puesto que, al igual que ocurre con otros ejemplares como melva (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017) o atún rojo (Báez *et al.*, 2013a) las corrientes intensificadas de entrada al mar Mediterráneo a través del estrecho de Gibraltar facilitarían el paso migratorio de la bacoreta y por tanto el desgaste energético necesario sería menor, resultando en una mejor condición física.

Finalmente, al igual que para la melva, a raíz de los resultados obtenidos, los ejemplares de bacoreta de mayor edad serían los más sensibles a los cambios en el medio ambiente circundante. Esto va en consonancia con Berkeley *et al.*, 2004a y Berkeley *et al.*, 2004b, que establecen que, al aumentar la edad de los ejemplares, también lo hace el gasto energético invertido en fines reproductivos, y en consecuencia la calidad de las larvas y supervivencia de los juveniles. Además, la posibilidad, aún por elucidar completamente, de que la bacoreta en el mediterráneo no migrara a una escala tan grande como si lo hacen especies como la melva, asumiendo unas poblaciones estables en el tiempo para una determinada zona, podría asimismo explicar la ausencia de resultados

estadísticamente significativos para las demás clases de edad, que realizarían un menor esfuerzo durante la época reproductiva, con un menor gasto energético.

#### **4.4.2 Posible evolución de la población de *Euthynnus alletteratus* en un contexto de Cambio Global**

Los resultados que se desprenden de este estudio confirman la influencia de las condiciones climáticas sobre la biología migratoria de la bacoreta confirmando en esta especie la hipótesis planteada en Graham & Harrold, 2009, o Báez & Real, 2011; entre muchos otros, de que las oscilaciones climáticas tienen una influencia sobre las pesquerías de especies migratorias. Al igual que sucede en el caso de la melva, la bacoreta no es una especie con un valor comercial tan elevado como otras especies de túnidos, pese a que se tiene un conocimiento suficiente de ciertos aspectos de su comportamiento biológico como la dieta, reproducción, o crecimiento. Aun así, es una especie con una elevada presencia en las capturas comerciales de la flota española. Sin embargo, es una especie de la que aún se desconoce diversos aspectos de su comportamiento. Uno de ellos, es el comportamiento migratorio, aún por definir en su totalidad, ya que existen discrepancias significativas acerca del mismo entre la comunidad científica. Esto refleja la necesidad de realizar estudios de marcado y recaptura de bacoreta, con el fin de mejorar el conocimiento de esta especie.

Por otro lado, ya que en este capítulo únicamente fueron considerados ejemplares de bacoreta en estado reproductivo previo al desove, no fue posible comparar ambos estadios reproductivos. Por ello, una de las principales conclusiones que se desprende de este estudio es la necesidad de profundizar en el conocimiento de la biología bacoreta en la misma línea de investigación que se presenta en este trabajo, a fin de poder comparar ambas fases del ciclo reproductivo de esta especie en lo que respecta a la respuesta biológica provocada como consecuencia de la prevalencia de unas determinadas condiciones ambientales.

De esta manera, se persigue profundizar en el conocimiento de aspectos biológicos y migratorios que aún están por elucidar y poder, de este modo, evaluar de manera más precisa la influencia de los factores climáticos sobre las poblaciones de esta especie en el Atlántico oriental y Mediterráneo occidental. Por ello, todo lo anterior permitiría ser más preciso a la hora de evaluar los stocks pesqueros de bacoreta y poder establecer unas medidas para su explotación sostenible y conservación más eficaces.

#### **4.4.3 Efectos de las predicciones futuras de calentamiento global sobre la biología de *Euthynnus alletteratus***

Teniendo en cuenta una tendencia hacia episodios de calentamiento global generalizados (Oreskes, 2004) y valores de NAO más extremos (Vicente-Serrano *et al.*, 2011) se espera una climatología en esta zona más seca y con temperaturas más bajas a nivel del mar, así como una intensificación de los vientos del oeste y alisios. Por ello, durante las fases más negativas del índice NAO, se esperaría una mejor condición física de los ejemplares de bacoreta durante su paso migratorio a través del estrecho de Gibraltar. Esto supondría un mayor éxito reproductivo que se traduciría en un mayor reclutamiento y unos mayores índices de abundancia. No obstante, considerando un escenario en el que los movimientos migratorios de la melva sean mayoritariamente a nivel local y regional, unos valores más extremos del índice NAO, desencadenarían una peor condición física de las bacoretas del Mediterráneo occidental, especialmente en los ejemplares de mayor edad, cuya inversión energética durante la reproducción es mayor. Esto provocaría un menor éxito reproductivo de la especie, lo que se traduciría en valores menores de reclutamiento y niveles de abundancia más bajos.

Teniendo en cuenta este contexto, se hace prioritario conocer por completo los patrones migratorios de esta especie, por lo que los estudios de marcado y recaptura a los que se hace referencia en la sección anterior son clave para poder establecer medidas de gestión eficaces para las poblaciones de bacoreta en el Atlántico este y Mediterráneo occidental.

## **5. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN** **FÍSICA DEL BONITO (*Sarda sarda*)**



*Foto obtenida de: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)*

## **5.1 Contexto General**

El bonito (*Sarda sarda*) es una de las especies de túnidos más abundante en el mar mediterráneo (Macías *et al.*, 2014). Su alta abundancia, sumada al comportamiento migratorio que caracteriza a las especies de túnidos, hacen que esta especie esté muy presente en las capturas comerciales de la flota española, que capturó en 2019 más de 1251 toneladas de esta especie según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, encontrándose sus stocks en una situación actual de sobreexplotación en el área del Atlántico este y mar Mediterráneo (Petukhova, 2020). Esta especie muestra su pico de actividad reproductiva durante los meses de mayo a Julio (Sabatés & Recasens, 2001). Por ello, durante los meses de primavera, el bonito migra hacia sus áreas de puesta, localizadas en diversos puntos del mar Mediterráneo (Turan *et al.*, 2016), donde las condiciones hidrodinámicas favorecen la puesta y el posterior alevinaje (Schaefer, 2001). Posteriormente, tras la época reproductora, los ejemplares de *S. sarda* realizan la migración inversa hacia sus áreas de invernada.

Pese a todo, existen diversos aspectos del ciclo de vida del bonito sobre los que aún existen numerosas incógnitas como por ejemplo sobre los estadios o el comportamiento migratorio. Respecto a esto último, varios autores han planteado la hipótesis de que, si bien el bonito es una especie migradora, estas migraciones podrían sucederse a una menor escala que en el caso de otras especies, y quedar incluso reducidas a una escala regional o local (Sabatés & Recasens, 2001). Esto mismo ya ha sido postulado para especies como la bacoreta (Gaykoz & Bokhanov, 2008; Mele *et al.*, 2016) pero la falta de experiencias de marcado y recaptura hasta la fecha impiden confirmar estas hipótesis.

Esto se enmarca en un contexto de cambio climático, donde la alternancia en las condiciones climáticas provoca cambios drásticos en las condiciones medioambientales. El área geográfica del Atlántico este y Mediterráneo occidental ha sido identificada como un punto caliente de cambio climático (Vicente- Serrano & Trigo, 2011), donde los episodios de variabilidad climática se suceden a un ritmo alto. Por ello, un amplio número de autores han postulado diversas hipótesis sobre la influencia de las condiciones climáticas sobre las poblaciones, con especial énfasis en aquellas con carácter migratorio. Según estas líneas de investigación, las oscilaciones climáticas en un área geográfica y a una escala temporal determinadas alterarían la fenología

(Chaloupka *et al.*, 2008; Mazaris *et al.*, 2008), condición física (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017), abundancia (Báez *et al.*, 2011a), distribución y reclutamiento (Borja & Santiago, 2002; Mejuto, 2003; Kell *et al.*, 2005; Goñi & Arrizabalaga, 2006; Graham & Harrold, 2009), así como el valor comercial de las capturas (Fernández *et al.*, 2020), e incluso su distribución vertical (Reglero *et al.*, 2018a) de las especies migradoras. Esto supone un riesgo para las poblaciones de estas especies, y podría llegar a poner en riesgo la viabilidad de sus stocks pesqueros; muy importantes por otro lado desde el punto de vista socioeconómico.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el objetivo específico de este capítulo es esclarecer la posible relación existente entre la condición física de bonito con las oscilaciones climáticas interanuales en el área del Atlántico este y Mediterráneo occidental. No obstante, es importante esclarecer en paralelo las incertidumbres que existen actualmente sobre la biología migratoria de esta especie y poder tomar así medidas precisas para la gestión y conservación sostenible de los stocks pesqueros de acuerdo con las previsiones climáticas a corto, medio y largo plazo en la zona.

## **5.2 Metodología**

Se utilizaron un total de 703 ejemplares de bonito en este estudio. Todos ellos fueron capturados durante el periodo comprendido entre los años 2003 y 2016 en la almadraba de La Azohía (ver localización geográfica en la figura 4.1). Al igual que se mencionó en los capítulos anteriores para los casos de la melva y la bacoreta, la toma de muestras de ejemplares de bonito se encuadra dentro de un muestreo anual en base a un diseño aleatorio estratificado que el Instituto Español de Oceanografía realiza anualmente. Este diseño permite eliminar cualquier sesgo de la condición física, cubriendo todo el rango de tallas de esta especie en las pesquerías comerciales que se realizan en esta zona, de acuerdo con el programa que desarrolla e implementa la ICCAT en el área del Atlántico este y Mediterráneo occidental.

Cada ejemplar fue medido a la horquilla (ver detalle en la figura 3.2) y el resultado fue redondeado hasta el centímetro más próximo. A continuación, cada ejemplar fue pesado, redondeando hasta el gramo más próximo y, posteriormente eviscerado y sexado mediante exploración visual de las gónadas (los detalles macroscópicos de las gónadas se aprecian en la figura 3.3). Finalmente, a cada ejemplar le fue asignada una clase de edad en función de la longitud furcal previamente establecida, tomando como

referencia la clave talla-edad (tabla 5.1) que se publica en Valeiras *et al.*, (2008c). En el caso particular del bonito, se asignaron tres clases de edad diferentes: 1, 2 y 3.

Tabla 5.1: Clave talla-edad donde se representa el porcentaje de individuos de *S. sarda* por clases de edad en relación con la longitud furcal expresada en centímetros.

Longitud Furcal (cm)	Edad 1	Edad 2	Edad 3
< 48	100	0	0
49	-	100	0
50	50	50	0
51	50	50	0
52	67	33	0
53	0	100	0
54	0	100	0
55	0	40	60
> 56	0	0	100

Tras esto, se obtuvieron las relaciones talla-peso anuales en la forma potencial de la regresión entre ambas variables, con la forma que la ecuación 1 (i.e.  $\text{Peso} = a * \text{Longitud}^b$ ; donde  $a$  y  $b$  son los coeficientes de la regresión potencial talla-peso, expresados en gramos y centímetros respectivamente). La interpretación de los parámetros de regresión es la misma que la aplicada para las dos especies anteriores, de acuerdo con Froese (2006). Este proceso se realizó para cada año de la serie temporal y, posteriormente se obtuvo una relación talla-peso general para machos y hembras y otra para cada una de las clases de edad que fueron asignadas a los ejemplares de acuerdo con el procedimiento anterior.

### **5.2.1 Cálculo de los índices de condición**

Se calcularon igualmente dos índices de manera para la evaluación de la condición física individual a partir de los coeficientes de regresión potencial talla-peso obtenido con anterioridad: el de Fulton modificado y el de LeCren. El índice de condición de Fulton modificado (Froese, 2006) se calculó, al igual que en los capítulos anteriores, de acuerdo con la ecuación 2:  $K_{mean} = 100 * (a * L^{(b-3)})$ ; donde  $a$  y  $b$  son los coeficientes de regresión y  $L$  es la longitud individual expresada en centímetros. Por otro lado, a través de la ecuación 3 se calculó el índice de condición de LeCren:  $LC =$

$W/(a * L^b)$ ); en la que a y b son los coeficientes de regresión, y W y L son el peso en gramos y la longitud furcal en centímetros, respectivamente. Este índice se define empíricamente por un cociente entre el peso empírico de cada ejemplar y el teórico supuesto a través de las relaciones talla-peso calculadas con anterioridad y expresa, de acuerdo con Froese (2006) la desviación de cualquier individuo del que debería de ser su peso promedio para un rango de longitud determinada.

Es conveniente aclarar que, al igual que lo ocurrido en el caso de la bacoreta, al proceder todos los ejemplares de la misma localización y ser todos ellos capturados mediante el mismo arte de pesca, no se realizó el filtrado de datos que sí se realizó para el análisis de la condición física de la melva para detectar y eliminar valores atípicos que interfirieran en la precisión de los análisis posteriores.

### **5.2.2 Análisis de los datos**

El proceso seguido para el análisis de los datos para la evaluación de la condición física del bonito es exactamente el mismo que el empleado para las otras dos especies analizadas en este estudio. En primer lugar, se realizó un test no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov para verificar la normalidad de los datos. En segundo lugar, se evaluó una posible dependencia temporal de las series de datos por medio de un análisis espectral con el objetivo de detectar una posible ciclicidad en la serie histórica de los mismos. Este procedimiento se realizó tanto para los datos atmosféricos como para los datos biológicos. Posteriormente, al igual que para las otras dos especies, se realizó un test no paramétrico de Mann-Whitney ( $\alpha=0.05$ ) con el fin de detectar posibles diferencias significativas entre los factores de condición de machos y hembras.

Finalmente, se realizó un test no paramétrico de Spearman ( $\alpha=0.01$ ) con el objetivo de detectar las posibles correlaciones entre la variabilidad observada en los índices atmosféricos propuestos y los factores de condición previamente calculados. Se repitió este test tanto para todo el conjunto de datos en general como para cada una de las clases de edad asignadas y por último filtrando para machos y hembras.

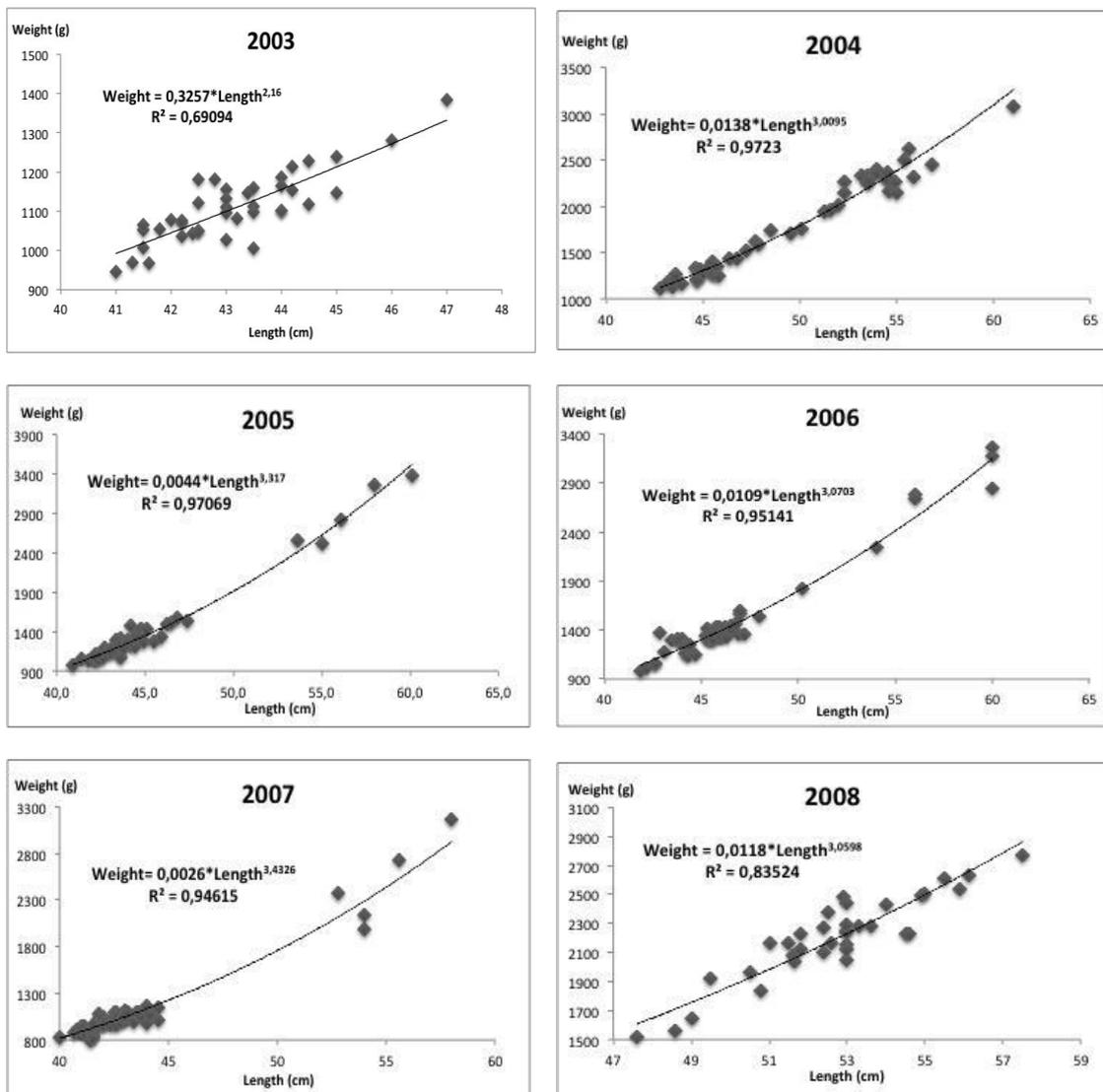
### **5.3 Resultados**

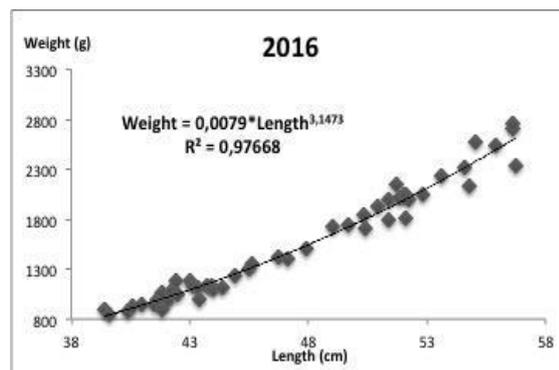
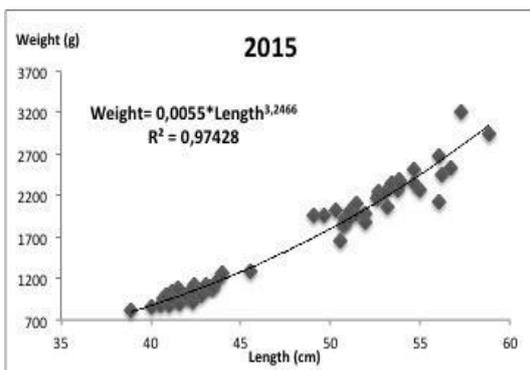
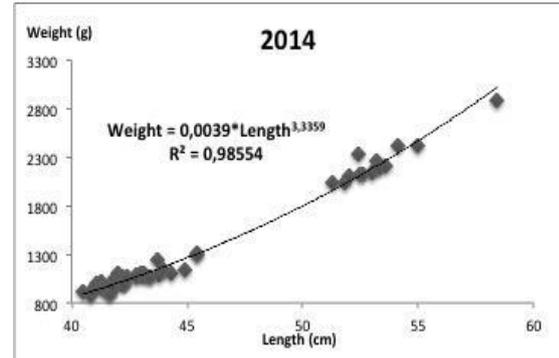
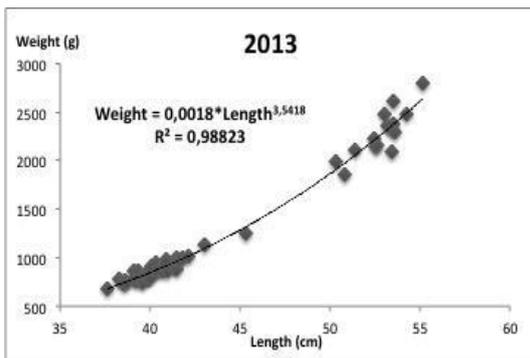
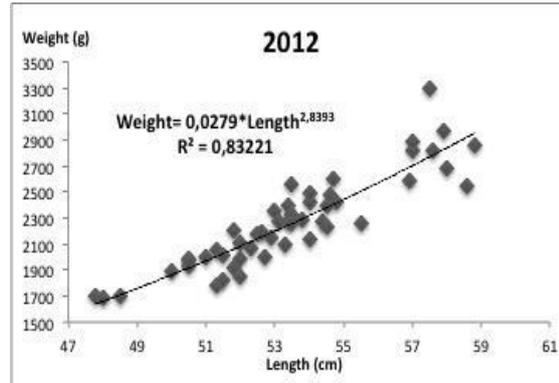
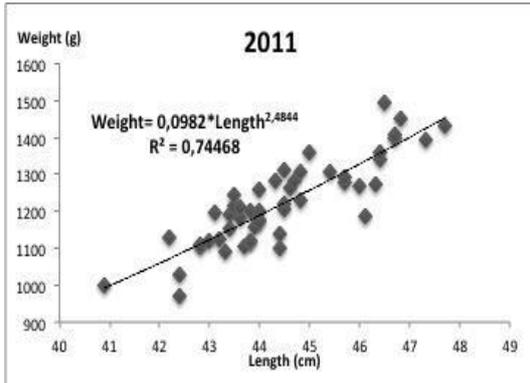
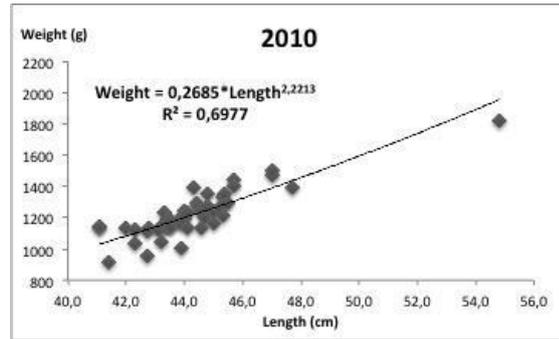
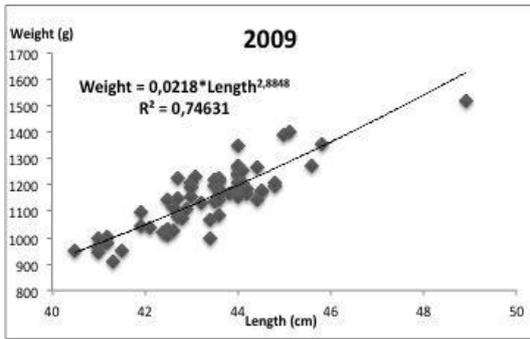
No se hallaron distribuciones normales en ninguno de los casos en los que se evaluó la normalidad de las mismas. Este hecho condicionó el empleo de métodos estadísticos no

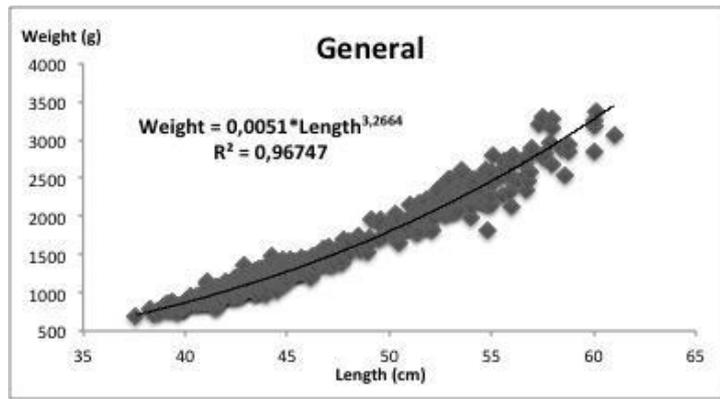
paramétricos en los análisis posteriores. Además, no se hallaron tendencias temporales en ninguno de los índices atmosféricos que se propusieron.

### **5.3.1 Relaciones talla-peso e Índices de condición**

En la figura 5.1 se presentan las relaciones talla-peso obtenidas para los 703 ejemplares de bonito analizados durante el periodo comprendido entre 2003 y 2016, así como para el conjunto de los ejemplares en general:







**Figura 5.1:** Relaciones talla-peso anuales y general de *S. sarda* capturadas en la almadraba de La Azohía en el periodo 2003-2016.

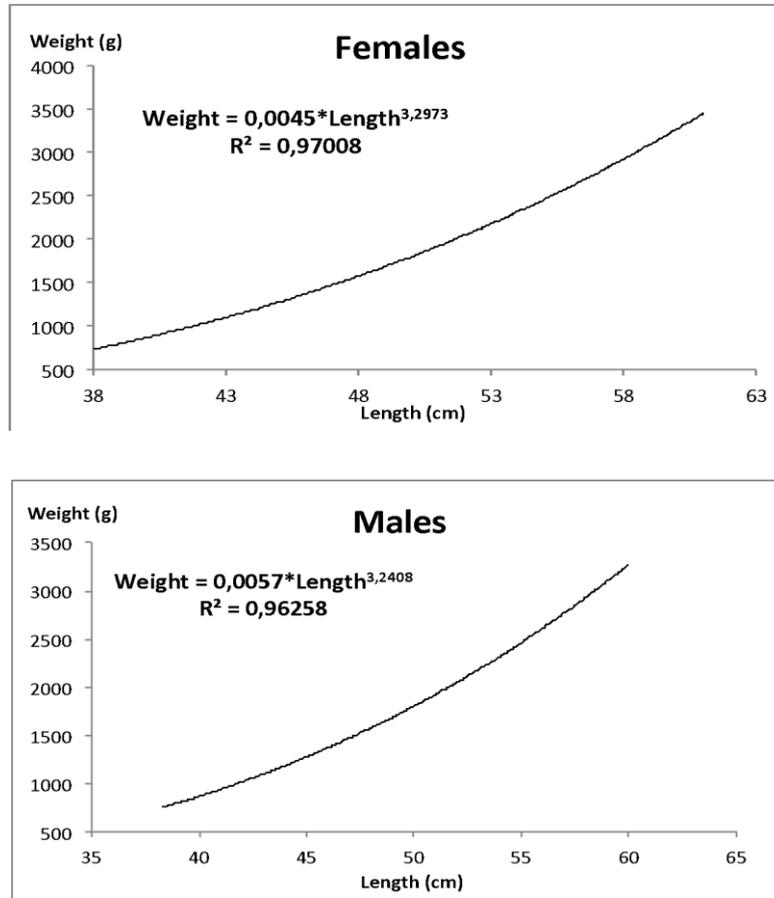
A continuación, en la tabla 5.1 se muestra un resumen de los coeficientes de regresión obtenidos de las relaciones talla-peso anteriores, y los índices de condición  $K_{mean}$  y  $LeCren$  promedio anuales, que se desprenden de la aplicación de las respectivas ecuaciones 2 y 3. De manera general, se obtuvo un valor del parámetro de regresión  $b$  igual a 3.2644 para bonito en el área del Mediterráneo occidental antes de la época reproductora. Esto denota un crecimiento alométrico positivo para esta especie. De manera general, los índices de condición promedio de  $K_{mean}$  y  $LeCren$  fueron de 1.4113 y 0,9990 respectivamente.

*Tabla 5.1: Coeficientes de regresión obtenidos por año para *S. sarda*, así como los índices de condición anuales, donde se muestra el número de individuos analizados cada año. Clave: “a” y “b” son los coeficientes de regresión,  $R^2$  es el coeficiente de determinación y  $K_{mean}$  y  $LeCren$  representan los factores de condición medios por año.*

AÑO	N	a	b	R2	Kmean	LeCren
2003	40	0,3257	2,1600	0,6909	1,3795	1,0009
2004	49	0,0138	3,0095	0,9723	1,432	1,0007
2005	44	0,0044	3,3170	0,9707	1,4712	1,0066
2006	54	0,0109	3,0703	0,9514	1,4277	1,0038
2007	55	0,0026	3,4326	0,9461	1,3283	0,9984
2008	35	0,0113	3,0716	0,8253	1,5008	0,9715
2009	65	0,0218	2,8848	0,7463	1,4123	0,9997
2010	51	0,2685	2,2213	0,6977	1,4044	1,0022
2011	50	0,0982	2,4844	0,7446	1,3888	1,0016
2012	50	0,0279	2,8393	0,8322	1,4726	1,0035
2013	50	0,0018	3,5418	0,9882	1,3941	0,997
2014	50	0,0039	3,3359	0,9855	1,4044	0,9918
2015	60	0,0055	3,2466	0,9742	1,4252	0,9998
2016	50	0,0079	3,1473	0,9766	1,3933	1,0013
<b>General</b>	<b>703</b>	<b>0,0051</b>	<b>3,2644</b>	<b>0,96747</b>	<b>1,4143</b>	<b>0,9990</b>

De manera general, no se obtuvo ninguna correlación estadísticamente significativa entre los índices de condición física de para los ejemplares de bonito evaluados y los índices atmosféricos propuestos.

Posteriormente, se obtuvieron las relaciones talla-peso también para ambos sexos. Estas aparecen reflejadas en la figura 5.2:



**Figura 5.2:** Relaciones talla-peso para las hembras (arriba) y machos (debajo) de *S. sarda* capturados en La Azohía durante el periodo 2003-2016.

Un total de 397 hembras y 306 machos fueron considerados en este estudio, lo que dio un valor de sex ratio de 1:1.297. Tanto para el caso de las hembras como en el de los machos, el parámetro de regresión  $b$ , que denota el tipo de crecimiento que experimentan los ejemplares en un momento dado, es sustancialmente superior a 3. Esto representa, para ambos sexos, un crecimiento alométrico positivo. Además, se obtuvo un valor para el índice de condición  $K_{mean}$  promedio 1.4140 y 1.4146 para machos y hembras respectivamente; y un valor del índice de LeCren de 1.0031 en el caso de los machos y 0.9959 para las hembras. Esto se resume en la tabla presentada a continuación (tabla 5.2):

Tabla 5.2: Coeficientes de regresión e índices de condición obtenidos para los machos y hembras de *S. sarda* capturados en La Azohía durante el periodo entre 2003-2016.

Sexo	b	R2	K	LC	N
Machos	3,2402	0,9625	1,4140	1,0031	306
Hembras	3,2973	0,97	1,4146	0,9959	397

Los resultados del test de Spearman empleado para comprobar la existencia de correlaciones estadísticamente significativas entre los índices de condición ( $K_{mean}$  y  $LeCren$ ) para ambos sexos y los índices atmosféricos, revelaron que no existe tal correlación para ninguno de los dos índices, tanto para machos como para hembras.

Finalmente, respecto de la edad de los ejemplares, la figura 5.3 representa las relaciones talla-peso halladas para cada una de las clases de edad que fueron asignadas a los individuos de *S. sarda*:

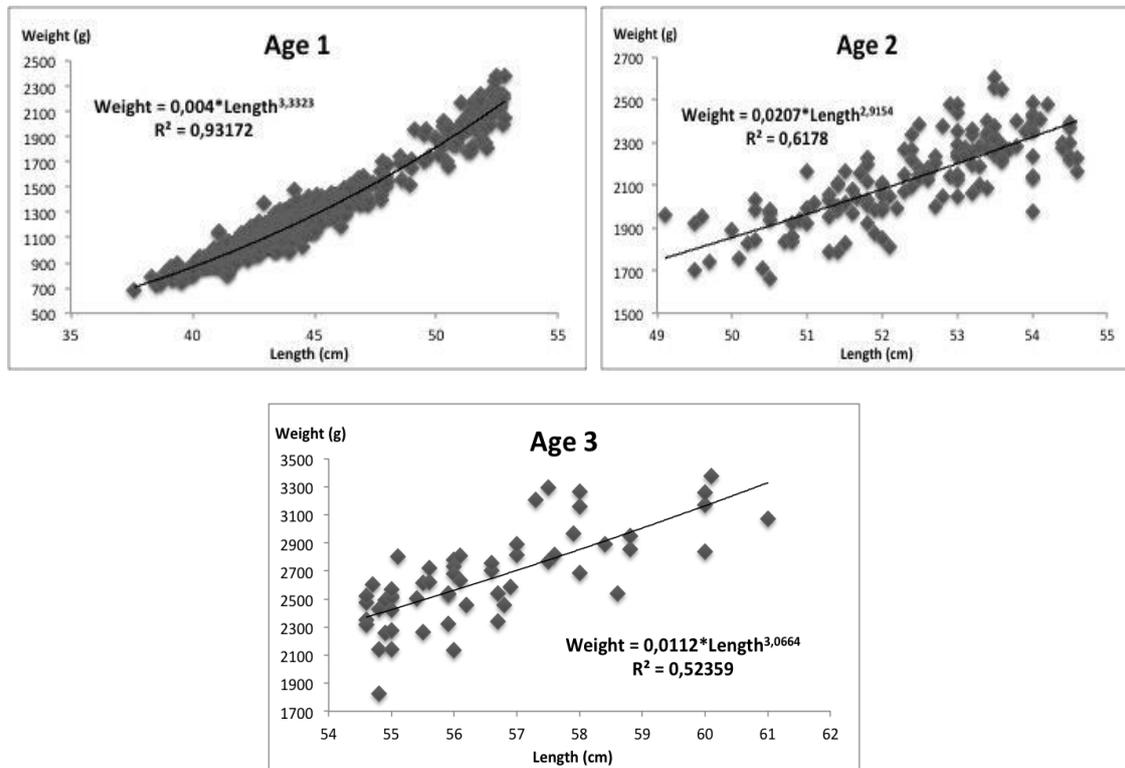


Figura 5.3: Relaciones talla-peso para las distintas clases de edad de los ejemplares de *S. sarda* capturados en La Azohía durante el periodo 2003-2016. Edad 1: arriba izquierda; Edad 2: arriba derecha; Edad 3: Abajo.

La tabla 5.3 muestra el valor de los índices de condición medios para cada una de las clases de edad asignadas a las capturas de bonito y el parámetro de regresión b para cada una de ellas:

Tabla 5.3: Parámetros de regresión y factores de condición promedio por clases de edad. Clave: % representa el porcentaje de melvas distribuidos en las diferentes clases de edad, “b” y “R<sup>2</sup>” son los coeficientes de regresión y K y Lc representan el factor de condición promedio por año.

Clase de edad	b	K	Lc	N	%
1	3,3323	1,398	1,0002	550	78,2361
2	2,9154	1,4752	1,0041	96	13,6558
3	3,0664	1,4697	0,9787	57	8,1081

En el caso particular del bonito, existe una mayor proporción de ejemplares de la clase de edad 1 (78.23%) en el stock pesquero, mientras que los ejemplares más longevos (clase de edad 3) apenas representan un 8% del total de las capturas. Tanto los ejemplares de las clases de edad 1 y 3 presentan un crecimiento alométrico positivo; más marcado en el caso de los ejemplares de menor edad. Sin embargo, los ejemplares pertenecientes a la clase de edad 2 presentaban un tipo de crecimiento ligeramente alométrico negativo.

Por otro lado, los índices de condición obtenidos para cada clase de edad son relativamente estables en el caso del índice de condición de LeCren con un leve descenso con la edad. Por el contrario, el índice de condición  $K_{mean}$  es más bajo para los ejemplares de menor edad (1.398) y se incrementa con la edad de los mismos. Finalmente, en la tabla 5.4 se muestran las correlaciones significativas obtenidas entre los índices de condición para las diferentes clases de edad asignadas al bonito y los índices atmosféricos de NAO.

Tabla 5.4: Resumen de las correlaciones establecidas entre la condición física y los índices atmosféricos para las 3 clases de edad de S. sarda. Solo se muestran los resultados con un p-value inferior a 0.01.

Índice de Condición	Índice de Oscilación Atmosférica	Rho Spearman
<b>CLASE DE EDAD 1</b>		
$K_{mean}$	NAO	-0.543
<b>CLASE DE EDAD 2</b>		
LeCren	NAOpy	0.685

A la vista de estos resultados, únicamente se encuentran influenciadas por las oscilaciones climáticas las clases de edad 1 y 2 de bonito en el Mediterráneo occidental. En el caso de los ejemplares de edad 1 se estableció una correlación negativa (Rho Spearman=-0.543) entre el índice  $K_{mean}$  y NAO. Por otro lado, para los ejemplares

asignados a la clase de edad 2, esta correlación se estableció entre el índice de LeCren y  $NAO_{py}$ .

## **5.4 Discusión**

### **5.4.1 Resultados biológicos**

Los datos obtenidos relativos al bonito para la realización de este estudio se corresponden en todo caso a ejemplares en estado pre-reproductor. Por ello, al no contar con datos relativos a la fase posterior al periodo reproductor no se pudo realizar una comparación entre ambos estadios.

De manera general, no se obtuvo para el total de los datos, ninguna correlación estadísticamente significativa entre los índices de condición planteados y las oscilaciones atmosféricas analizadas en la zona de estudio, en contraposición con lo publicado por varios autores en esta misma línea y para varias cuencas marina (ver por ejemplo Salihoglu *et al.*, 2019; Moullec *et al.*, 2019; o Báez *et al.*, 2021a.). Esta ausencia de correlaciones puede explicarse desde varios enfoques. El primero de ellos sería asumir que para el bonito no se cumple la hipótesis comprobada en otras especies de túnidos y especies afines de que las oscilaciones climáticas influyen sobre diversos aspectos biológicos de las especies migratorias. Por otro lado, este resultado podría sumar un argumento a favor de que el bonito en el Mediterráneo occidental no muestra un comportamiento migratorio tan marcado, y sus migraciones se limitan más a una escala local y regional. Esto ya ha sido postulado para el caso de la bacoreta por varios autores (ver por ejemplo Gaykoz & Bokhanov, 2008 o Mele *et al.*, 2016), tal y como se comentaba en el capítulo anterior de este estudio, y planteado por varios autores en el caso del bonito (Sabatés & Recasens, 2001). No obstante, la teoría de que esta especie forma poblaciones estables y con una menor actividad migratoria disiente de la propuesta por varios autores (ver por ejemplo Oray *et al.*, 2004; Turan *et al.*, 2016 o Genç *et al.*, 2019). De un modo u otro, queda patente la necesidad de clarificar lo relativo al carácter migratorio del bonito.

Del mismo modo, no se obtuvieron tampoco diferencias significativas entre los índices de condición promedio de machos y hembras y las oscilaciones climáticas propuestas. Este resultado está en línea con el resultado comentado anteriormente: o bien las poblaciones de bonito no están influenciadas por las variaciones de las condiciones climáticas presentes, o bien el bonito no realiza en el Mediterráneo occidental

migraciones a gran escala, quedando estas reducidas a una escala menor durante el periodo reproductivo, sin diferencias significativas en la influencia de las oscilaciones atmosféricas sobre condición física de machos y hembras, eliminando el factor sexo como fuente de variabilidad en la condición física de esta especie.

Por otro lado, la estructura de la población por clases de edad está ampliamente dominada por los ejemplares de la clase de edad 1, que suponen un 78.23% del total. Para el caso de estos ejemplares se obtuvo una correlación negativa entre el índice de condición de Fulton y el índice NAO que explicaba el 54.3% de la variabilidad observada en la condición física de estos ejemplares. Estos resultados están en consonancia con los obtenidos para la melva (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017), el atún rojo (Báez *et al.*, 2013a) o el atún blanco (Báez *et al.*, 2011a). Así pues, cabe esperar una mejor condición física del bonito durante su migración reproductora durante años con NAO en fase negativa, en la que se favorecen las corrientes de entrada hacia el Mediterráneo. Esto provoca una reducción del gasto energético invertido durante la migración, dando como resultado una mejor condición física. Por su parte, la condición física de los ejemplares asignados a la clase de edad 2 está correlacionada positivamente a través del índice de LeCren con el índice  $NAO_{py}$ . Esto se debe a un mayor aporte de nutrientes en el medio durante las fases positivas de NAO, con un desfase temporal entre la prevalencia de esta situación y las consecuencias biológicas provocadas (Báez *et al.*, 2013a). Para estos ejemplares de una clase de edad superior, la disponibilidad de alimento podría ser uno de los principales factores a la hora de condicionar la condición física, de ahí que se correlacione el índice de condición de LeCren con las condiciones atmosféricas, ya que de facto este índice denota un cociente entre el peso empírico y el teórico, al igual que ocurre con otras especies similares como la melva (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017). Mientras, para el caso de los ejemplares de una clase de edad menor, la condición física estaría más condicionada por la inversión energética realizada durante la migración reproductora, asociada al acúmulo de grasa corporal para afrontar la migración, lo que explica la correlación con el índice  $K_{mean}$ .

Finalmente, la condición física de los ejemplares más longevos no se correlacionó con las variaciones climáticas propuestas. Esto podría deberse a una menor dependencia de los ejemplares más longevos de las condiciones climáticas. Por otro lado, podría ocurrir que los ejemplares más longevos realizaran migraciones menos extensas sustentando la

hipótesis de un menor comportamiento migratorio, y por lo tanto menos dependientes de las condiciones climáticas. No obstante, estos extremos están aún por elucidar.

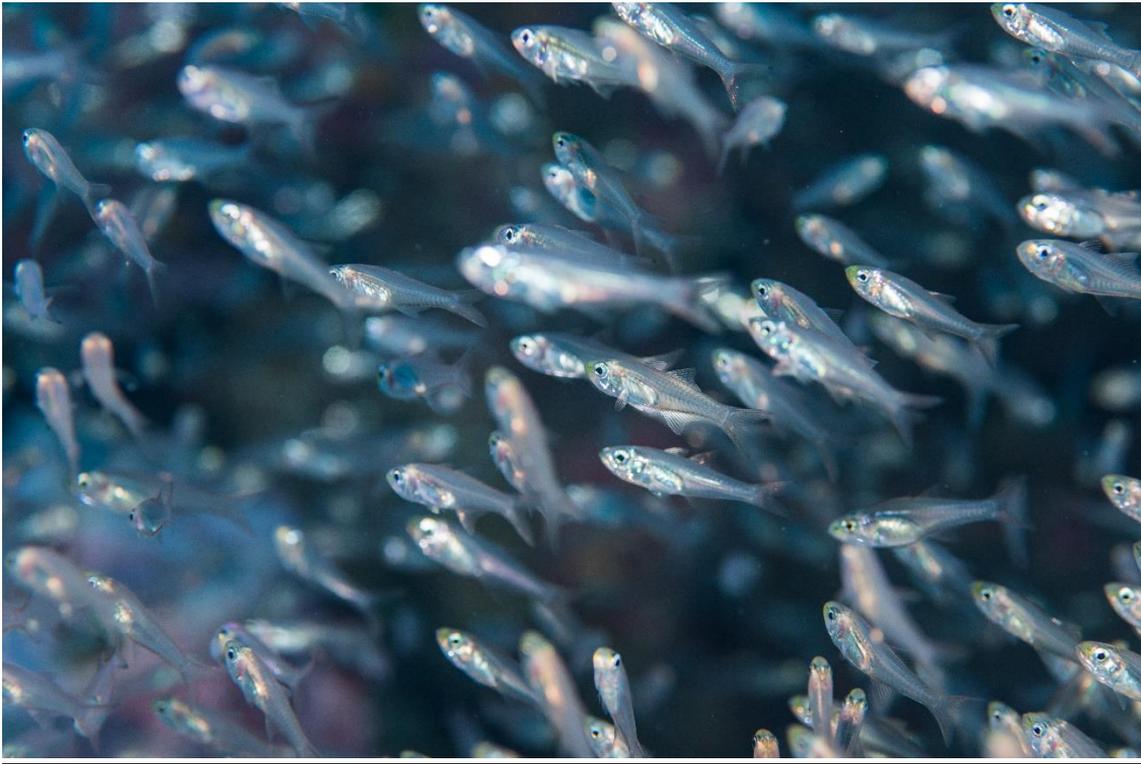
#### **5.4.2 Posible evolución de la población de *Sarda sarda* en un contexto de Cambio**

##### **Global**

Al igual que para las otras dos especies que se han analizado en este estudio, los resultados obtenidos en este estudio revelan una influencia de las condiciones climáticas sobre la biología del bonito. Esto confirma la hipótesis anteriormente planteada también para melva y bacoreta de que las condiciones climáticas influyen de una manera u otra en la condición física y pesquerías de las especies con hábitos migratorios.

Esta especie no tiene el valor comercial elevado de otras especies de túnidos, pese a la elevada presencia comercial que tiene por parte de las capturas comerciales de la flota española, si bien su valor también ha sido correlacionado con la variabilidad climática en el Mediterráneo occidental (Fernández *et al.*, 2020). Sin embargo, pese a que existe un conocimiento amplio de esta especie, aún existen ciertos aspectos biológicos de la misma que no se conocen. Uno de ellos es el comportamiento migratorio, sobre el que existen discrepancias entre la comunidad científica: mientras que una parte de ellas asume un comportamiento migratorio a gran escala en la misma línea que especies como el atún rojo, otros autores sugieren que esta especie realiza unas migraciones a una escala regional o local. Este aspecto es de vital importancia y condiciona incluso la propia interpretación de los resultados obtenidos en este estudio. Así pues, al igual que para las otras dos especies, en este contexto queda patente la necesidad de realizar estudios de marcado y recaptura que arrojen luz sobre estas incertidumbres a fin de profundizar sobre el conocimiento de esta especie, y poder determinar de un modo más preciso las medidas de gestión y conservación del bonito en el Mediterráneo occidental.

**6. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD  
REPRODUCTORA DE MELVA (*Auxis  
rochei*), BONITO (*Sarda sarda*) Y  
BACORETA (*Euthynnus alletteratus*)<sup>(2)</sup>**



*Foto obtenida de: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)*

(2) Capítulo publicado como: Báez, J.C., Muñoz-Expósito, P., Gómez-Vives, M.J., Godoy-Garrido, D. & Macías, D. (2019). NAO affects the reproductive potential of small tuna migrating from the Mediterranean Sea. *Fisheries Research*, 216: 41-46.

## **6.1 Contexto General**

En la actualidad, la comunidad científica acepta abiertamente el hecho de que la Oscilación del Atlántico Norte es la principal fuente de variabilidad climática, tanto estacional como interanual, especialmente durante los meses de invierno (Hurrell, 1995) en el área del Atlántico norte, que abarca también la cuenca del Mediterráneo (Hurrell, 1995; Hurrell & Deser, 2009). Este fenómeno atmosférico viene definido por la fluctuación de las presiones atmosféricas entre el centro de bajas presiones del Atlántico, situado en torno a Islandia, y el centro de altas presiones, localizado alrededor del archipiélago de las Azores; y se asocia con una serie de variaciones meteorológicas en la región que afectan no solo a la dirección e intensidad de los vientos, sino también a los regímenes de temperatura y precipitaciones (Hurrell, 1995).

Varios estudios en esta línea han confirmado la hipótesis de que NAO ejerce un efecto directo sobre las pesquerías en general (ver por ejemplo Graham & Harrold, 2009, o Báez & Real, 2011). Sin embargo, tiene un efecto aún más notable sobre las poblaciones de especies migratorias (Forchhammer *et al.*, 2002; Smederevac-Lalic & Regner, 2019) como los túnidos. Asimismo, varios autores han establecido una relación directa entre el índice NAO y diferentes especies de túnidos en relación a su abundancia (Báez *et al.*, 2011), capturabilidad (Rubio *et al.*, 2016; Smederevac-Lalic & Regner, 2019), reclutamiento (Borja & Santiago, 2002; Mejuto, 2003), y la condición física (Báez *et al.*, 2013; Muñoz-Expósito *et al.*, 2017).

La bacoreta *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque 1810), la melva *Auxis rochei* (Risso, 1810), y el bonito *Sarda sarda* (Bloch 1793) son las especies de pequeños túnidos más abundantes en el mar Mediterráneo (Macías *et al.*, 2014). Estas especies son comercialmente explotadas por parte de la flota pesquera española usando una amplia variedad de artes de pesca, y representa un valor comercial y ecológico muy notable ya que ocupan un lugar clave en las cadenas tróficas.

Al igual que las otras dos especies, la bacoreta es un pequeño túnido con hábitos predadores oportunistas y gregarios (Collette, 1986; El-Hawet *et al.*, 2013), que se halla habitualmente en aguas costeras (Valeiras & Abad, 2007). Habitualmente, si bien aún se desconocen muchos aspectos de su biología migratoria (Valeiras & Abad, 2007), Rodríguez-Roda (1966) se evidenciaron movimientos estacionales de pequeños túnidos

a través del estrecho de Gibraltar, que conecta el océano Atlántico y el mar Mediterráneo, con fines reproductivos. La melva es una especie nerítica que presenta movimientos migratorios estacionales a través del estrecho de Gibraltar. Así, entre los meses de abril y junio esta especie migra hacia la zona de Cabo Tiñoso (localizado en el sureste de la costa española) donde se captura mayoritariamente por almadrabas que se instalan en la zona. Por su parte, el bonito atlántico realiza migraciones a lo largo de la costa cubriendo grandes distancias, tal y como queda reflejado en los estudios de marcado y recaptura realizados a tal efecto en el mar de Alborán, lo que prueba que esta especie realiza una migración genética desde el océano Atlántico hacia el mar de Alborán durante los meses de primavera (Rey *et al.*, 1984). Tras la puesta, el bonito realiza la migración de vuelta hacia el Atlántico cruzando de nuevo por el estrecho de Gibraltar.

Por todo esto, el presente capítulo tiene por objetivo dilucidar el posible efecto del índice NAO sobre la condición física y el índice gonadosomático, que puede servir para dar una idea del potencial reproductivo de una especie, de estas tres especies de túnidos (bacoreta, melva y bonito) de pequeño tamaño, en el marco geográfico del Mediterráneo occidental y, por lo tanto, realizar una aproximación para la evaluación de los efectos biológicos que NAO produciría sobre estos recursos biológicos.

## **6.2 Metodología**

En el contexto de los muestreos científicos llevados a cabo anualmente por el Instituto Español de Oceanografía sobre las capturas comerciales de pequeños túnidos en la almadraba de La Azohía (figura 4.1), se capturaron un total de 258 hembras de bacoreta y 325 hembras de melva durante el periodo comprendido entre 2003 y 2016 y, adicionalmente, un total de 361 hembras de bonito entre 2003 y 2015, durante la migración reproductora (o genética) que estas tres especies realizan anualmente en el mar Mediterráneo.

Es conveniente mencionar el hecho de que se hayan utilizado únicamente hembras durante este estudio, puesto que el éxito en el desarrollo de los ovocitos y las posibles variaciones en el mismo son los que, en la práctica van a determinar el éxito reproductivo. Sin embargo, y previamente a la determinación del sexo de los individuos cada ejemplar fue medido hasta la horquilla hasta el centímetro más próximo y a continuación pesado con una precisión de  $\pm 10$  gramos. A continuación, cada ejemplar

fue eviscerado y sexado mediante exploración visual de las gónadas, que a su vez fueron pesadas con una precisión de  $\pm 1$  gramo.

Una vez obtenido todo el conjunto de datos para las tres especies en cuestión, los pares de valores de talla y peso se ajustaron mediante el siguiente ajuste potencial (ecuación 4):

$$\text{Peso} = a * \text{Talla}^b$$

Donde “a” y “b” son los correspondientes coeficientes de regresión y cuyas implicaciones biológicas han sido discutidas en la sección anterior y “Peso” y “Talla” son el peso (en gramos) y la talla (en centímetros) de cada individuo respectivamente. Por otro lado, con el objetivo de evaluar la condición física individual en un determinado momento del ciclo vital de los ejemplares (entendiendo el concepto de condición física como la masa corporal de un ejemplar para una talla determinada), se utilizó el índice de condición de LeCren (LC), de acuerdo con la ecuación (ecuación 5):

$$LC = W_{\text{observado}} / W_{\text{estimado}};$$

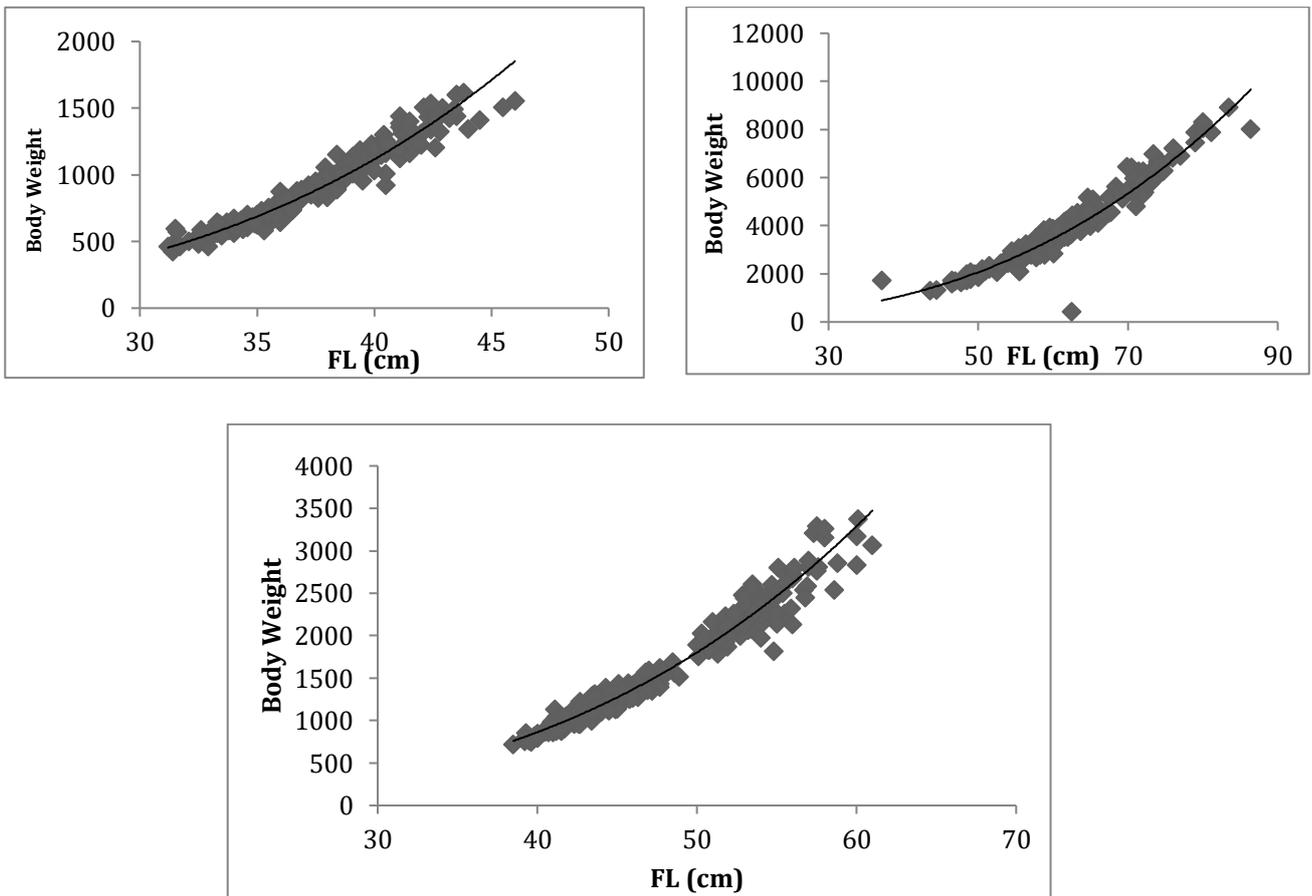
donde  $W_{\text{observado}}$  se corresponde con el peso observado *in-situ* para cada ejemplar en gramos y,  $W_{\text{estimado}}$  corresponde con el peso obtenido mediante el ajuste realizado anteriormente en función de la longitud de acuerdo con la relación talla-peso anterior. Por lo tanto, por medio de esta expresión se puede apreciar la desviación en el peso de un individuo a una cierta longitud con respecto al peso teórico esperable a tal longitud. A continuación, se calculó el índice gonadosomático (IGS) individual de acuerdo a la siguiente expresión (ecuación 6):

$$IGS = \frac{\text{Peso Gonadal}}{\text{Peso Eviscerado}} * 100$$

Finalmente, una vez realizados los cálculos anteriores y con el objetivo de testar la hipótesis planteada, se utilizó un test U-Mann Whitney ( $\alpha=0.05$ ) para evaluar posibles diferencias significativas en los índices gonadosomático y de LeCren durante las fases positivas y negativas de NAOw para las tres especies de tónidos expuestas anteriormente.

### 6.3 Resultados

La figura 6.1 así como la Tabla 6.1 muestran las relaciones talla-peso obtenidas para las 3 especies consideradas en este estudio, así como los coeficientes de regresión obtenidos en cada caso, respectivamente. Donde “Body Weight” es el peso de cada ejemplar expresado en gramos y “FL” es la longitud furcal en centímetros de cada uno:



**Figura 6.1:** Relaciones talla-peso de las distintas especies: melva (Arriba Izquierda), bacoreta (Arriba Derecha), y bonito (Abajo).

*Tabla 6.1: Parámetros de las relaciones talla-peso por especie.*

Especie	Función	R <sup>2</sup>
<b>Bacoreta (N=258)</b>	Peso= 0.032*Longitud <sup>2.83</sup>	0.95
<b>Melva (N= 325)</b>	Peso= 0.0019*Longitud <sup>3.6</sup>	0.95
<b>Bonito Atlántico (N=361)</b>	Peso= 0.0045*Longitud <sup>3.3</sup>	0.97

En el caso de los 258 ejemplares de bacoreta analizados, se observaron diferencias significativas (U= 6360, P=0.013) para el índice de condición de LeCren promedio durante las fases de NAOw negativas (0.996) y positivas (1.01). Asimismo, también se observaron diferencias significativas (U= 6469, P=0.048) entre el índice

gonadosomático promedio durante las fases de NAOw negativas (1.48) y positivas (1.88). Además, se obtuvo una correlación significativa no paramétrica positiva entre los índices gonadosomático y de LeCren ( $Rho= 0.362$ ,  $P< 0.0001$ ). Por lo tanto, las hembras con un mayor índice gonadosomático presentaban también un mayor valor para el índice de LeCren. También se obtuvieron correlaciones significativas no paramétricas positivas entre el índice gonadosomático y NAOw ( $Rho= 0.236$ ,  $P< 0.0001$ ) y entre el índice de LeCren y NAO w ( $Rho= 0.16$ ,  $P= 0.01$ ).

En el caso de las 325 hembras de melva contempladas para el estudio no se obtuvieron diferencias significativas ( $U= 11986.5$ ,  $P= 0.595$ ) para el índice de condición de LeCren promedio durante las fases de NAOw negativas (0.996) y positivas (1.003). No obstante, sí que se obtuvieron diferencias significativas ( $U= 9157$ ,  $P<0.0001$ ) para el índice gonadosomático promedio durante las fases de NAOw negativas (2.02) y positivas (1.5). Además, se obtuvo también una correlación significativa no paramétrica negativa entre el índice gonadosomático y el índice de condición de LeCren ( $Rho= -0.202$ ,  $P< 0.0001$ ), por lo que las hembras de melva con valores más elevados para el índice gonadosomático presentaban una peor condición física (LeCren), que no se relaciona con el índice NAOw de una manera concluyente por medio de una correlación significativa no paramétrica negativa ( $Rho= -0.11$ ,  $P= 0.048$ ).

Finalmente, para el caso del bonito atlántico, para el que se evaluaron un total de 361 hembras capturadas durante el periodo entre 2003 y 2015, no se obtuvieron diferencias significativas ( $U= 15406.5$ ,  $P=0.44$ ) entre el índice de condición de LeCren promedio durante las fases de NAOw negativas (0.991) y positivas (0.994). Sin embargo, se obtuvieron diferencias significativas ( $U= 12777.5$ ,  $P= 0.001$ ) entre el índice gonadosomático promedio y las fases de NAOw negativas (3.142) y positivas (4.039). También se obtuvo una correlación significativa no paramétrica positiva entre los índices gonadosomático y de LeCren ( $Rho= 0.39$ ,  $P< 0.0001$ ) por lo que las hembras de *S. sarda* con un mayor índice gonadosomático aparecían en una mejor condición física (LeCren). Por último, se obtuvieron correlaciones significativas no paramétrica positiva entre el índice gonadosomático y NAOw ( $Rho= 0.217$ ,  $P< 0.001$ ) y entre el índice de condición de LeCren y NAOw.

## **6.4 Discusión**

De manera general, los resultados obtenidos en este estudio indican una correlación entre el índice de condición de LeCren y el índice gonadosomático. No obstante, no se observa un patrón común para las tres especies consideradas. Así, tanto para la bacoreta como para el bonito la relación obtenida es positiva, mientras que para la melva esta correlación es negativa. De acuerdo con Sabatés & Recasens (2001), los pequeños túnidos podrían mostrar diferentes estrategias durante la puesta en el Mediterráneo occidental con el objetivo de evitar una competencia entre las distintas especies, ya que se reproducen durante el mismo periodo.

En el caso de la bacoreta y el bonito, la correlación positiva obtenida entre el índice de condición corporal y el índice gonadosomático es un hallazgo común para otras especies de peces (ver por ejemplo Hossain *et al.*, 2012 y Mozsár *et al.*, 2015 para especies de peces de agua dulce). Una mejor condición física podría inducir una mayor inversión energética en el crecimiento y desarrollo de las gónadas. De hecho, de acuerdo con Roff (1983) el excedente de energía procedente del crecimiento somático se canaliza hacia, bien el crecimiento somático, bien el crecimiento y desarrollo gonadal. Así pues, tanto la bacoreta como el bonito incrementarían el peso gonadal desde este excedente energético. Sin embargo, en el caso de la melva el crecimiento activo en peso de las gónadas podría estar basado en una inversión directa de energía. Así, la melva seguiría una estrategia distinta a las de las otras dos especies a la hora del gasto energético para el desarrollo gonadal. Esta diferencia podría explicarse por tres razones principalmente: 1) el periodo reproductor es más duradero que el de las otras dos especies contempladas en el estudio (Sabatés & Recasens, 2001; Valeiras & Abad, 2007); 2) el menor tamaño corporal de la melva lleva asociada una menor retención de grasas, consumidas rápidamente antes del periodo reproductor; y 3) que exista un sesgo en el muestreo, ya que durante los meses entre Abril y Junio las otras dos especies aún no han comenzado su periodo reproductor (Valeiras & Abad, 2007).

Respecto del efecto de NAOw sobre los índices de condición y gonadosomático, se sugiere que este puede incidir de dos modos diferentes: 1) incidiendo sobre la disponibilidad de recursos durante la migración genética hacia las áreas de puesta en el mar Mediterráneo; o 2) incidiendo sobre las condiciones oceanográficas que desencadenan la maduración de los ejemplares.

La hipótesis más plausible a la vista de estos resultados es que durante las fases de NAO positivas se originan unos vientos de componente oeste con una intensidad mayor al patrón de vientos habitual en latitudes templadas del hemisferio norte (Hurrell, 1995; Visbeck *et al.*, 2001), lo que podría favorecer la condición física de los túnidos en migración hacia aguas del Mediterráneo español. Por lo tanto, los cambios en el patrón de vientos predominante podrían favorecer la migración pre reproductora al reducir la demanda energética durante este proceso, así como la incrementar la disponibilidad de nutrientes, asegurando de este modo la recuperación de los ejemplares tras la puesta. Esta hipótesis se apoya en los resultados obtenidos, los cuales sugieren que durante las fases positivas de NAOw los pequeños túnidos presentan un mejor estado físico.

Diversos estudios realizados en túnidos indican que un mayor peso gonadal origina una mayor fecundidad (Zudaire *et al.*, 2013; Saber *et al.*, 2016). En este sentido, estudios realizados sobre atún blanco (*Thunnus alalunga*) en el mar Mediterráneo revelan que el peso gonadal es el principal factor a la hora de determinar la fecundidad independientemente del tamaño de la hembra. Además, la fecundidad relativa (que viene dada por el cociente: fecundidad del lote/peso corporal) únicamente aparecía estar significativamente correlacionada al peso de la gónada (Saber *et al.*, 2016). Por lo tanto, los cambios en el índice gonadosomático indicados por el índice NAO podrían afectar al potencial reproductivo de las especies de pequeños túnidos.

Así pues, el índice NAO podría determinar el potencial reproductivo de los túnidos en migración. Son muchos los autores que predicen que, en un escenario de cambio climático, el índice NAO presentará valores extremos, tanto positivos como negativos (por ejemplo, Vicente-Serrano *et al.*, 2011). A la luz de estos resultados, el cambio climático podría tener un efecto negativo sobre el potencial reproductivo de estas especies, afectando al reclutamiento de las mismas de tal modo que durante los periodos de NAO negativo con valores extremos, al ser este especialmente bajo, se podría poner en riesgo la continuidad de los stocks de estas especies. Esta situación afecta en particular tanto a la melva como al bonito ya que las pesquerías de estas dos especies se centran mayoritariamente en una o dos clases de edad. En una situación como esta, el paso de un periodo de tiempo entre 2 y 3 años con unos niveles de reclutamiento bajos podrían dar lugar al agotamiento de la biomasa del stock reproductivo. Así pues, en este escenario se aconseja tomar las medidas de gestión oportunas en términos de explotación que fomenten la conservación de estas especies.

## **7. DISCUSIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS**



*Foto obtenida de: [www.shutterstock.com](http://www.shutterstock.com)*

Los resultados obtenidos a lo largo de este estudio sugieren que las condiciones atmosféricas que vienen determinadas por las variaciones en el índice de la Oscilación del Atlántico Norte, suponen una fuente de variabilidad que explica los cambios en la condición física de los pequeños túnidos a lo largo de la migración reproductiva que estos realizan hacia aguas del mar Mediterráneo cruzando el estrecho de Gibraltar; y la posterior migración de retorno hacia las áreas de invernada. Este fenómeno (NAO) explica un porcentaje significativo de la variación observada en el índice de condición de las tres especies de túnidos consideradas en este estudio. Además, se constata en todos los casos y para todas las especies un desacople temporal, de entre 6 y 12 meses, entre la observancia de las variaciones climáticas y la respuesta biológica que estas desencadenan en las poblaciones melva, bacoreta y bonito. Del presente estudio también se desprende una relación directa entre la variabilidad climática que denota el índice NAO y el índice gonadosomático que determina la fracción de peso corporal que representa la gónada en cada individuo. De acuerdo con Saber *et al.* (2016) existe una relación directa entre el tamaño de la gónada y la fecundidad individual. De este modo, se deduce que las variaciones del índice NAO podrían ser claves a la hora de determinar el potencial reproductivo de este grupo de especies.

En lo que respecta a la evaluación de la capacidad reproductora de las tres especies de túnidos de pequeño tamaño que han sido evaluadas, se observa como denominador común una correlación entre el índice de condición de LeCren y el índice gonadosomático a nivel individual; si bien estas correlaciones son independientes según la especie en cuestión. Así pues, por un lado, en el caso del bonito y la bacoreta se estableció una correlación positiva entre el índice de LeCren y el índice gonadosomático, algo que concuerda con lo obtenido para otras especies de peces (Hossain *et al.*, 2012; Mossar *et al.*, 2015). En este sentido, y de acuerdo con Roff (1983) el excedente de energía procedente del crecimiento somático, y que se deriva de una mejor condición física, se canaliza bien hacia un mayor crecimiento somático, bien hacia el crecimiento y desarrollo de la gónada. Por lo tanto, a la luz de los resultados obtenidos, tanto la bacoreta como el bonito aumentarían el tamaño de la gónada a partir del acumulado energético que se deduce de una mejor condición física. Esto a su vez se relaciona directamente con una mayor fecundidad (Saber *et al.*, 2016), reclutamiento poblacional y tamaño del stock pesquero (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017; Báez *et al.*, 2019; Reglero *et al.*, 2018b; Di Natale *et al.*, 2018).

Sin embargo, en el caso de la melva existe una correlación negativa entre el índice de condición de LeCren y las variaciones en el índice gonadosomático de esta especie. En este caso, el patrón obtenido es el opuesto a las otras dos especies de túnidos exploradas. Esto podría sugerir que la melva sigue una estrategia reproductora y migratoria distinta al de otras especies de túnidos; en concordancia con Sabatés & Recasens (2001). Este resultado se puede apoyar en 3 posibles hipótesis aún por confirmar. En primer lugar, la melva podría tener un periodo reproductor de una mayor duración temporal comparado con el bonito y la bacoreta. Por otro lado, existe la posibilidad de que la melva, de un tamaño inferior al bonito y bacoreta, retenga un mayor porcentaje de grasa corporal durante el periodo reproductivo y, por último, podría existir un sesgo a la hora de realizar el muestreo de las poblaciones.

En todos los casos, para las tres especies exploradas, está mejor condición física ha sido correlacionada con las fases positivas del índice NAO de manera general. Durante estos periodos se produce una intensificación de los vientos de componente oeste que favorecen una migración hacia las áreas de puesta de estas especies localizadas en el Mediterráneo occidental, reduciendo así la demanda energética necesaria para realizar la migración. En consecuencia, bajo esta situación climática se encuentran ejemplares con una mejor condición física. Esto, como ya se ha mencionado anteriormente, se puede relacionar con un mayor tamaño y desarrollo de las gónadas, una mayor fecundidad y mayores tasas de reclutamiento. Además, esto también lleva asociado un incremento de nutrientes disponibles en el medio circundante por lo que el déficit energético resultante de la migración se reduce. Todas estas circunstancias resultan en ejemplares con una mejor condición física en fases positivas del índice NAO. Como conclusión, es esperable, en épocas de NAO positivas una mejor condición física en los ejemplares de bacoreta, melva y bonito y, en consecuencia, una mayor fecundidad, reclutamiento y tamaño poblacional del stock pesquero de estas especies.

En el caso particular de la melva, para la que se evaluó la afeción del índice NAO a los diferentes grupos de edad que se capturan comercialmente, se obtuvo que el índice NAO explica una fracción significativa de la variabilidad observada en el índice de condición de Fulton ( $K_{\text{mean}}$ ) (entre el 28% y el 34%). Además, se obtuvo un desfase temporal de un año entre la prevalencia de unas condiciones atmosféricas y las respuestas biológicas que estas desencadenan. Según esto, las fases positivas del índice NAO, caracterizadas por la intensificación de los vientos del oeste, originan corrientes

que facilitarían el paso de los ejemplares en migración hacia las áreas de puesta, reduciendo el gasto energético que invierten durante el movimiento migratorio, con la subsiguiente mejora en la condición física (Báez *et al.*, 2013a). En estas circunstancias, al igual que lo descrito anteriormente, se produciría una intensificación de la cantidad de nutrientes disponibles en el medio, como resultado de la combinación entre los vientos del alisios y un descenso en la temperatura del agua (Mercado *et al.*, 2005; Báez *et al.*, 2013b). Estos resultados van en concordancia con los obtenidos al evaluar la capacidad reproductora de la melva, la bacoreta y el bonito. Por lo tanto, los cambios esperables en el patrón de vientos dominante podrían favorecer la migración pre-reproductora al reducir la demanda energética durante este proceso, así como la incrementar la disponibilidad de nutrientes, asegurando de este modo la recuperación de los ejemplares tras la puesta.

En cuanto a la comparación de la condición física de los ejemplares de melva antes y después de la puesta, se obtuvo una mejor condición de manera global para esta especie antes de la puesta, explicada por un aumento en el peso corporal y gonadal que se produce como preparación para la migración reproductora y la posterior puesta (Macías *et al.*, 2005); teniendo además en cuenta la subsiguiente pérdida de peso producida durante la puesta y la posterior migración trófica en sentido opuesto (Schäfer, 2001). El análisis realizado sobre los ejemplares en post-puesta confirma que estos se encuentran en peor condición física tras el periodo reproductor debido a la pérdida de peso corporal que este periodo provoca en los ejemplares. Esta situación se ve magnificada durante los periodos de NAO positivos. Durante estos periodos, aunque como ya se ha mencionado anteriormente se produce un afloramiento de aguas profundas ricas en nutrientes que podrían favorecer la presencia de alimento en el medio circundante y en consecuencia una mejor recuperación tras la puesta, también da lugar a una intensificación de las corrientes procedentes del océano Atlántico a través del estrecho de Gibraltar. Esto último dificultaría la migración trófica de la melva tras la puesta y de ahí que se obtenga una peor condición física en estas situaciones. Este mismo resultado coincide con Báez *et al.*, 2013b en el que se obtuvo una peor condición física para los ejemplares de *T. thynnus* durante la migración post puesta hacia el océano Atlántico a través del estrecho de Gibraltar durante los periodos de NAO en fase positiva. Esto refuerza la hipótesis de que durante estos periodos las condiciones

oceanográficas que se originan sí que favorecen la migración reproductora (mejor condición física); no así la posterior migración trófica en esta zona en particular.

En cuanto a la estructura de edad, se obtuvo una marcada influencia de NAO en cada uno de los grupos de edad examinados. Además, en todos los casos se obtuvo un desfase temporal entre la prevalencia de una cierta situación climática y las consecuencias biológicas que estas desencadenan en los ejemplares, en lo que respecta a la condición física e incluso, como se ha comentado anteriormente, a la fecundidad o reclutamiento de la especie. Esto puede explicar parte de la variabilidad interanual que se observa en las capturas de pequeños túnidos en el Mediterráneo español.

Se obtuvo una fuerte influencia del índice NAO para los ejemplares de la clase de edad 1. Tal y como se ha mencionado en el párrafo anterior, existe un desfase temporal respecto de las consecuencias biológicas que se desencadenan. En el caso de los ejemplares de las clases de edad más jóvenes esto revela la influencia e importancia que tienen las oscilaciones climáticas (NAO) durante las fases larvarias y juveniles de esta especie antes de formar parte de los stocks pesqueros que componen las pesquerías comerciales en esta zona determinada. Esta misma situación ocurre con los ejemplares de la clase de edad 2. En ambos casos, se obtuvo una mejor condición física en los ejemplares pre-reproductores durante las fases positivas de NAO, que provocan unas mejores condiciones oceanográficas que reducen el gasto energético y originan un mayor aporte de nutrientes en el medio (Mercado *et al.*, 2005; Báez *et al.*, 2013b). No obstante, desde un punto de vista biológico los ejemplares pertenecientes a la clase de edad 1 serían más dependientes en cuanto a la condición física se refiere de la presencia de nutrientes en el medio, mientras que para los ejemplares de la clase de edad 2 el gasto energético empleado en la migración sería el factor más condicionante a la hora de determinar una mejor condición física. Ambas situaciones, tanto la presencia de nutrientes en el medio como un sistema de corrientes que permita un menor gasto energético durante la migración se ven favorecidos durante las fases positivas del índice NAO. Finalmente, para el caso de los ejemplares más longevos (edad 3 y superiores), estos son los más influenciados por las variaciones atmosféricas que vienen originadas por el índice NAO, que explicaba un porcentaje mayor de la variabilidad observada en el índice de condición que para las otras clases de edad. En este caso, los ejemplares más longevos estarían más afectados por las variaciones climáticas ya que estos realizan un mayor gasto energético en la migración reproductora y en el desarrollo de la gónada.

Además, podría existir un cambio en los hábitos alimenticios a medida que los ejemplares crecen en tamaño. Esto último, tal y como se expone en el capítulo correspondiente, tiene una influencia sobre el número y calidad de los huevos producidos y en la supervivencia de las larvas, con la consecuente mejora del reclutamiento. Además, los cambios en la disponibilidad de los nutrientes podrían ejercer un efecto directo sobre el peso corporal de los ejemplares y de ahí que exista una variación en el índice de condición de LeCren, que se define matemáticamente como un cociente entre el peso teórico y el empírico de cada individuo.

En cuanto a las perspectivas futuras de cambio climático, y teniendo en cuenta los resultados y conclusiones que se desprenden de este estudio; cada vez está más aceptado por la comunidad científica el hecho de que la Tierra se encuentra experimentando una serie de episodios de calentamiento global sucesivos (Oreskes, 2004), según los cuales se vaticina un cambio en el índice NAO hacia extremos más negativos (ver por ejemplo Vicente-Serrano *et al.*, 2011). En estas circunstancias, las condiciones oceanográficas en la zona geográfica del estrecho de Gibraltar se tornarían menos propensas a favorecer las migraciones reproductoras que los pequeños túnidos realizan estacionalmente en estas aguas. Así pues, sería esperable una menor cantidad de nutrientes presentes en el medio, clave para estas especies tanto durante la migración reproductiva como durante la migración trófica posterior que garantice la recuperación tras la puesta; así como un sistema de corrientes con una mayor componente este en el estrecho de Gibraltar. De este modo, estas circunstancias particulares originarían en consecuencia un medio menos favorable para las migraciones de los pequeños túnidos, que presentarían unos índices de condición menores. Esto a su vez podría tener consecuencias negativas en el éxito reproductivo de estas especies, influyendo a su vez en el reclutamiento de las mismas y por lo tanto originar una disminución del tamaño de los stocks pesqueros, con el consecuente impacto socioeconómico que se deriva, pues los túnidos en esta región son especies muy cotizadas comercialmente. Esta situación es especialmente importante para el caso del bonito, especie para la que se pesca sobre una o dos clases de edad. Por ello, si esta situación se prolongase en el tiempo, se pondría en riesgo la viabilidad de los stocks pesqueros y la conservación de las comunidades.

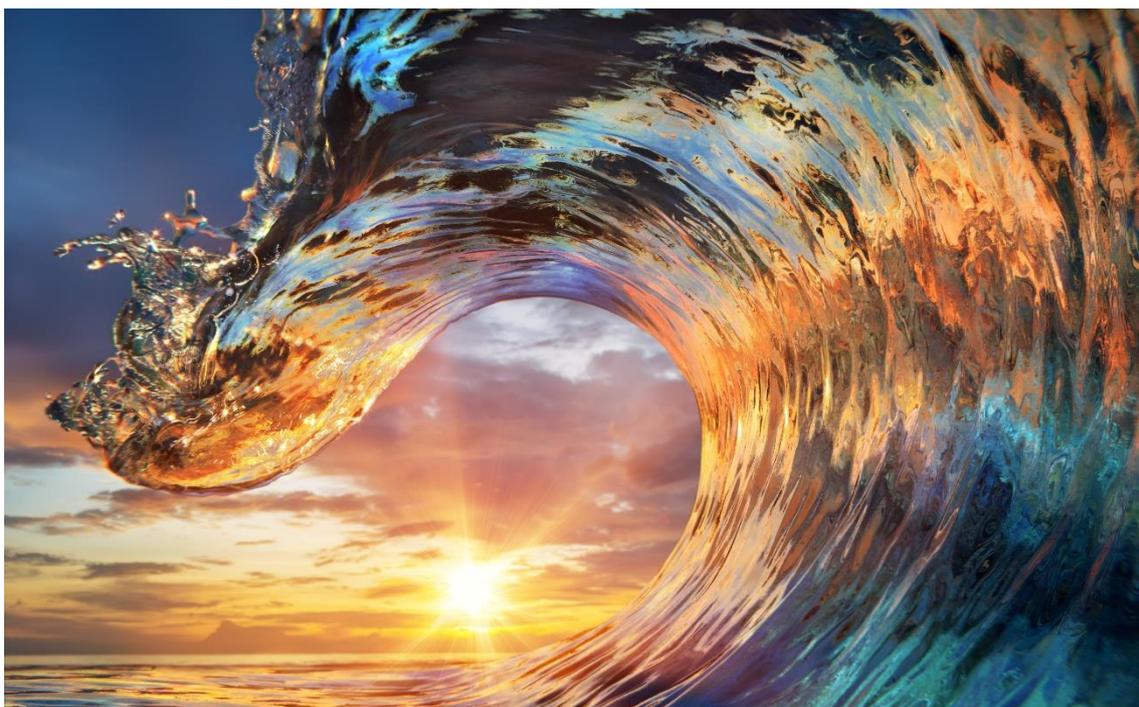
Para el caso de la bacoreta y el bonito, no se disponían para este estudio datos obtenidos tras el periodo reproductor. Esto impidió realizar un análisis más detallado del efecto de las condiciones climáticas sobre la condición física de estas dos especies, como sí

ocurrió en el caso de la melva. Por ello, y con el fin de ampliar las conclusiones recogidas en este estudio, conviene la obtención de datos biológicos de bacoreta y bonito posteriores a la reproducción.

Además, estas dos especies fueron correlacionadas con una menor intensidad que la melva con las oscilaciones climáticas (Muñoz-Expósito *et al.*, 2017; Fernández *et al.*, 2020; Báez *et al.*, 2021). Esto se puede deber a una menor dependencia de las condiciones circundantes de estas especies, por lo que las oscilaciones climáticas no afectan tanto a la variabilidad de los índices de condición física. No obstante, existe un debate acerca del comportamiento migratorio de bacoreta y bonito, ya que existen teorías que afirman que las migraciones realizadas por estas dos especies podrían ocurrir a una escala menor, quedando reducidas a nivel regional o local, formándose poblaciones más o menos estables durante todo el año (Sabatés & Recasens, 2001). Esto se podría asociar con una menor dependencia de las oscilaciones climáticas que originan efectos en el medio a una escala espacial mayor (Turan *et al.*, 2016 o Genç *et al.*, 2019 entre otros), explicando así los resultados que se han obtenido en este estudio. No obstante, teniendo en cuenta las incertidumbres existentes, resulta necesario realizar estudios de marcado y recaptura de bacoreta y bonito en el área del Atlántico este y Mediterráneo occidental.

Por ello, se hace preciso ahondar en el conocimiento de la biología de estas especies, ya que hay ciertos aspectos de la misma que son aún desconocidos, tales como el comportamiento migratorio completo. Así pues, las conclusiones que se derivan de este estudio dejan patente la necesidad de ajustar las medidas de gestión que se deben desempeñar sobre este grupo de especies en esta área geográfica concreta de acuerdo con las previsiones climáticas que se tengan a corto, medio y largo plazo.

## **8. CONCLUSIONES**



Las principales conclusiones que se pueden extraer de este estudio son:

- i.** La condición física de melva, bacoreta y bonito, está estrechamente influenciada por el índice NAO. Por lo tanto, se puede considerar al índice NAO como una variable clave para determinar el éxito reproductivo de estas tres especies.
- ii.** Existe un desfase temporal entre la prevalencia de unas determinadas condiciones atmosféricas y sus consecuencias biológicas para las especies estudiadas. Este lapso temporal puede estimarse entre 6 y 12 meses.
- iii.** El índice  $K_{\text{mean}}$  es el que muestra una mayor respuesta a la variabilidad de las condiciones ambientales el caso de la melva durante su migración prepuesta. Por el contrario, el índice de LeCren muestra una mayor respuesta durante la post-puesta.
- iv.** De un modo general, las fases positivas de NAO se asocian con una peor condición física de la melva durante la migración pre-reproductora, independientemente de la clase de edad.
- v.** Se obtuvo, de manera general, un mejor estado de condición física para la melva durante el estadio pre-reproductor durante los periodos de prevalencia del índice NAO negativo.
- vi.** Las hembras de melva durante la migración pre-reproductora se encuentran en una condición física significativamente mejor que la de los machos debido a la mayor inversión energética en la reproducción que se traduce en un mayor desarrollo gonadal. Por el contrario, no se obtuvieron diferencias significativas entre ambos sexos tras la migración post-reproductora.
- vii.** La melva en el mar Mediterráneo presenta en todos los casos crecimiento alométrico positivo, independientemente del estadio reproductor en que se encuentre cada ejemplar. No obstante, hay un crecimiento ligeramente inferior en los individuos post-reproductores. Además, se observa un descenso en la tasa de crecimiento con la edad tras la puesta debido al mayor esfuerzo reproductivo llevado a cabo por los ejemplares más longevos.

**viii.** Existe una correlación positiva entre el índice de condición de LeCren y el índice gonadosomático para la bacoreta y bonito. No obstante, para la melva esta correlación es negativa debido a que esta especie podría llevar a cabo una estrategia reproductiva diferente a las de las otras especies.

**ix.** Es necesario mejorar el conocimiento biológico de diversos aspectos de la biología migratoria, poblacional y reproductiva de melva, bacoreta y bonito, a fin de ser capaces de perfeccionar las medidas de gestión que se puedan establecer.

## **9. REFERENCIAS**



- Abiy, A.Z., Melesse, A.M., Seyoum, W.M. & Abteu, W. (2019). Drought and climate teleconnection and drought. *Extreme Hydrology and Climate variability monitoring. Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation*, pp. 275-295.
- Adams, S.M., Brown, A.M. & Goede, R.W. (1993). A quantitative health assessment index for rapid evaluation of fish condition in the field. *Transactions of the American Fisheries Society*, 122: 63-73.
- Alemany, F. (1997). Ictioplancton del Mar Balear. PhD Thesis. Universitat de les Illes Balears.
- Alvarez-Berastegui, D., Ciannelli, L., Aparicio-Gonzalez, A., Reglero, P. & Hidalgo, M. (2014). Spatial scale, means and gradients of hydrographic variables define pelagic seascapes of bluefin and bullet tuna spawning distribution. *PloS One*, 9 (10): e109338.
- Ambaum, M.H.P., Hoskins, B.J. & Stephenson, D.B. (2001). Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation? *Journal of Climate*, 14: 3495-3507.
- Astraldi, M., Balopoulos, S., Candela, J., Font, J., Gacic, M., Gasparini, G., Manca, B., Theocharis, A. & Tontoré, J. (1999). The role of Straits and Channels in understanding the characteristics of Mediterranean circulation. *Progress in Oceanography*, 44: 65-108.
- Báez, J.C., Czerwinski, I.A. & Ramos, M.L. (2020). Climate oscillations effect on the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) Spanish captures in the Indian Ocean. *Fisheries Oceanography*: DOI: 10.1111/fog.12496.
- Báez, J.C., Gimeno, L., Gomez-Gesteira, M, Ferri-Yañez, F. & Real, R. (2013b). Combined effects of the North Atlantic Oscillation and the Arctic Oscillation on Sea Surface Temperature in the Alboran Sea. *PlosOne*, 8: e62201.
- Báez J.C., Gimeno, L. & Real, R. (2021a). North Atlantic Oscillation and fisheries management during global climate change. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 31: 319-336.
- Báez J.C., Loyola-Fernández, I. & Camiñas, J.A. (2021b). North Atlantic Oscillation effect on the Biology and Fisheries of Tuna Species in the Alboran Sea. *Alboran Sea - Ecosystems and Marine Resources*, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65516-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65516-7_17). 577-587 pp.
- Báez, J.C., Macías, D., de Castro, M., De Gesteira, M.G., Gimeno, L., & Real, R. (2013a). Analysis of the effect of atmospheric oscillations on physical condition of pre- reproductive Bluefin tuna from the Strait of Gibraltar. *Animal Biodiversity and Conservation*, 36: 225–233.
- Báez, J.C., Macías, D., de Castro, M., Gomez-Gesteira, M, Gimeno, L. & Real, R. (2014). Assessing the response of exploited marine populations in a context of rapid climate change: the case of Blackspot Seabream from the Strait of Gibraltar. *Animal biodiversity and Conservation*, 37: 35-47.
- Báez, J.C., Muñoz-Expósito, P., Gómez-Vives, M.J., Godoy-Garrido, D. & Macías, D. (2019). NAO affects the reproductive potential of small tuna migrating from the Mediterranean Sea. *Fisheries Research* 216: 41-46.

- Báez, J.C., Ortiz De Urbina, J.M., Real, R. & Macías, D. (2011a). Cumulative effect of the north Atlantic oscillation on age-class abundance of albacore (*Thunnus alalunga*). *Journal of Applied Ichthyology* 27: 1356–1359.
- Báez, J.C., Pascual-Alayón, P., Ramos, M.L. & Abascal, F.J. (2018). Tónidos tropicales: calentamiento global y seguridad alimentaria, una visión global. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 53(1): 1-8.
- Báez, J.C. & Real, R. (2011b). The North Atlantic Oscillation affects landings of anchovy *Engraulis encrasicolus* in the Gulf of Cádiz (south of Spain). *Journal of Applied Ichthyology*, 27: 1232-1235.
- Baldwin, M.P., Dameris, M. & Shephers, T.G. (2007). How will the stratosphere affect climate change? *Science*, 316: 1576-1577.
- Baldwin, M.P. & Dunkerton, T.J. (1999), Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 104: 937-946.
- Bastos, A., Janssens, I.A., Gouveia, C.M., Trigo, R.M., Ciais, P., Chevallier, F., Peñuelas, J., Rodenbeck, C., Piao, S., Friedlingstein, P. & Running, S.W. (2016). European land CO<sub>2</sub> sink influenced by NAO and East-Atlantic Pattern Coupling. *Nature Communications*, 7: 10315.
- Berkeley, S.A., Chapman, C. & Sogard, S.M. (2004a). Maternal age as a determinant of larval growth and survival in a marine fish, *Sebastes Melanops*. *Ecology*, 85: 1258-1264.
- Berkeley, S.A., Hixon, M.A., Larson, R.J. & Love, M.S. (2004b). Fisheries sustainability via Protection of Age Structure and Spatial Distribution of Fish Populations. *Fisheries*, 29: 23-32.
- Bianchi, G. Carpenter K.E., Roux, J.P., Molloy, F.J., Boyer, D. & Boyer, H.J. (1999). Field guide to the living marine resources of Namibia. *FAO species identification guide for fishery purposes*, 265 pp.
- Borja, A. & Santiago, J. (2002). Does the North Atlantic Oscillation control some processes influencing recruitment of temperate tunas? *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 54: 964-984.
- Bromhead, D., Scholey, V., Nicol, S., Margullies, D., Wexler, J., Stein, M., Hoyle, S., Lennert-Cody, C., Williamson, J., Havenhand, J., Ilyina, T. & Lehodey, P. (2015). The potential impact of ocean acidification upon eggs and larvae of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Deep-Sea Research II: Tropical Studies in Oceanography*, 113: 268-279.
- Cayré, P. & Diouf, T. (1983). Croissance de la Thonine *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque 1810), établie à Partir de Coupes Transversales du Premier Rayon de la Nageoire Dorsale. *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 15(2): 337-345.
- Cochrane, K.L. (2021). Reconciling sustainability, economic efficiency and equity in marine fisheries: Has there been progress in the last 20 years? *Fish and Fisheries*, 22(2): 298-323.
- Collette, B.B. & Nauen., C.E. (1983). FAO species catalogue. Vol. 2: Scombrids of the world. An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos and related species known to date. *FAO Fisheries Synopsis*, 125. 137 pp.

- Collette, B. (1986). Scombridae (including Thunnidae, Scomberomoridae, Gasterochismatidae and Sardidae). In: Whitehead, P.J.P., Bauchot, M.L., Hureau, J.C., Nielsen, J., Tortonese, E. (Eds.), *Fishes of the North-Eastern Atlantic and the Mediterranean*, 2nd ed. Unesco, pp. 981–997.
- Collette, B., Acero, A., Amorim, A.F., Boustany, A., Ramirez, C., Cárdenas, G., Carpenter, K.E., de Oliveira Leite Jr., N., Di Natale, A., Fox, W., Fredou, F.L., Graves, J., Guzmán- Mora, A., Hazin, F.H., Juan-Jorda, M., Kada, O., Minte-Vera, C., Miyabe, N., Montano-Cruz, R., Nelson, R., Oxenford, H., Salas, E., Schaefer, K., Serra, R., Sun, C., Teixeira-Lessa, R.P., Travassos, P.E., Uozumi, Y. & Yanez, E. (2011). *Auxis rochei*. *The IUCN Red List of Threatened Species*. e.T170355A6765188. <https://www.iucnredlist.org/es/species/170355/6765188#assessment-information>.
- Chaloupka, M., Work, T.M., Balazs, G.H., Mrakawa, S.K.K. & Morris, R. (2008). Cause-specific temporal and spatial trends in green sea turtle strandings in the Hawaiian Archipelago (1982-2003). *Marine Biology*, 154: 887-898.
- Christiansen, B. (2007). The North Atlantic Oscillation or the Arctic Oscillation? Volcanic eruptions as Nature's own experiments. *Geophysical Research Abstracts*, 9: 1607-1692.
- Deary, A.L., Moret-Ferguson, S., Engels, M., Zettler, E. & Jaroslow, G. (2015). Influence of Central Pacific Oceanographic Conditions on the Potential Vertical Habitat of Four Tropical Tuna Species. *Pacific Science*, 69(4): 461-476.
- Defant, A. (1961). *Physical Oceanography*, Volume 1. Pergamon Press, New York.
- Di Natale, A., Tensek, S., Celona, A., Garibaldi, F., Macías-López, A.D., Oray, I., Ortega-García, A., Pagá-García, A., Potoschi, A. & Tinti, F. (2018). Another peculiar situation for yoy of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Mediterranean Sea in 2016. *Collective Volume Scientific Papers ICCAT*, 74(6): 2839-2849.
- Drinkwater, K.F., Belgrano, A., Borja, A., Conversi, A., Edwards, M., Greene, C.H., Ottersen, G., Pershing, A.J. & Walker, H. (2003). The Response of Marine Ecosystems to Climate Variability associated with the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Monograph*, 134: 211-234.
- Douville, D. (2009). Stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere winter climate variability. *Geophysics Research Letters*, 36: 1-5.
- Duarte, C.M., Agusti, S., Barbier, E., Britten, G.L., Castilla, J.C., Gattuso, J.P., Fulweiler, R.W., Hughes, T.P., Knowlton, N., Lovelock, C.E., Lotze, H.K., Predragovic, M., Poloczanska, E., Roberts, C. & Worm, B. (2020). Rebuilding marine life. *Nature*, 580: 39-51.
- El-Haweet, A.R., Sabry, E. & Mohamed, H. (2013). Fishery and population characteristics of *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque 1810) in the Eastern Coast of Alexandria, Egypt. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 13: 629–638.
- Encina, L. & Granado-Lorencio, C. (1997). Seasonal changes in condition, nutrition, gonad maturation, and energy content in barbe, *Barbus sclateri*, inhabiting a fluctuating river. *Environmental Biology of Fishes*, 50: 75.
- Etchevers, S.L. (1976). Incidencia de clupeidos en la alimentación de las caballas: *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque 1810) y *Auxis thazard* (Lacepède, 1800) en la costa noreste de Margarita. *Lagena*, (37-38): 9-11.

- Faillettaz, R., Beaugrand, G., Goberville, E. & Klrby, R. (2019). Atlantic Multidecadal Oscillations drive the basin-scale distribution of Atlantic bluefin tuna. *Science Advances*, 5(1): DOI: 10.1126/sciadv.aar6993.
- FAO (2011). *FishStatJ: Universal software for fishery statistical time series*. FAO Fisheries and Aquaculture Department, Statistics and Information Service, Rome, Italy.
- FAO (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>.
- Fernández, I.L., Báez, J.C., Rubio, C.J., Muñoz, P., Camiñas, J.A. & Macías, D. (2020). Climate oscillations effects on market prices of commercially important fish in the northern Alboran Sea. *International Journal of Biometeorology*, 64: 10.1007/s00484-020-01859-3.
- Finney, B.P., Gregory-Eaves, I., Douglas, M.S.V. & Smol, J.P. (2002). Fisheries productivity in the northeastern Pacific Ocean over the past 2.200 years. *Nature*, 416: 729-733.
- Forchhammer, M.C., Post, E. & Stenseth, N.C. (2002). North Atlantic Oscillation timing of long- and short-distance migration. *Journal of Animal Ecology*, 71: 1002–1014.
- Fredj, G., Bellan-Santini, D. & Meinardi, M. (1992). Etat de connaissances sur la faune marine méditerranéenne. *Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco*, 9: 133-145.
- Froese, R. (2006). Cube Law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22: 241-253.
- Ganzedo, U., Polanco-Martínez, J.M., Caballero-Alfonso, A.M., Faria, S.H., Li, J. & Castro-Hernández, J.J. (2016). Climate effects on historic bluefin tuna captures in the Gibraltar Strait and Western Mediterranean. *Journal of Marine Systems*, 158: 84-92.
- García, A., Alemany, F., Rodríguez, J. M., Cortes, D., Corregidor, F., & Ceballos, E. (2005). Distribution and abundance of bullet tuna larvae (*Auxis rochei*) off the Balearic Sea during the 2003-2005 spawning seasons. *ICCAT Meeting on Small Tunas Fisheries*.
- García Diez, C. & Remiro Perlado, J. P. (2014). Impactos del Cambio Climático sobre la Acuicultura en España. *Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*. Madrid, 38.
- Gaertner, D. & Dreyfus, L. (2004). Analysis of non-linear relationships between catch per unit effort and abundance in a tuna purse-seine fishery simulated with artificial neural networks. *ICES Journal of Marine Science*, 61: 812-820.
- Gaykov, V.Z. & Bokhanov, D.V. (2008). The biological characteristics of Atlantic black skipjack (*Euthynnus alletteratus*) of the eastern Atlantic Ocean. *Collective Volume Scientific Papers ICCAT*, 62(5): 1610-1628.
- Genç, Y., Başçınar, N.S. & Dağtekin, M. (2019). Feeding habits during migration of the Atlantic bonito *Sarda sarda* (Bloch, 1793) to the Black Sea. *Marine Biology Research*, 15(2): 125-136.

- Goñi, N. & Arrizabalaga, H. (2005). Analysis of juvenile North Atlantic Albacore (*Thunnus alalunga*) catch per unit effort by surface gears in relation to environmental variables. *Journal of Marine Science*, 62:1475-1482.
- Graham, C.T. & Harrold, C. (2009). Implications of climate change for the fishes of the British Isles. *Journal of Fisheries Biology*, 74: 1143-1205.
- Gutiérrez-Estrada, J.C., Sanz-Fernández, V., Pulido-Calvo, I. & Gil-Herrera, J. (2020). Improving the interpretability of the effects of environmental factor son abundance of fish stocks. *Ecological Indicators*, 117: 106533. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106533>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). IPCC Fifth Assessment Report. Climate change 2014: synthesis report for policymakers. 151 pp.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T. & Ryan, P.D. (2001). PAST. Paleontological software package for education and data analysis. *Paleontología Electrónica*, 4: 9pp.
- Hamza, Y.G., Ameta, S.K., Tukur, A. & Usman, A. (2020). Overview on Evidence and Reality of Climate Change. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 14(7): 17-26.
- Hauschildt, M., Rinna, J. & Rullkötter, J. (1999). Molecular indicators of the supply of marine and terrigenous organic matter to a Pleistocene organic-matter-rich layer in the Alboran Basin (Western Mediterranean Sea). *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 161: 391-400.
- Hefferman, J.B., Soranno, P.A., Angilletta, M.J., Buckley, L.B., Gruner, D.S., Tim, H.K., Kellner, J.R., Kominoski, J.S., Rocha, A.V., Xiao, J., Harms, T.K., Goring, S.J., Koenig, L.E., McDowell, W.H., Powell, H., Richardson, A.D., Stow, C.A., Vargas, R. & Weathers, K.C. (2014). Macrosystems ecology: understanding ecological patterns and processes at continental scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12: 5-14.
- Hilborn, R., Amoroso, R.O., Anderson, C.M., Baum, J.K., Branch, T.A., Costello, C., De Moor, C.L., Faraj, A., Hively, D., Jensen, O.P., Kurota, H., Little, L.R., Mace, P., McClanahan, T., Melnychuk, C., Minto, C., Osio, G.C., Parma, A.M., Pons, M., Segurado, S., Szuwalski, C.S., Wilson, J.R. & Ye, Y. (2020). Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(4): 2218-2224.
- Hossain, Y., Rahman, M. & Abdallah, E.M. (2012). Relationships between body size, weight, condition and fecundity of the threatened fish *Puntius ticto* (Hamilton, 1822) in the Ganges River, Northwestern Bangladesh. *Sains Malaysiana*, 41(7): 803–814.
- Hurrell, J.W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269: 676–679.
- Johnson, A.G. (1983). Comparison of dorsal spines and vertebrae as ageing structures for little tunny, *Euthynnus alletteratus*, from the Northeast Gulf of Mexico. U. S Department of Commerce, NOAA Technical Report *NMFS*, 8: 111-115.

- Kahraman, A.E. (1999). Age and growth of Atlantic black skipjack (*Euthynnus alletteratus* Raf. 1810) in Turkish waters. PhD Thesis. University of Istanbul.
- Kahraman, A.E., Göktürk, D., Bozkurt, E.R., Akayli, T. & Karakulak, F. S. (2010). Some reproductive aspects of female bullet tuna, *Auxis rochei* (Risso), from the Turkish Mediterranean coasts. *African Journal of Biotechnology*, 9: 6813-6818.
- Katz, R.W 2002. Sir Gilbert Walker and a connection between El niño and Statistics. *Statistical Science*, 17: 97-112.
- Kell, L.T., Fromentin, J.M., Ortíz de Zárate, V. & Arrizabalaga, H. (2005). Can we detect the effects of environmental variations on fish populations through VPA outputs? The North Atlantic Albacore Case. *Collective Volume Scientific Papers ICCAT*, 58: 1256-1264.
- Keller, C.F. (2007). An update to global warming: the balance of evidence and its policy implications. *The Scientific World Journal*, 7: 381-399.
- Krom, M. D., Kress, N., Brenner, S. & Gorden, L.I. (1991). Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. *Limnology and Oceanography*, 36: 424-432.
- Landau, R. (1965). Determination of age and growth rate in *Euthynnus alletteratus* and *Euthynnus affinis* using vertebrae. *Rapports et Procès Verbaux des Reunions Publié par les Soins de Jean Furnesting Commission Internationale pour L'Exploration Scientifique de la Mediterranée*, 18(2): 241-243.
- Le Cren, E.D. (1951). The length-weight relationships and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*). *Journal of Animal Ecology*, 20: 201-219.
- Lehodey, P., Bertignac, M., Hampton, J., Lewis, A. & Picaut, J. (1997). El Niño Southern Oscillation and tuna in the Western Pacific. *Nature*, 389: 715-718.
- Luebbers, R. A. (1978). Meals and menus: A study of change in prehistoric coastal settlements in south Australia. PhD Thesis. Australian National University. Canberra.
- Macías, D., Gómez-Vives, M.J. & De la Serna, J.M. (2005a). Some reproductive aspects of the bullet tuna (*Auxis rochei*) from the southwestern Spanish Mediterranean. *Collective volume of Scientific Papers ICCAT*, 58: 484-495.
- Macías, D., Gómez-Vives, M.J., García, S. & Ortíz de Urbina, J.M. (2005b). Reproductive characteristics of Atlantic bonito (*Sarda sarda*) from the south western Spanish Mediterranean. *Collective volume of Scientific Papers ICCAT*, 58(2): 470-483.
- Macías, D., Saber, S., Osuna, A.M., Cruz-Castán, R.M., Gómez-Vives, M.J. & Báez, J.C. (2014). First record of intersexuality in *Euthynnus alletteratus* in the Mediterranean Sea: histological description. *Marine Biodiversity*, 7, e3.
- Madden, R.A. & Julian, P.R. (1971). Detection of a 40-50 days oscillation in the zonal wind in the tropical pacific. *Journal of Atmospheric Sciences*, 28(5): 702-708.
- Madden, R.A. & Julian, P.R. (1972). Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40–50 Day Period. *Journal of Atmospheric Sciences*, 29(6): 1109-1123.

- Mazaris, A.D., Kallimanis, A.S., Sgardelis, S.P., & Pantis, J.D. (2008). Do long-term changes in sea surface temperature at the breeding areas affect the breeding dates and reproduction performance of Mediterranean loggerhead turtles? Implications for climate change. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 364: 219-226.
- Mejuto, J. (2003). Recruit indices of the North Atlantic Swordfish (*Xiphias gladius*) and their possible link to atmospheric and oceanographic indicators during the 1982-2000 periods. *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 55: 1506-1515.
- Mele, S., Pennino, M.G., Piras, M.C., Macías, D., Gómez-Vives, M.J., Alemany, F., Montero, F.E., Garippa, G. & Merella, P. (2016). Ecology of the Atlantic black skipjack *Euthynnus alletteratus* (Osteichthyes: Scombridae) in the Western Mediterranean Sea inferred by parasitological analysis. *Parasitology*, 143(10): 1330-1339.
- Mele, S., Saber, S., Gómez-Vives, M.J., Garippa, G., Alemany, F., Macías, D. & Merella, P. (2014). Metazoan parasites in the head region of the bullet tuna *Auxis rochei* (Osteichthyes: Scombridae) from the Western Mediterranean Sea. *Journal of Helminthology*, 97: 219-234.
- Menezes, M.F. & Aragão, L.P. (1980). Aspectos da biometria e biologia do bonito, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque), do Estado do Ceará, Brasil. *Arquivos de Ciências do Mar*, 17(2): 95-100.
- Mercado, J.M., Ramirez, T., Cortes, D., Sebastián, M. & Vargas-Yañez, M. (2005). Seasonal and interannual variability of the phytoplankton communities in an upwelling area of the Alboran Sea (SW Mediterranean Sea). *Scientia Marina*, 69: 451-465.
- Mostarda, E., Campo, D., Castriota, L., Esposito, V., Scarabello, M. P. & Andaloro, F. (2007). Feeding habits of the bullet tuna *Auxis rochei* in the southern Tyrrhenian Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 87: 1007-1012.
- Moullec, F., Velez, L., Verley, L., Barrier, N., Ulses, C., Carbonara, P., Esteban, A., Follesa, C., Gristina, M., Jadaud, A., Ligas, A., Lopez-Diaz, E., Maiorano, P., Peristeraki, P., Spedicato, M.T., Thasitis, I., Valls, M., Guilhaumon, F. & Shin, Y.J. (2019). Catching the big picture of the Mediterranean Sea biodiversity with an end-to-end model of climate and fishing impacts. *Progress in Oceanography*, 178: doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102179.
- Mozsár, A., Boros, G., Sály, P., Antal, L. & Nagy, S.A. (2015). Relationship between Fulton's condition factor and proximate body composition in three freshwater fish species. *Journal of Applied Ichthyology*, 31(2): 315–320.
- Mullan, C., Guillotreau, P., Galbraith, E.D., Fortilus, J., Chaboud, C., Bopp, L., Aumont, O. & Kaplan, D. (2017). Exploring future scenarios for the global supply chain of tuna. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 140: 251-267.
- Muñoz-Expósito, P., Macías, D., Ortiz de Urbina, J.M., García-Barcelona, S., Gómez, M.J. & Báez, J.C. (2017). North Atlantic Oscillation affects the physical condition of migrating bullet tuna *Auxis rochei* (Risso, 1810) from the western Mediterranean Sea. *Fisheries Research*, 194: 84-88.

- McCauley, D.J., Pinsky, M.L., Palumbi, S.R., Estes, J.A., Joyce, F.H. & Warner, R.R. (2015). Marine defaunation: Animal loss in the global ocean. *Science*, 347: (6219).
- Myers, R. A. & Worm, B. (2003). Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature*, 423: 280-283.
- Mysterud, A., Stenseth, N.C., Yoccoz, N.G., Ottersen, G. & Langvatn, R. (2003). The response of terrestrial ecosystems to climate variability associated with the north atlantic oscillation. *Geophysical Monograph*, 134: 234-262.
- Neves dos Santos, M. & García, A. (2006). Observations on the catches of small tunas from a trap off the Algarve (southern Portugal). *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 59(3): 802-812.
- Newman, M., Alexander, M.A., Ault, T.R., Cobb, K.M., Deser, C., Di Lorenzo, E., Mantua, N.J., Miller, A.J., Shoshiro, M., Nakamura, H., Schneider, N., Vimont, D.J., Phillips, A.S., Scott, J.D. & Smith, C.A. (2016). The Pacific Decadal Oscillation, Revisited. *American Meteorological Society*, 29(12):4399-4427.
- Notarbartolo di Sciara, G., Agardy, T., Hyrenbach, D., Scovazzi, T. & Van Klaveren, P. (2008). The Pelagos Sanctuary for the Mediterranean marine mammals. *Aquatic conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18: 367-391.
- Ñiquen, M. & Bouchon, M. (2004). Impact of El niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Oceanography of Eastern Pacific: Volume III*, 61: 563-574.
- Olson, R.J. (1982). Feeding and energetics studies of yellowfin tuna; food for ecological thought. *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 17: 444-457.
- Oray, I.K., Karakulak, F.S. & Zengin, M. (2004). Report on the turkish bonito (*Sarda sarda*) fishery in 2000/2001. *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 56(2): 784-788.
- Oreskes, N. (2004). The scientific consensus on climate change. *Science*, 306. 1686 pp.
- Ottersen, G., Planque, B., Belgrano, A., Post, E., Reid, P.C. & Stenseth, N.C. (2001). Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia*, 128: 1-14.
- Pauly, D. (1980). On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. *ICES Journal of Marine Science*, 39: 175-192.
- Parrilla, G & Kinder, T.H. (1987). Oceanografía física del Mar de Alborán. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 4: 133-165.
- Petukhova, N.G. (2020). Preliminary assessment of the stock status of Atlantic bonito (*Sarda sarda*) in the northeastern part of the Atlantic Ocean. *Journal of Ichthyology*, 60: 732-741.
- Piccineti, C., Piccineti, M.G. & Soro, S. (1996). Larve di Tunnidi in the Mediterranean. *Biologia Marina Mediterranea*, 3: 303-309.
- Piroddi, C., Colloca, F. & Tsikliras, A.C. (2020). The living marine resources in the Mediterranean Sea Large Marine Ecosystem. *Environmental Development*, 36: 100555. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100555>.

- Reglero, P., Blanco, E., Alemany, F., Ferrá, C., Álvarez-Berasategui, D., Ortega, A., De la Gándara, F., Aparicio-Gonzalez, A. & Folkvord, A. (2018a). Vertical distribution of Atlantic bluefin tuna *Thunnus thynnus* and bonito *Sarda* larvae is related to temperature preference. *Marine Ecology Progress Series*, 594: 231-243.
- Reglero, P., Ciannelli, L., Álvarez-Berastegui, D., Balbín, R., López-Jurado, J.L. & Alemany, F. (2012). Geographically and environmentally driven spawning distributions of tuna species in the western Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 463: 273–284.
- Reglero, P., Ortega, A., Balbín, R., Abascal, F.J., Medina, A., Blanco, E., de la Gándara, F., Álvarez-Berasategui, D., Hidalgo, M., Rasmuson, L., Alemany, F. & Fiksen, Ø. (2018b). Atlantic bluefin tuna spawn at suboptimal temperatures for their offspring. *Proceedings of the Royal Society B*, 285: 20171405. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1405>.
- Rey, J.C., Alot, E. & Ramos, A. (1984). Sinopsis biológica del bonito *Sarda* (Bloch) del Mediterráneo y Atlántico Este. *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 20(2): 469-502.
- Ribera, M.A., Gómez-Garreta, A., Gallardo, T., Cormaci, M., Furnari, G. & Giaccone, G. (1992). Check-list of Mediterranean seaweeds I. Fucophyceae (Warming 1884). *Botánica Marina*, 35: 190-130.
- Robinson, R.A., Crick, H.Q.P., Learmonth, J.A., Maclean, I.M.D., Thomas, C.D., Bairlein, F., Forchhammer, M.C., Francis, C. M., Gill, J.A., Godley, B.J., Harwood, J., Hays, G.C., Huntley, B., Hutson, A.M., Pierce, G.J., Rehfishch, M.M., Sims, D.W., Santos, M.B., Sparks, T.H., Stroud, D.A. & Visser, M.E. (2009). Travelling through a warming world: climate change and migratory species. *Endangered Species Research* 7: 87-99.
- Rodríguez, J. (1982). Oceanografía del mar Mediterráneo. Pirámide, Barcelona. pp. 174.
- Rodríguez-Roda, J. (1966). Estudio de la bacoreta, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque), bonito, *Sarda sarda* (Bloch) y melva *Auxis thazard* (Lacepede), capturados por las almadrabas españolas. *Investigaciones Pesqueras*, 30: 247-292.
- Roff, D.R. (1983). An allocation model of growth and reproduction in fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(9): 1395–1404.
- Rogers, J.C. (1997). North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe. *Journal of Climate*, 10: 1635-1645.
- Sabatés, A. & Recasens, L. (2001). Seasonal distribution and spawning of small tunas (*Auxis rochei* and *Sarda sarda*) in the northwestern Mediterranean. *Scientia Marina*, 65: 95–100.
- Saber, S., Macías, D., Ortiz de Urbina, J.M. & Kjesbu, O.S. (2016). Contrasting batch fecundity estimates of albacore (*Thunnus alalunga*), an indeterminate spawner, by different laboratory techniques. *Fisheries Research*, 176: 76–85.
- Saber, S., Ortiz de Urbina, J., Lino, P.G., Gómez-Vives, M.J., Coelho, R, Muñoz-Lechuga, R. & Macías, D. (2018). Biological aspects of little tunny *Euthynnus alletteratus* from Spanish and Portuguese waters. *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 75(1): 95-110.

- Salihoglu, B., Arkin, S.S., Akoglu E. & Fach. B.A. (2017). Evolution of the Black Sea Fish Stocks under Changing environmental and Climatic Conditions. *Frontiers in Marine Science*, 4: 339. doi: 10.3389/fmars.2017.00339.
- Sobrino, J.A., Julien, Y. & García-Monteiro, S. (2020). Surface Temperature of the Planet Earth from Satellite Data. *Remote Sensing*, 12(2): 218-227.
- Southall, E.J., Sims, D.W., Witt, M.J. & Metcalfe, J.D. (2006). Seasonal space-use estimates of basking sharks in relation to protection and political-economic zones in the NE Atlantic. *Biology and Conservation*, 132: 33-39.
- Sokal, R.R. & Rohlf, F.J. (1995). *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. Freeman, New York.
- Sutton, S. G., Bult, T.P. & Haedrich, R.L. (2000), Relationships among Fat Weight, Body Weight, Water Weight, and Condition Factors in Wild Atlantic Salmon Parr. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129 (2): 527-538.
- Schaefer, K.M. (2001). Reproductive biology of tunas. *Tuna physiology, Ecology and Evolution*, 19, 225pp.
- Smederevac-Lalic, M. & Regner, S. (2019). Analysis of long term landings of some economically important pelagic species of the Mediterranean Sea. *Studia Marina*, 32(2): 23-32.
- Stenseth, N.C. & Mysterud, A. (2005). Weather packages: finding the right scale and composition of climate in ecology. *Journal of Animal Ecology*, 74: 1195-1198.
- Stenseth, N.C., Ottersen, G., Hurrell, J.W., Mysterud, A., Lima, M., Chan, K.S., Yoccoz, N.G. & Adlandsvik, B. (2003). Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Niño Southern Oscillation and beyond. *Proceedings: Biological Sciences*, 270: 2087-2096.
- Stephenson, D.B., Wanner, H. Bronnimann, S. & Luterbacher, J. (2003). The history of Scientific Research on the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Monograph Series*, 34: 37-50.
- Straile, D., Livingstone, D.M., Weyhenmeyer, G.A. & Glen-George, D. (2003). The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the north atlantic oscillation. *The North Atlantic Oscillation - climatic significance and environmental impact*. American Geophysical Union, pp. 263-279.
- Straile, D. & Stenseth, N.C. (2007). The North Atlantic Oscillation and ecology: links between historical time-series, and lessons regarding future climate warming. *Climate Research*, 34: 259-262.
- Tidd, A., Blanchard, J.L., Kell, L. & Watson, R.A. (2018). Predicting global tuna vulnerabilities with spatial, economic, biological and climatic considerations. *Nature*, 8: 10572-10584.
- Thieltges, D.W., Strasser, M., Van Beusekom, J.E.E. & Reise, K. (2004). Too cold to prosper-winter mortality prevents population increase of the introduced American slipper limpet *Crepidula fornicata* in northern Europe. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 311: 375-391.
- Trigo, R.M., Osborn, T.J. & Corte-Real, J.M. (2002). The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms. *Climate Research*, 20: 9-17.

- Tsiklirasa, A.C., Licandro, P., Pardalou, A., McQuinn, I.H., Gröger, J.P. & Alheit, J. (2019). Synchronization of Mediterranean pelagic populations with the North Atlantic climate variability. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 159: 143-151.
- Turan, C., Ivanova, P. & Soldo, A. (2016). Population structuring and migration pathway of Atlantic bonito *Sarda sarda*. *Natural and Engineering Sciences*, 1(3): 56-65.
- Valeiras, X. & Abad, E. (2006a). Bullet Tuna: ICCAT Manual, *International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna*.
- Valeiras, X. & Abad, E. (2006b). Bacoreta: ICCAT Manual, *International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna*.
- Valeiras, X. & Abad, E. (2006c). Bonito Atlántico: ICCAT Manual, *International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna*.
- Valeiras, J., Abad, E. (2007). In: Small tuna: ICCAT Field Manual, *International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna*.
- Valeiras, X., Macías, D., Gómez, M.J., Lema, L., García-Barcelona, S., Ortiz de Urbina, J.M. & De la Serna, J.M. (2008). Age and growth of bullet tuna (*Auxis rochei*) in the western Mediterranean Sea. *Collective Volume of Scientific Papers, ICCAT*, 62: 1629-1637.
- Veski, S., Heinsalu, A., Klassen, V., Kriiska, A., Lougas, L., Poska, A. & Saluär, U. (2005). Early Holocene coastal settlements and paleoenvironment on the shore of the Baltic Sea at Pärnu, southwestern Estonia. *Quaternary International*, 130: 75-85.
- Vicente-Serrano, S. & Trigo, R.M. (eds). Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region. *Advances in Global Change Research*.
- Vicente-Serrano, S.M., Trigo, R.M., Lopez-Moreno, J.I., Liberato, M. L. R., Lorenzo-Lacruz, J., Beguería, S., Moran-Tejeda, E. & El Kenawy, A. (2011). Extreme winter precipitation in the Iberian Peninsula in 2010: anomalies, driving mechanisms and future projections. *Climate Research*, 46: 51-65.
- Visbeck, M.H., Hurrell, J.W., Polvani, L. & Cullen, H.M. (2001). The North Atlantic oscillation: past, present, and future. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98: 12876–12877.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J. & Melillo, J.M. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 277: 494-499.
- Von Bertalanffy, L (1938). A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws II). *Human Biology*, 10: 181-213.
- Walker, G.T. (1923). Correlation in seasonal variations of weather VIII. A preliminary study of world weather. *Memoirs of the Indian Meteorological Department* 24(4). 75-131.
- Wang, J., Chen, X., Staples, Y. & Chen, Y. (2018). A stock assessment for *Illex argentinus* in Southwest Atlantic using an environmentally dependent surplus production model. *Acta Oceanologica Sinica*, 37: 94-101.

- Würtz, M. (2010). Mediterranean Pelagic Habitat: Oceanographic and Biological Processes, an Overview. Gland (Switzerland) and Malaga, Spain. *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources*. 88 pp.
- Yatsu, A., Watanabe, T., Ishida, M., Sugisaki, H. & Jacobson, L.D. (2005). Environmental effects on recruitment and productivity of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and chubmackerel *Scomber Japonicus* with recommendations for management. *Fisheries Oceanography*, 14: 263-278.
- Zengin, M., Karakulak, F.S. & Oray, I.K. (2005). Investigations on bonitos (*Sarda sarda*, Bloch 1973) on the southern Black Sea coast of turkey. *Collective volume of Scientific Papers ICCAT*, 58(2): 160-174.
- Zudaire, I., Murua, H., Grande, M. & Bodin, N. (2013). Reproductive potential of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western. *Indian Ocean Fisheries Bulletin*, 111: 252–264.

## ANEXOS



**Anexo I:** Muñoz-Expósito, P., Macías, D., Ortiz de Urbina, J.M., García-Barcelona, S., Gómez, M.J., Báez, J.C. (2017). North Atlantic Oscillation affects the physical condition of migrating bullet tuna *Auxis rochei* (Risso, 1810) from the western Mediterranean Sea. *Fisheries Research*, 194: 84-88

Muñoz-Expósito, P., Macías, D., Ortiz de Urbina, J.M., García-Barcelona, S., Gómez, M.J. & Báez, J.C. (2017). North Atlantic Oscillation affects the physical condition of migrating bullet tuna *Auxis rochei* (Risso, 1810) from the western Mediterranean Sea. *Fisheries Research*, 194: 84-88.

<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.05.016>

Resumen:

Las oscilaciones climáticas ejercen un control directo sobre el entorno en el que se producen y, por ello, pueden influir en la condición física de especies marinas migratorias, como el atún, como así lo atestiguan otros estudios realizados previamente en esta misma. Este estudio tiene por objetivo principal establecer la asociación existente entre los efectos potenciales de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) en el estado de aptitud de la melva (*Auxis rochei*) durante las migraciones que esta especie realiza hacia el mar Mediterráneo español. Se analizaron para ello un total de 2357 ejemplares capturados a lo largo la costa mediterránea española. A continuación, se obtuvieron su talla y peso correspondientes. Tras esto, se utilizó una prueba no paramétrica de Spearman para establecer las correlaciones entre los índices de oscilación atmosférica y dos índices de condición física calculados a través de los parámetros de regresión talla-peso anuales. Los resultados sugieren que, en general, las fases positivas de la NAO índice mejorar la condición física de los peces que migran a las zonas de desove en el Mar Mediterráneo. Estos los resultados podrían explicarse por cambios en los vientos dominantes, lo que podría favorecer la migración previa al desove, y por la disponibilidad de nutrientes, lo que garantiza su recuperación después del período de desove.

**Anexo II:** Báez, J.C., Muñoz-Expósito, P., Gómez-Vives, M.J., Godoy-Garrido, D. & Macías, D. (2019). NAO affects the reproductive potential of small tuna migrating from the Mediterranean Sea. *Fisheries Research* 216: 41-46.

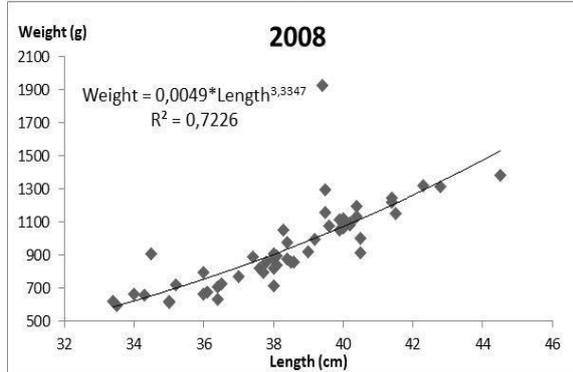
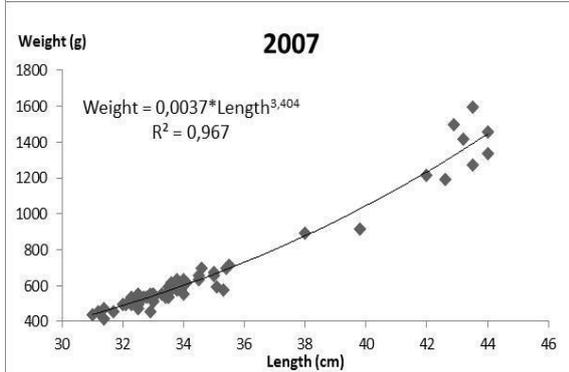
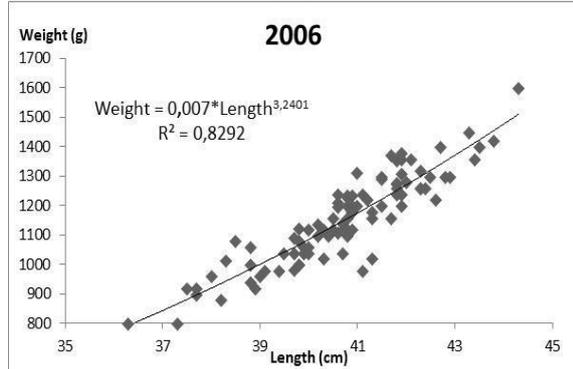
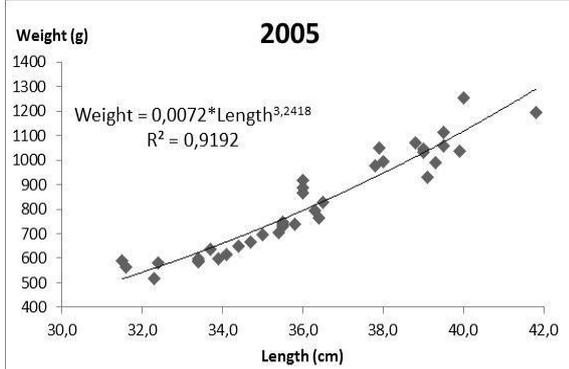
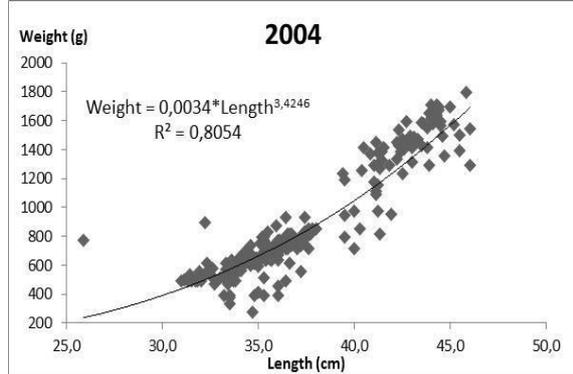
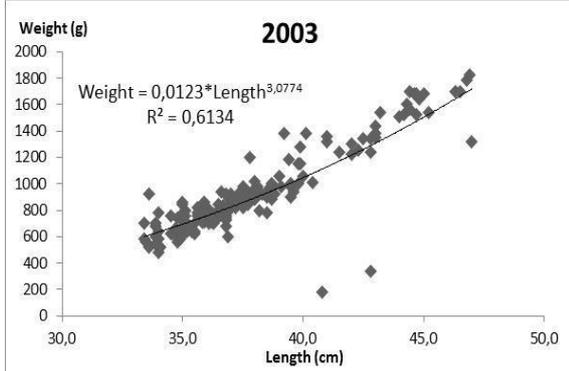
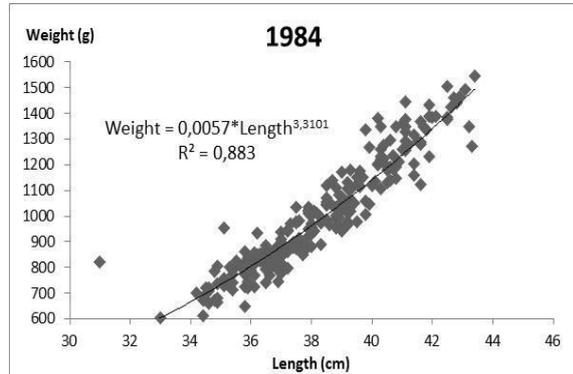
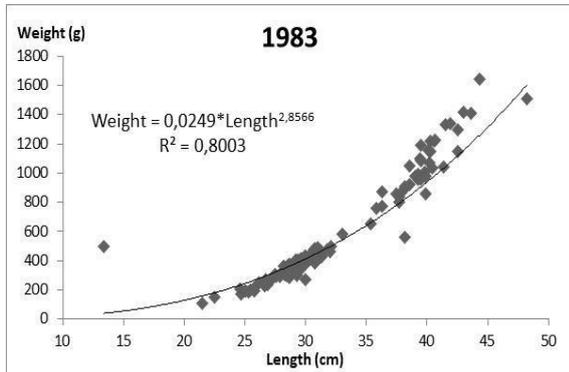
Báez, J.C., Muñoz-Expósito, P., Gómez-Vives, M.J., Godoy-Garrido, D. & Macías, D. (2019). NAO affects the reproductive potential of small tuna migrating from the Mediterranean Sea. *Fisheries Research*, 216: 41-46.

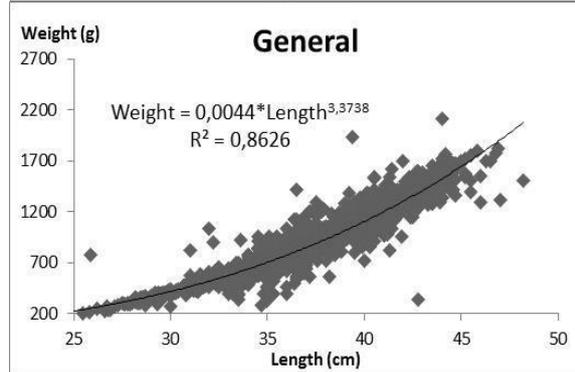
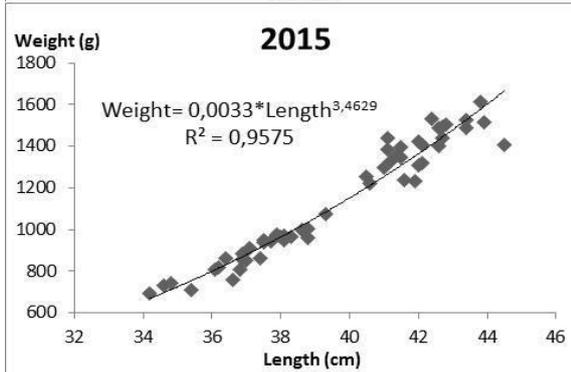
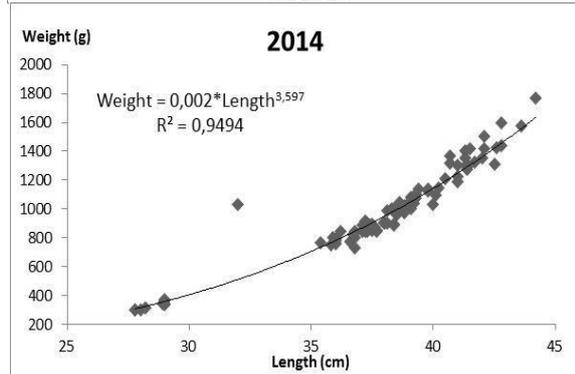
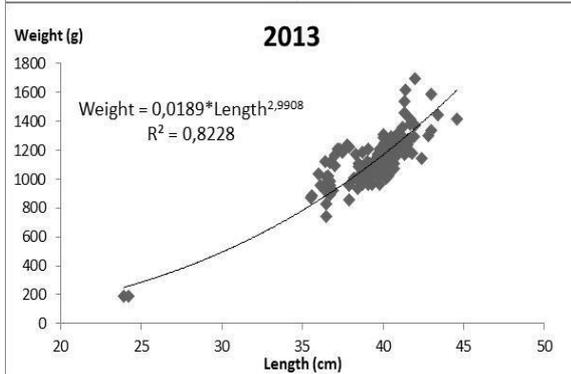
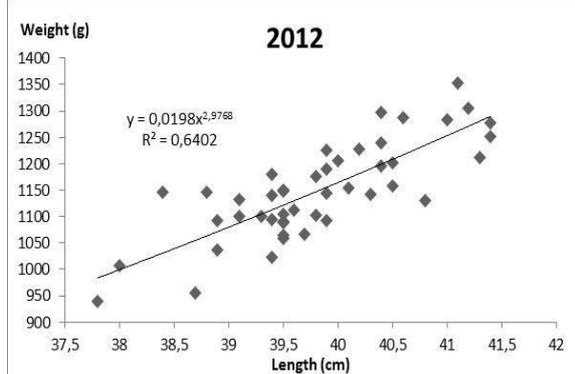
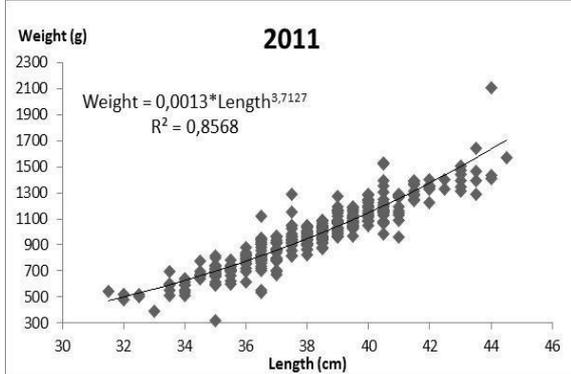
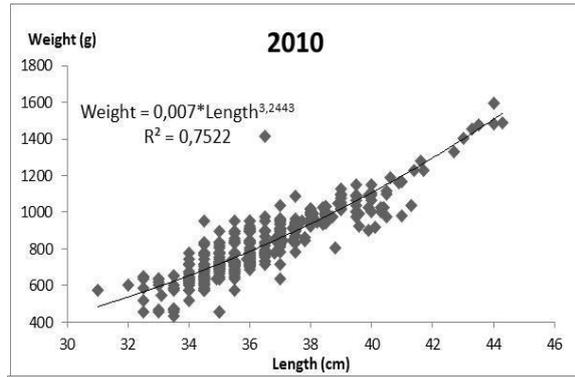
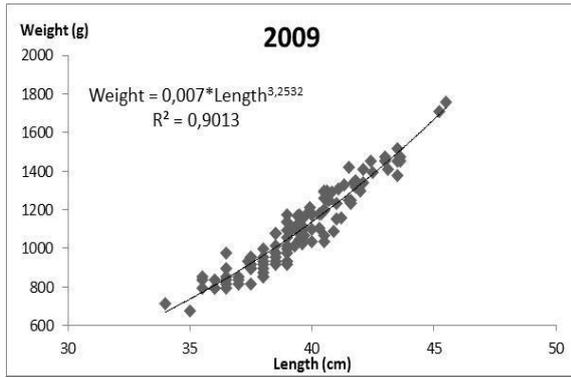
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2019.03.023>

#### Resumen:

Varios estudios han confirmado que la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) tiene una influencia directa sobre diversos aspectos biológicos en los túnidos, tales como abundancia, capturabilidad, reclutamiento y condición física (LC), especialmente durante la temporada de invierno (NAOw). Sin embargo, su efecto sobre la biología reproductiva ha sido escasamente investigado. Por lo tanto, el principal objetivo de este estudio es investigar el efecto de la NAO en el índice de condición física y el índice gonadosomático (GSI) de las tres especies pequeñas de túnidos migratorios más explotadas comercialmente (es decir, bacoreta, melva y bonito) en el mar Mediterráneo. Se encontró una correlación directa positiva entre la bacoreta y el bonito del Atlántico y los índices gonadosomático y de condición física. Además, se demostró que existe una fuerte correlación entre NAOw y los índices gonadosomático y LC, lo que podría conducir a una mayor inversión reproductiva en el crecimiento de las gónadas antes de la temporada de desove. Por el contrario, la melva tenía un índice LC bajo durante el crecimiento máximo de las gónadas y se vieron menos afectados por las oscilaciones NAOw. En el caso de la melva, estos resultados podrían explicarse por un período reproductivo más largo que conduciría a un consumo de grasa más rápido antes de la período reproductivo que en las otras especies y una mayor dependencia de las condiciones ambientales circundantes para el éxito reproductivo.

**Anexo III:** Relaciones talla-peso obtenidas antes del análisis del conjunto de datos (N=2381), previo a la eliminación de los valores atípicos.





**Anexo IV:** Factores de condición promedio interanuales y coeficientes de regresión obtenidos para *A. rochei* previamente a la depuración de la base de datos.

<b>Años/Parámetros</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>R2</b>	<b>K-mean</b>	<b>LeCren</b>
<b>General (N=2381)</b>	0.0044	3.37	0.8626	1.682	1.013
<b>1983 (N=142)</b>	0.0249	2.85	0.8003	1.554	1.069
<b>1984 (N=252)</b>	0.0057	3.31	0.883	1.732	1.007
<b>2003 (N=177)</b>	0.0123	3.07	0.6134	1.629	1.014
<b>2004 (N=235)</b>	0.0034	3.42	0.8054	1.574	1.022
<b>2005 (N=37)</b>	0.0072	3.24	0.9192	1.713	0.997
<b>2006 (N=94)</b>	0.007	3.24	0.8292	1.704	1.000
<b>2007 (N=124)</b>	0.0037	3.4	0.967	1.547	0.996
<b>2008 (N=53)</b>	0.0049	3.33	0.7226	1.659	1.005
<b>2009 (N=115)</b>	0.007	3.23	0.9013	1.775	1.080
<b>2010 (N=449)</b>	0.007	3.24	0.7522	1.681	1.008
<b>2011 (N=361)</b>	0.0013	3.71	0.8568	1.739	0.999
<b>2012 (N=50)</b>	0.0214	2.95	0.7335	1.817	1.002
<b>2013 (N=152)</b>	0.0189	2.99	0.8228	1.827	1.0025
<b>2014 (N=88)</b>	0.002	3.6	0.9464	1.735	0.991
<b>2015 (N=52)</b>	0.0033	3.46	0.9575	1.792	1.0007

**Anexo V:** Valores interanuales para la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y las modificaciones propuestas.

<b>Año</b>	<b>NAO</b>	<b>NAOw</b>	<b>NAOpy</b>	<b>NAOpw</b>
1983	0.31	0.775	0.43	-0.0567
1984	0.2475	0.3283	0.31	0.775
2003	0.0975	-0.3833	0.0392	0.2983
2004	0.2425	0.1383	0.0975	-0.3833
2005	-0.2675	0.0783	0.2425	0.1383
2006	-0.2075	-0.375	-0.2675	0.0783
2007	0.1733	0.1217	-0.2075	-0.375
2008	-0.3783	0.5117	0.1733	0.1217
2009	-0.2433	-0.0033	-0.3783	0.5117
2010	-1.1525	-1.1583	-0.2433	-0.0033
2011	0.2933	-0.6617	-1.1525	-1.1583
2012	-0.4558	1.1883	0.2933	-0.6617
2013	0.21	-0.6967	-0.4558	1.1883
2014	0.1867	0.5	0.21	-0.6967
2015	0.3966	1.1900	0.1867	0.3966
2016	-0.1175	0.508	0.3966	1.1900

**Anexo VI:** Lista de trabajos originados a raíz de este estudio.

- 8<sup>th</sup> Simposio MIA 2015, Málaga, del 21 al 23 de Septiembre de 2015



## **Análisis preliminar del efecto de las oscilaciones climáticas sobre la condición física de la melva (*Auxis rochei*) post-reproductora en el Mar de Alborán**

### ***Preliminary analysis of the effect of climate oscillations on the physical condition of the post-spawning bullet tuna (*Auxis rochei*) in the Alboran Sea***

**P. Muñoz (1), J.C. Báez (1), E. Ceballos (1), M<sup>a</sup>.J. Meléndez (1), E. Alot (1) & D. Macías (1)**

(1) Instituto Español de Oceanografía, C.O. Málaga, Puerto Pesquero s/n, 29640, Fuengirola, Málaga, España. E-mail: carlos.j.rubio.86@gmail.com

**Abstract:** The Mediterranean Sea is considered by several authors as a hot-spot of Climate Oscillation, such as the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Arctic Oscillation (AO). However, information about the effect of the climate oscillations on the fitness of the species is still scarce. In this context, bullet tuna is an important migratory species with a substantial socio-economical value, whose fisheries might be affected by the effect of certain climatological conditions. In fact, these atmospheric oscillations trigger a chain of hydrodynamic events, leading a change on the timing, destinations, and success of the migratory species in their search for spawning grounds. This study relies on the hypothesis of a correlation between the physical condition of the post-spawning bullet tuna and climate oscillation indexes. For that purpose, 151 individuals of bullet tuna, *Auxis rochei*, were collected in the traps of Ceuta (Alboran Sea) during three different years, (1983, 1984 and 2014). The physical condition index was calculated, and later statistically correlated with the climate oscillation indexes proposed. Significant differences were found between the physical condition of *A. rochei* and the average accumulated NAO index. Moreover, for age class 3+ we obtained a significant correlation with atmospheric oscillations.

**Key words:** Climate Oscillation, Migratory species, Bullet tuna, Condition factor, Alboran Sea.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El mar de Alborán es considerado una importante zona de paso para gran número de especies en su migración hacia sus áreas de puesta en el Mediterráneo. Muchas de estas especies tienen importancia pesquera por su valor socioeconómico. Algunos ejemplos de este hecho son especies como el atún rojo, *Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758) (Báez *et al.* 2014), la bacoreta, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque, 1810) (Hajje *et al.* 2010), el bonito, *Sarda sarda* (Bloch, 1793) (Sabatés & Recasens, 2001), o la melva, *Auxis rochei* (Risso, 1810; Sabatés & Recasens, 2001). Diversos autores coinciden en el hecho de que estas especies migradoras pueden alterar su fenología en respuesta a las oscilaciones climáticas (Báez *et al.* 2014).

La melva (*A. rochei*) es una de las especies de menor tamaño dentro de la familia Scombridae, con una longitud máxima en torno a 40 centímetros y con hábitos de vida gregarios. La formación de cardúmenes hace a la especie altamente susceptible a determinados artes de pesca como el cerco o las almadrabas (Valeiras & Abad, 2006). Presenta un ciclo de vida que comprende fases en el Mediterráneo y en el Atlántico. Durante la primavera y verano se adentra en el Mediterráneo para la puesta, para en otoño volver a cruzar el estrecho hacia sus zonas de invernada. Durante su migración de retorno post-reproductor hacia el océano Atlántico son capturados en la almadraba de Ceuta (Sabatés & Recasens, 2001).

La Oscilación del Atlántico Norte NAO (de sus siglas en inglés, *North Atlantic Oscillation*) y la oscilación ártica AO (de sus siglas en inglés, *Arctic Oscillation*), son conocidas por ser tener una gran influencia sobre las condiciones climáticas en el Mediterráneo y el Margen Ibérico Atlántico. La NAO resume los cambios en la diferencia de presiones atmosféricas entre las bajas presiones de Islandia y las altas presiones de las Azores, mientras que la AO hace referencia a la intensidad del vórtice polar. Desde que la AO fue definida, ha existido un fuerte debate sobre su identidad física. Así, en la actualidad se discute si es un reflejo de la NAO, o si la AO y la NAO son dos efectos de una misma causa común en la troposfera (revisado en Báez *et al.* 2013b).



Teniendo en cuenta las anteriores premisas, el presente estudio tiene como objetivo la evaluación de la condición física de *la* melva durante su migración post-reproductora y la influencia que los índices climáticos NAO y AO podrían tener sobre la misma.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio

El presente estudio se localiza en el mar de Alborán, la cuenca más occidental del mar Mediterráneo. El mar de Alborán, debido a sus especiales características oceanográficas y topográficas ha sido catalogado por diversos autores como una de las zonas calientes en relación al cambio climático del planeta, y donde las oscilaciones climáticas tienen mayor influencia (Vicente-Serrano & Trigo, 2011). En esta zona un complejo sistema de corrientes da lugar a afloramientos de aguas profundas ricas en nutrientes lo que origina una elevada productividad primaria (Parrilla & Kinder, 1987). La alta productividad de la zona implica una alta disponibilidad de peces aprovechada como fuente de alimentación por muchas especies migratorias y como recurso pesquero.

### 2.2 Muestreo

Durante los años 1983, 1984 y 2014, un total de 152 individuos de *A. rochei* fueron analizados des entre los ejemplares capturados en la almadraba situada en la bahía sur de Ceuta durante el movimiento que anualmente lleva a cabo esta especie en su ciclo migratorio.

Los 152 individuos fueron medidos a la furca hasta el centímetro más cercano (FL), y pesados hasta el gramo más próximo. A continuación, por medio de la relación talla-peso, se obtuvo el índice de condición promedio ( $K_{mean}$ ) para cada individuo por medio de la siguiente ecuación (Ec 1) (Froese, 2006):

$$K_{mean} = (a * LF^{(b-3)}) * 100$$

Ec. 1: Expresión utilizada para el cálculo del índice de condición donde “a” y “b” son los coeficientes de regresión y “LF” es la longitud a la furca.

Adicionalmente, se determinó el sexo mediante la visualización directa de la gónada, y se le asignó una edad aproximada a cada individuo de acuerdo con la clave talla-edad propuesta por Valeiras *et al.* (2008). Por otra parte, se obtuvieron los datos correspondientes a la NAO y AO correspondientes a los años de captura de los individuos y anteriores. Los datos fueron obtenidos en el sitio web de la Agencia NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): <http://www.cpc.noaa.gov/>

Las oscilaciones atmosféricas presentan una fuerte variabilidad intra e interanual (Hurrell, 1995), y dichas oscilaciones pueden estar desacopladas en relación con la respuesta biológica que desencadenan.

Por esto, se decidió considerar las siguientes variables en relación a dichas oscilaciones;  $NAO_{ac}/AO_{ac}$ : Comprende el promedio de los valores obtenidos para el índice en cuestión acumulados por cada ejemplar considerando su edad.  $NAO_w/AO_w$ : Basado en el promedio del índice atmosférico durante los meses del último invierno.  $NAO_{wac}/AO_{wac}$ : Implica el valor promedio de los inviernos acumulados por cada individuo.

### 2.3 Análisis estadístico

Debido a la existencia de valores atípicos, se eliminó un registro del conjunto total de datos, quedando un total de 151 registros disponibles para ser analizados estadísticamente.

En primer lugar, se comprobó la normalidad de las distribuciones y, debido a la escasez de años en el conjunto de datos se realizó una correlación no paramétrica de Spearman entre los índices de oscilaciones atmosféricas propuestos anteriormente, y la condición física de los ejemplares en conjunto, y por sexo.

## 3. RESULTADOS

Se obtuvo un valor de sex-ratio para la población en estudio de 1:1,1 (58 machos y 64 hembras). Los valores obtenidos para el índice de condición, así como los intervalos de talla-peso obtenidos aparecen reflejados en la tabla I.

Tabla I: Resumen de los intervalos de talla y peso, así como los índices de condición obtenidos por categoría.

	$L_{min}$ - $L_{max}$	$P_{min}$ - $P_{max}$	$K_{min}$ - $K_{max}$ (Promedio)
<b>General</b> (N=151)	21.5- 43.6	111- 1425	1.244-1.878 (1.715)
<b>Machos</b> (N=58)	25-43.6	189- 1425	1.332-1.877 (1.722)
<b>Hembras</b> (N=64)	26.9- 43.3	239- 1415	1.377-1.878 (1.708)

En lo que respecta a las clases de edad, la tabla que se muestra a continuación (Tabla II) refleja el porcentaje de individuos capturados por clase de edad para los años de estudio.

Tabla II: Distribución de los individuos analizados por clases de edad.

Edad	Nº de Individuos	Porcentaje (%)
1	93	61.58
2	41	27.15
3+	17	11.26

Se obtuvo una correlación significativa entre el aumento de la condición física y la NAOacu en fase negativa ( $Rho$  Spearman= -0.185;  $P= 0.023$ ) para el conjunto de los datos analizados; en el caso de la clase de edad 3+ además de dicha correlación se obtuvo una correlación positiva significativa con las oscilaciones climáticas testadas (ver tabla III). En lo relativo al índice AOacu, solo se obtuvieron diferencias significativas con la condición física en general, sin distinción de sexo o edad.

Tabla III: Resultados significativos de los parámetros estadísticos obtenidos mediante la correlación no paramétrica de Spearman para los registros analizados de clase de edad 3+. Clave: \* $P= <0.05$ .

Variables correlacionadas	Rho Spearman
$K_{3+} - AO_{acu}$	-0.502*
$K_{3+} - NAO_{want}$	0.502*
$K_{3+} - AO_w$	0.502*
$K_{3+} - AO_{ant}$	0.502*
$K_{3+} - AO_{want}$	0.531*

#### 4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que el índice de condición física de la melva post-reproductora está influenciado por las condiciones climatológicas predominantes en el medio, fundamentalmente por la media de la NAO/AO que experimenta a lo largo de su vida. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Báez *et al.* (2011) para el caso del atún blanco, *Thunnus alalunga*.

Tanto la NAO como la AO en fase negativa favorecen la predominancia de las tormentas sobre el Mediterráneo occidental. Esta circunstancia aumenta el aporte de nutrientes desde la costa al mar por escorrentía, lo que determina un incremento de la productividad de la zona.

El hecho de que las mayores diferencias significativas se obtengan en relación al índice AOacu puede implicar un desfase temporal entre la oscilación atmosférica y la respuesta biológica que desencadena en los individuos. Esta afirmación coincide con lo propuesto por Báez *et al.* (2013a), ya que las oscilaciones atmosféricas originan

cambios en la disponibilidad de nutrientes en la cadena trófica lo que finalmente se traduciría en un aumento de la condición física de los individuos. De este modo, el hecho de conocer la evolución y modelado de la climatología podría permitir realizar estimaciones sobre el rendimiento pesquero de *A. rochei*.

En lo relativo a los valores obtenidos por sexo, no se encontraron diferencias significativas entre el índice de condición de machos y hembras. Este hecho refleja la respuesta independiente del sexo del individuo tanto a los cambios en las condiciones ambientales como al balance energético durante el periodo reproductivo. Según Palandri *et al.* (2008) la talla de maduración para *A. rochei* en el Mediterráneo se estima en torno a 32 cm (FL), por lo que, de acuerdo con nuestros datos los individuos capturados por la almadraba de Ceuta son sexualmente maduros y en periodo de reposo tras la época reproductora.

Este estudio supone la primera evaluación de la condición física de *A. rochei* en periodo post-reproductor. Nuestros resultados señalan la importancia de introducir el efecto de las oscilaciones climáticas en los procesos de evaluación de las especies sometidas a explotación.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el Instituto Español de Oceanografía en el programa de “Túidos y especies afines” dentro del marco de la realización de la Tesis de Máster.

## 5. REFERENCIAS

- Báez, J.C., Ortiz De Urbina, J.M., Real, R. & Macías, D. (2011). Cumulative effect of the north Atlantic oscillation on age-class abundance of albacore (*Thunnus alalunga*). *Journal of Applied Ichthyology*, 27, 1356–1359.
- Báez, J.C., Macías, D., De Castro, M., Gómez–Gesteira, M., Gimeno, L. & Real, R. (2013a). Analysis of the effect of atmospheric oscillations on physical condition of pre–reproductive bluefin tuna from the Strait of Gibraltar. *Animal Biodiversity and Conservation*, 36, 225–233.
- Báez J.C., Gimeno L., Gómez–Gesteira M., Ferri–Yáñez F. & Real R. (2013b). Combined effects of the Arctic Oscillation and the North Atlantic Oscillation on Sea Surface Temperature in the Alborán Sea. *Plos One*, 8(4), e62201. doi: 10.1371/journal.pone.0062201
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22(4), 241–253.
- García, A., Alemany, F., Rodríguez, J. M., Cortes, D., Corregidor, F., & Ceballos, E. (2005). Distribution and abundance of bullet tuna larvae (*Auxis rochei*) off the Balearic Sea during the 2003–2005 spawning seasons. *ICCAT Meeting on Small Tunas Fisheries*.
- Hajje, G., Hattour, A., Allaya, H., Jarboui, O., & Bouain, A. (2010). Biology of little tunny *Euthynnus alletteratus* in the Gulf of Gabes, Southern Tunisia (Central Mediterranean Sea). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 45, 399–406.
- Hurrell, J.W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676–679.
- Palandri, G., Lanteri, L., Garibaldi, F., & Orsi Relini, L. (2009). Biological parameters of bullet tuna in the Ligurian Sea. *ICCAT, Collective Volume of Scientific Papers*, 64(7), 2272–2279.
- Parrilla, G & Kinder, T.H. (1987). Oceanografía física del Mar de Alborán. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 4, 133–165.
- Sabatés, A. & Recasens, L. (2001). Seasonal distribution and spawning of small tunas (*Auxis rochei* and *Sarda sarda*) in the northwestern Mediterranean. *Scientia Marina*, 65(2), 95–100.
- Vicente-Serrano, S. & Trigo, R.M. (2011). Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region. *Advances in Global Change Research*. Springer. 325 pp.
- Valeiras, J. & Abad, E. (2006). *Bullet Tuna*. ICCAT Manual. International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna. Available from website: [https://www.iccat.int/Documents/SCRS/Manual/CH2/2\\_1\\_11\\_2\\_BLT\\_ENG.pdf](https://www.iccat.int/Documents/SCRS/Manual/CH2/2_1_11_2_BLT_ENG.pdf).
- Valeiras, X., Macías, D., Gómez, M.J., Lema, L., García-Barcelona, S., Ortiz De Urbina, J.M. & De la Serna, J.M. (2008). Age and growth of bullet tuna (*Auxis rochei*) in the western Mediterranean Sea. *ICCAT, Collective Volume of Scientific Papers*, 62(5), 1629–1637.

- ICCAT: Collective Volume of Scientific Papers: SCRS/2015/124

## VARIACIÓN INTERANUAL DE LA CONDICIÓN FÍSICA DE LA MELVA (*Auxis rochei*) EN MIGRACIÓN PRE-REPRODUCTORA Y SU RELACIÓN CON LA OSCILACIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE

P. Muñoz<sup>1</sup>, D. Macías<sup>1</sup> & J.C. Báez<sup>1</sup>

### SUMMARY

Several authors highlight the fact that atmospheric oscillations might have an effect on the migratory species abundance, recruitment and physical condition. The major aim of this study was to elucidate a possible relationship between the physical condition of the bullet tuna (*Auxis rochei*) and the atmospheric oscillation based on 2154 specimens collected by commercial fisheries along the Spanish Mediterranean coast in two different periods (1983-1984 and 2003-2014). The species conducts pre-reproductive migratory movements annually towards the spawning area along the Mediterranean coast. Both variations on sex-ratios and age were tested against the North Atlantic Oscillation (NAO). Significant differences between the LeCrem condition index for the individuals of the age class 3+ and NAO<sub>w</sub> and NAO<sub>ant</sub> were found. A better condition during years with positive NAO phase was found. These results could be explained by the environmental conditions during positive NAO phase that would enhance the migration process. Nonetheless, populations monitoring is recommended in order to elucidate the effect of climate on fitness of this migratory species.

### RESUMEN

Las oscilaciones atmosféricas afectan directamente a muchas especies migradoras, reflejado en un cambio directo en su abundancia, reclutamiento o condición física. Este estudio tiene como principal objetivo elucidar posibles efectos de las oscilaciones climáticas (estandarizada por el índice NAO) sobre la condición física de la melva (*Auxis rochei*). Para ello se analizó el índice de condición de 2154 ejemplares capturados mediante diferentes artes de pesca por pesquerías comerciales a lo largo de la costa Mediterránea española durante los periodos comprendidos entre 1983-1984 y 2003-2014. Las capturas tuvieron lugar durante el movimiento migratorio que esta especie realiza hacia las áreas de puesta situadas en el Mediterráneo occidental. La condición física se testó en relación con las oscilaciones atmosféricas teniendo en cuenta la edad y sexo-ratio. Se obtuvieron diferencias significativas entre el índice de condición para los individuos de clase de edad 3+ y los índices NAO<sub>w</sub> y NAO<sub>ant</sub>. Los años con un índice NAO positivo se encontró una mejor condición física en los ejemplares estudiados. Esto podría deberse a que las condiciones ambientales durante los años de NAO en fase positiva facilitarían la migración. No obstante, se recomienda continuar con el seguimiento de las poblaciones para poder elucidar los efectos climáticos sobre la condición física de esta especie migratoria.

*Keywords: A. rochei, Atmospheric Oscillations, Climate Change, Mediterranean Sea, Condition Index*

### 1. Introducción

Las especies migradoras pueden ver alterada su abundancia (Gancedo *et al.*, 2005; Báez *et al.*, 2011), condición física (Báez *et al.*, 2013) o reclutamiento (Borja & Santiago, 2002; Mejuto, 2003; Kell *et al.*, 2004; Goñi & Arrizabalaga, 2005; Gancedo *et al.*, 2009) en respuesta a cambios en las condiciones climáticas predominantes. No obstante, aún se desconocen los efectos que las oscilaciones climáticas pueden desencadenar en pequeños túnidos.

La melva, *Auxis rochei* (Risso, 1810) es un pequeño túnido del grupo de los escombriformes, con una talla y peso medios para el Mediterráneo en torno a 40 cm y 1.9 kg respectivamente (Valeiras & Abad, 2008) y con hábitos de vida gregarios, lo que les hace susceptibles de ser capturados por diferentes artes de pesca.

El índice NAO (por sus siglas en inglés *North Atlantic Oscillation*) es el más usado para abordar las oscilaciones atmosféricas en la zona del Mediterráneo (Vicente-Serrano & Trigo, 2011) el cual es considerado por la comunidad científica, como un punto caliente para los efectos del calentamiento global, pues sus consecuencias podrían ser aún más pronunciadas debido a su condición de mar interior. La NAO hace referencia a una diferencia de presiones atmosférica entre la zona de las bajas

presiones situadas en torno a Islandia y la zona de altas presiones localizada próxima al archipiélago de las Azores.

El principal objetivo de este artículo es dilucidar los posibles efectos que las oscilaciones atmosféricas puedan ocasionar en la condición física de *A. rochei* capturados a lo largo de la costa Mediterránea española, durante el movimiento migratorio que anualmente realiza esta especie hacia sus épocas de puesta en torno a la zona de Baleares (Sabatés & Recasens, 2001).

## 2. Material y Métodos

### 2.1 Área de estudio y Datos pesqueros

El Mediterráneo occidental es una importante área de puesta para muchas especies de túnidos, ya que las temperaturas registradas durante la primavera y verano en la zona garantizan el reclutamiento y supervivencia de las larvas (García *et al.*, 2005). Por ello, se ha convertido en el destino de numerosas rutas migratorias con el estrecho de Gibraltar y el mar de Alborán como única vía de entrada desde el océano Atlántico (García *et al.*, 2005)

Un total de 2154 ejemplares de *A. rochei* fueron analizados a partir de las capturas comerciales en distintas localizaciones a lo largo de la costa Mediterránea española por medio de diversos artes de pesca principalmente almadraba; durante los periodos de tiempo comprendidos entre los años 1983 a 1984, y 2003 a 2014.

Cada individuo fue medido a la horquilla hasta el centímetro más próximo, y pesados hasta el gramo más cercano. A continuación, cada individuo fue eviscerado, lo que permitió la identificación del sexo mediante examen visual de la gónada. Adicionalmente por medio de la clave talla-edad propuesta por Valeiras y Abad (2008), a cada individuo se le asignó una edad aproximada (2+ 3+ o 4+).

A continuación, por medio de la relación talla-peso, se obtuvo el índice de condición de LeCren (LC) para cada individuo mediante la expresión propuesta por Froese (2006):

$$LC = \frac{P}{(a * LF^b)}$$

donde “a” y “b” son los coeficientes de regresión y “LF” es la longitud a la furca en centímetros y P es el peso en gramos.

### 2.2 Datos atmosféricos

Los datos correspondientes a los valores de las oscilaciones climáticas durante el periodo de estudio se obtuvieron en el sitio web de la Agencia NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): <http://www.cpc.noaa.gov/>. No obstante, ya que se sabe que las oscilaciones atmosféricas presentan una fuerte variabilidad interanual y que además es lógico pensar que llevan asociado un cierto desfase temporal con respecto a la respuesta biológica, se consideró la utilización de las siguientes variables asociadas a dichas oscilaciones; NAO<sub>w</sub>: comprende el valor promedio del índice en cuestión correspondiente a los meses de invierno (de Octubre del año anterior a Marzo del año de captura); NAO<sub>ant</sub>: basado en el valor del índice en cuestión el año anterior a la captura del individuo; NAO<sub>want</sub>: implica el valor promedio de cada índice relativo a los meses de invierno (Octubre, Noviembre y Diciembre) del año previo a la captura de cada ejemplar. Finalmente, también se consideró el índice NAO.

### 2.3 Análisis de los datos

En primer lugar, se comprobó la normalidad de las distribuciones. Posteriormente se testaron las diferencias interanuales entre los valores de LeCren y el índice NAO mediante un test ANOVA, una vez confirmada la normalidad de las distribuciones, considerando intervalos de confianza del 95% ( $\alpha=0.05$ ); por medio del software estadístico SPSS. Este procedimiento se realizó tanto para testar el conjunto de los datos de manera general, así como para testar ambos sexos y las diferentes clases de edad.

La tabla 1 muestra un resumen de la procedencia de los individuos estudiados, así como el arte de pesca empleado para su captura.

### 3. Resultados y discusión

En lo relativo a la estructura por sexos, se obtuvo un valor de sex ratio de 1:1.22. No se observaron diferencias significativas entre el índice de condición por sexo. Los valores obtenidos para el índice de condición por sexo, así como los intervalos de talla y peso obtenidos, son expuestos en la tabla 2. De manera similar no se observaron diferencias significativas por clase de edad (tabla 3).

Por otro lado, en lo relativo a los índices climáticos, se obtuvieron diferencias significativas entre el índice de condición de LeCren frente a  $NAO_{ant}$  y  $NAO_w$  para los individuos de la clase de edad 3+. La tabla 4 muestra los resultados estadísticos obtenidos.

Los resultados obtenidos reflejan la existencia de diferencias significativas entre el índice de condición de LeCren y el  $NAO_w$  y  $NAO_{ant}$ ; ambos casos para la clase de edad 3+. En ambos casos, el índice de condición medio es superior en el caso de los años con NAO en fase positiva. En este contexto, de acuerdo con Báez *et al.*, (2013) la fase de NAO positiva se caracteriza por vientos predominantes de componentes oeste que podrían facilitar la migración (Forchhammer *et al.*, 2002), disminuyendo el esfuerzo ejercido por los individuos que migran al Mediterráneo. En contraposición, durante los años con NAO en fase negativa, los individuos en migración tendrían que aumentar el gasto de energía durante la misma. Del mismo modo esto podría explicar los desfases encontrados.

El hecho de que no se hayan observado diferencias significativas para las clases 2 y 4, puede ser debido a un efecto matemático ya que la mayor parte de los individuos analizados de estas clases de edad se concentran en años con poca variabilidad del índice NAO (Tabla 5). Por ejemplo, la clase de edad 4 presenta sus mayores efectivos en 5 años de fase positiva y un solo año de fase negativa. En este sentido las deficiencias de la serie de datos condicionan los resultados obtenidos en nuestro estudio

En lo que respecta al sexo, no se han encontrado diferencias significativas frente a las oscilaciones climáticas esto podría deberse a que las oscilaciones climáticas afectan por igual a ambos sexos.

### 4. Referencias

- Báez J.C., Ortiz De Urbina J.M., Real R. and Macías D. (2011) Cumulative effect of the north Atlantic oscillation on age-class abundance of albacore (*Thunnus alalunga*). *Journal of Applied Ichthyology* 27, 1356–1359.
- Báez J.C., Macías D., De Castro M., Gómez–Gesteira M, Gimeno L. and Real R. (2013a) Analysis of the effect of atmospheric oscillations on physical condition of pre–reproductive bluefin tuna from the Strait of Gibraltar. *Animal Biodiversity and Conservation* 36, 225–233.
- Borja, A. & J. Santiago (2002). Does the North Atlantic Oscillation control some processes influencing recruitment of temperate fishes? *ICCAT, Col. Vol. Sci. Pap.*, 54: 964-984.
- Forchhammer M.C., Post E. and Stenseth N.C. (2002) North Atlantic Oscillation timing of long- and short-distance migration. *Journal Animal of Ecology* 71, 1002–1014.
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22(4), 241-253.
- García, A., Alemany, F., Rodríguez, J. M., Cortes, D., Corregidor, F., & Ceballos, E. (2005). Distribution and abundance of bullet tuna larvae (*Auxis rochei*) off the Balearic Sea during the 2003-2005 spawning seasons. *ICCAT Meeting on Small Tunas Fisheries*.
- Gancedo, U. (2005). Efecto de las variaciones climáticas en la distribución espacio-temporal de *Thunnus thynnus thynnus* (Linnaeus, 1758) y *Thunnus alalunga* (Bonnaterre, 1788) en el Océano Atlántico. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas De Gran Canaria, Departamento de Biología, 182 pp.
- Gancedo, U., E. Zorita, A.P. Solari, G. Chust, A.S. del Pino, J. Polanco and J.J. Castro (2009). What drove tuna catches between 1525 and 1756 in southern Europe? *ICES J. Mar. Sci.*, 66: 1595-1604.
- Goñi, N. & H. Arrizabalaga (2005). Analysis of juvenile North Atlantic Albacore (*Thunnus alalunga*) catch per unit effort by surface gears in relation to environmental variables. *ICES J. Mar. Sci.*, 62:1475-1482.

- Hurrell, J.W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269: 676–679.
- Hurrell, J.W., Y. Kushnir, G. Ottersen & M. Visbeck (2003). *An Overview of the North Atlantic Oscillation*. In: The North Atlantic Oscillation Climatic Significance and Environmental Impact (Hurrell, J.W., Y. Kushnir, G. Ottersen & M. Visbeck, Eds.), pp. 1-35. Geophysical Monograph 134. Washington, D.C., U.S.A.
- Kell, L.T., J.M. Fromentin, V. Ortíz de Zárate, H. Arrizabalaga (2005). Can we detect the effects of environmental variations on fish populations through VPA outputs? The North Atlantic Albacore Case. *ICCAT, Col. Vol. Sci. Pap.*, 58: 1256-1264.
- Mejuto, J. (2003). Recruit indices of the North Atlantic Swordfish (*Xiphias gladius*) and their possible link to atmospheric and oceanographic indicators during the 1982-2000 periods. *ICCAT, Col. Vol. Sci. Pap.*, 55: 1506-1515.
- Rodríguez, J. *Oceanografía del Mar de Alborán*. Aldaba, 71-77 (1989).
- Valeiras, J. and Abad, E. (2006). *Bullet Tuna*. ICCAT Manual, International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna.
- Vicente-Serrano, S. & Trigo, R.M. (editores). Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region *Advances in Global Change Research*.

Tabla 1: Resumen de la procedencia de los ejemplares de *A. rochei* analizados, así como el arte de pesca empleado en su captura.

LOCALIZACIÓN	Arte de Pesca	Subtotal (N)	Total (N)
Almería	Cerco	75	75
Calpe	Curricán	4	4
Fuengirola	Cerco	99	99
La Azohía	Almadraba	1845	1866
	Curricán	19	
	Palangre	2	
La Pobra de Farnals	Curricán	6	6
Málaga	Cerco	7	7
Motril	Cerco	24	24
Palma	Curricán	4	62
	Cerco	58	
Santa Pola	Curricán	2	2

Tabla 2: Resumen de los valores intervalos de talla, peso y condición física para ambos sexos.

Sexo	$L_{min}-L_{max}$	$P_{min}-P_{max}$	$LC_{min}-LC_{max}$ (Promedio)
Machos (N=307)	31-48.2	440-1766	0.767-1.287 (0.999)
Hembras (N=375)	28.2-46	318-1678	0.826-1.172 (0.993)

Tabla 3: Resumen de los valores intervalos de talla, peso y condición física para cada clase de edad.

Clase de Edad	$L_{min}-L_{max}$	$P_{min}-P_{max}$	$LC_{min}-LC_{max}$ (Promedio)
2+(177)	31-39	440-1070	0.861-1.287 (0.999)
3+(N=131)	35.9-43	790-1474	0.807-1.247 (0.994)
4+(N=26)	40.4-48.2	982-1766	0.767-1.184 (1.004)

Tabla 4: Valores estadísticos obtenidos para el test ANOVA entre LC y los índices atmosféricos.

Variables correlacionadas	p- value	F
$LC_{Edad\ 3+} - NAO_w$	0.026	8.612
$LC_{Edad\ 3+} - NAO_{ant}$	0.026	8.612

Tabla 5. Frecuencia de años observados por clases de edad observados en años de NAO en fase negativa, y años de NAO en fase positiva.

Clase de edad	NAO <sub>ant +</sub>	NAO <sub>ant -</sub>
2+	6	2
3+	5	3
4+	5	1

- ICCAT: Collective Volume of Scientific Papers: SCRS/2015/125

## LENGTH-WEIGHT RELATIONSHIP OF BULLET TUNA FROM WESTERN MEDITERRANEAN SEA

P. Muñoz<sup>1</sup>, D. Macias<sup>1</sup> & J.C. Báez<sup>1</sup>

### *Summary*

Length-weight relationships are used as an important tool in terms of biological assessing and management policies; since supply important information about biological dynamics, as well as the status of the stock, spawning periods or growth, among others. The major aim of this article is to provide length weight relationships of the bullet tuna *Auxis rochei* (Risso, 1810), based on 2329 specimens collected along the Spanish Mediterranean Coast in four different locations and caught by different fishing gears in both recreational and commercial fisheries. The results obtained are presented for the whole data set and also sorted out by sex.

### *Resumen*

Las relaciones talla-peso son usadas como una herramienta importante en términos de evaluación biológica y el establecimiento de medidas de gestión pesquera; ya que proporcionan importante información sobre las dinámicas biológicas de las especies estudiadas, así como el estado del stock en cuestión o los periodos de desove o crecimiento, entre otros. Por ello, el principal objetivo de este artículo consiste en presentar las relaciones talla-peso de la melva *Auxis rochei* (Risso, 1810), basadas en los datos de 2329 especímenes capturados a lo largo de la costa mediterránea española en cuatro estaciones diferentes por medio de diferentes artes de pesca tanto de pesquerías comerciales como pesca recreativa. Las ecuaciones obtenidas se presentan para el conjunto de datos y dividido por sexos.

### *Resumé*

*Key words: Length-weight relationship, bullet tuna, NW Mediterranean, small tunas, fisheries assessment.*

## 1. Introduction

Bullet tuna *Auxis rochei* (Risso, 1810) is a small species belonging to the Scombridae family, with a high commercial value, whose exploitation needs to be managed (Valeiras and Abad, 2006) and cannot be disregarded. As well as other members of this family, bullet tuna is widely distributed all over the largest Oceans in the world, including the Mediterranean Sea, where they find their spawning area (García *et al.*, 2005). The Strait of Gibraltar represents an important area within the Mediterranean Sea, since determines a geographical connection between the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea and represents a connective channel that numerous migratory species cross towards the Mediterranean basin.

Due to their migratory behavior, as well as other small tuna species, they cross the Strait of Gibraltar and penetrate into the Mediterranean Sea where they find their spawning area usually coinciding with warmer sea temperature that enhances the availability of resources (Teo *et al.*, 2007; Báez *et al.*, 2014) during the spawning period. This migration is reflected on a peak on the fisheries yield (Uchida, 1981) during the months when this massive movement is more intense i.e. between May and September (Palandri *et al.*, 2008).

Previous studies of the Length-weight relationships (LWR hereafter) for bullet tuna are scarce. Palandri *et al.*, (2008), highlight the possibility of this species to form stable populations in the western Mediterranean Sea; however, many of the biological aspects of the bullet tuna are yet to be understood, and the migratory behavior represents an impediment when analyzing the biological parameters of the species and interferes on the establishment of management policies, since the exploitation affects differentially to the different cohorts of the population.

LWR constitute a powerful tool to establish biological assessment and management policies. It basically consists on fitting the length against the weight observed for a certain individual, obtaining a statistical fitting expression for the whole set of individuals. This relationship provides information about the status of the stocks, lifespan, mortality, or growth rates, and permits asses about the temporal trend of the stock. From the equation obtained for a set of specimens, several biological implications can be deduced; one of the most relevant is growth. According to Froese (2006) LWR parameter  $b$  represents the type of growth followed by a determinate species. In concordance with this,  $b=3$

represents an isometric growth (meaning that the animal grows equally in the three spatial dimensions) while a value for parameter “b” different than 3 represents an allometric growth. This kind of growth can be either positive allometric growth for those values of “b” larger than 3 (the specimens increase their thickness rather than the length), or negative allometric growth for “b” smaller than 3 (individuals grow elongated). According to this, presenting the LWR for this species will constitute an important improvement for the assessment and management of their stocks, since parameters obtained from these relationships provide useful information about biological dynamics. Moreover, the LWR in fish from a specific geographic region during a specific season could be useful to estimate their physical condition. The main aim of present paper is to provide the LWR for the bullet tuna collected along the Spanish Mediterranean Sea.

## 2. Materials and Methods

The samples were caught by Spanish fleets from the Western Mediterranean with different fishing systems (**Figure 1**). Detailed information about the number of individuals collected per sampling station is shown in **Table 1**.

A total of 2329 individuals of bullet tuna were collected during the whole year along the Spanish Mediterranean coast between 2003 and 2014. The individuals sampled came from different fishing gears: trap, purse seine and different types of longlines. Every specimen was measured to the nearest cm fork length (FL) and posteriorly weighed to the nearest gram. A database with the length-weight pairs of data belonging to the specimens of bullet tuna collected was created. However, the whole data set was filtered in order to remove the outliers. After elimination of outliers a total of 2305 samples were finally analyzed.

The outliers were eliminated following a two step procedure. First of all, the LeCren condition index was calculated individually by mean of the ratio between the observed and the expected weight (Froese, 2006) (given by the LWR equation). Secondly, those individuals with both the upper and lower 1% of the LeCren condition index were considered as outliers: and hence removed. We tested the randomness of the length-weight pairs deleted by mean of a chi-square test. The aim of this procedure was to ensure the randomness of samples per year.

The length-weight relationships were fitted to a power curve regression according to the equation:

$$W = a * FL^b$$

where W is the weight in grams, and FL is the furcal length in centimeters. This operation was performed considering both the whole data set and sorting the data by sex.

## 3. Results and Discussion

The LWR equation for both male and female, and with all data pooled together are shown in the figures **Figures 2, 3 and 4** respectively.

Additionally, the LWR parameters (a and b), as well as the regression coefficient ( $R^2$ ), the number of individuals per analysed group and the range of the lengths and weights that have been used to model the LWR is presented in the **Table 2**.

Finally, regression parameter “b” was found to be greater than 3 in all cases, reflecting positive allometric growth of the species, and also obtained for both males and females. These results reflect a slightly allometrically positive ( $b > 3$ ) growth for bullet tuna in all cases. Sorted out by sex, both males and females present allometric growth. In case of females, parameter b (as a growth parameter) is higher than in case of males (**Table 3**). Nonetheless, no significant differences were found between both sexes for parameter b (greater than 3 in both cases) and hence a positive allometric growth for bullet tuna in the Western Mediterranean Sea (i.e. individuals tend to grow more elongated than thick), with no effect of sex on growth could be concluded.

Uchida (1981) found similar parameters for individuals of *A. rochei* collected in the coast of Japan. Additionally, the results obtained by Ramos *et al.*, 1985 correspondent to individuals collected by Spanish artisanal fisheries in the Mediterranean Sea, reflect a similar growth parameter ( $b=3.64$ ). Palandri *et al.*, (2008) also shows a similar growth parameter for both males and females in the Ligurian Sea (Palandri *et al.*, 2008).

This study enhances the contribution to the length-weight relationship of the bullet tuna in the western Mediterranean Sea where in fact they find their spawning area.

#### 4. References

- Báez, J. C., Macías, D., Castro, M. De, Gesteira, M. G., Gimeno, L., & Real, R. (2014). Analysis of the effect of atmospheric oscillations on physical condition of pre – reproductive bluefin tuna from the Strait of Gibraltar, 2(2013), 225–233.
- Froese, R., 2006. Cube law, condition factor and weight–length relationships, meta–analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22: 241–253.
- García, A., Alemany, F., Rodríguez, J. M., Cortes, D., Corregidor, F., & Ceballos, E. (2005). Distribution and abundance of bullet tuna larvae (*Auxisrochei*) off the Balearic Sea during the 2003-2005 spawning seasons. ICCAT Meeting on Small Tunas Fisheries.
- LeCren, E. D. (1951). The length- weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Percafluviatilis*). *J. Anim.Ecol.*, 20 (4): 201 -219.
- Palandri, G., Lanteri, L., Garibaldi, F., & L, O. R. (2008). Scrs/2008/057 biological parameters of bullet tuna in the ligurian sea, (August 2007).
- Ramos, A. Alot, E. Caminas, J. A. (1986). Relación talla/peso de la Melva, *Auxis thazard*, para el Atlántico y Mediterráneo. *Collective Volume of Scientific Papers ICCAT*, 268, 265–268.
- Teo, S. L. H., Boustany, A., Dewar, H., Stokesbury, M. J. W., Weng, K. C., Beemer, S., Block, B. A. (2007). Annual migrations, diving behavior, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology*, 151, 1–18. doi:10.1007/s00227-006-0447.
- Uchida, R. N. (1981). Synopsis of biological data on frigate tune, *Auxis thazard*, and bullet tuna, *A. rochei*. NOAA Technical Report NMFS, Circular 4(124), 63pp.
- Valeiras, J. and Abad, E. (2006). *Bullet Tuna*. ICCAT Manual, International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna. Available from website: [https://www.iccat.int/Documents/SCRS/Manual/CH2/2\\_1\\_11\\_2\\_BLT\\_ENG.pdf](https://www.iccat.int/Documents/SCRS/Manual/CH2/2_1_11_2_BLT_ENG.pdf)

Table 1: Distribution of the individuals collected per sampling station.

LOCATION		N
Ceuta (CE)		176
	La Azohía (LA)	1888
Málaga (MA)		7
	Palma de Mallorca (PM)	62

Table 2: Parameters of the LWRs in a general context and sorted out by sex for *A. rochei* in the Eastern Mediterranean basin.

	N	$L_{min}-L_{max}$	$W_{min}-W_{max}$	A	b	R <sup>2</sup>
<b>General</b>	455	23.9-47.0	197.28-2110	0.0027	3.5064	0.9039
<b>Males</b>	195	31-44.6	440-1766	0.002	3.5864	0.9501
<b>Females</b>	254	28.2-46	318-1678	0.0019	3.6011	0.9594

Table 3: Statistical parameters obtained from the LWR for both males and females.

Sex	b-min	b-max	b-mean	T-student	P
<b>Males</b>	3.470	3.703	3.586	60.599	0.975
<b>Females</b>	3.509	3.693	3.601	77.141	0.979



Figure 1: Map of the Mediterranean Sea, showing the sampling sites. Key: CE, Ceuta; LA, La Azohía; MA, Málaga; PM, Palma de Mallorca.

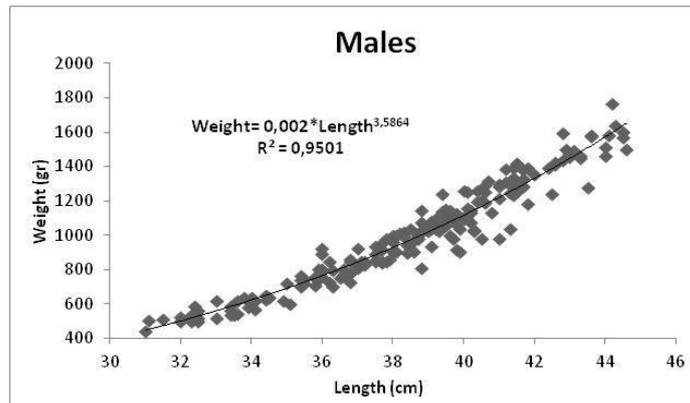


Figure 2: Length-weight relationship model obtained for males of bullet tuna in the Western Mediterranean Sea.

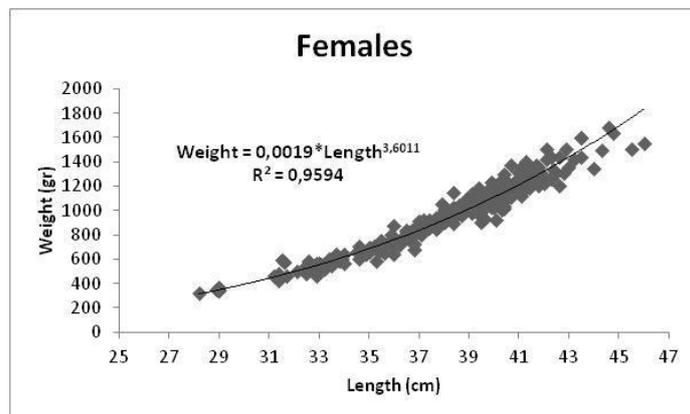


Figure 3: Length-weight relationship model obtained for females of bullet tuna in the Western Mediterranean Sea.

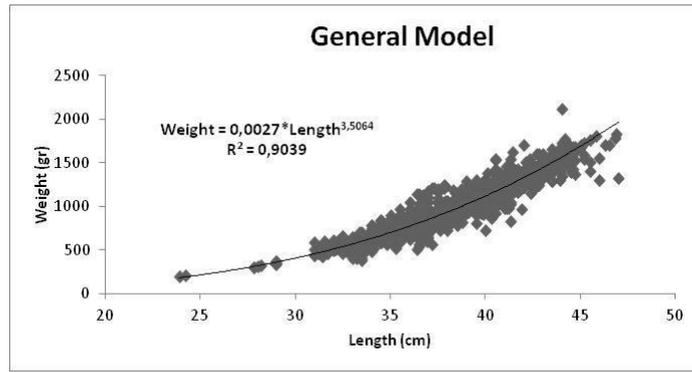


Figure 4: General length-weight relationship model for bullet tuna in the Western Mediterranean Sea.