



Universitat
de les Illes Balears



TESIS DOCTORAL

Estudio biológico de la capa de dispersión acústica estival en el mar de Alborán y su implicación en la evaluación de pelágicos costeros.

Ana Ventero Martín

2016



Universitat
de les Illes Balears



TESIS DOCTORAL

Programa de Doctorado en Ecología Marina

Estudio biológico de la capa de dispersión acústica estival en el mar de Alborán y su implicación en la evaluación de pelágicos costeros.

Ana Ventero Martín

Doctora por la Universitat de les Illes Balears

Directora: M^a Magdalena Iglesias Marroig

Tutora: Nona Sheila Agawin Romualdo

2016

A mi familia, a Joan y a Josep.

Agradecimientos

Cuando empecé la tesis nadie me avisó que sería más dura que las doce pruebas de Astérix, y si lo hizo fue en una frecuencia imperceptible para mis sentidos. Después de todo el camino recorrido durante estos años, he obtenido los conocimientos necesarios para plantear, planificar, llevar a cabo, discutir críticamente y dar a conocer los resultados de una investigación científica, lo cual es para mí un premio mayor que la conquista de Roma por parte de los Galos.

El trabajo que ha quedado plasmado en este documento, es fruto de la colaboración de multitud de personas, y ahora que toca dar las gracias no me gustaría olvidar ninguno de los granitos de arena que han hecho posible esta montaña.

Este proyecto no hubiera sido posible sin la actuación simbiótica de mis dos co-directoras, las doctoras Magdalena Iglesias y Nona Sheila Agawin, cuyas directrices me han servido para no dispersarme y conseguir el objetivo final: ACABAR. Marilín, gracias por las charlas acústicas que hemos mantenido, por tus consejos y por la frase: "Un objetivo sin un plan es solo un deseo" de Antoine de Saint-Exupéry, me alegra saber que tenemos por delante muchos años de planificación y trabajo conjunto. Nona, gracias por ser una fuente inagotable de energía positiva y motivación.

Aunque esta tesis comenzó oficialmente hace unos cuatro años, se empezó a gestar mucho antes, cuando aterricé en "Sa roqueta" para incorporarme al equipo de acústica de Baleares. Gracias por vuestra acogida, por confiar en mí desde el primer día y por transmitirme la curiosidad necesaria para ver la acústica como una gran herramienta para el estudio del ecosistema pelágico y no como una tortura física.

Joan Miquel, eres es el espejo en el que todo acústico debería mirarse, me has enseñado los fundamentos de la acústica submarina con una paciencia infinita, a ir siempre más allá y la importancia de tomarse la vida con humor. Ahora que disfrutas de tu jubilación, nos hemos quedado sin gallo en el gallinero y tu ausencia es irremplazable. Gracias por ser maestro y amigo.

Dolores Oñate, sin duda eres el alma de las campañas, gracias por hacer que los turnos ante la ecosonda fueran siempre enriquecedores y amenos, por implicarte en este proyecto, por transmitirme tu experiencia en la interpretación de ecogramas y por tu inestimable ayuda para la coordinación del trabajo a bordo.

El trabajo en el mar no es sencillo pues en muchas ocasiones la ley de Murphy impera, aunque las probabilidades de éxito se maximizan si estás rodeada de gente competente y profesional. Gracias a todo el equipo de "Murcia, qué hermosa eres" en especial a Ángel Fernández. Jefe, me has enseñado que en un buque

oceanográfico la cadena de mando es lenta, que la dirección del arrastre no la marcas tú sino el viento y que si hay más de un equipo implicado en la realización de una tarea, la organización es fundamental. En este sentido, la unidad planctónica de respuesta inmediata compuesta por Mariano Serra e Isabel González demostró su gran experiencia en la toma de muestras y juntos formamos un gran equipo, gracias por todo y gracias Isa por tu colaboración en la separación y medición de los organismos. El trabajo en el laboratorio húmedo fue realmente divertido y enriquecedor gracias al grupo de CUFES, en especial gracias Ana Lago y Concha Franco por estar dispuestas a echarme una mano siempre que me hizo falta, os voy a echar mucho de menos.

La actitud de la tripulación fue admirable, sobre todo en el buque oceanográfico Miguel Oliver donde ya me siento casi como en casa. Me gustaría agradecer a todos vuestro esfuerzo, en especial al capitán Luis Gago y a los oficiales de puente por vuestra destreza para poner la red donde poníamos el ojo y por enseñarme que el sentido del humor y la mano izquierda son la base para que todo funcione.

Gracias a mi compi Javi por tenerlo todo bajo control en el laboratorio de acústica mientras yo estaba en el puente y gracias a Nuria, Biel, María José, Matxalen, Albert, Antonio, Alba, Pilar, Germán, Jaime y a tantos otros por las noches de terapia, las risas y los trinas compartidos.

Desde el principio pensé que la tarea más ardua y complicada sería la parte decibélica y lo fue, pero la parte biológica no se quedó atrás. El análisis de las muestras de zooplancton me hizo admirar aún más la labor de los taxónomos, pues es un proceso muy laborioso y peliagudo. Gracias a la doctora Mari Luz García de Puelles y al doctor Francisco Alemany por sus consejos iniciales para la definición del método de toma de muestras y a Magdalena por ayudarme con la identificación de los bichitos.

Gracias a todos los participantes en las reuniones MEDIAS, en especial a Angelo Bonano como chairman por darme la oportunidad de presentar anualmente mis progresos y a tod@s por vuestras críticas, comentarios y aportaciones.

Contar esta historia de una manera amena y apta para todos los públicos resultó "sencillo" gracias a la colaboración de Maripaz y Josep, quienes boli rojo en mano habéis tenido la paciencia necesaria para mejorar mi prosa y enriquecer mi trabajo, muchísimas gracias y gracias al diseñador Sergio Sola por la maquetación del manuscrito final.

Finalmente, gracias a mi padre y a las mujeres de mi vida, mi madre, mi hermana, mi abuela y mis tías por haber sido siempre mis fans incondicionales. Gracias mamá por tu fortaleza, tu valentía y por enseñarme a no rendirme nunca.

Lista de figuras

Figura 1.1: Ambientes marinos. Región estudiada (área rayada), zona epipelágica de la región nerítica de la plataforma continental.

Figura 1.2: Detalle vejiga natatoria. A: Tonino (*Scomber colias*), B: Sardina (*Sardina pilchardus*).

Figura 1.3: Ecogramas obtenidos por una ecosonda científica. A: Situación diurna. B: Situación al ocaso.

Figura 1.4: Variaciones estacionales de la producción primaria (fitoplancton) y secundaria (zooplancton).

Figura 1.5: Adaptaciones de los organismos zooplanctónicos al ambiente pelágico.

Figura 1.6: Muestreadores empleados en muestreos de plancton.

Figura 1.7: Tipos de plancton en cuanto a su composición corporal.

Figura 1.8: Evolución de la tecnología acústica aplicada al estudio del medio marino.

Figura 1.9: Desplazamiento de las ondas de sonido.

Figura 1.10: Zonas a tener en cuenta en un estudio acústico.

Figura 1.11: Esquema básico de la ecosonda científica.

Figura 1.12: Esquema general de una ecosonda científica cuando se emplean diferentes frecuencias.

Figura 1.13: Elementos y funcionamiento de la ecosonda científica.

Figura 1.14: Dispersión del sonido según el tamaño de los blancos.

Figura 1.15: Ecograma registrado a la frecuencia de 38 kHz señalando los diferentes registros acústicos.

Figura 1.16: Ecograma visualizado a distintos umbrales.

Figura 1.17: Límite de la zona de Rayleigh.

Figura 1.18: Modelos de dispersión acústica de los animales pelágicos.

Figura 3.1: Zona de estudio.

Figura 3.2: Características de los buques oceanográficos.

Figura 3.3: Diseño de muestreo.

Figura 3.4: Tipos de registros acústicos detectados.

Figura 3.5: Redes bongo equipadas con un sensor de profundidad ITI.

Figura 3.6: Representación simplificada de un arrastre horizontal.

Figura 3.7: Cálculo del volumen filtrado.

Figura 3.8: Sensores de profundidad.

Figura 3.9: Trayectoria de la red en la interfaz de la ecosonda científica EK60.

Figura 3.10: Representación simplificada de la delimitación de la capa de dispersión.

Figura 3.11: Intervalos de profundidad para detectar variaciones en la energía acústica detectada a múltiples frecuencias sobre la plataforma continental.

Figura 3.12: Representación simplificada de la co-ocurrencia de los cardúmenes de peces y la capa de dispersión acústica.

Figura 3.13: Representación de los intervalos de profundidad para aplicar el índice de co-ocurrencia.

Figura 3.14: Trayectoria del arrastre de la red de plancton sobre la frecuencia de 38 kHz de una estación realizada durante este estudio y procesada con el software SonarData Echoview v.4.

Figura 3.15: Regiones para la determinación de valores de ruido en las estaciones de muestreo biológico.

Figura 4.1: Área cubierta: en azul la plataforma continental hasta 200 m y en negro las millas prospectadas.

Figura 4.2: Diagrama de cajas para los valores de s_A de la capa epipelágica de dispersión acústica por año y frecuencia.

Figura 4.3: Áreas y radiales donde se detectaron los máximos valores de densidad acústica.

Figura 4.4: Valores de s_A medios registrados a múltiples frecuencias por intervalos de profundidad.

Figura 4.5: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 18 kHz en 2013 y el centro espacial de la distribución.

Figura 4.6: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 18 kHz en 2014 y el centro espacial de la distribución.

Figura 4.7: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 38 kHz en 2013 y el centro espacial de la distribución.

- Figura 4.8:** Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 38 kHz en 2014 y el centro el espacial de la distribución.
- Figura 4.9:** Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 120 kHz en 2013 y el centro el espacial de la distribución.
- Figura 4.10:** Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 120 kHz en 2014 y el centro el espacial de la distribución.
- Figura 4.11:** Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 200 kHz en 2013 y el centro el espacial de la distribución.
- Figura 4.12:** Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 200 kHz en 2014 y el centro el espacial de la distribución.
- Figura 4.13:** Porcentaje cardúmenes afectados por la presencia de la capa de dispersión acústica por intervalo de profundidad.
- Figura 4.14:** Estaciones de zooplancton realizadas en 2013 y 2014.
- Figura 4.15:** Ecogramas estación 14.5. Bongo90. Fecha: 18/07/2014. Profundidad del fondo: 35 m. Profundidad del arrastre: 23 m.
- Figura 4.16:** Ecogramas estación 14.2. Bongo40. Fecha: 14/07/2014. Profundidad del fondo: 83 m. Profundidad del arrastre: 34 m.
- Figura 4.17:** Ecogramas estación 14.8. Bongo90. Fecha: 21/07/2014. Profundidad del fondo: 115 m. Profundidad del arrastre: 85 m.
- Figura 4.18:** Perfiles multifrecuencia observados en 2013.
- Figura 4.19:** Perfiles multifrecuencia observados en 2014.
- Figura 4.20:** Patrón acústico número 1.
- Figura 4.21:** Patrón acústico número 2.
- Figura 4.22:** Patrón acústico número 3.
- Figura 4.23:** Patrón acústico número 4.
- Figura 4.24:** Patrón acústico número 5.
- Figura 4.25:** Patrón acústico número 6.
- Figura 4.26:** Cnidarios.
- Figura 4.27:** Quetognatos.
- Figura 4.28:** Heterópodos.
- Figura 4.29:** Crustáceos.

Figura 4.30: Tunicados

Figura 4.31: Ictioplancton.

Figura 4.32: Abundancia total (org/m³) de grupos faunísticos capturados por la red de 250 µm en los años 2013 y 2014.

Figura 4.33: Distribución espacial del porcentaje de grupos faunísticos capturados por la red de 250 µm en 2013 y 2014.

Figura 4.34: Abundancia total (org/m³) de grupos faunísticos capturados por la red de 333 µm en los años 2013 y 2014.

Figura 4.35: Distribución espacial del porcentaje de grupos faunísticos capturados por la red de 333 µm en 2013 y 2014.

Figura 4.36: Abundancia total (org/m³) de grupos faunísticos capturados por la red de 500 µm en los años 2013 y 2014.

Figura 4.37: Distribución espacial del porcentaje de grupos faunísticos capturados por la red de 500 µm en 2013 y 2014.

Figura 4.38: Abundancia total (org/m³) de grupos faunísticos capturados por la red de 2000 µm en los años 2013 y 2014.

Figura 4.39: Distribución espacial del porcentaje de grupos faunísticos capturados por la red de 2000 µm en 2013 y 2014.

Figura 4.40: Perfiles de CTD realizados en 2013.

Figura 4.41: Perfiles de CTD realizados en 2014.

Figura 4.42: Relación de la capa de dispersión acústica con la termoclina y el máximo de fluorescencia en 2013 y 2014.

Figura 4.43: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de apendicularias registrados en 2013.

Figura 4.44: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de apendicularias registrados en 2014.

Figura 4.45: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de larvas de peces registrados en 2013.

Figura 4.46: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de larvas de peces registrados en 2014.

Figura 4.47: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de crustáceos grandes registrados a la frecuencia de 120 kHz en 2013 y 2014.

Figura 4.48: Valor de MVBS observado y estimado en base a las muestras biológicas a múltiples frecuencias.

Figura 5.1: Co-ocurrencia de cardúmenes de peces y la capa de plancton (ecograma a 38 kHz) y aplicación del algoritmo para la separación de ambas (máscara).

Figura 5.2: Circulación general en Mar de Alborán.

Figura 5.3: Datos satélite de clorofila-a correspondientes al mes de julio para los años 2013 y 2014.

Figura 5.4: Temperatura media mensual registrada por la boya de Málaga desde enero de 2013 a diciembre de 2014.

Figura 5.5: Ecograma a múltiples frecuencias de la estación 13.5 de 2013, perteneciente al patrón acústico global 1. Año: 2013. Profundidad: 25-37m.

Figura 5.6: Ecograma a múltiples frecuencias de la estación 13.6 de 2013, perteneciente al patrón acústico global 2. Año: 2013. Profundidad: 87 m.

Figura 5.7: Ecograma a múltiples frecuencias de la estación 13.2 de 2013, perteneciente al patrón acústico global 3. Año: 2013. Profundidad: 200 m.

Figura 5.8: Perfiles de dispersión acústica identificados bajo el proyecto SIMFAMI.

***Todas las fotos y figuras, salvo indicación expresa, han sido realizadas por Ana Ventero Martín.**

Lista de tablas

Tabla 1.1: Clasificación de los organismos pelágicos por tamaños.

Tabla 3.1: Especificaciones de los Transductores.

Tabla 3.2: Formas y dimensiones biológicas estimadas para los principales grupos faunísticos capturados por la malla de 500 μm en 2014.

Tabla 3.3: Modelos de dispersión aplicados a cada grupo faunístico.

Tabla 4.1: Áreas geográficas asociadas a los valores elevados de densidad acústica detectados en el diagrama de cajas.

Tabla 4.2: Estadísticos descriptivos correspondientes a la capa epipelágica de dispersión acústica.

Tabla 4.3: Resultados del análisis de regresión lineal múltiple en 2013.

Tabla 4.4: Resultados del análisis de regresión lineal múltiple en 2014.

Tabla 4.5: Resultados del análisis de regresión lineal múltiple para el conjunto de los datos.

Tabla 4.6: Correlación entre los valores de s_A asociados a la comunidad de peces pelágicos (peces) y a la capa de dispersión acústica (plancton) en 2013.

Tabla 4.7: Correlación entre los valores de s_A asociados a la comunidad de peces pelágicos (peces) y a la capa de dispersión acústica (plancton) en 2014.

Tabla 4.8: Estaciones de zooplancton.

Tabla 4.9: Valores de S_V correspondientes al ruido constante calculados en 2013.

Tabla 4.10: Valores de S_V correspondientes al ruido constante calculados en 2014.

Tabla 4.11: Valores de MVBS registrados para la capa epipelágica de dispersión acústica en 2013.

Tabla 4.12: Valores de MVBS registrados para la capa epipelágica de dispersión acústica en 2014.

Tabla 4.13: Muestras biológicas analizadas en 2013.

Tabla 4.14: Muestras biológicas analizadas en 2014.

Tabla 4.15: Niveles taxonómicos considerado en este estudio.

Tabla 4.16: Abundancia media (ind/m³) y desviación típica (s) de cada grupo faunístico por muestreador en 2013.

Tabla 4.17: Abundancia media (ind/m³) y desviación típica (s) de cada grupo faunístico por muestreador en 2014.

Tabla 4.18: Valores medios y desviación típica (s) de las variables biológicas estimadas para cada grupo faunístico capturado por la malla de 500 μ m en cada estación.

Tabla 4.19: Correlación entre la densidad de grupos faunísticos y los diferentes tamaños de malla.

Tabla 4.20: Variables físico-químicas recogidas en las estaciones de muestreo en 2013.

Tabla 4.21: Variables físico-químicas recogidas en las estaciones de muestreo en 2014.

Tabla 4.22: Ajuste por regresión múltiple entre la densidad de organismos capturada por la red de 250 μ m y los valores de energía acústica a múltiples frecuencias.

Tabla 4.23: Ajuste por regresión múltiple entre la densidad de organismos capturada por la red de 333 μ m y los valores de energía acústica a múltiples frecuencias.

Tabla 4.24: Ajuste por regresión múltiple entre la densidad de organismos capturada por la red de 500 μ m y los valores de energía acústica a múltiples frecuencias.

Tabla 4.25: Valores de MVBS estimados y categoría acústica dominante para cada frecuencia y estación.

Agradecimientos VI

Lista de figuras 8

Lista de tablas 14

Resumen/Resum/Summary 20

Capítulo 1: Introducción 27

1.1. Las subdivisiones del medio marino 28

1.2. Las comunidades pelágicas 29

1.2.1. El Necton 29

1.2.2. El Plancton 30

1.3. La acústica subacuática 37

1.3.1. Fundamentos de la acústica subacuática 38

1.3.2. La ecosonda científica 41

1.3.2.1. Componentes de la ecosonda científica 41

1.3.2.2. Funcionamiento de la ecosonda científica 42

1.3.3. Ecuación clásica del radar 43

1.3.4. Tipos de blancos 45

1.3.5. Reflectividad de los organismos: Fuerza de blanco 46

1.3.6. Unidades de medida de la energía acústica 47

1.4. Interpretación de ecogramas 48

1.4.1. Respuesta acústica multifrecuencia del plancton y el necton 51

Capítulo 2: Objetivos

2.1. Objetivo general 57

2.2. Objetivos específicos 57

Capítulo 3: Material y métodos

3.1. Área de estudio 61

3.2. Recogida de datos 61

3.2.1. Datos acústicos 62

3.2.1.1. Registro sistemático de comunidades pelágicas 64

3.2.1.2. Selección de estaciones para la identificación de la capa epipelágica de dispersión acústica	65
3.2.2. Datos biológicos	66
3.2.2.1. Muestreo de la capa epipelágica de dispersión acústica	66
3.2.2.1.1. Estimación del tamaño de los organismos	68
3.2.2.2. Monitorización de redes de plancton	68
3.2.3. Datos oceanográficos	69
3.3. Tratamiento y análisis de datos	70
3.3.1. Datos acústicos	70
3.3.1.1. Descripción general de la capa epipelágica de dispersión acústica	70
3.3.1.1.1. Implicación en la evaluación de la comunidad de peces pelágicos	71
3.3.1.2. Delimitación del volumen acústico muestreado biológicamente	73
3.3.1.2.1. Determinación del ruido constante	74
3.3.1.2.2. Energía acústica observada a múltiples frecuencias	75
3.3.2. Datos biológicos	75
3.3.2.1. Abundancia y distribución de los principales grupos faunísticos	76
3.3.2.2. Comparación entre sistemas de muestreo	76
3.3.3. Datos oceanográficos	77
3.3.3.1. Comunidad fitoplanctónica	77
3.3.4. Combinación de datos acústicos, biológicos y oceanográficos	77
3.3.4.1. Aplicación de modelos de dispersión acústica	77
3.3.4.2. Energía acústica esperada a múltiples frecuencias	80
3.3.4.3. Organismos detectados por la ecosonda científica	80
3.3.4.3.1. Comunidad zooplanctónica	80
3.3.4.3.2. Comunidad fitoplanctónica	81

Capítulo 4: Resultados

4.1. Descripción de la capa epipelágica de dispersión acústica a múltiples frecuencias 85

4.1.1. Estadísticos descriptivos	86
4.1.2. Distribución espacial	88
4.1.2.1. Densidad acústica por intervalos de profundidad	88
4.1.2.2. Mapas de densidad acústica	89
4.1.3. Relación entre frecuencias	94
4.1.4. Implicación en la evaluación de la comunidad de peces pelágicos	95
4.1.4.1. Correlación entre comunidades pelágicas	95
4.1.4.2. Co-ocurrencia de comunidades pelágicas	97

4.2. Identificación biológica de la capa epipelágica de dispersión acústica 98

4.2.1. Estaciones muestreadas biológicamente	99
--	----

4.2.1.1. Registros acústicos	99
4.2.1.1.1. Determinación de los valores de ruido constante	101
4.2.1.1.2. Valores de densidad acústica	102
4.2.1.1.3. Patrones acústicos multifrecuencia	103
4.2.1.2. Muestras biológicas	107
4.2.1.2.1. Principales grupos faunísticos capturados	108
4.2.1.2.2. Abundancia y distribución de los principales grupos faunísticos	112
4.2.1.2.2.1. Dimensiones de los organismos	118
4.2.1.2.3. Influencia del muestreador	118
4.2.1.2.3.1. Correlación entre grupos faunísticos	119
4.2.1.3. Condiciones ambientales en las estaciones de muestreo	121
4.2.1.3.1. Relación con la capa epipelágica de dispersión acústica	124
4.2.2. Grupos faunísticos detectados por la ecosonda científica a múltiples frecuencias	126
4.2.2.1. Análisis SIMPER	126
4.2.2.2. Análisis de la regresión lineal	127
4.2.2.2.1. Regresión lineal múltiple	127
4.2.2.2.2. Regresión lineal simple	128
4.2.2.3. Determinación de la categoría acústica dominante	130
4.2.2.4. Relación entre la energía acústica observada y esperada	133

Capítulo 5: Discusión

5.1. Las campañas de evaluación de stocks como plataformas para el estudio integrado del ecosistema pelágico	137
5.2. Optimización del proceso de evaluación de la comunidad de peces pelágicos	139
5.3. Influencia del sistema de muestreo en la identificación acústica de la comunidad zooplanctónica	142
5.4. Composición y distribución de la comunidad zooplanctónica	145
5.4.1. Relaciones tróficas entre la comunidad zooplanctónica	147
5.5. Fitoplancton y condiciones ambientales	148
5.6. Cambios en la comunidad zooplanctónica detectados acústicamente sobre la plataforma continental	150
5.6.1. Zona costera	150
5.6.2. Zona intermedia	151
5.6.3. Zona profunda	152
5.7. Organismos detectados por la ecosonda científica	153
5.8. Propuestas para el futuro	155

Capítulo 6: Conclusiones 160

Bibliografía 166

Anexo 1

Determinación del espesor vertical de la celda de integración 180

Anexo 2

Determinación del volumen de la alícuota 184

Anexo 3

Resultados de la calibración de la ecosonda científica 188

Anexo 4

Desarrollo y aplicación de ecogramas virtuales 196

Resumen

En este estudio se ha llevado a cabo la caracterización acústica y la identificación biológica de la capa epipelágica presente en la plataforma continental del Golfo de Vera y del Mar de Alborán durante la época estival de los años 2013 y 2014. Para ello, la capa epipelágica fue detectada acústicamente empleando una ecosonda científica EK60 (Simrad) operando a diferentes frecuencias de trabajo: 18, 38, 70, 120 y 200 kHz, y en base a sus características acústicas se procedió a la identificación biológica mediante redes de plancton. Para cubrir un amplio espectro de tallas (meso y macrozooplancton) y capturar la comunidad susceptible de generar la respuesta acústica observada, se emplearon dos sistemas de muestreo: una red Bongo 40 equipada con mallas de 250 y 333 micras y una red Bongo 90 equipada con mallas de 500 y 2000 micras. Además, las variables termohalinas y la concentración de clorofila-a de la columna de agua fueron registradas en las estaciones de muestreo mediante un CTD provisto de un sensor de fluorescencia.

La combinación de los datos acústicos y biológicos mostró que la frecuencia de mayor respuesta de la capa epipelágica varió a lo largo de la plataforma continental, en función de la comunidad zooplanctónica presente en la columna de agua, pasando de una comunidad costera resonante en la frecuencia de 70 kHz en 2013 y en 120 kHz en 2014, compuesta principalmente por crustáceos de pequeño tamaño, a otra comunidad resonante en la frecuencia de 38 kHz en las zonas comprendidas entre 40 y 200 m de fondo, de composición faunística heterogénea. Al final de la plataforma continental se detectó la incursión de una capa profunda, resonante en la frecuencia de 18 kHz, compuesta por larvas de peces mesopelágicos.

La capacidad de los organismos para dispersar sonido depende de su concentración en el medio, de su tamaño y de sus características corporales, por esto no todos los organismos presentes en la columna de agua fueron detectados por las frecuencias de trabajo. Los crustáceos resultaron ser el grupo faunístico más abundante en las muestras y fueron detectados eficazmente en las frecuencias de 70, 120 y 200 kHz en ausencia de otros organismos con mayor capacidad para dispersar sonido como las larvas de peces. Las larvas de peces, aunque fueron poco abundantes en las muestras, dominaron la señal acústica en un amplio rango de frecuencias, enmascarando la señal del resto de grupos faunísticos debido al aire que contiene su vejiga natatoria. El tamaño de las larvas condicionó su frecuencia de mayor respuesta, detectándose larvas de mayor tamaño en la frecuencia de 18 kHz y de un menor tamaño en la frecuencia de 38 kHz.

Por otro lado, se constató que la interacción entre la comunidad zooplanctónica y la comunidad de peces pelágicos en la frecuencia de evaluación acústica (38 kHz), se maximizó a profundidades de entre 40 y 100 m de profundidad, enmascarando entre el 33 y el 37 % los cardúmenes de peces. La existencia de una relación de tipo lineal entre la energía dispersada por la capa de zooplancton a las diferentes frecuencias empleadas, permitió el desarrollo de un ecograma virtual, que separó eficazmente los registros de los peces de aquellos correspondientes al zooplancton, contribuyendo a mejorar el proceso de interpretación de ecogramas y, como extensión, optimizar el proceso de evaluación de pequeños pelágicos costeros.

Resum

En aquest estudi s'ha dut a terme la caracterització acústica i la identificació biològica de la capa epipelàgica present a la plataforma continental del Golfo de Vera i del mar d'Alboran durant l'època estival dels anys 2013 i 2014. Per aquest fi, la capa epipelàgica fou detectada acústicament mitjançant una ecosonda científica EK60 (Simrad) operant a diferents freqüències de treball: 18, 38, 70, 120 i 200 kHz, i en base a les seves característiques acústiques es va procedir a la identificació biològica mitjançant xarxes de plàncton. Per a cobrir un ample espectre de talles (meso i macrozooplàncton) i capturar la comunitat susceptible de generar la resposta acústica observada, es van emprar dos sistemes de mostreig: Una xarxa Bongo 40 equipada amb malles de 250 i 333 micres i una xarxa Bongo 90 equipada amb malles de 500 i 2000 micres. A més, les variables termohalines i la concentració de clorofila-a de la columna d'aigua foren registrades en les estacions de mostreig mitjançant un CTD equipat amb un sensor de fluorescència.

La combinació de les dades acústiques i biològiques mostrà que la freqüència de major resposta de la capa epipelàgica va variar al llarg de la plataforma continental, en funció de la comunitat zooplanctònica present a la columna d'aigua, passant d'una comunitat costanera ressonant en la freqüència de 70 kHz en 2013 i en 120 kHz en 2014, compost principalment per crustacis de petit mida, a altra comunitat ressonant en la freqüència de 38 kHz a les zones compreses entre 40 i 200 m de fondària, de composició faunística heterogènea. A la fi de la plataforma continental es detectà la incursió d'una capa profunda, ressonant a la freqüència de 18 kHz, composta per larves de peixos mesopelàgics.

La capacitat dels organismes per a dispersar so depèn de la seva concentració en el medi, de la seva mida i de les seves característiques corporals, per això no tots els organismes presents a la columna d'aigua foren detectats per les freqüències de treball. Els crustacis resultaren ser el grup faunístic més abundant a les mostres i foren detectats eficaçment a les freqüències de 70, 120 i 200 kHz en absència d'altres organismes amb major capacitat per a dispersar so com les larves de peixos. Les larves de peixos, encara foren poc abundants en les mostres, dominaren la senyal acústica en un ampli rang de freqüències, emmascarant la senyal de la resta de grups faunístics degut a l'aire que conté la seva bufeta natatòria. La mida de les larves condicionà la seva freqüència de major resposta, detectant larves de major mida en la freqüències de 38 kHz.

Per altra banda, es constatà que la interacció entre la comunitat zooplanctònica i la comunitat de peixos pelàgics en la freqüència d'avaluació acústica (38 kHz), es maximitza a profunditats compreses entre 40 i 100 m de fondària, emmascarant entre el 33 i el 37 % de les moles de peixos. L'existència d'una relació de tipus lineal entre l'energia dispersada per la capa de zooplàncton a les diferents freqüències emprades, va permetre el desenvolupament d'un ecograma virtual, que va separar eficaçment els registres dels peixos d'aquells corresponents al zooplàncton, contribuint a millorar el procés d'interpretació d'ecogrames i, com extensió, optimitzar el procés d'avaluació de petits pelàgics costaners.

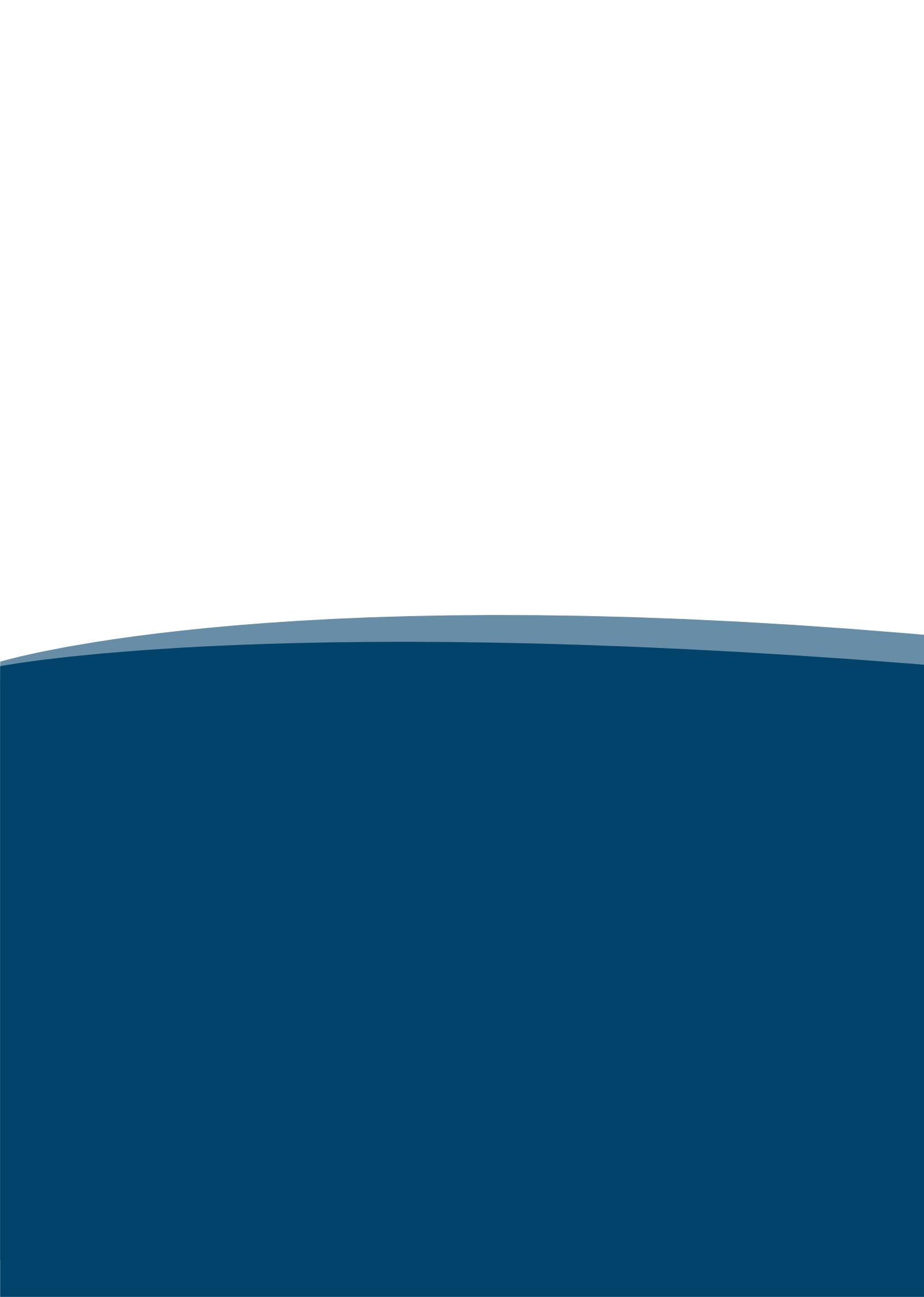
Summary

The present study has been performed in order to characterize acoustically and identify biologically the epipelagic scattering layer present in the Gulf of Vera and the Alboran Sea continental shelf during summer time in 2013 and 2014. To that end, the epipelagic layer was detected acoustically using a scientific echosounder EK60 (Simrad) operating at different working frequencies: 18, 38, 70, 120 and 200 kHz, and based on its acoustic characteristics, the biological identification was carried out by means of plankton nets. With the purpose of covering a wide size range (meso and macrozooplankton) and capturing the zooplankton community responsible of the observed acoustic response, two different sampling systems were employed: Bongo 40 plankton net equipped with 250 and 333 microns meshes and Bongo 90 net equipped with 500 and 2000 microns meshes. In addition, water column thermohalines variables and chlorophyll-a concentration were recorded at the sampling stations using a CTD equipped with a fluorescence sensor.

Matching acoustical and biological data showed the epipelagic layer frequency response varied along the continental shelf according to changes in the zooplankton community. In coastal areas, the resonance frequency was 70 kHz in 2013 and 120 kHz in 2014 and the zooplankton community was mainly composed of small crustaceans, while in areas between 40 and 200 m depth, the resonance frequency was 38 kHz and the zooplankton community composition was heterogenic. At the edge of the continental shelf, a deep scattering layer appeared at 18 kHz, which was associated with mesopelagic fish larvae.

The capacity of the organisms to disperse sound depends on their concentration in the medium, their size and their body features, so not all of the organisms present in the water column were detected by the working frequencies. Crustaceans were the faunal group most abundant in the biological samples and they were effectively detected at 70, 120 and 200 kHz in the absence of other stronger scatters such as fish larvae. Fish larvae, although they were less abundant in the samples, dominated the acoustic signal in a wide range of frequencies, masking other faunal groups due to the air inside their swimbladder. The larvae size determined its resonance frequency; large larvae were detected at 18 kHz, while smaller ones were detected at 38 kHz.

Moreover, it was confirmed that the interaction between the pelagic fish community and the zooplankton community detected at the stabilized assessment frequency, 38 kHz, was maxima at depth ranging from 40 to 100 m, masking the 33 % of the fish schools detected in the study area in 2013 and the 37 % in 2014. The existence of a linear relationship between the zooplankton layer at the different frequencies analyzed allowed the development of a virtual echogram which effectively separated fish echotraces from those belonging to the zooplankton community, helping to improve the echogram scrutinize process and, as an extension, to optimize the small pelagic acoustical assessment process.



CAPÍTULO 1

Introducción



1.1. Las subdivisiones del medio marino

1.2. Las comunidades pelágicas

- 1.2.1. El Necton
- 1.2.2. El Plancton

1.3. La acústica subacuática

- 1.3.1. Fundamentos de la acústica subacuática
- 1.3.2. La ecosonda científica
 - 1.3.2.1. Componentes de la ecosonda científica
 - 1.3.2.2. Funcionamiento de la ecosonda científica
- 1.3.3. Ecuación clásica del radar
- 1.3.4. Tipos de blancos
- 1.3.5. Reflectividad de los organismos: Fuerza de blanco
- 1.3.6. Unidades de medida de la energía acústica

1.4. Interpretación de ecogramas

- 1.4.1. Respuesta acústica multifrecuencia del plancton y el necton

Los datos acústicos obtenidos durante las campañas de evaluación de peces pelágicos tienen un gran potencial para el estudio del ecosistema pelágico, ya que en ellos subyace información sobre otra comunidad pelágica de gran interés ecológico, la comunidad planctónica. La interpretación integrada de los ecogramas, y no focalizada únicamente en la comunidad de peces, supone un avance en el estudio del ecosistema pelágico.

La interpretación de los registros acústicos es una etapa clave en la determinación de la abundancia de peces. El análisis de los ecogramas consiste en detectar y delimitar cardúmenes de peces y asignarlos a una especie, o en el caso de que se trate de una comunidad mixta, a proporciones de especies. Para ello, se llevan a cabo pescas de verificación o identificación. La frecuencia estipulada internacionalmente para la evaluación de stocks pelágicos es de 38 kilohercios (kHz) y detecta eficazmente los peces que poseen vejiga natatoria. Además, detecta otros tipos de blancos acústicos, como son los asociados a la comunidad planctónica.

La evaluación precisa de los stocks de peces pelágicos es fundamental para su gestión sostenible. Por lo tanto, es necesario conocer cómo influye la presencia de otros registros acústicos en la detección de los cardúmenes de peces y, cuantificar la mejora en la evaluación de estas poblaciones al aplicar ecogramas virtuales basados en la combinación de frecuencias.

En la época estival, los ecogramas recogidos en el Golfo de Vera y el Mar de Alborán registran una capa epipelágica de dispersión acústica que coexiste con la comunidad de peces. La identificación biológica de esta capa, mediante diferentes sistemas de muestreo, permitirá analizar de qué comunidades planctónicas está compuesta, y determinar que organismos son detectados por la ecosonda científica.

Hasta la fecha, en el marco de la evaluación de peces, esta capa de dispersión acústica se ha tratado como reverberación o registro indeseable y ha sido sistemáticamente excluida de los ecogramas. La caracterización esta capa a diferentes frecuencias y su identificación por medio de toma de muestras, abre la puerta al estudio integrado del ecosistema pelágico mediante técnicas acústicas.

1.1. Las subdivisiones del medio marino

La vida en los mares y océanos se ha desarrollado en tres dimensiones y ha colonizado tanto los fondos como las masas de agua. Es posible subdividir el medio marino en dos grandes ambientes o dominios, el dominio bentónico y el dominio pelágico (**Figura 1.1**). El dominio bentónico está formado por el fondo marino y la capa de agua que está en íntimo contacto con él; el dominio pelágico está formado por las aguas libres que no están en contacto con el fondo.

El fondo marino o sustrato sólido presenta una estructura geomorfológica que permite establecer diferentes zonas: la plataforma continental, el talud continental y las llanuras abisales (**Figura 1.1**). La plataforma continental es la parte de la corteza terrestre que se extiende bajo el mar, su pendiente desciende gradualmente desde la costa hasta una profundidad teórica de 200 metros. Después, su pendiente experimenta un cambio brusco que se considera como límite de la plataforma y el comienzo del talud continental. El límite de la plataforma continental marca la frontera entre la zona nerítica (desde 10 m de profundidad hasta el fin de la plataforma continental) y la zona oceánica (desde la terminación de la plataforma continental hacia mar adentro). El talud continental es la continuación de la plataforma continental y se extiende hasta el origen de las llanuras abisales o cuencas oceánicas, presentando una acusada pendiente. Las cuencas oceánicas, de unos 4000 m de profundidad media, se caracterizan por grandes extensiones planas (llanuras abisales) interrumpidas por cadenas de montañas submarinas (dorsales) y grandes depresiones (fosas oceánicas).

En la columna de agua existe una zonación vertical (**Figura 1.1**) debida a diversos factores ambientales, como la incidencia de luz solar, la temperatura o la presión. Esto, condiciona el nicho ecológico de las diferentes especies marinas. La capa superior de la columna de agua, también llamada zona epipelágica, se extiende desde la superficie hasta una profundidad de 200 m, y se considera como zona fótica, pues coincide con el límite de penetración de la luz solar. Por debajo de esta capa superficial se encuentra la zona mesopelágica, que comprende desde los 200 hasta los 1000 m de profundidad, en ella penetra muy poca luz y se considera como el inicio de la zona afótica. Por último, entre los 1.000 m y el suelo oceánico se extiende la zona batipelágica donde la oscuridad es teóricamente completa.

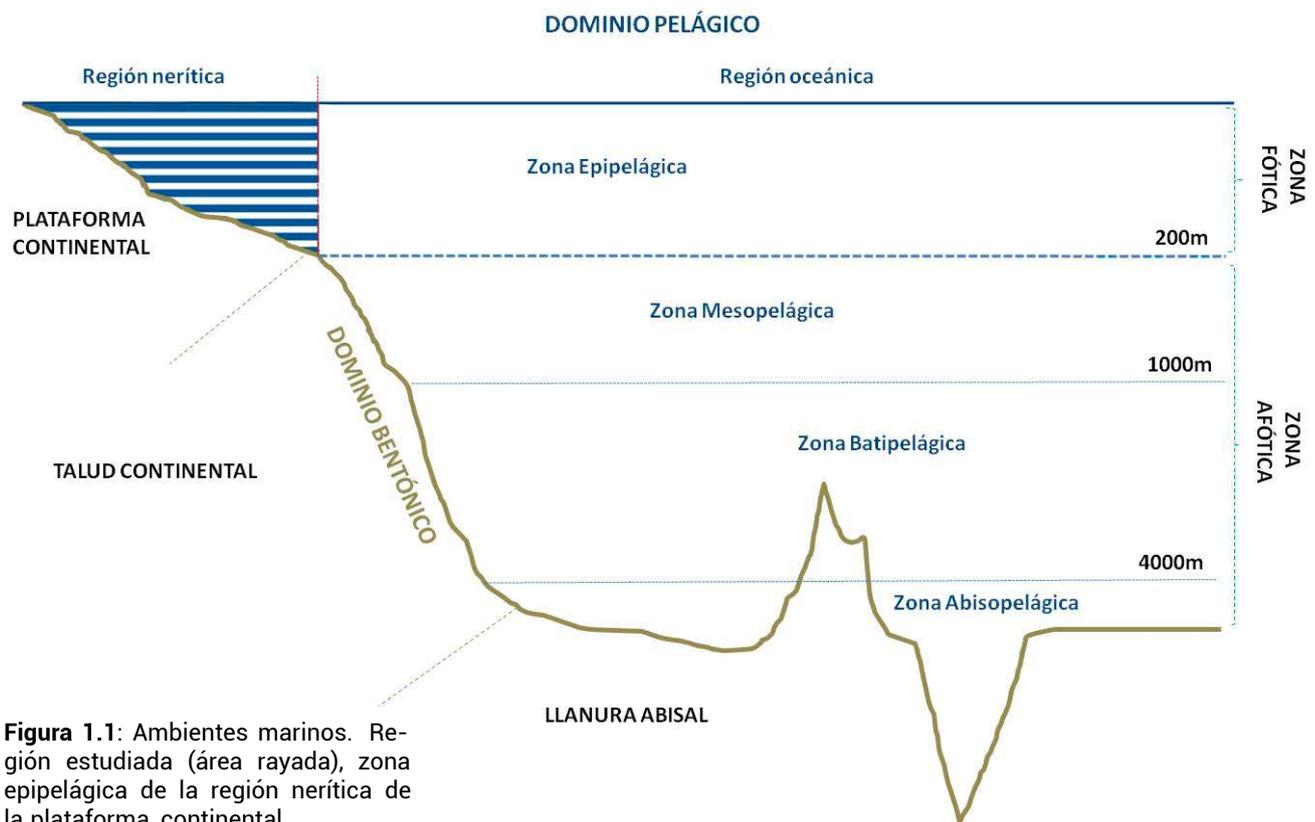


Figura 1.1: Ambientes marinos. Región estudiada (área rayada), zona epipelágica de la región nerítica de la plataforma continental.

1.2. Las comunidades pelágicas

Los organismos que habitan en el dominio pelágico se dividen en dos grandes grupos ecológicos: necton y plancton. El necton está integrado por aquellos organismos adaptados a la natación activa. El plancton incluye aquellos organismos que, debido a su escasa capacidad de movimiento, son arrastrados pasivamente por la actividad de las corrientes, las olas o el viento.

1.2.1. El Necton

El término **necton** proviene del griego *nekton* que significa "que nada" y fue acuñado por Ernst Haeckel en 1890. El necton está integrado por aquellos animales nadadores, capaces de contrarrestar los movimientos del mar.

La zona pelágica es un medio ecológico de extraordinaria uniformidad. Por ello, las formas nectónicas se reducen a pocos modelos de organización, tanto en estructuras como en funciones, presentándose múltiples casos de convergencia evolutiva. Los principales grupos de animales que forman la asociación ecoló-

gica del necton son los crustáceos, moluscos, peces, reptiles y mamíferos (Cognetti *et al.*, 1999).

Los peces pelágicos están perfectamente adaptados a la natación activa. Generalmente, presentan forma de huso o torpedo lo que disminuye la resistencia al avance. Además, su cuerpo se encuentra lubricado por recubrimientos mucosos que reducen la fricción con el agua, al mismo tiempo que protegen a la piel contra traumatismos e infecciones. Los peces pelágicos poseen una estructura corporal compleja con avanzados sistemas circulatorio, respiratorio, y nervioso, y una cefalización muy clara relacionada con su condición depredadora. El desarrollo de un órgano de flotación hidrostático, como es la vejiga natatoria (**Figura 1.2**), les permite flotar a un nivel determinado, sin hundirse ni ascender. También, poseen un sistema auditivo sofisticado responsable de su equilibrio, y cuentan con un órgano para determinar su posición en el agua, denominado "línea lateral" (Margalef, 1974; Cognetti *et al.*, 1999).

Una característica que comparten los pequeños y medianos pelágicos es la formación de agrupaciones denominadas bancos o cardúmenes. Los cardúmenes, generalmente monoespecíficos y de tallas similares, se comportan como un súper organismo. Se trata de una estrategia adaptativa que les facilita el movimiento (el grupo reduce el coste energético en el desplazamiento), la defensa contra los depredadores y la reproducción (ahorro en el encuentro entre sexos) (Cognetti *et al.*, 1999).

A lo largo de día, los peces pelágicos se organizan en cardúmenes ocupando la columna de agua, aunque cerca del fondo para evitar la depredación. Durante la noche, los individuos formadores del cardumen ascienden hacia la superficie (migración nictemeral) y se dispersan para buscar alimento (**Figura 1.3**). La situación diurna, en la que los peces se encuentran separados del fondo marino y concentrados en una zona determinada, permite estudiarlos y evaluarlos mediante técnicas acústicas.

1.2.1. El Plancton

El término plancton fue utilizado por primera vez por Víctor Hensen en el año de 1887 y significa "errante" o "vagabundo". Se define como el conjunto de organismos vegetales y animales de tamaño microscópico que viven en las aguas dulces o saladas, flotando o dotados de escasos elementos de locomoción.

La comunidad planctónica puede ser concebida como una compleja red biológica formada por algas microscópicas (fitoplancton) y especies animales (zooplancton y peces). Usando como fuente de energía la luz solar, el fitoplancton produce materia orgánica a partir de agua y materia inorgánica. Esta materia orgánica es consumida por los consumidores primarios (herbívoros) y los consumidores secundarios o terciarios (carnívoros). Final-

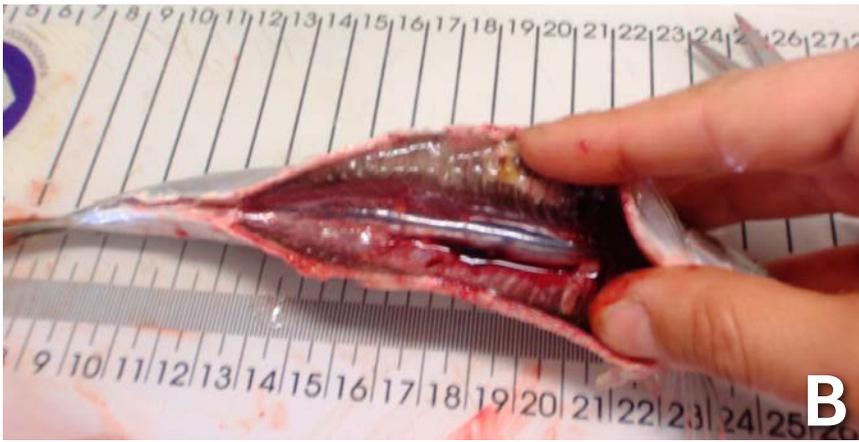


Figura 1.2: Detalle vejiga natatoria. **A:** Tonino (*Scomber colias*), **B:** Sardina (*Sardina pilchardus*).

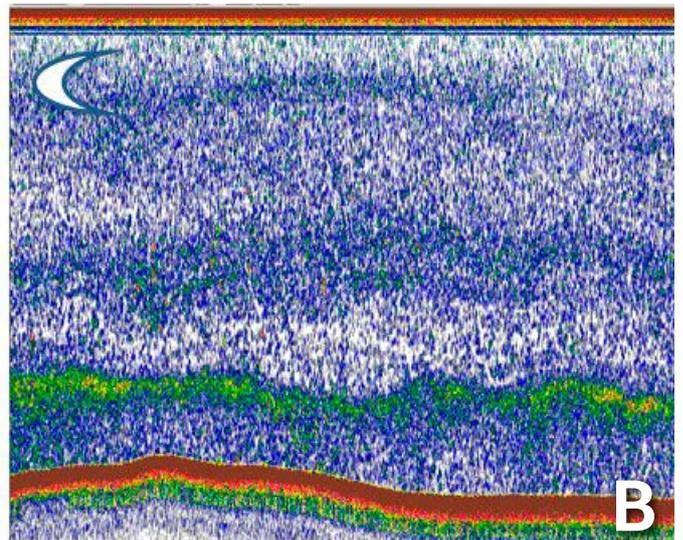
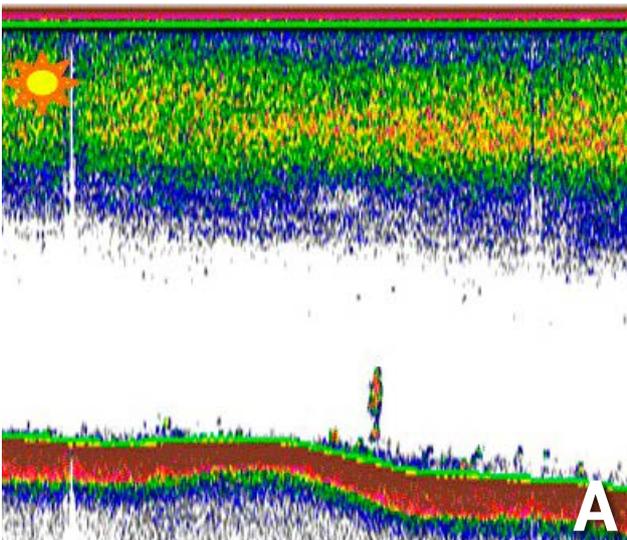


Figura 1.3: Ecogramas obtenidos por una ecosonda científica. **A:** Situación diurna. **B:** Situación al ocaso.

mente, las bacterias descomponedoras la metabolizan cerrando la cadena trófica marina. (Begon *et al.*, 1998).

Los organismos marinos pueden formar parte del plancton durante una parte o toda su ontogenia. Aquellos organismos que ocupan la columna de agua de forma permanente se denominan holoplanctónicos, como copépodos o cladóceros. En contraposición, encontramos organismos que ocupan la columna de agua de manera temporal, durante una parte de su ontogenia, se denominan meroplancton, como los equinodermos o algunos cnidarios, cuyas larvas se desarrollan en la columna de agua pero los adultos forman parte del bentos (Cognetti *et al.*, 1999).

La producción vegetal (fitoplancton) y animal (zooplancton) está sujeta a ciclos anuales, relacionados con la disponibilidad de nutrientes en el medio (**Figura 1.4**). En invierno, la ruptura de la estratificación de la columna de agua, debida a la disminución de la temperatura, propicia el aumento de los nutrientes en las capas superficiales. Al inicio de la primavera, la mayor penetración de los rayos solares junto al incremento de nutrientes favorece la proliferación de los organismos fotosintéticos, detectándose el primer pico de producción primaria (fitoplanctónica) en el medio. Aprovechando el incremento de fitoplancton, el zooplancton comienza a desarrollarse, alcanzando su máxima abundancia a finales de primavera-principios de verano. Las altas temperaturas de los meses estivales calientan las capas superficiales del mar y la columna de agua queda estratificada, como consecuencia se produce el mínimo de producción primaria seguido de un mínimo de producción secundaria. La inestabilidad que caracteriza al otoño contribuye al aumento en la disponibilidad de nutrientes y se produce un segundo pico de abundancia, pero de menor intensidad que el de primavera (Margalef, 1974; Begon *et al.*, 1998).

La composición de especies que se encuentra en un área determinada está condicionada por las condiciones ambientales. Por esto, dependiendo del grupo zooplanctónico que se considere su patrón de distribución estacional cambia (Calbet, 2001; Berline *et al.*, 2012). Para el Mediterráneo, se pueden diferenciar cinco patrones estacionales en función del máximo de abundancia anual.

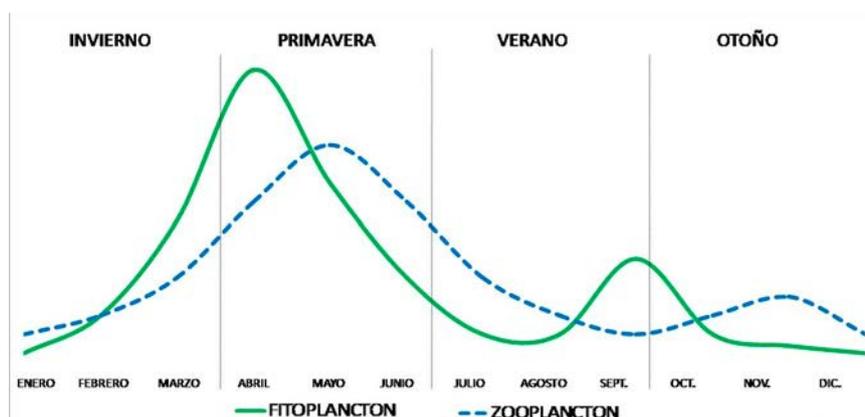


Figura 1.4: Variaciones estacionales de la producción primaria (fitoplancton) y secundaria (zooplancton).

Así, para los copépodos el máximo anual ocurre a finales de invierno-principios de primavera; para los cladóceros se da en verano; y los ostrácodos alcanzan su máxima densidad en otoño-invierno. Los quetognatos, pterópodos y doliólidos, suelen presentar su máximo anual a finales de otoño-principios de invierno, aunque su patrón no se repite en todas las localizaciones mediterráneas. Por último, los sifonóforos, apendicularias y medusas presentan un patrón irregular. Los principales factores que controlan los cambios en la comunidad zooplanctónica son: el flujo de nutrientes, la temperatura del agua marina y las características de las masas de agua (Berline *et al.*, 2012).

Aunque existe una gran heterogeneidad en los organismos formadores del plancton, todos comparten convergencias adaptativas (**Figura 1.5**), encaminadas a prevenir el hundimiento en la columna de agua, entre las que destacan (Cognetti *et al.*, 1999):

- Minimizar su peso despojándose de toda estructura pesada como carcasas o esqueletos muy densos.
- Maximizar la "superficie específica" o relación entre la superficie del cuerpo y su volumen favoreciendo la flotación y la absorción de nutrientes. Los copépodos, por ejemplo, desarrollan expansiones corporales en forma de apéndices natatorios que les permiten poseer cierta capacidad de movimiento y evitar el descenso.
- Desarrollar dispositivos de flotación formando cavidades con aire como ocurre con algunos sifonóforos, medusas o larvas de peces, o acumulando sustancias de densidad menor al agua de mar, como en el caso de las diatomeas o huevos de peces.
- Poseer una densidad similar al medio. Las medusas cuyo cuerpo gelatinoso está formado por un 95% de agua, pesan lo mismo que el volumen de agua que desalojan y por lo tanto tienden a poseer flotabilidad neutra.

Sieburth en 1978 (Sieburth, 1978) propuso la clasificación de los compartimentos trófico-taxonómicos del plancton en función de su tamaño (**Tabla 1.1**):

- El virioplancton, que está representado fundamentalmente por virus (femtoplancton).
- El bacterioplancton está formado por bacterias unicelulares (picoplancton).
- El mycoplancton incluye a los hongos marinos (nanoplancton).
- El fitoplancton está constituido por organismos vegetales y el protozooplancton lo forman organismos animales (nano y microzooplancton).
- El muestreo de estos cuatro grupos se realiza con botellas oceanográficas (Harris *et al.*, 2000) (**Figura 1.6A**).
- El metazooplancton engloba las categorías de meso, macro y megaplancton. El mesoplancton, está constituido principalmente por copépodos, quetognatos, sifonóforos, doliólidos, apendicularias y algunos de los estadios larvarios de peces. El macroplancton, por organismos de mayor tamaño como

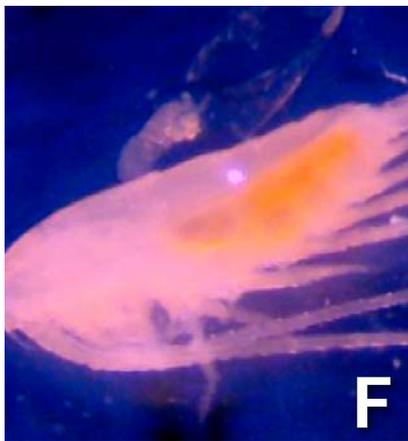
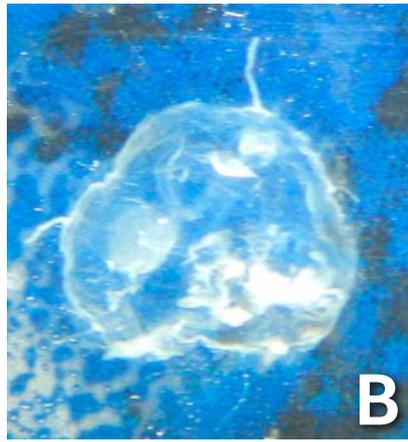
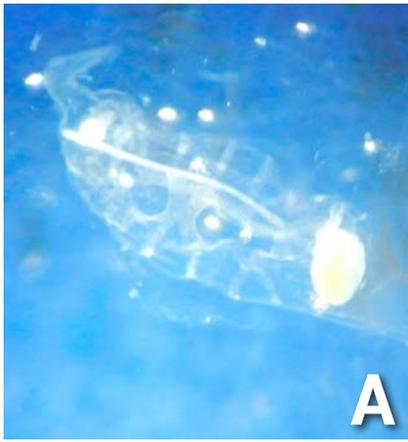


Figura 1.5: Adaptaciones de los organismos zooplanctónicos al ambiente pelágico. **A:** Salpas: sin estructuras pesadas o calcificadas. **B:** Medusas: compuestas por un 95% de agua además, los adultos contienen aire en su interior. **C:** Larvas de crustáceos decápodos: desarrollo de expansiones laterales. **D:** Detalle de las vacuolas de gas de la medusa *Pelagia noctiluca*. **E:** Copépodos formación de largos apéndices natatorios y acumulo de aceites en su interior (naranja-amarillo). **F:** Detalle de la gota de aceite en copépodo (naranja-amarillo). **G:** Sifonóforos: concentración de sustancias oleosas (amarillo).

eufausiáceos o diversos estadios de desarrollo de peces. El megaplankton se compone de grandes formas tales como colonias de cnidarios (medusas, sifonóforos) o de tunicados (pirosomas).

- El muestreo de estas categorías se lleva a cabo mediante “redes de plancton” (Harris *et al.*, 2000) (**Figura 1.6B y C**).
- El necton está constituido fundamentalmente por peces y contiene las formas animales de mayor tamaño, a partir de 2 centímetros (cm).

PLANCTON	FEMTO- 0.02-0.2 μm	PICO- 0.2-2 μm	NANO- 2-20 μm	MICRO- 20-200 μm	MESO- 0.2-20 mm	MACRO- 2-20 cm	MEGA- 20-200 cm			
NECTON						2-20 cm	20-200 cm	2-20 m		
VIRIO-	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁷									
BACTERIO-		10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁶								
MYCO-			10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵							
FITO-			10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁴							
PROTOZOO-			10 ⁻⁶ - 10 ⁻²							
METAZOO-				10 ⁻⁴ - 10 ⁰						
NECTON						10 ⁻¹ - 10 ¹				
TALLA (m)	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹

Tabla 1.1: Clasificación de los organismos pelágicos por tamaños (adaptado de Sieburth, 1978, fig.1). En verde, las comunidades estudiadas del plancton y del necton en este estudio.



Figura 1.6: Muestreadores empleados en muestreos de plancton. **A:** Botella oceanográfica. **B:** Red de plancton Bongo 40. **C:** Red de plancton Bongo 90.

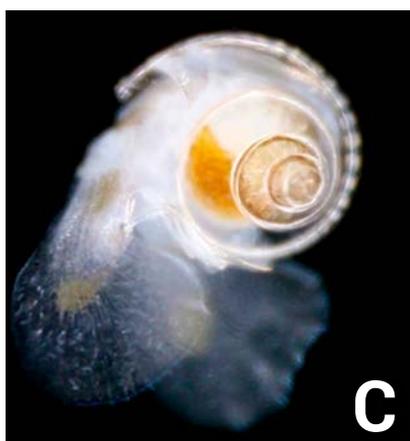
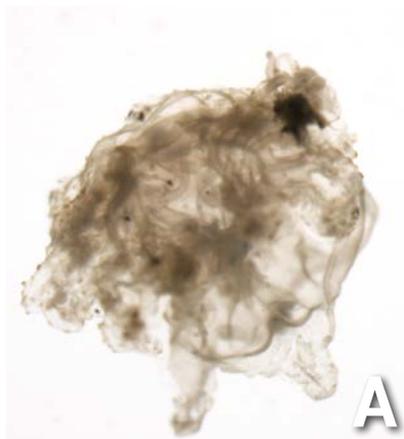


Figura 1.7: Tipos de plancton en cuanto a su composición corporal. **A:** Estructura corporal de una larva de medusa compuesta por tejidos blandos. **B:** Exoesqueleto quitinoso de copépodos. **C:** Concha de carbonato cálcico de heterópodo, planktochronicles.org.

Atendiendo al material del que se compone el organismo, dentro del zooplancton se distinguen:

- Organismos gelatinosos (**Figura 1.7A**) en el que se incluyen organismos como medusas, salpas, doliólidos. Pueden presentar o no vesículas de aire en su interior.
- Organismos quitinosos (**Figura 1.7B**) representados fundamentalmente por los crustáceos (copépodos, ostrácodos, eufausiáceos...), cuyo exoesqueleto está formado por quitina.
- Organismos calcáreos (**Figura 1.7C**) donde se engloban aquellos organismos dotados de una concha externa formada de carbonato cálcico como es el caso de los heterópodos.

Los organismos planctónicos también pueden clasificarse en base al modelo de dispersión que explica su reflexión acústica. Para este tipo de clasificación, el proyecto europeo "Species Identification Methods From Acoustic Multi-frequency Information", SIMFAMI (Fernandes *et al.*, 2006) desarrolló el principio de categorización acústica. Este principio discrimina a los organismos en tres clases o categorías diferentes: "Fluid-like", "Elastic-shelled" y "Resonant", también denominado "Gas-bearing" (Martin *et al.*, 1996, Simmonds y MacLennan, 2005).

Cada una de estas tres categorías posee una firma acústica única, entendiendo ésta como el comportamiento de la energía reflejada por los individuos al ser insonificados en un rango de frecuencias creciente (Holliday *et al.*, 1989). Dentro de cada clase existe cierta variabilidad debido a la conducta de los individuos en el medio natural, no sujeta a modelos (Martin *et al.*, 1996). En la presente tesis, para referirse a estas tres clases de organismos, se empleará la nomenclatura propuesta por Martin y Simmonds y MacLennan (Martin *et al.*, 1996 y Simmonds y MacLennan, 2005): "Fluid-like", "Elastic-shelled" y "Gas-bearing".

La clase "**Fluid-like**" incluye a los organismos de cuerpos blandos cuya composición y densidad es similar al agua de mar. Además, el cambio que se produce en la velocidad del sonido al atravesar su cuerpo es muy pequeño. A esta clase pertenecen copépodos, eufausiáceos o quetognatos.

La clase "**Elastic-shelled**" está formada por organismos que poseen una concha externa de carbonato cálcico, como los gasterópodos.

Finalmente, en la clase "**Gas-bearing**" se agrupan los organismos que poseen vesículas gaseosas, como algunos sifonóforos, medusas adultas y larvas de peces.

1.3. La acústica subacuática

La tecnología acústica para la detección de organismos acuáticos se desarrolló hace menos de un siglo. Sin embargo, debido a sus múltiples ventajas y aplicaciones se ha convertido en un campo en continua evolución. En la actualidad, es posible obtener imágenes en 3D de la columna de agua (**Figura 1.8**; Chu, 2011).

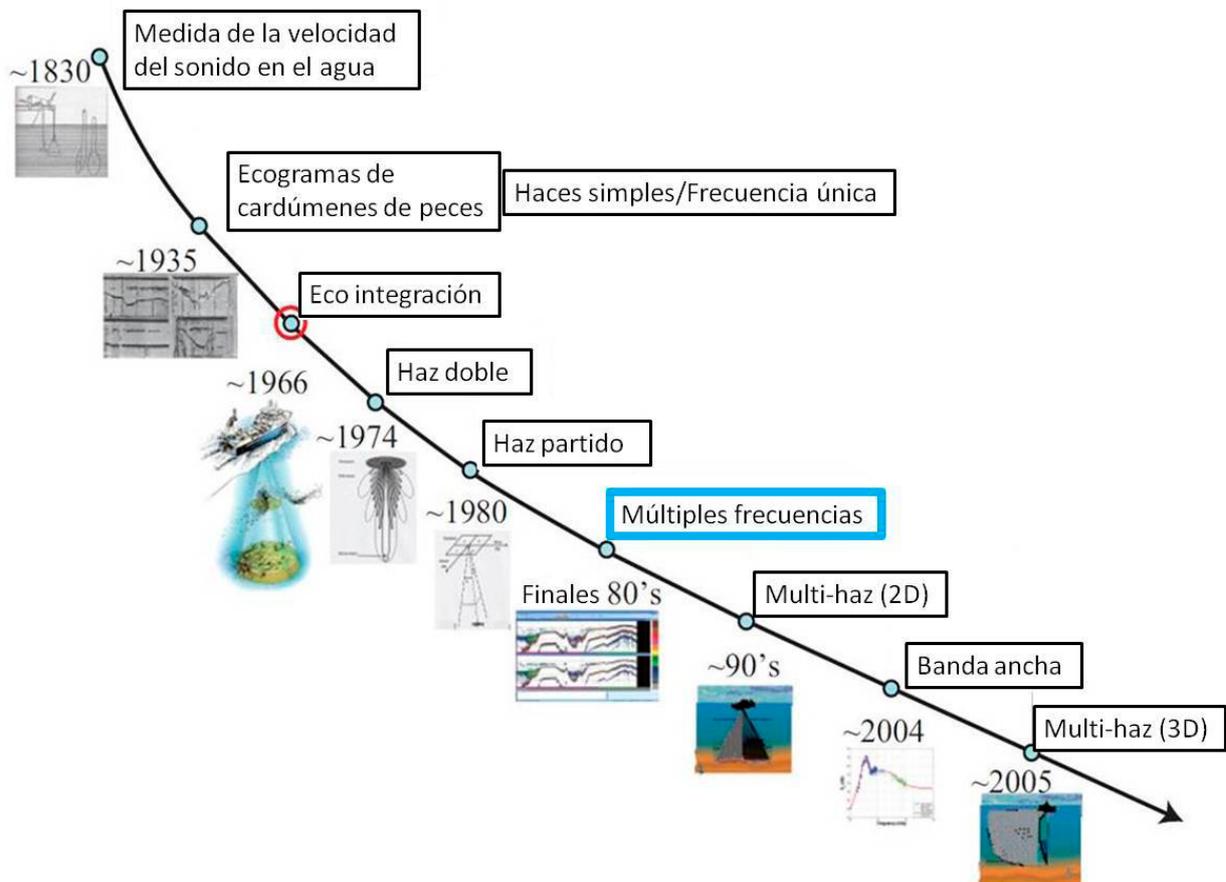


Figura 1.8: Evolución de la tecnología acústica aplicada al estudio del medio marino. Modificado de Dezhang Chu (2011).

La primera aplicación de la acústica con fines biológicos se le atribuye a Kimura (Kimura, 1929). Kimura insonificó un número diferente de peces dentro de un estanque y observó que la señal eléctrica recibida (voltaje) era directamente proporcional a los peces que contenía.

Después de la Segunda Guerra Mundial la tecnología acústica, restringida hasta entonces a fines militares, empezó a ser aplicada por científicos y pescadores. La eficiencia en la extracción de los recursos pesqueros se incrementó debido al uso de esta nueva tecnología combinada con los conocimientos que poseía la flota pesquera sobre los bancos de pesca. Gracias a ella, se pudo conocer el tamaño relativo de las agrupaciones de peces, su localización y distribución espacial.

Uno de los hitos más importantes en términos de procesamiento de los datos acústicos fue la introducción de la técnica de eco-

integración (Foote, 1982; 1983), que supuso el paso de la observación cualitativa a la determinación cuantitativa de los recursos pesqueros. La ecointegración es el proceso mediante el cual se integran en dos dimensiones (área) los ecos reflejados por los organismos presentes en el volumen de agua muestreado por la ecosonda científica (tridimensional). La cantidad de energía acústica reflejada por los organismos presentes en la columna de agua es proporcional a su abundancia, por lo que si se conoce la cantidad de energía acústica que refleja un organismo puede determinarse su abundancia.

La determinación de la cantidad exacta de energía que devuelve un blanco motivó a los científicos e ingenieros a desarrollar nuevas tecnologías para medir la fuerza acústica de los peces, y así realizar correctamente la conversión entre energía acústica y abundancia (número de individuos) (Clay y Medwin, 1977; Urick, 1983). Este factor se denomina fuerza de blanco (TS).

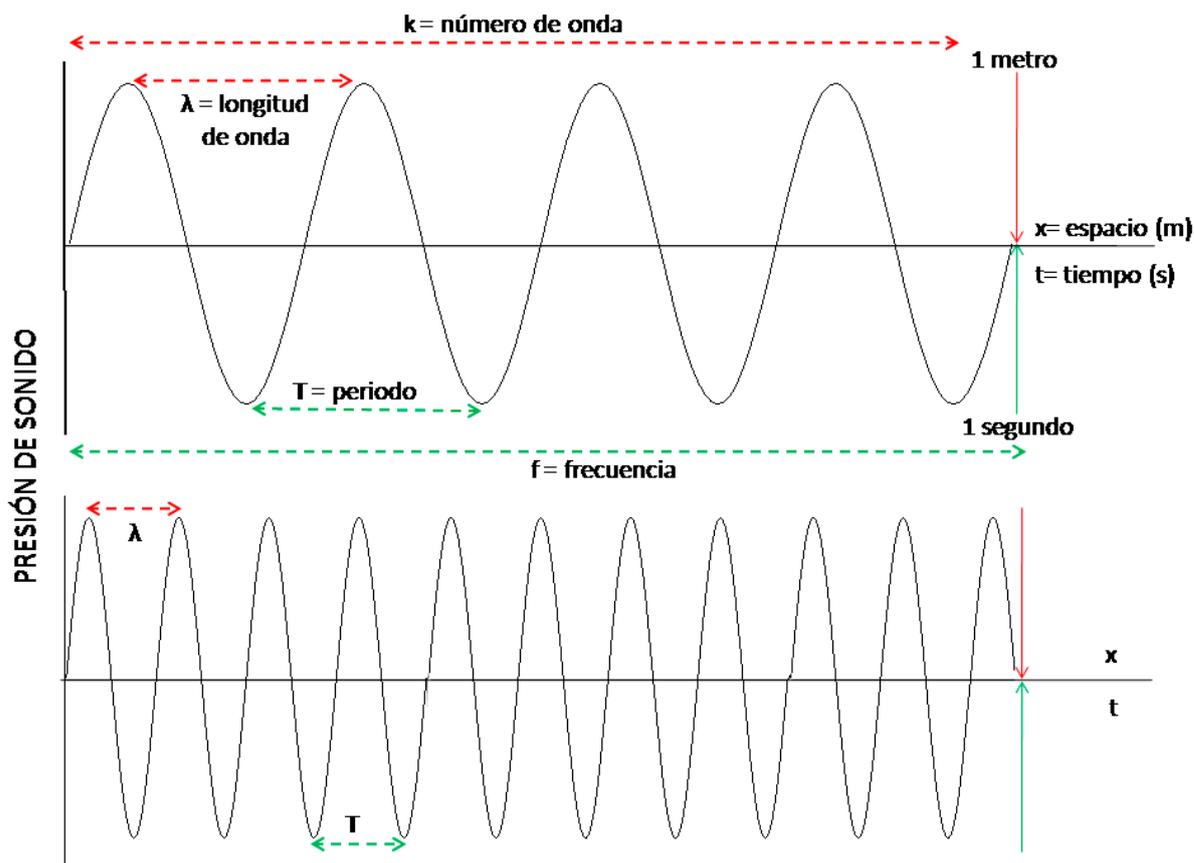
El desarrollo de factores de corrección para compensar las pérdidas que sufre el sonido con la profundidad, así como la mejora de las técnicas de calibración estándar posibilitó un estudio más exhaustivo de las comunidades pelágicas (Fernandes *et al.*, 2002).

A finales de los años ochenta, proliferó el uso simultáneo de múltiples frecuencias. Esto, permitió a los científicos comprobar que la señal acústica reflejada por los distintos organismos presentes en la columna de agua, se ve influenciada por la frecuencia a la que son insonificados (Chu, 2011). Este descubrimiento supuso un gran avance en la interpretación de ecogramas, pues abrió la puerta a la detección y separación de distintos grupos ecológicos (Simmonds y MacLennan, 2005).

1.3.1. Fundamentos de la acústica subacuática

El sonido es una onda (**Figura 1.9**) capaz de propagarse a través del medio acuático a una velocidad aproximada de 1500 metros por segundo (m/s). Este valor varía en función de la temperatura, la salinidad y la presión. En el ámbito de la acústica pesquera, el método recomendado para calcular, de forma precisa, la velocidad del sonido en el agua de mar es la ecuación descrita por Leroy en 1969 (Simmonds y MacLennan, 2005).

Para cualquier punto en el espacio la presión de la onda sonora varía según el seno de la velocidad angular de la oscilación multiplicada por el tiempo ($\sin(\omega t)$). Si x es la distancia a la fuente en el eje de propagación, para cada instante, la presión cambia según el seno del espacio recorrido (k) multiplicado por número de onda ($\sin(kx)$).



El periodo de la onda (T) es el tiempo que tarda la onda en realizar una oscilación completa. La frecuencia (f), en Hercios (Hz), es el número de ciclos por segundo de la oscilación:

$$f = \omega / 2\pi, \text{ o bien } 1/T$$

La longitud de onda (λ), calculada como la velocidad del sonido (c) dividida por la frecuencia (f), es la distancia que recorre una onda en un determinado intervalo de tiempo. Este parámetro es muy importante en los estudios acústicos ya que determina el límite de resolución de los blancos.

$$\lambda = c / f$$

La acústica subacuática se basa en el uso de ondas de sonido para estudiar las distintas comunidades que se encuentran en la columna de agua (plancton y necton) de manera conjunta y rápida. Los sistemas utilizados en acústica pesquera se fundamentan en la emisión de energía acústica, y en el análisis de la energía devuelta en forma de eco. Sus principales **ventajas** son (Simmonds y MacLennan, 2005):

- La gran intensidad de muestreo. El sonido se propaga bajo el agua a gran velocidad pudiendo recorrer grandes distancias, por lo que es posible muestrear un elevado volumen de agua en un periodo relativamente corto de tiempo.

Figura 1.9: Desplazamiento de las ondas de sonido.

- Las mediciones son remotas, no invasivas y no extractivas. Debido a la naturaleza no invasiva permiten una recogida simultánea de datos cualitativos y cuantitativos sobre varias comunidades de un ecosistema, desde el zooplancton hasta los grandes depredadores.
- Gran resolución espacial.
- Gran velocidad de adquisición y post-procesado de los datos.
- Generación de series históricas comparables que permiten analizar la variación espacio temporal de los organismos presentes en la columna de agua, en grandes áreas y con un coste bajo comparado con otro tipo de métodos.

Sin embargo, los métodos acústicos poseen ciertos **inconvenientes** (Simmonds y MacLennan, 2005) que se pueden resumir en:

- Existencia de zonas no muestreables (**Figura 1.10**): la “zona invisible” desde la superficie hasta la cara vibrante del transductor y la “zona muerta” cercana al fondo. Estas zonas no pueden ser detectadas acústicamente, lo cual conlleva que los organismos que viven en el fondo (bentónicos) o en muy estrecha relación con él (demersales) y en los primeros metros de la columna de agua (pleuston) no puedan ser estudiados con esta técnica.
- Necesidad de realizar pescas de verificación o identificación para determinar el organismo u organismos que producen la señal acústica.

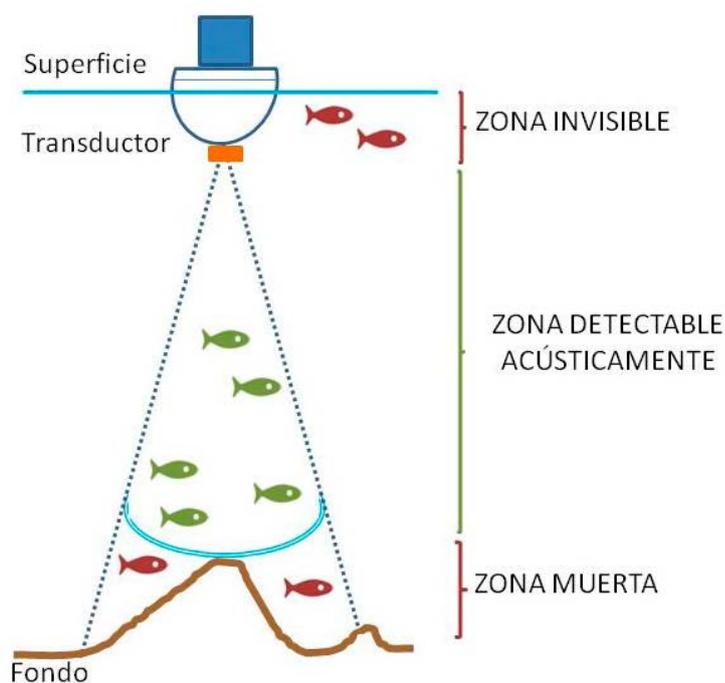


Figura 1.10: Zonas a tener en cuenta en un estudio acústico.

1.3.2. La ecosonda científica

1.3.2.1. Componentes de la ecosonda científica

Una ecosonda científica se compone de 3 elementos fundamentales (**Figura 1.11**): Unidad Central de Procesamiento (**CPU**), "General Purpose Transceiver" (**GPT**) y **transductor**.

Desde la CPU se controla la tasa de tiro (ping rate), con la que se envían pulsos de sonido a través de la columna de agua; el intervalo de profundidad que se observa en pantalla; el intervalo de profundidad que se registra en los ficheros primarios (de extensión .raw); y la profundidad máxima de adquisición de los datos. La tasa de tiro es un parámetro que viene determinado por la profundidad máxima de adquisición de los datos, debe ser mayor o igual al tiempo que tarda la onda en llegar al fondo y retornar hasta el transductor ($t=2R/c$). Para estudios realizados en la plataforma continental, se considera la profundidad máxima de adquisición de datos como 250 m. Por lo tanto, la tasa de tiro será 0.3 s o mayor. Si la tasa de tiro no fuera la adecuada, aparecería sobre el ecograma el eco correspondiente al ping anterior, denominado eco fantasma.

La CPU a través de comandos controla los parámetros eléctricos del GPT, como son potencia, ancho de banda y longitud de impulso.

Cuando se usan varias frecuencias cada una de ellas cuenta con su GPT y con su transductor, y todos los GPTs van conectados a la misma unidad de procesamiento mediante un "switch" de Ethernet (**Figura 1.12**).

El transductor es un dispositivo capaz de transformar un tipo de energía en otro. En el modo de transmisión convierte la energía eléctrica en energía acústica, en el modo de recepción lo hace de forma contraria.

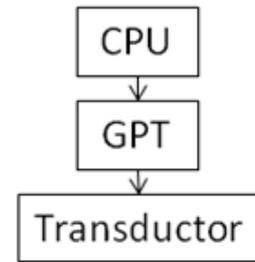


Figura 1.11: Esquema básico de la ecosonda científica.

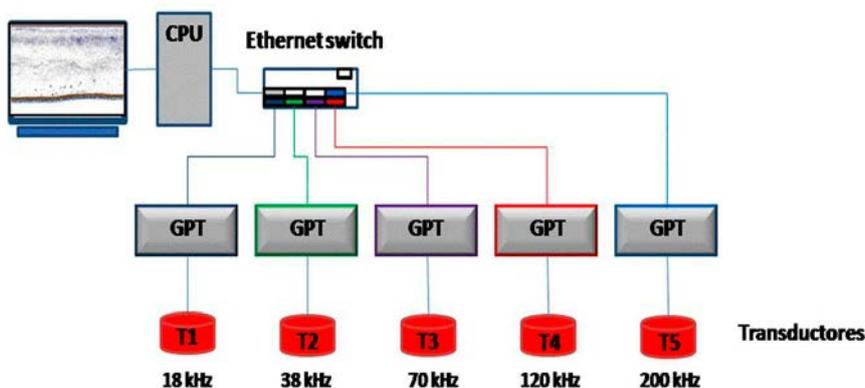


Figura 1.12: Esquema general de una ecosonda científica cuando se emplean diferentes frecuencias.

La dimensión y la frecuencia de emisión del transductor marcan el límite entre el campo cercano o zona de Fresnel y el campo lejano o zona de Fraunhofer. En el campo cercano, los frentes de onda no son paralelos y la intensidad varía rápidamente con la distancia al transductor de manera oscilatoria. En el campo lejano los frentes de ondas son prácticamente paralelos, la forma del haz es un ángulo sólido y pueden aplicarse leyes geométricas. La transición entre ambas zonas se produce gradualmente alrededor de un rango denominado R_b . El límite (profundidad) entre el campo cercano y lejano (R_b) se calcula como la máxima dimensión lineal del transductor (lado o radio) al cuadrado dividido por la longitud de onda de la frecuencia del transductor (Simmonds y MacLennan, 2005).

$$R_b = r^2 / \lambda$$

1.3.2.2. Funcionamiento de la ecosonda científica

El funcionamiento de la ecosonda científica se basa en la generación de pulsos de sonido discretos que viajan a través de la columna de agua. Cuando encuentran una discontinuidad en la densidad del medio (blanco acústico), asociado a un cambio en la impedancia acústica, reflejan cierta energía que es registrada durante el tiempo de escucha del equipo (**Figura 1.13**). La impedancia acústica (Z) es el producto entre la densidad (ρ) por la velocidad del sonido (c) del medio.

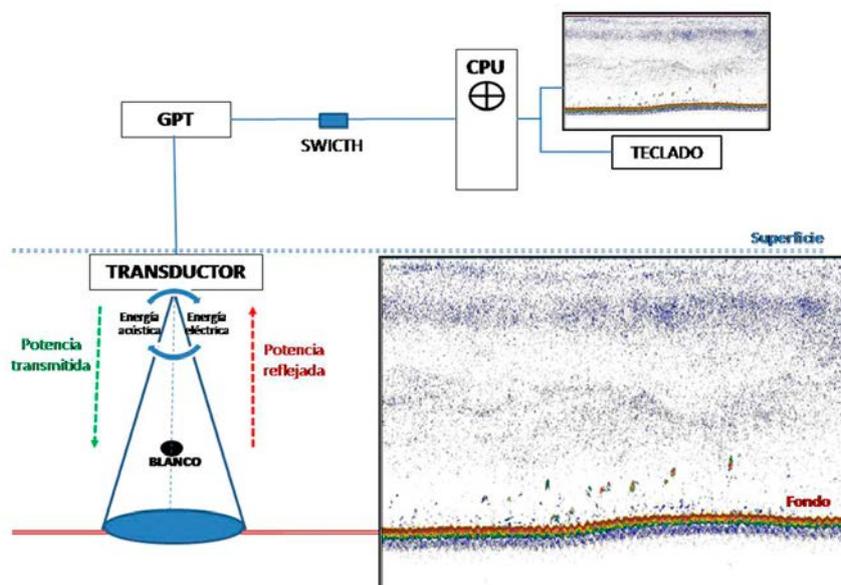


Figura 1.13: Elementos y funcionamiento de la ecosonda científica.

La ecosonda científica transmite pequeños paquetes de sonido a los que denominamos pulsos o pings que consisten en un cierto número de ciclos a una frecuencia determinada. La duración del pulso (τ) es igual a los ciclos emitidos divididos por la frecuencia de emisión. De esta manera, un pulso de 19 ciclos emitido a 38 kilohercios (kHz) tendría una longitud de pulso de 0.5 milisegundos (ms). Sin embargo, a 120 kHz los mismos ciclos ocuparán 0.1 ms. Si asumimos la velocidad del sonido como 1500 m/s, la longitud

del pulso será la velocidad del sonido por la duración del pulso. Si la duración del pulso a una determinada frecuencia es 1 ms, la longitud del pulso será 1.5 m.

Supongamos que hay dos blancos a distintos rangos (R_1 y R_2), para obtener su eco individual la diferencia ($R_2 - R_1$) debe ser lo suficientemente grande para que no se solapen. El eco del blanco que se encuentra más cerca del transductor será detectado primero, en el tiempo $t_1 = 2R_1/c$, el segundo eco producirá una señal a un tiempo $t_2 = 2R_2/c$. Para poder distinguir los dos blancos el tiempo en el que se registra el segundo blanco ha de ser mayor que el tiempo en que se registra el primer blanco más la duración del pulso ($t_2 > t_1 + \tau$) o bien:

$$R_2 - R_1 > c * \tau / 2$$

Por lo tanto, aquellos ecos que estén separados al menos la mitad de la longitud del pulso aparecerán como ecos distintos.

La frecuencia de la ecosonda, indicada por el fabricante, es la frecuencia central de la onda. Aunque, hay cierta energía que es transmitida en frecuencias muy próximas dentro de una banda centrada en ésta. Es lo que se conoce como ancho de banda (B) y va a depender de la duración del pulso. Así, cuanto más corto es el pulso mayor es el espectro de frecuencias. Al ser la duración del pulso el inverso del ancho de banda ($\tau = 1/B$), si la duración del pulso es de 1 ms, el ancho de banda será: $1/0.0001 = 1000 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$, si fuera 0.5 ms el ancho de banda sería 2 kHz.

El volumen muestreado por la ecosonda (V_0), determinará la cantidad de blancos que serán detectados, siendo este:

$$V_0 = \frac{c\tau\psi R^2}{2}$$

El ángulo sólido ψ , es la forma del haz y es igual a:

$$\psi = \frac{\beta_1\beta_2}{5600} \quad \begin{array}{l} \beta_1 \text{ ángulo proa-popa.} \\ \beta_2 \text{ ángulo babor-estribor.} \end{array}$$

1.3.3. Ecuación clásica del radar

La ecuación usada para determinar la energía acústica que devuelve un blanco se basa en la ecuación clásica del radar, y viene implementada en el programa de la ecosonda científica (manual de las ecosondas científicas EK500 y EK60, Simrad®).

La potencia (P_r) que tendremos en cualquier punto, si consideramos un medio ideal, sería directamente proporcional a la potencia transmitida (potencia efectiva del transductor; P_i) e inversamente proporcional a la distancia desde el foco de emisión de ondas (r). La forma del haz acústico se corresponde con un ángulo sólido

lido. La superficie de la esfera ($4\pi r^2$) centrada en el transductor es el área en el que progresivamente se ha de repartir la potencia transmitida.

Además hay que tener en cuenta la ganancia (G), parámetro determinado en la calibración. Este factor se emplea para corregir la desviación que existe entre el valor de TS de un blanco de referencia (esfera de cobre o tungsteno) y el estimado en la calibración.

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi r^2}$$

El medio acuático no es un medio ideal y la potencia transmitida disminuye conforme nos alejamos de la fuente, es lo que se conoce como pérdidas por absorción. El coeficiente de absorción (α) depende fuertemente de la frecuencia, cuanto mayor es ésta mayor es la absorción.

$$P_r = P_t G \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2}$$

Cuando la onda incide sobre un blanco, la cantidad de energía que éste devolverá depende de su superficie de reflectividad (σ).

$$P_r = P_t G \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \sigma$$

En este momento el blanco actúa como fuente puntual, emitiendo una señal que viajará de vuelta hasta el transductor, sufriendo de nuevo pérdidas geométricas y de absorción.

$$P_r = P_t G \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \sigma \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} G$$

Finalmente, la onda llega al transductor, y la potencia recibida dependerá del área efectiva de recepción.

$$P_r = P_t G \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \sigma \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

Si despejamos σ obtenemos la energía del blanco en función de la diferencia de potencias y de la frecuencia que se considere.

$$\sigma = \frac{P_r 64\pi^3}{P_t G^2 \lambda^2} r^4 10^{2\alpha r}$$

Llamamos punto de dispersión (S_p) a la superficie de reflectividad dividida por la superficie del ángulo sólido a un metro del transductor (r_0).

$$S_p = \frac{\sigma}{4\pi r_0^2} = \frac{P_r 16\pi^2}{P_t G^2 r_0^2 \lambda^2} r^4 10^{2\alpha r}$$

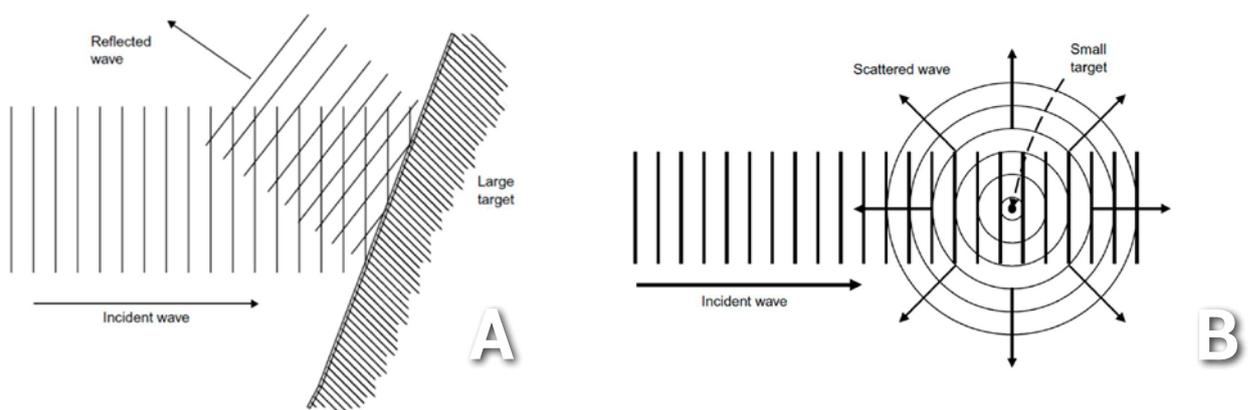
La forma más común de encontrar esta ecuación es en su forma logarítmica, es decir pasado a decibelios:

$$10\log_{10}(S_p) = 10\log_{10}(P_r) + 10\log_{10}(r^4 10^{2\alpha}) + 10\log_{10} \frac{P_t G^2 r_0^2 \lambda^2}{16\pi^2}$$

1.3.4. Tipos de blancos

En función la frecuencia empleada se pueden detectar blancos pequeños o grandes. Cuando el tamaño del organismo es mucho más grande que la longitud de onda, como ocurre con la comunidad nectónica, es la superficie la que determina la dispersión del sonido. Cuando la superficie es lisa, la dispersión es simplemente una onda reflejada cuya dirección está determinada por las reglas generales de la física, los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales. Si esta relación puede ser aplicable se dice que la dispersión es geométrica (**Figura 1.14A**; Simmonds y MacLennan, 2005).

Si el organismo es muy pequeño comparado con la longitud de onda, como ocurre con los organismos planctónicos, todo el blanco está sometido a la misma presión de sonido. Los organismos responden a la oscilación de presión incidente contrayéndose y expandiéndose, actuando como una fuente puntual de dispersión de ondas radiales onmidireccionales (**Figura 1.14B**, Simmonds y MacLennan, 2005). La intensidad del sonido dispersada por los blancos pequeños no suele ser la misma en todas las direcciones. En este caso, es el volumen en lugar de la forma lo que determina la dispersión (Demer y Martin, 1995). Si "d" es el tamaño característico de un organismo, entendido como la raíz cúbica de su volumen, la energía dispersada es proporcional a $(d / \lambda)^4$ cuando $d \ll \lambda$. Este fenómeno se conoce como la ley de Rayleigh de dispersión, y



se aplica tanto a la luz como al sonido. Para tamaños intermedios, donde las dimensiones del organismo y la longitud de onda son similares, la dispersión depende de la estructura geométrica y de las propiedades del material. Se produce entonces el fenómeno de la resonancia, mediante el cual la energía dispersada cambia rá-

Figura 1.14: Dispersión del sonido según el tamaño de los blancos. **A:** Blancos grandes. **B:** Blancos pequeños. Jonh Simmonds y David MacLennan (2005).

pidamente con la frecuencia. Siempre que la frecuencia de un pulso se aproxime a la frecuencia natural de oscilación de un blanco, la amplitud del eco recibido será máxima y el eco será recibido dentro de la región que se conoce como región de resonancia. Por lo tanto, todos los organismos acuáticos tendrán una frecuencia de resonancia propia, la cual es función de su tamaño y de su composición corporal (p. ej. si posee vacuolas lipídicas, burbujas de aire, vejiga natatoria...) (Simmonds y MacLennan, 2005).

1.3.5. Reflectividad de los organismos: Fuerza de blanco

El TS, es la medida en decibelios (dB) de la proporción de la energía incidente que es reflejada por un blanco, siendo un blanco cualquier objeto con un límite, en este caso un pez o un organismo zooplanctónico. En términos físicos, se define como la sección de dispersión transversal equivalente de un blanco (σ_{bs}), expresada en unidades de área (m^2). También, puede utilizarse la medida de la sección de dispersión esférica equivalente (σ_{sp}), la cual se relaciona con obs multiplicándola por 4π . σ_{sp} proviene de un antiguo concepto que considera al blanco acústico como una esfera que refleja la intensidad en todas las direcciones, el factor 4π proviene de la superficie de la esfera que es $4\pi R^2$.

$$\sigma_{bs} = R^2 I_b / I_i$$

Finalmente, el TS es la sección transversal equivalente expresada en decibelios:

$$TS = 10 \log_{10} (\sigma_{bs})$$

TS, σ_{bs} y σ_{sp} son formas alternativas de describir la misma propiedad física del blanco, su fuerza acústica dispersada. El TS se expresa en forma logarítmica debido a la gran diferencia la energía devuelta por los blancos y la transmitida desde la ecosonda. Para la mayoría los peces los TS están dentro del rango -60 dB a -20 dB. Las secciones transversales equivalentes englobarían cuatro órdenes de magnitud en el dominio lineal, de 0.000001 a 0.01 m^2 . Por lo tanto la σ_{bs} se calcula como la inversa del logaritmo:

$$\sigma_{bs} = 10^{\left(\frac{TS}{10}\right)}$$

La forma logarítmica es común en los trabajos prácticos, para dar valores dentro de un rango de números enteros. Aunque, es importante señalar, que el decibelio expresa la relación entre la energía que se recibe respecto de la que se envía. Decir que un blanco es 3 dB mayor que otro, significa que dispersa el doble de energía; si la diferencia entre blancos fuese 6 dB, la cantidad de energía dispersada sería cuatro veces mayor. Un gran tónico puede tener

un TS de -20 dB, diez mil veces más grande que el de un espadín (*Sprattus sprattus*) de 4 cm que tiene un TS de unos -60 dB.

En el caso de los peces y para las frecuencias de trabajo empleadas en este estudio, nos encontramos dentro de la zona geométrica, pues la talla de los peces es siempre mayor que la longitud de onda de cada una de las frecuencias. El TS puede calcularse aplicando un modelo geométrico donde la energía devuelta por los blancos es proporcional a la sección transversal horizontal de los órganos que contribuyen al eco (proporcional al tamaño de la vejiga natatoria). La sección transversal horizontal de los peces cambia con el cuadrado de la longitud del pez (L), suponiendo que la vejiga natatoria crece proporcionalmente al crecimiento del pez. Esto implica que σ_{bs} es proporcional a L^2 , y que la fuerza del

$$TS = m \log L + b$$

blanco es igual a $20 \log L$ más un término constante. En el caso del plancton, se aplican los mismos principios que para peces. Sin embargo, como su talla y su estructura corporal son tan diferentes a la de los peces, hace que no se pueda aplicar la misma metodología. Además, para las frecuencias de evaluación de peces la mayoría de los organismos planctónicos se encuentran en la zona de Rayleigh (Simmonds y MacLennan, 2005).

La mayoría de las investigaciones de la dispersión de acústica del plancton se han basado en modelos teóricos (Stanton *et al.*, 1996; Stanton *et al.*, 1998, Martin *et al.*, 1996, Stanton y Chu, 2000).

Los métodos tradicionales de medición de TS, ampliamente empleados en estudios pesqueros, son apropiados sólo para los organismos zooplanctónicos de gran tamaño, similares en talla a los peces más pequeños, como por ejemplo eufausiáceos de gran tamaño. Se pueden calcular valores de TS "ex situ" para organismos zooplanctónicos insonificando una cantidad conocida de individuos en un volumen conocido. De esta forma, dividiendo la energía por unidad de volumen (s_v) que devuelven un número conocido de individuos entre el número de individuos, podemos conocer que TS le correspondería a cada uno de ellos. De manera inversa, si sabemos el TS teórico de un organismo y lo multiplicamos por el número de individuos que hay en un volumen podremos estimar el s_v de los individuos en ese volumen (Simmonds y MacLennan, 2005).

1.3.6. Unidades de medida de la energía acústica

Los datos acústicos pueden almacenarse en referencia a un volumen, tanto de forma lineal (s_v) expresado en unidades m^{-1} , como de forma logarítmica (S_v o MVBS) expresado en unidades dB re 1 m^{-1} ; o bien en referencia a un área, en forma lineal (s_a) con unidades de $m^2 m^{-2}$ o en forma logarítmica dB re 1 $m^2 m^{-2}$. Cuando el s_v se calcula en un volumen finito se denomina MVBS y tiene unidades logarítmicas (MacLennan *et al.*, 2002).

El proceso de eointegración que permite evaluar comunidades de peces, consiste en sumar todas las medidas acústicas registradas en un volumen (s_v) y reducirlas a dos dimensiones (s_a). Además, se consideran por unidad de distancia (EDSU=Elementary Distance Sampling Unit). En el marco de la evaluación de peces llevada a cabo en el Mediterráneo Español esta distancia se corresponde con una milla náutica (s_A o NASC, Nautical Area Scattering Coefficient), aunque pueden emplearse otras unidades de medida.

$$s_v = \frac{\sum \sigma_{bs}}{\text{Volumen}} \quad S_v = 10 \log_{10}(s_v)$$

$$s_a = \int_{z_2}^{z_1} s_v dz \quad S_a = 10 \log_{10}(s_a)$$

$$\text{NASC} = s_A = 4\pi(1852)^2 s_a \quad S_A = 10 \log_{10}(s_A)$$

1.4. Interpretación de ecogramas

Un ecograma es el resultado de la recepción, digitalización y visualización de los ecos devueltos por las distintas discontinuidades (fondo, peces, plancton...) presentes en la columna de agua, cuando emitimos pulsos a una determinada frecuencia (**Figura 1.15**). Cada uno de los pulsos emitidos por la ecosonda científica genera una señal, y la suma de esas señales verticales se visualiza en un monitor como un registro continuo. Cada

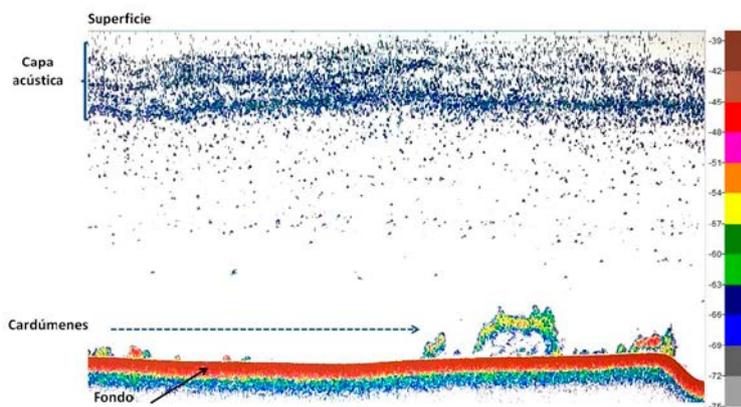


Figura 1.15: Ecograma registrado a la frecuencia de 38 kHz señalando los diferentes registros acústicos.

vez que el transductor envía ondas y éstas son reflejadas por un blanco, aparece en la pantalla una marca a la distancia que se encuentra del transductor. Por lo tanto, un ecograma nos ofrece una visión sinóptica de la columna de agua (Simmonds y MacLennan, 2005). En el ecograma que aparece en la figura anterior (**Figura 1.15**) se distinguen diferentes registros. La línea supe-

rior de color azul coincide con la superficie, concretamente con la cara vibrante del transductor. La línea inferior, de elevados valores de energía acústica (rojos-marrones), se corresponde con el fondo. Además, se observan dos tipos de ecotrazos claramente diferenciados: los primeros son continuos y persistentes formando una capa de baja respuesta acústica (entre -63 y -75 dB, colores grises-azules) que se asocia a la comunidad planctónica (capa de plancton), los segundos forman agrupaciones de gran energía acústica (entre -63 y -45 dB, colores amarillo-rojo) identificados como cardúmenes de peces (comunidad nectónica).

Durante las campañas de evaluación de pequeños pelágicos costeros por medios acústicos, se monitoriza toda la columna de agua, aunque normalmente sólo se analizan los registros correspondientes a peces. En estas campañas, el plancton es considerado como ruido, y por lo general se elimina de los datos junto con otras especies no objetivo (Bertrand *et al.*, 2003).

La lectura o interpretación de los ecogramas consiste en adjudicar cada ecotrazo detectado a una especie o grupo de especies. El proceso de lectura requiere de una "limpieza" previa de los ecogramas en la que se eliminan los registros distintos a peces.

El proceso de análisis de ecogramas comienza con la eliminación del ruido constante proveniente de los equipos electrónicos y la hidrodinámica del buque oceanográfico. Se trata de determinar el valor del término constante de la ecuación: $20 \cdot \log(R) + 2 \cdot \alpha \cdot R + \text{"offset"}$. La determinación del ruido puede llevarse a cabo con la ecosonda científica en modo pasivo (sólo escucha), que es el método recomendado por el fabricante (Manual EK60, Simrad), o bien operando ésta en modo activo. Para el cálculo en modo activo, se han aplicado distintas técnicas como la determinación del mínimo valor de S_v para cada profundidad (Watkins y Brierley, 1996), o el uso de valores de energía acústica registrados por debajo del fondo (Korneliussen, 2002; De Robertis y Higginbottom, 2007), pues el fondo es la última fuente de reflexión y por ello, cuando el fondo desaparece los datos recogidos son puramente pasivos y válidos para calcular los valores de ruido.

Una vez determinado y sustraído el ruido constante, el siguiente paso es delimitar los cardúmenes de peces en la frecuencia de evaluación, acordada internacionalmente como 38 kHz. La presencia de reverberación dificulta la interpretación de ecogramas, y puede influir negativamente en la determinación de la abundancia (Simmonds y MacLennan, 2005).

Este problema puede abordarse de dos maneras, se puede aumentar el umbral de visualización o usar algoritmos matemáticos que combinen diferentes frecuencias.

El umbral de visualización (**Figura 1.16**) permite eliminar aquellos registros por debajo de un valor límite, por ejemplo si el umbral es -65 dB, todos aquellos ecos de menor valor (asociados con

plancton) no aparecerán en pantalla, pudiendo delimitar fácilmente los cardúmenes. Esta práctica es efectiva si en el área de estudio aparecen cardúmenes muy densos, y no se encuentran especies con bajos niveles de energía acústica como la caballa

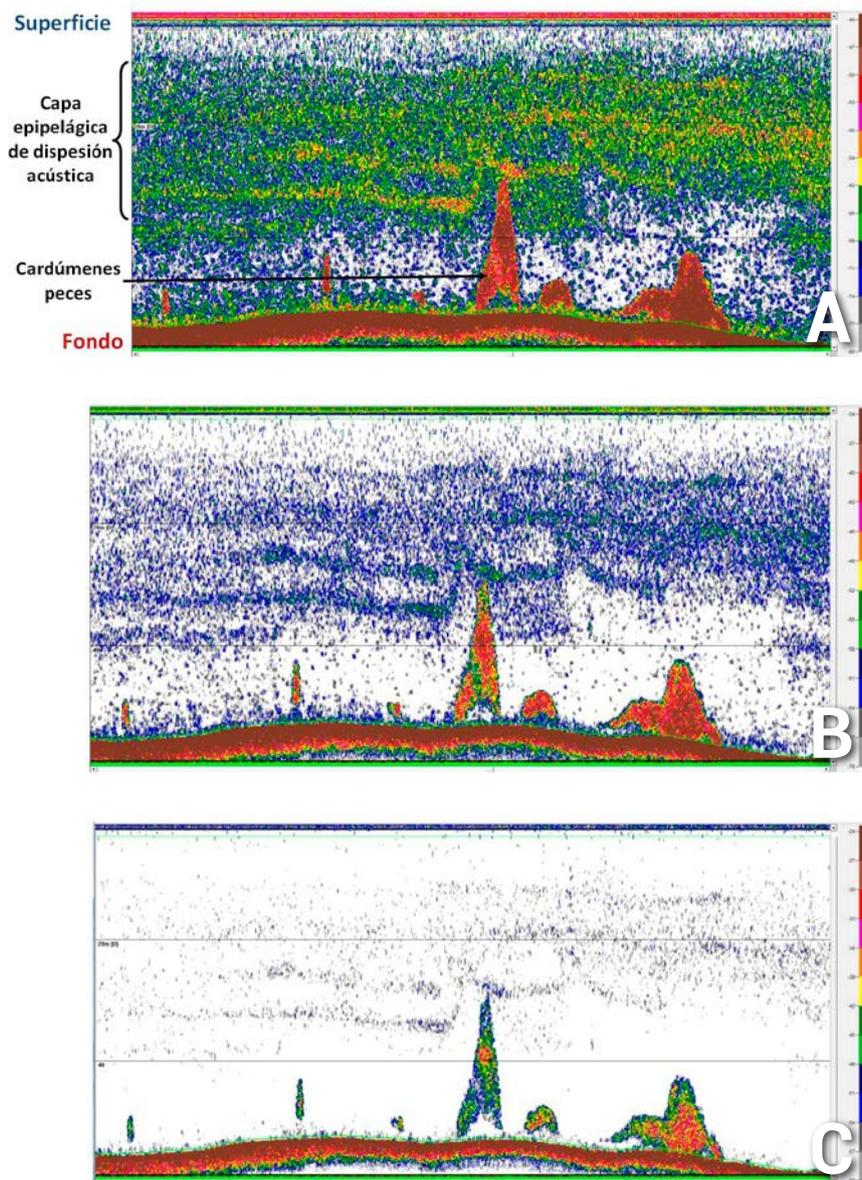


Figura 1.16: Ecograma visualizado a distintos umbrales. **A:** -80 dB, **B:** -70 dB y **C:** -60 dB.

(*Scomber scombrus*) que, al no tener vejiga natatoria, devuelve muy poca energía en la frecuencia de evaluación.

Aplicando esta técnica se puede subestimar el tamaño de los cardúmenes pues la energía acústica en los bordes del cardumen es menor que en el centro y se puede asumir un contorno menor que el real, por otra parte nos puede llevar a perder detección de peces que se encuentren poco concentrados.

La aplicación de algoritmos matemáticos, combinando diferentes frecuencias (Korneliussen, 2002), permite aplicar un umbral más bajo (-70 dB). Por lo tanto, las dimensiones de los cardúmenes no se verán afectadas por la presencia de plancton. El resulta-

do de su aplicación es la generación de una máscara o grid de valores positivos (peces) y negativos (plancton) que superpuesta a la frecuencia de 38 kHz muestra sólo los registros asociados con peces.

El uso de multifrecuencias proporciona información sobre el tipo de blanco (Chu *et al.*, 1993), especialmente si el rango de frecuencias empleado cubre la transición entre la zona de dispersión de Rayleigh y la zona de dispersión geométrica (Clay y Medwin, 1977). Además, permite la clasificación o caracterización acústica de los organismos presentes en la columna de agua (Chu *et al.*, 1992; Chu *et al.*, 1993; Holliday *et al.*, 1989; Jech y Michaels, 2006).

1.4.1. Respuesta acústica multifrecuencia del plancton y el necton

Una de las principales diferencias entre el plancton y el necton es su tamaño (Sieburth, 1978). Por ello no se comportan del mismo modo al ser insonificados por una fuente acústica puntual en una frecuencia determinada. A cada frecuencia le corresponde una longitud de onda, cuanto más alta es la frecuencia menor es la longitud de onda. Por lo tanto, se espera detectar organismos más pequeños al utilizar transductores que operen a frecuencias más altas.

El límite de la zona de Rayleigh (**Figura 1.17**) delimita la dimensión que debería tener un blanco para ser detectado a una determinada frecuencia (en este caso: 18, 38, 70, 120 y 200 kHz).

El límite de la zona de Rayleigh se alcanza, teóricamente, cuando la dimensión del blanco multiplicada por un factor (k) es mayor de 2. El factor "k" depende de la longitud de onda y se calcula como $2\pi/\lambda$. En este caso, la dimensión es el radio esférico equivalente del organismo (ESR).

Se espera, por tanto, que la frecuencia de 200 kHz sea la que primero detecte a los organismos más pequeños, y la detección disminuya al disminuir la frecuencia. Los organismos con ESR menores de 2 milímetros (mm), se encuentran en la zona de Rayleigh

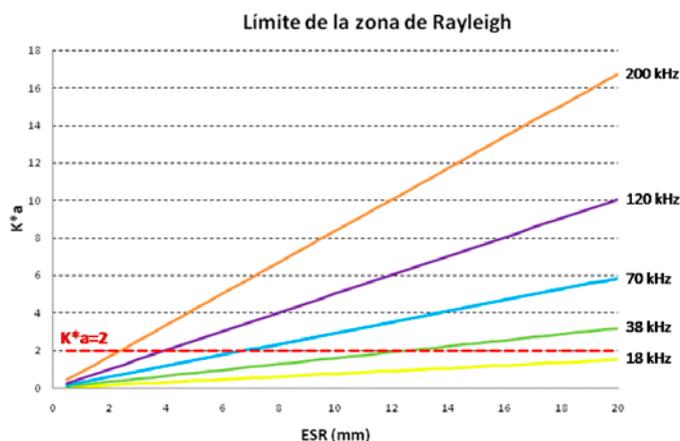


Figura 1.17: Límite de la zona de Rayleigh.

en todas las frecuencias. Por lo que si no existen procesos de resonancia, su energía dispersada tenderá a aumentar con la frecuencia. Es esperable que los organismos más pequeños no sean detectados por las frecuencias más bajas.

Pero la respuesta acústica no se produce sólo en función de la talla del organismo, también depende de su composición, su anatomía, su forma, su comportamiento y su densidad en el medio (Simmonds y MacLennan, 2005). Cada una de las tres categorías de blancos acústicos ("Fluid-like", "Elastic-shelled" y "Gas-bearing") posee una respuesta acústica multifrecuencia singular (**Figura 1.18**).

Los organismos de tipo "**Fluid-like**", de tamaño pequeño como copépodos o cladóceros presentan un patrón multifrecuencia donde su reflexión acústica aumenta al aumentar la frecuencia. Mientras que los de mayor tamaño, como eufausiáceos presentan un valor máximo entre 70 y 200 kHz.

Los organismos de tipo "**Elastic-shelled**" devuelven una mayor energía al aumentar la frecuencia a la que son insonificados hasta alcanzar un nivel asintótico.

Los organismos de tipo "**Gas-bearing**" ("Resonant" en la **Figura 1.18**), son resonantes debido a una inclusión de gas en el interior de su cuerpo. La frecuencia de resonancia, para una esfera gaseosa de 1.2 mm, se encuentra normalmente entre 18 y 38 kHz, mientras que la frecuencia de resonancia de una vejiga natatoria de peces adultos está por debajo de 1 kHz.

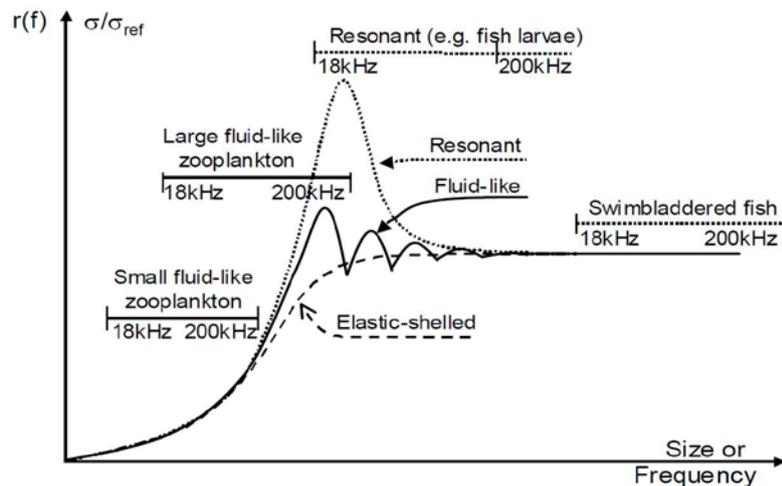
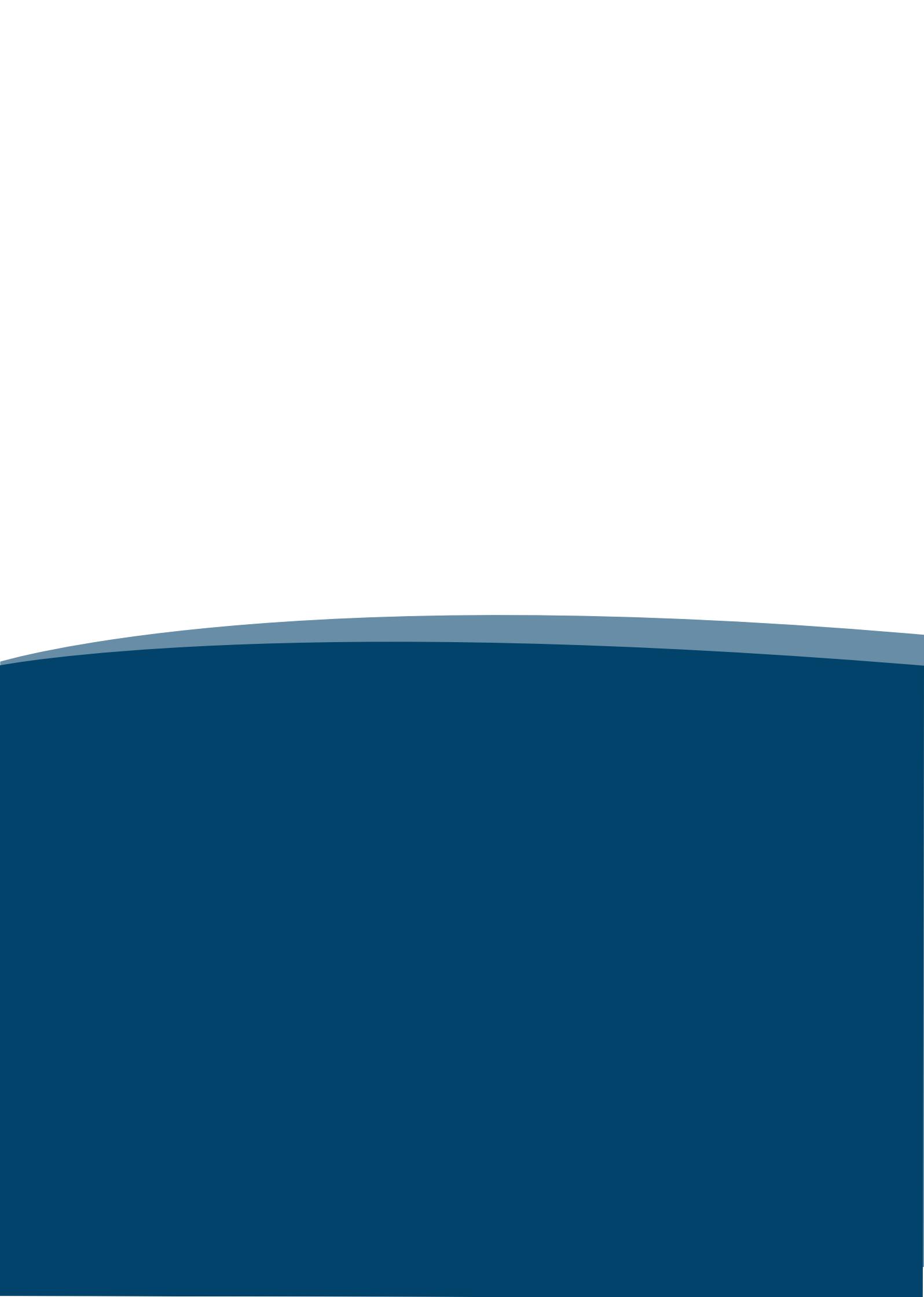


Figura 1.18: Modelos de dispersión acústica de los animales pelágicos. Fernandes *et al.*, 2006.

En teoría, la respuesta acústica de los diferentes organismos planctónicos cuando son insonificados a diferentes frecuencias difiere de la de los peces. Por lo tanto, sería posible separar los registros acústicos correspondientes a peces y a zooplancton (Holliday, 1977; Greenlaw, 1979; Holliday *et al.*, 1989). El sonido reflejado por el plancton, en las frecuencias empleadas en este trabajo, se encuentra en la zona de Rayleigh donde el TS aumenta rápidamente con la frecuencia. En cambio, los peces con vejiga

natatoria presentan una variación mucho más suave con las frecuencias. Estas diferencias en las propiedades de reflexión de sonido se pueden usar como ayuda para discriminar estos dos tipos de blancos (proyecto SIMFAMI por Fernandes *et al.*, 2006).

La frecuencia de respuesta es clave en la separación de diferentes tipos de blancos (Korneliussen y Ona, 2003), y ha permitido desarrollar diferentes aproximaciones para aislar peces y zooplancton (Kang *et al.*, 2002; Axenrot *et al.*, 2009; Woillez *et al.*, 2012; Ballón *et al.*, 2011), discriminar entre especies de peces (De Robertis *et al.*, 2010; Mosteiro *et al.*, 2004; Korneliussen *et al.*, 2009; Logerwell y Wilson, 2004; Kloser *et al.*, 2002), o distinguir organismos macrozooplanctónicos (Madureira *et al.*, 1993; Woodd-Walker *et al.*, 2003; Lavery *et al.*, 2007; Graham *et al.*, 2010; Trenkel y Berger, 2013).



CAPÍTULO 2

Objetivos



2.1. Objetivo general

2.2. Objetivos específicos

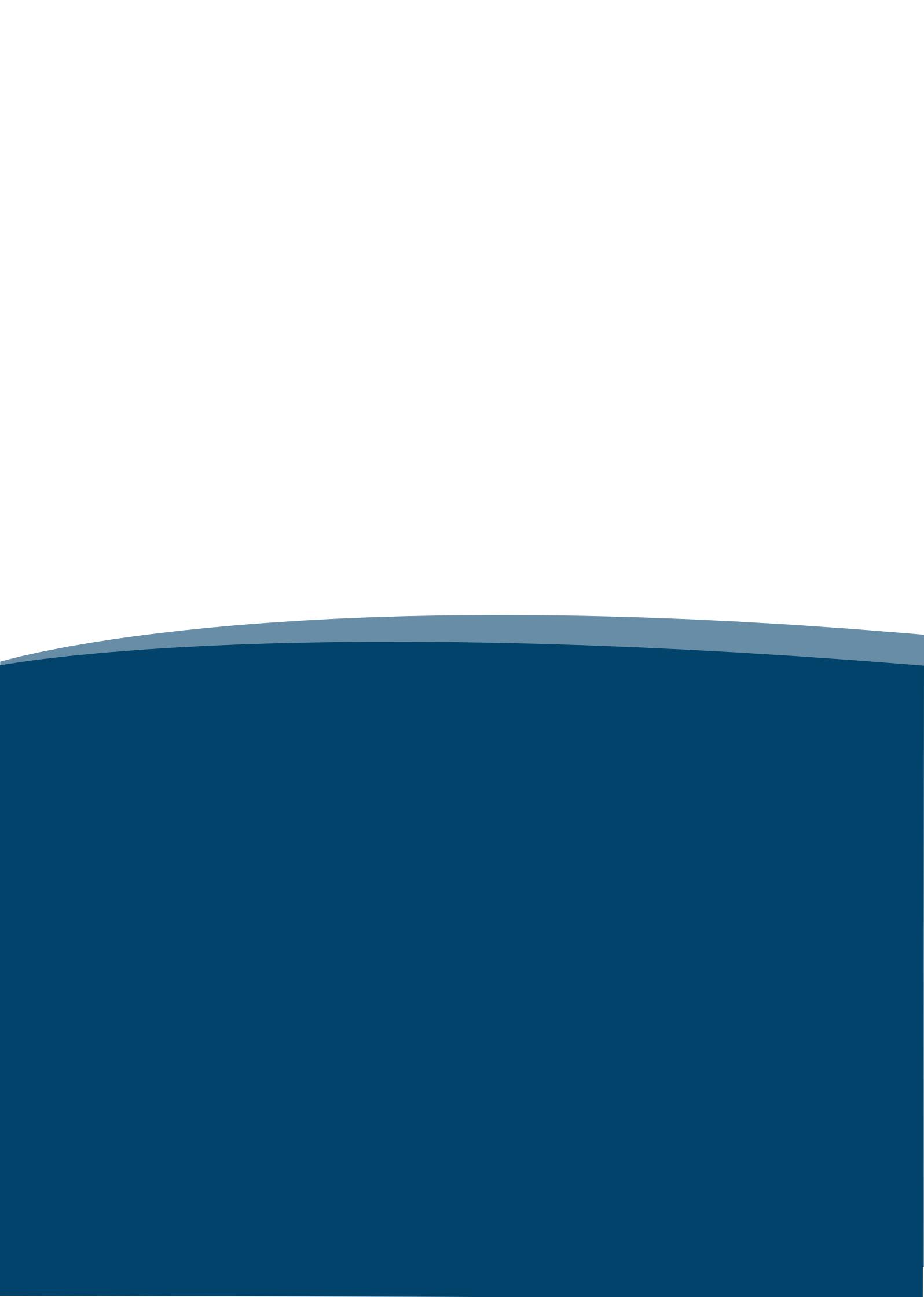
2.1. Objetivo general

El objetivo general es optimizar la interpretación de ecogramas procedentes de las campañas de evaluación acústicas de pequeños pelágicos que se realizan en el Mediterráneo español (MEDIAS), mediante el estudio acústico y biológico de la capa epipelágica de dispersión acústica asociada con la comunidad planctónica detectada en el Golfo de Vera y el Mar de Alborán.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Caracterizar acústicamente la capa epipelágica de dispersión acústica presente en el área de estudio a las frecuencias de 18, 38, 70, 120 y 200 kHz y determinar su influencia en la evaluación de la comunidad de peces pelágicos.
2. Identificar biológicamente la capa superficial de plancton detectada con múltiples frecuencias en el área de estudio, empleando diferentes sistemas de muestreo (redes) de zooplancton.
3. Establecer patrones acústicos comunes para la capa superficial de plancton detectada a múltiples frecuencias en el área de estudio.
4. Identificar los organismos responsables de la respuesta acústica detectada a múltiples frecuencias dentro del conjunto de organismos zooplanctónicos que componen la capa superficial de plancton.
5. Comparar los valores de energía acústica observados en las estaciones de zooplancton con los esperados aplicando modelos de dispersión teóricos.
6. Investigar la contribución a la señal acústica del fitoplancton presente en el área de estudio.



CAPÍTULO 3

Material y métodos



3.1. Área de estudio

3.2. Recogida de datos

3.2.1. Datos acústicos

3.2.1.1. Registro sistemático de comunidades pelágicas

3.2.1.2. Selección de estaciones para la identificación de la capa epipelágica de dispersión acústica

3.2.2. Datos biológicos

3.2.2.1. Muestreo de la capa epipelágica de dispersión acústica

3.2.2.1.1. Estimación del tamaño de los organismos

3.2.2.2. Monitorización de redes de plancton

3.2.3. Datos oceanográficos

3.3. Tratamiento y análisis de datos

3.3.1. Datos acústicos

3.3.1.1. Descripción general de la capa epipelágica de dispersión acústica

3.3.1.1.1. Implicación en la evaluación de la comunidad de peces pelágicos

3.3.1.2. Delimitación del volumen acústico muestreado biológicamente

3.3.1.2.1. Determinación del ruido constante

3.3.1.2.2. Energía acústica observada a múltiples frecuencias

3.3.2. Datos biológicos

3.3.2.1. Abundancia y distribución de los principales grupos faunísticos

3.3.2.2. Comparación entre sistemas de muestreo

3.3.3. Datos oceanográficos

3.3.3.1. Comunidad fitoplanctónica

3.3.4. Combinación de datos acústicos y biológicos

3.3.4.1. Aplicación de modelos de dispersión acústica

3.3.4.2. Energía acústica esperada a múltiples frecuencias

3.3.4.3. Organismos detectados por la ecosonda científica

3.3.4.3.1. Comunidad zooplanctónica

3.3.4.3.2. Comunidad fitoplanctónica

3.1. Área de estudio

Esta tesis se ha focalizado en el estudio de la zona epipelágica de la plataforma continental del Golfo de Vera y de la parte española del Mar de Alborán, Norte del Mar de Alborán (**Figura 3.1**).

El Golfo de Vera se encuentra entre Cabo de Palos (Murcia) y Cabo de Gata (Almería). Se caracteriza por tener una plataforma continental de poca amplitud, entre 2 y 6 km, irregular en cuanto a su forma, y con una profundidad límite de 150 m.

La parte española del Mar de Alborán se localiza entre Cabo de Gata (Almería) y Punta Europa (Cádiz). Su plataforma continental es estrecha, entre 2 y 10 km, con una acusada pendiente, variando su profundidad límite entre los 100 y los 150 m. El relieve del fondo es muy accidentado y está caracterizado por la existencia de cordilleras y cañones submarinos.



Figura 3.1: Zona de estudio.

3.2. Recogida de datos

La presente tesis doctoral se basa en los datos obtenidos durante las campañas MEDIAS (MEDiterranean International Acoustics Surveys; <http://www.medias-project.eu/medias/website/>) llevadas a cabo en el Mediterráneo español los años 2013 y 2014. El objetivo de estas campañas es la monitorización anual de los recursos pelágicos costeros de interés comercial, principalmente sardina (*Sardina pilchardus*) y boquerón (*Engraulis encrasicolus*).

La toma de datos se llevó a cabo durante el mes de julio, del 20 al 31 en 2013 y del 11 al 22 en 2014. Para la recogida de los datos se empleó, en 2013 el buque oceanográfico (B/O) Cornide de Saavedra perteneciente al Instituto Español de Oceanografía (**Figura 3.2A**) y en 2014 el B/O Miguel Oliver de la Secretaría General de Pesca (**Figura 3.2B**).



Cornide de Saavedra

Eslora: 66.7 m.
 Manga: 11.3 m.
 Número de tripulantes: 51
 Año de botadura: 1972
 Frecuencias: 18, 38, 70, 120 y 200 kHz



Miguel Oliver

Eslora: 70 m.
 Manga: 14.40 m.
 Número de tripulantes: 45
 Año de botadura: 2007
 Frecuencias: 18, 38, 120 y 200 kHz

Figura 3.2: **A:** Características del B/O Cornide de Saavedra en 2013, www.ieo.es. **B:** Características del B/O Miguel Oliver en 2014, foto de Albert Cama.

3.2.1. Datos acústicos

Para la adquisición de los datos acústicos se empleó una ecosonda científica EK60 (SIMRAD®) operando a múltiples frecuencias (18, 38, 70, 120 y 200 kHz en 2013 y 18, 38, 120 y 200 en 2014). Las especificaciones técnicas de los transductores usados en este estudio están recogidas en la siguiente tabla (**Tabla 3.1**). Los registros acústicos se visualizaron en pantalla por medio del programa asociado a la ecosonda científica: ER60 versión 2.4.x aplicando un umbral visualización de -70 dB.

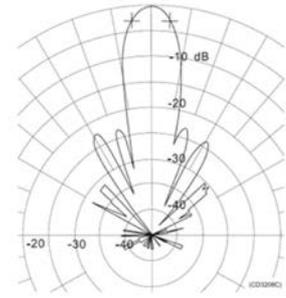
Los transductores se calibraron al inicio de cada campaña según el protocolo propuesto por Foote en 1987 (Foote *et al.*, 1987). Para que los datos recogidos con las diferentes frecuencias fueran comparables espacial y temporalmente, se siguieron las recomendaciones propuestas por Korneliussen (Korneliussen *et al.*, 2004 y Korneliussen *et al.*, 2008):

- Los transductores emitieron pulsos simultáneos, de la misma duración, con el mismo intervalo de disparo.
- Los transductores funcionaron a los niveles de potencia adecuados para minimizar la distorsión armónica.
- Los transductores están emplazados juntos en una barquilla situada en la quilla del barco. Así, los haces acústicos muestrearon prácticamente la misma zona.

Tabla 3.1: Especificaciones de los transductores empleados en este estudio. SIMRAD.



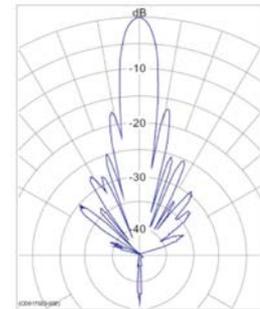
Frecuencia de resonancia: 18 kHz.
 Longitud de onda: 0.0833 m.
 Ancho del haz: 11 ± 2 deg.
 Ángulo sólido $10 \log \Psi$: -17 ± 1 dB.
 Máxima potencia de entrada: 2000 W.
 Potencia de trabajo: 2000 W.
 Diámetro: 540 mm.
 Límite del campo cercano: 3.5 m.



Beam pattern



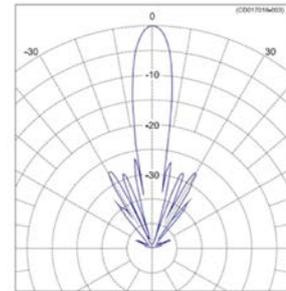
Frecuencia de resonancia: 38 kHz.
 Longitud de onda: 0.0395 m.
 Ancho del haz: 7 ± 1 deg.
 Ángulo sólido $10 \log \Psi$: -20.5 ± 1 dB.
 Máxima potencia de entrada: 4000 W.
 Potencia de trabajo: 2000 W.
 Diámetro: 424 mm.
 Límite del campo cercano: 4.6 m.



Beam pattern



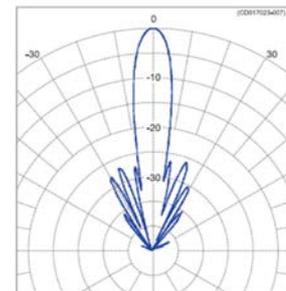
Frecuencia de resonancia: 70 kHz.
 Longitud de onda: 0.0214 m.
 Ancho del haz: 7 deg.
 Ángulo sólido $10 \log \Psi$: -21 dB.
 Máxima potencia de entrada: 1000 W.
 Potencia de trabajo: 600 W.
 Diámetro: 250 mm.
 Límite del campo cercano: 2.9 m.



Beam pattern



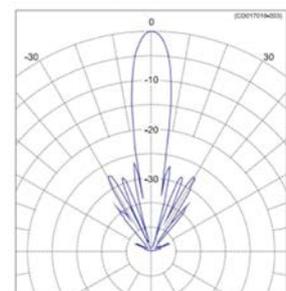
Frecuencia de resonancia: 120 kHz.
 Longitud de onda: 0.0125 m.
 Ancho del haz: 7 deg.
 Ángulo sólido $10 \log \Psi$: -21 dB.
 Máxima potencia de entrada: 1000 W.
 Potencia de trabajo: 200 W.
 Diámetro: 152 mm.
 Límite del campo cercano: 1.8 m.



Beam pattern



Frecuencia de resonancia: 200 kHz.
 Longitud de onda: 0.0075 m.
 Ancho del haz: 7 deg.
 Ángulo sólido $10 \log \Psi$: -20.5 dB.
 Máxima potencia de entrada: 1000 W.
 Potencia de trabajo: 90 W.
 Diámetro: 100 mm.
 Límite del campo cercano: 1.3 m.



Beam pattern

- La diferencia de posición entre los traductores se corrigió durante el procesado asignando un mismo centro para todos los transductores.

El valor del ruido constante, provocado por los componentes eléctricos y la hidrodinámica del barco, se determinó siguiendo las recomendaciones del fabricante de la ecosonda científica operando ésta en modo pasivo. Para obtener ecogramas libres de ruido se sustrajo el valor de ruido estimado por la ecosonda científica de los ecogramas primarios mediante el programa SonarData Echo-view versión 4 de Myriax Software Pty. Ltd. (ex SonarData Pty. Ltd.).

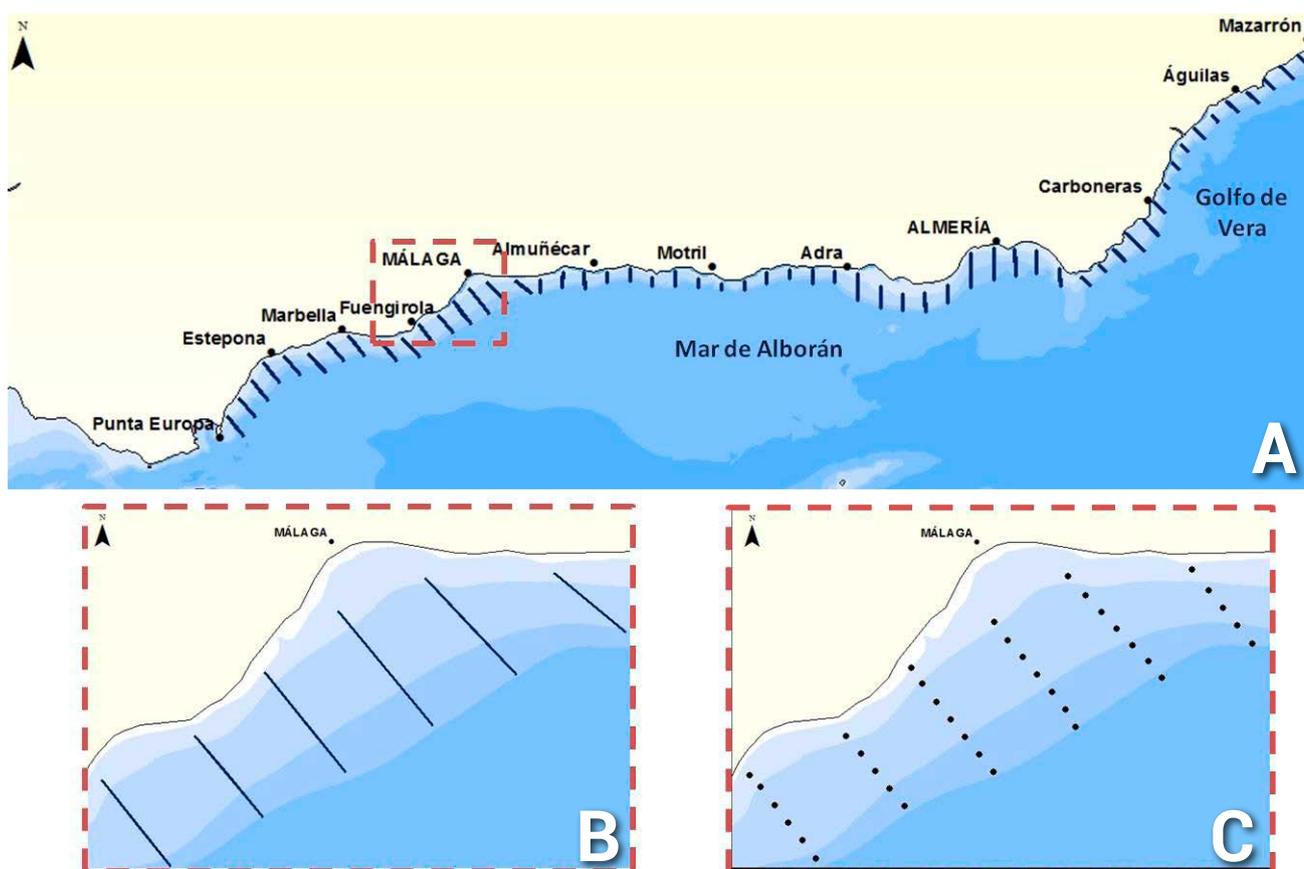


Figura 3.3: A: Diseño de muestreo. B: Detalle radiales C: Detalle unidad elemental de muestreo acústico (milla náutica).

3.2.1.1. Registro sistemático de comunidades pelágicas

El muestreo acústico sistemático se realizó durante el día (de las 08:00 a las 20:00), a una velocidad de 10 nudos. La plataforma continental del Golfo de Vera y del Mar de Alborán se prospectó acústicamente desde los 30 hasta los 200 m. El diseño de muestreo se basó en radiales o transectos paralelos entre sí y perpendiculares a la línea de costa, separados 4 millas náuticas (Figuras 3.3A y B).

La unidad elemental para el muestreo acústico fue la milla náutica (Figura 3.3C). La energía acústica reflejada por los organismos

presentes en la columna de agua fue detectada a lo largo de los radiales y se integró para cada milla náutica recorrida.

Durante la prospección sistemática se detectaron dos tipos de registros acústicos: continuos (**Figura 3.4A**) y discretos (**Figura 3.4B**). Los registros continuos conformaron una capa epipelágica de dispersión acústica, se encontraron a media agua y se asociaron con la comunidad planctónica. Los registros discretos se encontraron ocupando parte de la columna de agua y cerca del fondo y se asociaron a cardúmenes de peces.

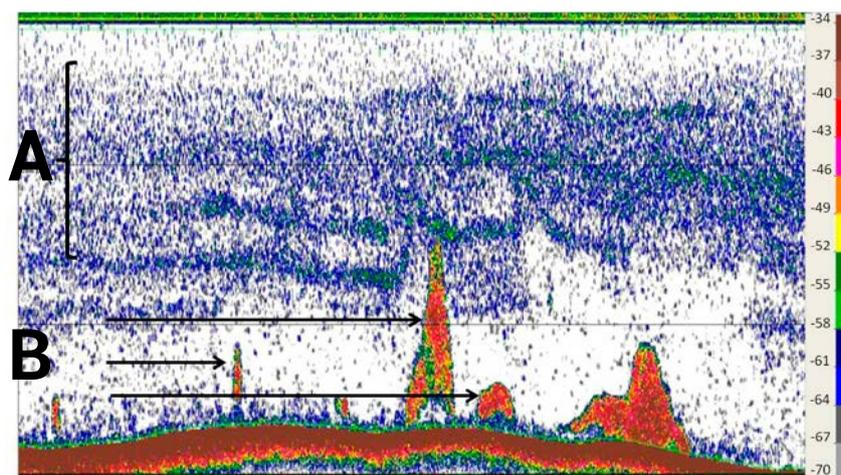


Figura 3.4: Tipos de registros acústicos detectados. **A:** Continuos; asociados con la comunidad planctónica. **B:** Discretos; asociados con la comunidad de peces pelágicos.

3.2.1.2. Selección de estaciones para la identificación de la capa epipelágica de dispersión acústica

El método para seleccionar las estaciones de muestreo biológico fue intencionado, dado que se trató de pescas de identificación. La estrategia para la recolección de muestras fue adaptativa y oportunista; adaptativa porque se tuvo en cuenta la experiencia de estaciones previas para planificar los siguientes muestreos y oportunista puesto que se aprovechó una plataforma ya consolidada dedicada a la evaluación de stocks.

La visualización de los registros correspondientes a la capa epipelágica de dispersión acústica se llevó a cabo simultáneamente a la detección de los cardúmenes de peces. La situación acústica a muestrear se decidió en base al registro de los siguientes parámetros relativos a la capa de dispersión acústica:

- La continuidad de los registros acústicos.
- La frecuencia con mayor señal acústica.
- Los cambios en la señal acústica y las profundidades a las que se registraron.
- La presencia o ausencia de señal acústica en la frecuencia de 18 kHz.
- El comportamiento de los cardúmenes respecto a la capa.

La condición indispensable para la toma de muestras fue la distinción precisa entre comunidades pelágicas. Esta situación se registró durante el día cuando los peces pelágicos están agrupados en cardúmenes y la capa de dispersión acústica fue fácilmente acotable.

3.2.2. Datos biológicos

Para la recogida de los datos biológicos se emplearon dos sistemas de muestreo o muestreadores diferentes: una red bongo 40 y una red bongo 90.

El bongo 40, de 40 centímetros (cm) de diámetro (**Figura 3.5A**), estuvo provisto de dos redes de malla diferentes: 250 y 333 micras (μm). El bongo 90, de 90 cm de lado (**Figura 3.5B**) se armó con redes de 500 y 2000 μm . En la parte anterior de cada red se colocó un sensor de profundidad para conocer su posición durante el arrastre. El motivo para usar diferentes muestreadores fue cubrir un amplio rango de tallas, capturando organismos pertenecientes al meso y macrozooplancton.

Los muestreadores se largaron por la amura de sotavento del B/O y se arrastraron a una velocidad de entre 2 y 2.5 nudos.

Los sistemas de muestreo carecían de sistema de apertura y cierre, lo cual puede provocar mezcla entre comunidades. La reducción de la contaminación durante el largado y virado se logró mediante la disminución de la velocidad del barco y el aumento en la velocidad del torno (Olivar *et al.*, 2012).

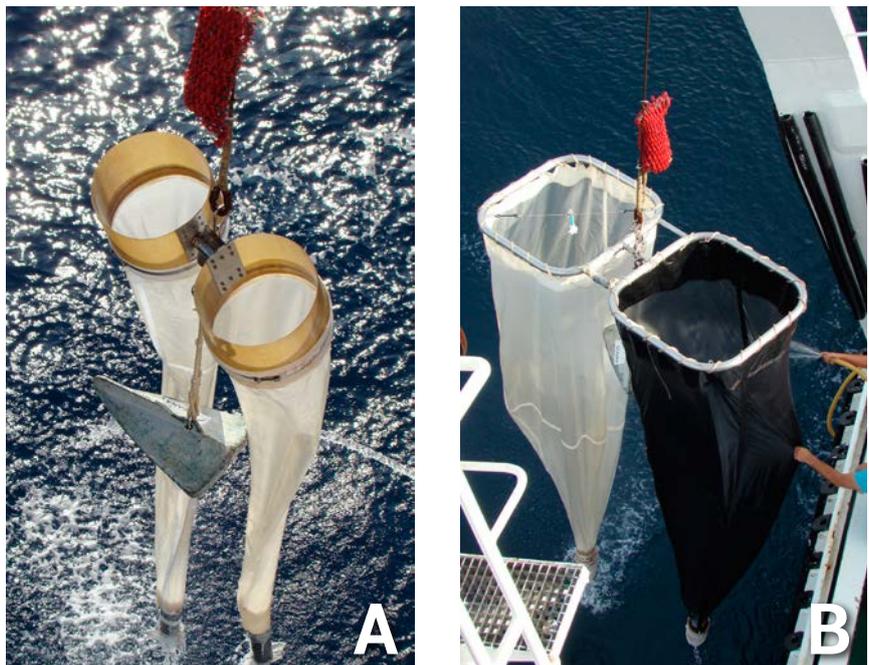


Figura 3.5: Redes bongo equipadas con un sensor de profundidad ITI. A: Red Bongo 40. B: Red Bongo 90.

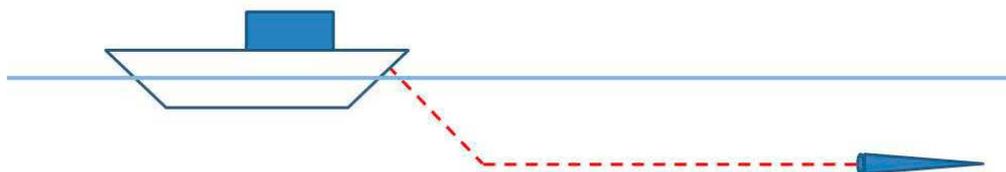
3.2.2.1. Muestreo de la capa epipelágica de dispersión acústica

El muestreo biológico se realizó arrastrando horizontalmente las redes de plancton, una a continuación de la otra, en la zona de mayor detección acústica observada en el ecograma (**Figura 3.6**).

Para mejorar la detección y delimitación de la capa de dispersión acústica, la visualización del ecograma se realizó a un umbral de -80dB.

La duración del arrastre se fijó en siete minutos en 2013 y se redujo a seis minutos en 2014 para optimizar el muestro biológico, y representó el tiempo transcurrido entre la posición de firmes de la red de plancton (cuando la red alcanzó la posición establecida para la toma de muestras) y el virado de ésta (cuando se dio la orden de subir la red a bordo).

El volumen filtrado en cada estación (**Figura 3.7**) se estimó como el área correspondiente a la boca de la red multiplicada por la distancia recorrida (Olivar *et al.*, 2012; Peña *et al.*, 2014). El área muestreada se estimó como un círculo de 20 cm de radio y, en el caso de la red bongo 90 como un cuadrado de 90 cm de lado.



La distancia recorrida se calculó conociendo el tiempo arrastrado y la velocidad del arrastre.

Figura 3.6: Representación simplificada de un arrastre horizontal.

Una vez a bordo, las redes fueron lavadas con agua de mar utilizando una manguera para conducir los organismos retenidos en la red hasta el colector. Los organismos concentrados en el colector, se trasvasaron a un recipiente plástico empleando un pulverizador de agua de mar para arrastrar todos los organismos retenidos en la malla hasta el recipiente. Al recipiente se le acopló un cedazo de un centímetro de malla para retener las medusas. Las medusas se midieron (longitud total y el diámetro de umbrela) y se devolvieron al mar.

La muestra final se concentró, se depositó en frascos de 250 mililitros (ml) y se fijó con formol tamponado con bórax al 4% para su posterior análisis en el laboratorio.

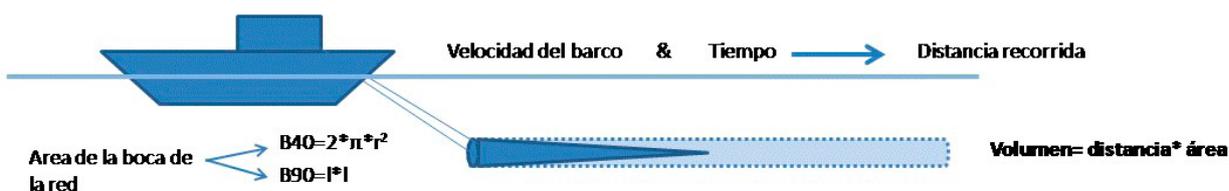


Figura 3.7: Cálculo del volumen filtrado.

3.2.2.1.1. Estimación del tamaño de los organismos

La medición del tamaño de los organismos se realizó a bordo del B/O, bien con la muestra sin fijar o bien anestesiando a los organismos con unas gotas de formol.

En las muestras recogidas en 2013 se constató que el proceso de medida con las muestras concentradas y fijadas no resultó preciso para los organismos más frágiles o elásticos (apendicularias, larvas de peces o quetognatos). Por este motivo, no se cuenta con las dimensiones de los organismos para este año. Aunque las medidas de los organismos no pudieron ser determinadas, pudo constatarse que la red más adecuada para realizar futuras mediciones fue la de 500 μm de tamaño de malla.

En las muestras recogidas en 2014 se determinó la forma y el tamaño de los organismos más abundantes capturados por la malla de 500 μm . La forma de cada grupo faunístico se aproximó a una figura geométrica. El tamaño se estimó midiendo las dimensiones que definieron la forma (**Tabla 3.2**).

El proceso de medida se llevó a cabo, según el tamaño de los ejemplares, empleando papel milimetrado o el programa de medición Moticam Plus asociado a la lupa empleada en la identificación de los organismos (Leica EK4, © Leica Microsystems). El programa de medición se calibró conforme a las recomendaciones del fabricante.

Tabla 3.2: Formas y dimensiones biológicas estimadas para los principales grupos faunísticos capturados por la malla de 500 μm en 2014.

Grupo faunístico	Forma	Dimensión/es medida/s (mm)
Crustáceos	Elipse	Semiejes menor y mayor
Quetognatos	Cilindro	Largo y ancho
Sifonóforos	Cilindro	Largo y ancho
Heterópodos	Esfera	Radio
Larvas	Elipse	Semiejes menor y mayor

3.2.2.2. Monitorización de redes de plancton

La trayectoria de las redes de plancton se monitorizó durante la toma de muestras colocando un sensor de profundidad en la parte anterior de los muestreadores. En 2013 se empleó el sensor de profundidad SS4 DEPTH SENSOR fabricado por Scanmar® (**Figura 3.8A**) y en 2014 se utilizó un sistema de monitorización de red ITI fabricado por Simrad® (**Figura 3.8B**).

La trayectoria de la red se visualizó en tiempo real sobre la pantalla de la ecosonda científica EK60, por lo que fue posible posicionar las redes exactamente en la zona de mayor respuesta acústica (**Figura 3.9**).

Las sentencias transmitidas por los sensores de profundidad pueden ser visualizadas en la pantalla de la ecosonda científica EK60 siempre que los aparatos (sensor y ecosonda) sean compatibles.

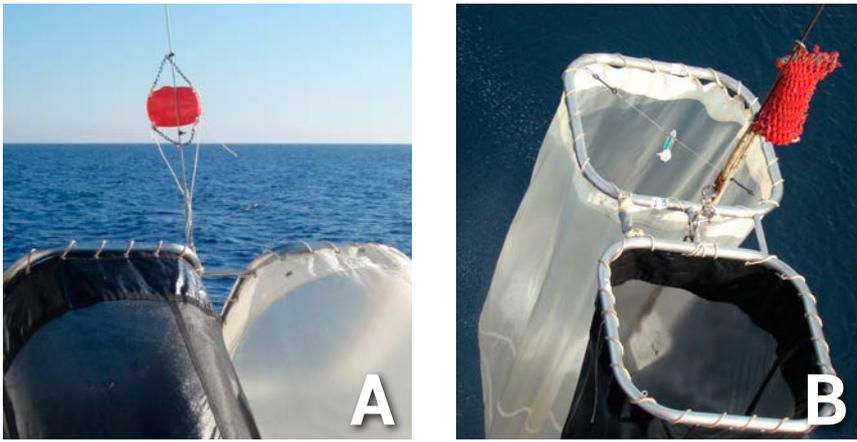


Figura 3.8: Sensores de profundidad. **A:** SS4 DEPTH SENSOR (Scanmar®). **B:** sistema de monitorización de red ITI (Simrad®).

En 2013, las sentencias emitidas por el sensor SS4 (Scanmar®) se tradujeron a lenguaje interpretable por la ecosonda científica EK60 mediante un programa informático desarrollado por Joan Miquel Batlle (ingeniero del grupo de acústica del COB, IEO). En 2014, sólo fue necesario habilitar un canal de comunicación en la ecosonda científica EK60 para que incluyera las sentencias del sensor ITI (Simrad®) en el ecograma.

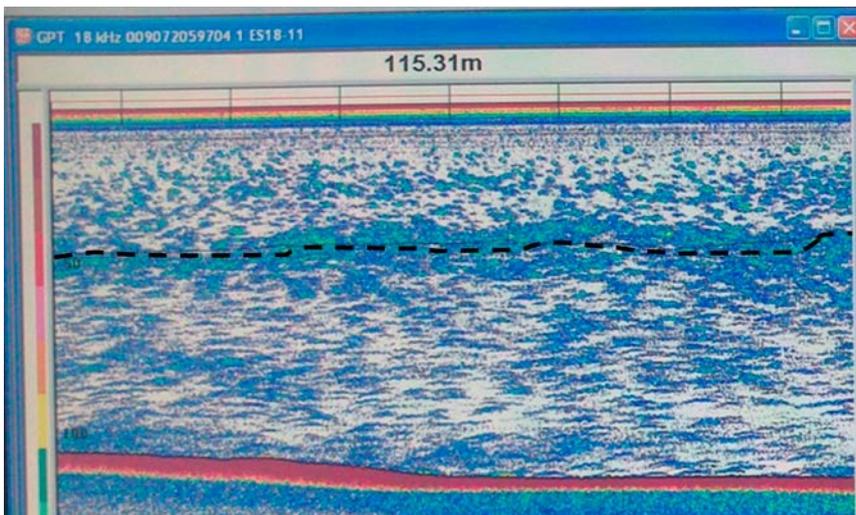


Figura 3.9: Trayectoria de la red (línea negra discontinua) en la interfaz de la ecosonda científica EK60.

3.2.3. Datos oceanográficos

En cada estación de muestreo, se determinaron las propiedades termo-halinas de la columna de agua empleando un CTD Seabird 19 plus. El instrumento trabajó en autocontenido, almacenando datos de profundidad (m), temperatura (°C) y conductividad (S/m) para determinar la salinidad (ups).

Adicionalmente, un sensor de fluorescencia se acopló la estructura del CTD para determinar el perfil vertical de la clorofila-a (mg/m³). La cantidad de clorofila-a se empleó como indicador de la comunidad fitoplanctónica.

3.3. Tratamiento y análisis de datos

3.3.1. Datos acústicos

El procesado de los ficheros base (de extensión .raw) generados por el programa ER60 de la ecosonda científica EK60, almacenados durante las campañas oceanográficas, se realizó con el programa SonarData Echoview versión 4 de Myriax Software Pty. Ltd. (ex SonarData Pty. Ltd.).

3.3.1.1. Descripción general de la capa epipelágica de dispersión acústica

La capa de dispersión acústica presente en los ecogramas se acotó por medio de polígonos o regiones continuas en cada frecuencia disponible (**Figura 3.10**). El límite superior de la región determinó la profundidad mínima de la capa y el límite inferior determinó la profundidad máxima. La profundidad media se calculó como el promedio entre las profundidades máxima y mínima.

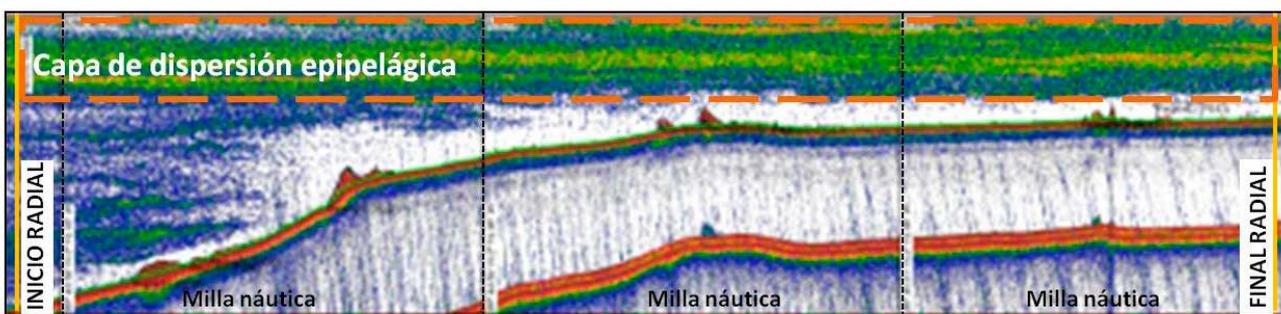


Figura 3.10: Representación simplificada de la delimitación de la capa de dispersión acústica (polígono naranja punteado) sobre ecograma a 38 kHz. Las líneas negras discontinuas marcan una distancia de una milla náutica.

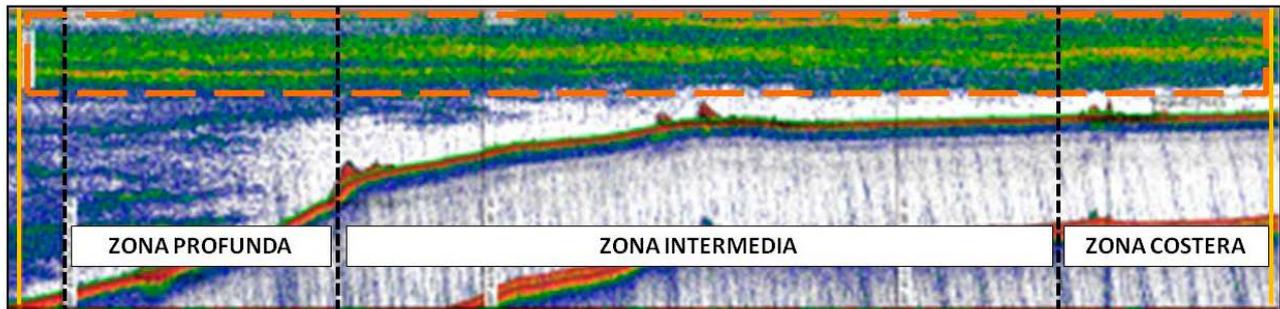
Los valores de energía acústica reflejados por la capa de dispersión, se registraron en forma de s_A para cada pulso emitido por la ecosonda científica. Posteriormente fueron agrupados en función del análisis estadístico ejecutado. El cálculo del valor de s_A se realizó para cada frecuencia y año.

Para el cálculo de los estadísticos descriptivos básicos (mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 ó mediana y Q3, valores atípicos y simetría de la distribución), los valores de s_A se agruparon por radial y se graficaron por medio de un gráfico de cajas o boxplot.

Para detectar variaciones en la energía acústica sobre la plataforma continental (desde la costa al borde del talud continental), el valor de s_A se agrupó por intervalos de profundidad. Los intervalos se decidieron en función de la profundidad a la que se registraron cambios en la detección acústica a diferentes frecuencias (cambio en la frecuencia de mayor respuesta o en la intensidad de la señal). Los radiales se dividieron en tres zonas acotadas según la profundidad del fondo (**Figura 3.11**):

- Zona costera: De la mínima profundidad registrada hasta 40 m.
- Zona intermedia: Entre 40 y 100 m.
- Zona profunda: Desde 100 m hasta la máxima profundidad muestreada.

El valor de s_A registrado para cada zona se gráfico mediante un gráfico de barras.



Para construir un algoritmo, basado en la combinación de frecuencias, que suprima la detección acústica asociada a la comunidad planctónica de la frecuencia de evaluación, se estudió la relación entre la capa de dispersión acústica registrada a 38 kHz y la registrada por el resto de frecuencias. Para ello se llevó a cabo un análisis de regresión lineal múltiple. Las variables utilizadas en el análisis fueron los valores de s_A asociados a la capa de dispersión agrupados por milla náutica a múltiples frecuencias. La variable a explicar fue el valor de s_A en la frecuencia de 38 kHz y las explicativas los valores de s_A al resto de frecuencias (18, 70, 120 y 200 kHz).

Figura 3.11: Intervalos de profundidad para detectar variaciones en la energía acústica detectada a múltiples frecuencias sobre la plataforma continental.

Para representar la distribución espacial de la capa de dispersión acústica en el área de estudio se llevó a cabo un análisis de densidad espacial Kernel empleando el programa Arc GIS 10 (ESRI®). Para este análisis se utilizaron los valores de s_A agrupados por milla náutica. Los valores de densidad resultantes del análisis, se representaron por deciles (dividiendo la distribución en 10 partes) y se normalizaron con los valores registrados por la frecuencia de 38 kHz en 2014.

Para detectar si existieron variaciones interanuales en la distribución de los valores de la capa de dispersión acústica, se calculó el centro espacial de la distribución de los valores de s_A para cada frecuencia y año.

3.3.1.1.1. Implicación en la evaluación de la comunidad de peces pelágicos

La comunidad de peces pelágicos y la comunidad plantónica coexisten espacial y temporalmente. Para determinar la implicación de la capa de dispersión acústica en la evaluación de la comunidad de peces pelágicos se estudió la relación y el comportamien-

to de los cardúmenes de peces respecto a la capa de dispersión.

Los cardúmenes presentes en los radiales prospectados acústicamente se detectaron y delimitaron en la frecuencia de evaluación (38 kHz). Para cada cardumen se determinó:

- El valor de s_A .
- Su profundidad (mínima y máxima) respecto a la superficie.
- La profundidad del fondo.

Además, en la posición de cada cardumen, se determinaron los siguientes parámetros relativos a la capa de dispersión acústica:

- El valor de s_A registrado en la frecuencia de evaluación.
- Su profundidad (mínima y máxima) respecto a la superficie registrada en la frecuencia de evaluación.
- El valor de s_A registrado por el resto de frecuencias.

Para examinar la relación entre las comunidades pelágicas detectadas acústicamente (comunidad de peces pelágicos y comunidad planctónica), se llevó a cabo un análisis de correlación múltiple. Este análisis se realizó con los valores de s_A calculados para cada uno de los cardúmenes, en la frecuencia de evaluación, y los valores de s_A asociados a la capa de dispersión, registrados a múltiples frecuencias (18, 38, 70, 120 y 200 kHz en 2013 y 18, 38, 120 y 200 kHz en 2014).

Para determinar el número de cardúmenes afectados por la presencia de la capa de plancton en la frecuencia de evaluación, se aplicó un índice experimental de co-ocurrencia. Este índice relaciona las profundidades máximas y mínimas de los cardúmenes y con las profundidades máximas y mínimas de la capa de dispersión acústica. En el caso de que un cardumen se encuentre a una profundidad mínima mayor que la máxima registrada para la capa de plancton se considera afectado por la presencia de la capa de dispersión acústica (cardúmenes enmarcados en verde en la **Figura 3.12**).

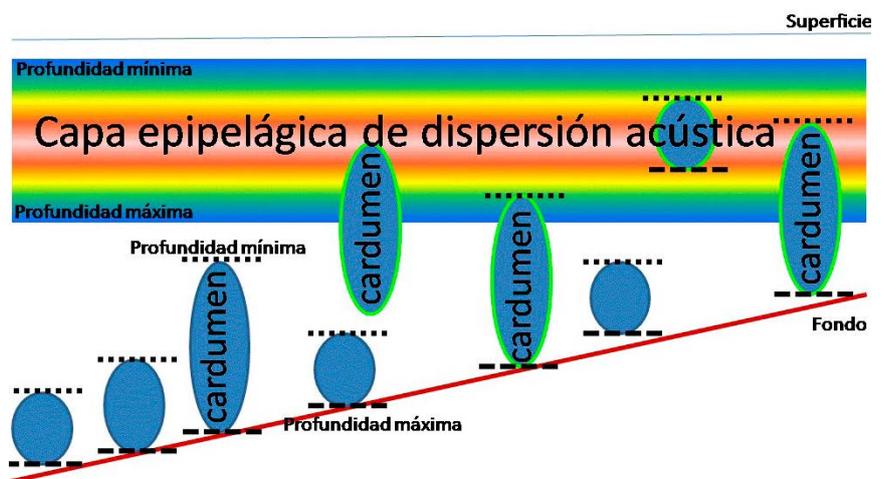


Figura 3.12: Representación simplificada de la co-ocurrencia de los cardúmenes de peces y la capa de dispersión acústica.

La aplicación del índice de co-ocurrencia se llevó a cabo por intervalos horizontales de profundidad, acotados por la profundidad del fondo (**Figura 3.13**). En base a las características de la zona de estudio y a la distribución de los cardúmenes, los intervalos fueron construidos cada 25 metros de profundidad.

- De 25 a 50 m
- De 50 a 75 m
- De 75 a 100 m
- De 175 a 200 m
- De 100 a 125 m
- De 125 a 150 m
- De 150 a 175 m
- Más de 200 m

El porcentaje de cardúmenes afectados en cada intervalo de profundidad se representó gráficamente mediante un gráfico de barras para los dos años estudiados.

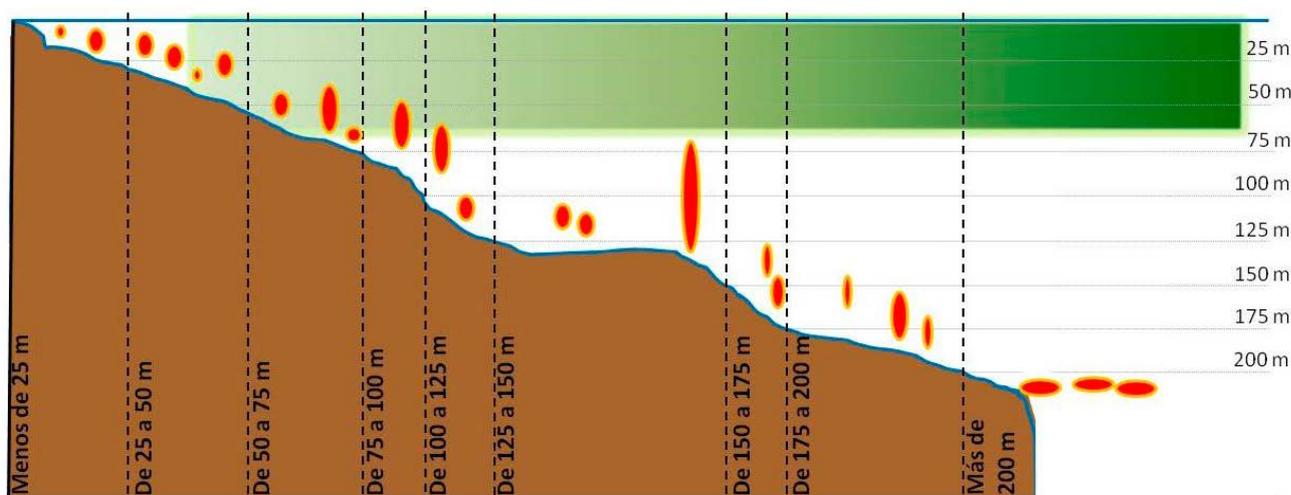


Figura 3.13: Representación de los intervalos de profundidad para aplicar el índice de co-ocurrencia.

3.3.1.2. Delimitación del volumen acústico muestreado biológicamente

La trayectoria del arrastre de las redes de plancton, monitorizada por medio de sensores de profundidad, se convirtió en un archivo de texto (de extensión .txt) interpretable por el programa de post-proceso SonarData Echoview v.4 como una línea virtual.

En la **Figura 3.14** se visualiza, aplicando un umbral de -80 dB, el ecograma de la frecuencia 38 kHz perteneciente a una de las estaciones de plancton. Sobre el ecograma se muestra una línea negra discontinua que representa el recorrido realizado por el muestreador bongo 90. Las líneas verticales marcan una distancia de 100 pings (un ping dura un segundo y el barco navega a 2.2 nudos, que equivalen a 1.13m/s, 100 ping equivalen a 113 m).

La región acústica asociada al muestreo biológico se determinó sobre el ecograma. La dimensión horizontal se definió como la distancia entre la posición de firmas o inicio efectivo del arrastre y virado. La dimensión vertical se determinó en base a los resultados del test de análisis de la varianza ANOVA (**Anexo 1**) comparando diferentes espesores verticales.

Se compararon tres espesores verticales para cada red, basados en distancias proporcionales a su abertura:

- Para la red bongo 40: 0.5, 1.0 y 2.5 m.
- Para la red bongo 90: 1.0, 2.5 y 5 m.

Finalmente, para los cálculos llevados a cabo en esta tesis, se determinó una celda de espesor vertical de 0.5 m para el bongo 40 y 1 m para el bongo 90, y una distancia horizontal igual a la distancia recorrida entre la posición de firmes (red en la profundidad de muestreo deseada) y la posición de virado.

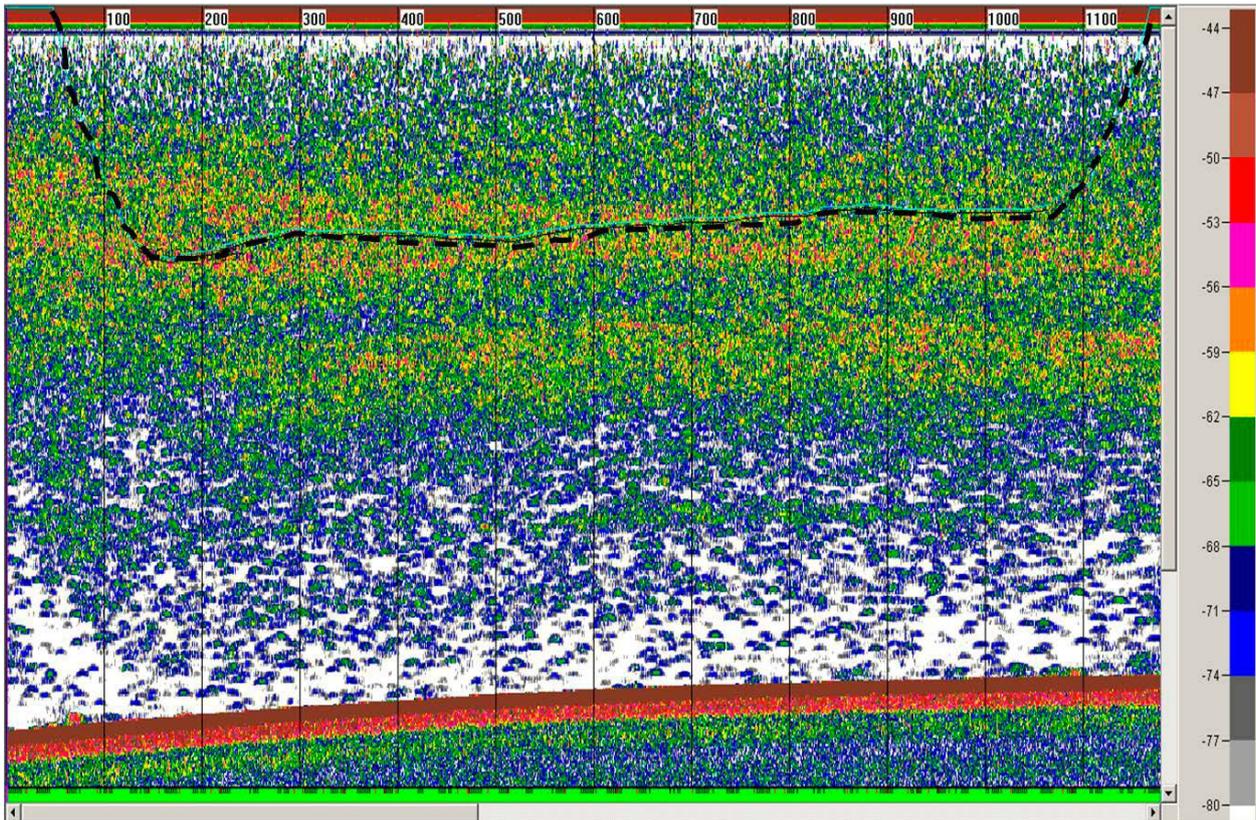


Figura 3.14: Trayectoria del arrastre de la red de plancton (línea negra discontinua) sobre la frecuencia de 38 kHz de una estación realizada durante este estudio y procesada con el software SonarData Echoview v.4.

3.3.1.2.1. Determinación del ruido constante

Debido a que durante la calibración de la ecosonda científica, no se obtuvieron valores de ruido constante en modo pasivo para las velocidades de arrastre de las redes de plancton, el cálculo y sustracción de los valores de ruido se llevó a cabo durante el procesado de los datos.

El nivel de ruidos constantes generado por el B/O se determinó empleando el programa SonarData Echoview v.4, para ello se adaptó el método propuesto por De Robertis (De Robertis y Higginbottom, 2007).

El cálculo del nivel de ruidos en la región muestreada biológicamente, se llevó a cabo delimitando sobre el ecograma, de manera aleatoria, entre cinco y diez regiones en áreas sin detección acús-

tica por debajo del fondo; entre éste y el doble fondo. Para ello, se aplicó un umbral de visualización de -80 dB (Figura 3.15). Las regiones se trazaron de diferentes dimensiones (para evitar el efecto de la dimensión) y a distintos rangos (para evitar el efecto de la profundidad). Para cada estación, cada red (bongo 40 y bongo 90) y cada frecuencia se calculó valor de ruido constante a la profundidad media de las regiones como el s_v medio (en el dominio lineal) y se transformó a valores logarítmicos en dB (MVBS). Finalmente, aplicando la ecuación $TVG=20*\log(R)+2*\alpha*R + \text{constante}$ se determinó el valor de la constante a 1 metro del transductor.

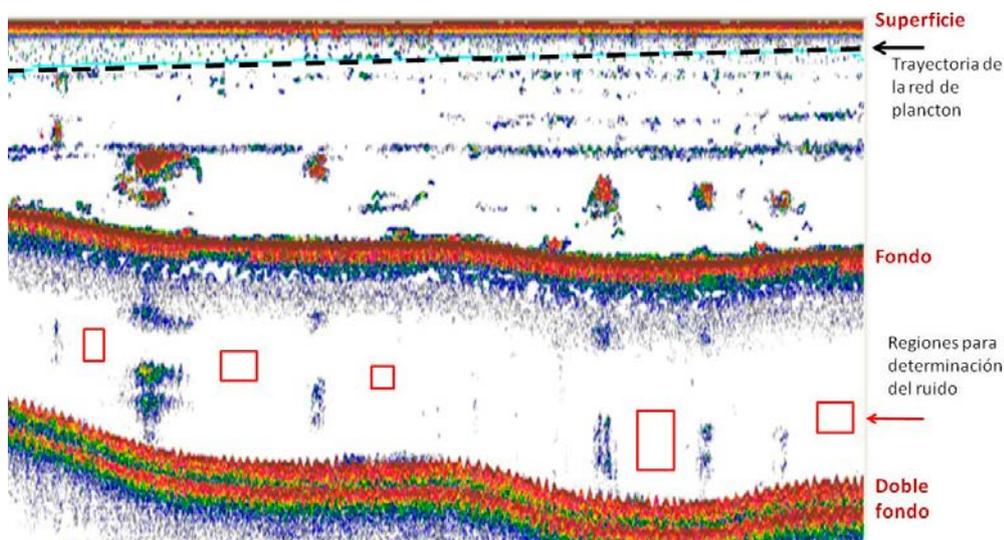


Figura 3.15: Regiones para la determinación de valores de ruido en las estaciones de muestreo biológico.

3.1.2.2. Energía acústica observada a múltiples frecuencias

La energía acústica correspondiente al muestreo biológico, se estimó como el promedio de energía acústica reflejada por los organismos contenidos en el volumen acústico muestreado. La energía acústica reflejada por unidad de volumen se calculó tanto en el dominio lineal (s_v) como en el dominio logarítmico (MVBS) a múltiples frecuencias.

Para determinar el patrón o perfil acústico multifrecuencia muestreado en cada estación se emplearon los valores de MVBS. Los valores de MVBS a 18, 38, 120 y 200 kHz se representaron mediante un diagrama de puntos. El gráfico se construyó colocando las frecuencias en orden ascendente en el eje de abscisas y el valor de MVBS en el eje de ordenadas. Los valores de MVBS se unieron mediante una línea recta y, la forma que adquirió la línea determinó el perfil o patrón multifrecuencia de la estación.

3.3.2. Datos biológicos

El análisis de las muestras biológicas, recogidas por cada uno de los tamaños de malla (250, 333, 500 y 2000 μm), se llevó a cabo bajo la lupa (Leica EK4, © Leica Microsystems) adaptando los aumentos al tamaño de los organismos. Para la adquisición de

imágenes de los organismos se utilizó una cámara Moticam 580 (Motic®) calibrada según los estándares del fabricante.

3.3.2.1. Abundancia y distribución de los principales grupos faunísticos

La abundancia de los principales grupos faunísticos, capturados por cada tamaño de malla en cada estación, se estimó en base al análisis de una submuestra o alícuota. La elevada concentración de organismos en las muestras hizo inviable el análisis total de la muestra, por ello se analizó una alícuota de 10 ml, estipulada en base a un experimento previo (**Anexo 2**). La abundancia determinada para la alícuota se extrapola al volumen total de la muestra.

Para que el análisis biológico fuera estadísticamente robusto se analizaron tres replicas de 10 ml para cada tamaño de malla en cada estación.

Los organismos presentes en las muestras se englobaron en grandes grupos faunísticos, determinados en base a su abundancia y presencia en las muestras. Posteriormente, los grupos faunísticos fueron agrupados en una de las tres categorías de blancos acústicos: "Fluid-like", "Elastic-shelled" y "Gas-bearing".

El número de individuos de cada grupo faunístico presente en las muestras se calculó mediante la siguiente relación (comunicación personal de Agawin; Lavery *et al.*, 2007; Lebourges-Dhaussy *et al.*, 2014):

$$N^{\circ} \text{ Individuos}_{\text{muestra}} = \frac{N^{\circ} \text{ Individuos}_{\text{alícuota}} * \text{Volumen}_{\text{muestra}}}{\text{Volumen}_{\text{alícuota}}}$$

La abundancia total de individuos se describió en base a la densidad absoluta de individuos en las muestras. La abundancia total se definió como el número de organismos por unidad de volumen (ind/m^3) y se calculó aplicando la siguiente relación:

$$\text{Abundancia individuos}_{\text{estación}} = \frac{N^{\circ} \text{ Individuos}_{\text{muestra}}}{\text{Volumen}_{\text{estación}}}$$

La abundancia total de los principales grupos taxonómicos y su contribución en porcentaje a la captura total se calculó para cada estación, para cada tamaño de malla (250, 333, 500 y 2000 μm) y para los dos años muestreados (2013 y 2014).

La distribución geográfica de la abundancia en las estaciones de muestreo se representó mediante gráficos de sectores empleando el programa Arc GIS 10 (ESRI®).

3.3.2.2. Comparación entre sistemas de muestreo

Para definir la red que más eficazmente retuvo a cada grupo taxo-

nómico y en un futuro, poder reducir el número de muestreadores, se comparó la abundancia total y la abundancia por grupos faunísticos capturada por cada tamaño de red.

Para determinar si existió relación entre la abundancia de los organismos y el tamaño de malla con el que fueron capturados (250, 333, 500 y 2000 μm), se llevó a cabo un análisis de correlación lineal múltiple.

3.3.3. Datos oceanográficos

Para el procesado de los datos oceanográficos de la columna de agua se empleó el programa Seasoft V2: SBE Data Processing (Sea-Bird Electronics, Inc.) asociado al CTD Seabird 19 plus.

Los perfiles verticales de temperatura, salinidad y fluorescencia registrados en cada estación de muestreo se representaron mediante un gráfico de dispersión con líneas suavizadas.

Los límites superior e inferior de la termoclina, considerada como la zona de máximo gradiente de temperatura a través de la columna de agua, se determinaron por lectura directa sobre los perfiles verticales de temperatura.

Para describir las condiciones ambientales a las que se tomaron las muestras se determinó, en la profundidad media del arrastre, el valor de la temperatura, la salinidad y la fluorescencia.

3.3.3.1. Comunidad fitoplanctónica

La comunidad fitoplanctónica fue inferida de los perfiles verticales de fluorescencia. La profundidad del máximo de fluorescencia se estimó por lectura directa sobre los perfiles verticales registrados en cada estación. La profundidad del máximo de fluorescencia se asoció con la presencia de una capa biológica atribuible al fitoplancton cuyo pigmento fotosintético es la clorofila-a (Benoit-Bird *et al.*, 2010; Benoit-Bird y McManus, 2014).

3.3.4. Combinación de datos acústicos, biológicos y oceanográficos

3.3.4.1. Aplicación de modelos de dispersión acústica

Para predecir los valores teóricos de σ_{bs} y determinar el valor de TS de los individuos recogidos por la malla 500 μm en año 2014, se aplicó un modelo de dispersión acústica. Los modelos teóricos de dispersión acústica se construyeron para 5 grupos faunísticos (**Tabla 3.3**): crustáceos, sifonóforos, quetognatos, heterópodos y larvas de peces.

La energía acústica dispersada por sifonóforos, quetognatos, crustáceos y heterópodos se estimó en base al modelo desarrollado por Stanton (Stanton, 1989) y en el caso de las larvas de peces se aplicó el modelo propuesto por Kloser (Kloser *et al.*, 2002).

Para la aplicación del modelo de Stanton (Stanton, 1989), las constantes específicas "g" y "h", referidas a la composición material de los organismos, se determinaron en base a la bibliografía. Para los cálculos llevados a cabo en esta tesis se han usado: para heterópodos los valores $g=2.8$ y $h=4.38$ (Stanton, 1989), para crustáceos $g=1.043$ y $h=1.052$ (Greenlaw, 1979) y para quetognatos y sifonóforos $g=1.03$ y $h=1.03$ (Mair *et al.*, 2000).

Para la aplicación del modelo de Kloser (Kloser *et al.*, 2002) se asumieron los siguientes valores específicos para las larvas de peces: $\mu_1=10^5\text{Pa}$, $\gamma=1.4$, $\rho=1.075\text{Kg/m}^3$ y $Q=5$ y $e=0.2$ (Kloser *et al.*, 2002). El radio equivalente de la vejiga natatoria se aproximó como la longitud equivalente al cinco por ciento de la longitud total de la larva (Simmonds y MacLennan, 2005).

Tabla 3.3: Modelos de dispersión aplicados a cada grupo faunístico.

Grupo faunístico	Forma	Composición	Modelo
Crustáceos	Elipse irregular	Fluido	Stanton, 1989
Quetognatos	Cilindro irregular	Fluido	Stanton, 1989
Sifonóforos	Cilindro irregular	Fluido	Stanton, 1989
Heterópodos	Esfera irregular	Elástico	Stanton, 1989
Larvas	Burbuja	Resonante	Kloser <i>et al.</i> , 2002

$$\alpha_{ns} = \frac{1-gh^2}{3gh^2} + \frac{1-g}{1+2g}$$

$$\alpha_{nc} = \frac{1-gh^2}{2gh^2} + \frac{1-g}{1+g}$$

$$R = \frac{gh-1}{gh+1}$$

σ_{bs} = backscattering cross section para la frecuencia de incidencia (f).

g = contraste de densidad entre el material del cuerpo y el medio circundante (agua de mar).

h = contraste de la velocidad del sonido entre el material del cuerpo y el del fluido circundante.

a = radio esférico de la esfera, longitud del semieje menor de la elipse o el radio cilíndrico del cilindro.

L = longitud total de la elipse y del cilindro.

k = número de onda, $k=2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de onda.

$K=k\cdot\text{sen}$ (para cilindro).

F = constante experimental.

G = constante experimental.

a = radio esférico equivalente al volumen de la vejiga natatoria.

f_p =frecuencia de resonancia del elipsoide.

Q = factor de calidad de la resonancia.

f_0 =frecuencia de resonancia esférica.

e = redondez.

P =presión hidrostática.

D = profundidad.

ρ = densidad del tejido del pez.

γ = ratio de calores específicos entre la vejiga natatoria y el cuerpo del pez.

Cálculo de σ_{bs}	Valores de F y G (Stanton, 1989)
$\sigma_{bs} = \frac{\frac{1}{9}L^2(ka)^4 \alpha_{nc}^2 G}{1 + \frac{16/9(ka)^4 \alpha_{ns}^2}{R^2 F}}$	$F = 40(ka)^{-0.4}$ $G = \left\{ 1 - 0.8 \exp(-2.5(ka - 2.25)^2) \right\}$
$\sigma_{bs} = \frac{\frac{1}{9}L^2(ka)^4 \alpha_{nc}^2 G}{1 + \frac{16/9(ka)^4 \alpha_{ns}^2}{R^2 F}}$	$F = 2.5(ka)^{1.65}$ $G = \left\{ 1 - 0.8 \exp(-2.5(ka - 2.3)^2) \right\}$
$\sigma_{bs} = \frac{\frac{1}{9}L^2(ka)^4 \alpha_{nc}^2 G}{1 + \frac{16/9(ka)^4 \alpha_{ns}^2}{R^2 F}}$	$F = 2.5(ka)^{1.65}$ $G = \left\{ 1 - 0.8 \exp(-2.5(ka - 2.3)^2) \right\}$
$\sigma_{bs} = \frac{a^2(ka)^4 \alpha_{ns}^2 G}{1 + \frac{4(ka)^4 \alpha_{ns}^2}{R^2 F}}$	$F = 15(ka)^{-1.9}$ $G = \left\{ 1 - 0.8 \exp(-2.5(ka - 2.25)^2) \right\}$
$\sigma_{bs} = a^2 \left\{ \left[(f_p / f)^2 - 1 \right]^2 + 1/Q^2 \right\}^{-1}$ $f_0 = \frac{1}{2\pi a} \left\{ \frac{3\gamma P + 4\mu}{\rho} \right\}^{1/2}$ $f_p = f_0 2^{1/2} e^{-1/3} (1 - e^2)^{1/4} \left\{ \text{Ln} \left[\frac{1 + (1 + e^2)^{1/2}}{1 - (1 + e^2)^{1/2}} \right] \right\}^{-1/2}$	

3.3.4.2. Energía acústica esperada a múltiples frecuencias

Para comparar los resultados de la aplicación del modelo teórico (valores estimados) con los datos acústicos determinados en las estaciones realizadas *in situ* (valores observados), los valores de energía acústica reflejados por individuo fueron convertidos a energía acústica dispersada por los organismos presentes en el volumen muestreado, empleando la siguiente ecuación:

$$TS = 10 \log_{10} \sigma_{bs}$$

$$MVBS_{estimado} = TS * \log_{10} (n)$$

MVBS_{estimado}= energía media devuelta por los blancos contenidos en el volumen muestreado (dB).

n= número de individuos por metro cúbico.

TS= energía refejada por individuo (dB).

σ_{bs} = energía refejada por individuo acorde con las variables biológicas medidas (m²).

Este cálculo se realizó para los cinco grupos taxonómicos analizados en las ocho estaciones realizadas en 2014 y para las cuatro frecuencias de las que se dispuso (18, 38, 120 y 200 kHz). El valor total de **MVBS_{estimado}** para cada estación se calculó como la suma de los valores de **MVBS** de cada grupo faunístico.

El grupo acústicamente dominante: "Fluid-like", "Elastic-shelled" o "Gas-bearing", se identificó para cada estación y frecuencia como aquel que contribuyó en mayor proporción al **MVBS_{estimado}** total.

3.3.4.3. Organismos detectados por la ecosonda científica

3.3.4.3.1. Comunidad zooplanctónica

Para explorar qué combinaciones de grupos faunísticos generaron los patrones acústicos observados, se realizó un análisis de porcentajes de similitud (SIMPER) con el programa PRIMER-6 (Clarke y Gorley, 2006). Los patrones acústicos multifrecuencia coincidentes entre estaciones se agruparon dentro de patrones globales, con independencia del año.

La matriz de datos empleada en el análisis SIMPER, se construyó a partir de las observaciones de abundancia (ind/m³) recogidas en cada estación con la malla de 500 μ m. La matriz de abundancias fue transformada aplicando la raíz cuarta. El análisis se basó en la similaridad de Bray-Curtis y se llevó a cabo para 6 niveles de un solo factor (Patrón_acústico). El punto de corte del porcentaje acumulado para desechar grupos faunísticos escasos del 90%.

Para determinar qué grupos faunísticos participaron de la señal acústica registrada por la ecosonda científica, se aplicó un modelo de regresión lineal en dos fases: primero múltiple y después simple.

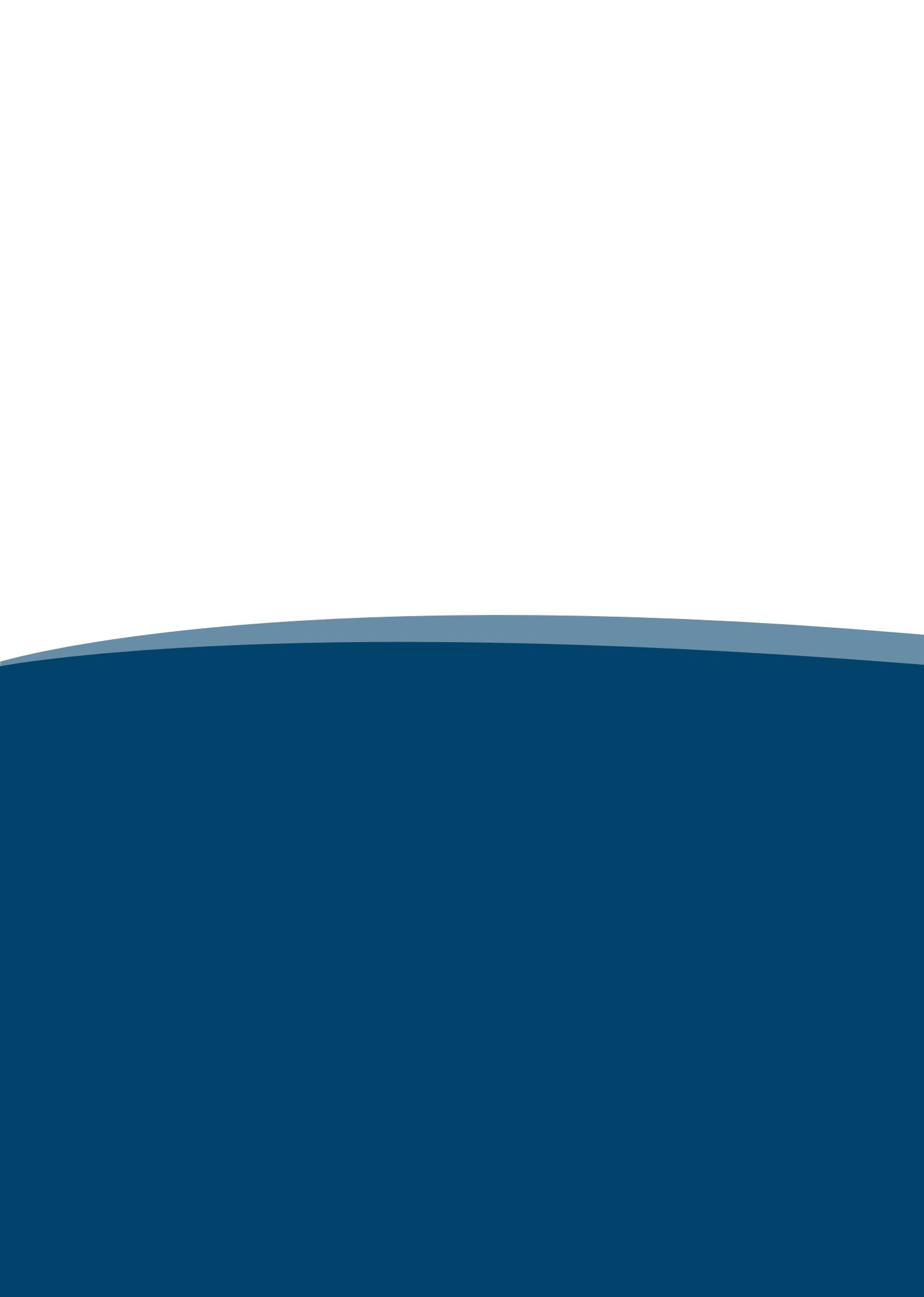
El modelo de regresión múltiple se empleó para descartar aquellos organismos cuya presencia no contribuyó a explicar la señal acústica registrada en ninguna frecuencia. En este análisis las variables a explicar fueron los valores de s_v registrados a diferentes frecuencias y, las variables explicativas el número de individuos de cada grupo faunístico presentes en volumen acústico muestreado. Este análisis se realizó para cada año y para cada tamaño de malla.

El modelo de regresión simple se aplicó a los grupos faunísticos que resultaron significativos en el modelo de regresión lineal múltiple. Este análisis se realizó con la intención de:

- Comprobar que se cumplió el principio de linealidad (Foote, 1983).
- Precisar el ajuste de los datos.
- Detectar cambios interanuales.

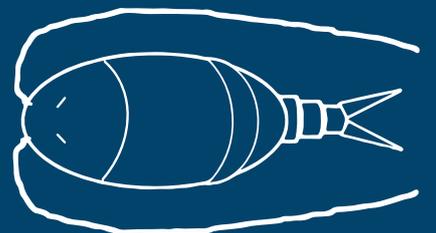
3.3.4.3.2. Comunidad fitoplanctónica

Para determinar la contribución de la comunidad fitoplanctónica a la señal acústica, se superpuso el perfil de fluorescencia, registrado por el CTD, en los ecogramas recogidos y, se inspeccionó visualmente la existencia de algún registro acústico que evidenciara la presencia de fitoplancton en la profundidad del máximo de fluorescencia.



CAPÍTULO 4

Resultados



4.1. Descripción de la capa epipelágica de dispersión acústica a múltiples frecuencias

- 4.1.1. Estadísticos descriptivos
- 4.1.2. Distribución espacial
 - 4.1.2.1. Densidad acústica por intervalos de profundidad
 - 4.1.2.2. Mapas de densidad acústica
- 4.1.3. Relación entre frecuencias
- 4.1.4. Implicación en la evaluación de la comunidad de peces pelágicos
 - 4.1.4.1. Correlación entre comunidades pelágicas
 - 4.1.4.2. Co-ocurrencia de comunidades pelágicas

4.2. Identificación biológica de la capa epipelágica de dispersión acústica

- 4.2.1. Estaciones muestreadas biológicamente
 - 4.2.1.1. Registros acústicos
 - 4.2.1.1.1. Determinación de los valores de ruido constante
 - 4.2.1.1.2. Valores de densidad acústica
 - 4.2.1.1.3. Patrones acústicos multifrecuencia
 - 4.2.1.2. Muestras biológicas
 - 4.2.1.2.1. Principales grupos faunísticos capturados
 - 4.2.1.2.2. Abundancia y distribución de los principales grupos faunísticos
 - 4.2.1.2.2.1. Dimensiones de los organismos
 - 4.2.1.2.3. Influencia del muestreador
 - 4.2.1.2.3.1. Correlación entre grupos faunísticos
 - 4.2.1.3. Condiciones ambientales en las estaciones de muestreo
 - 4.2.1.3.1. Relación con la capa epipelágica de dispersión acústica
- 4.2.2. Grupos faunísticos detectados por la ecosonda científica a múltiples frecuencias
 - 4.2.2.1. Análisis SIMPER
 - 4.2.2.2. Análisis de la regresión lineal
 - 4.2.2.2.1. Regresión lineal múltiple
 - 4.2.2.2.2. Regresión lineal simple
 - 4.2.2.3. Determinación de la categoría acústica dominante
 - 4.2.2.4. Relación entre la energía acústica esperada y observada

4.1. Descripción de la capa epipelágica de dispersión acústica a múltiples frecuencias

La prospección acústica cubrió íntegramente el diseño sistemático de muestreo fijado para el área de estudio. Los valores de densidad acústica reflejados por los blancos presentes en la columna de agua, se detectaron a múltiples frecuencias sobre 54 radiales, equivalentes al muestreo de 195 millas náuticas (mn). La profundidad mínima de adquisición de los datos acústicos varió entre 25 y 28 m en función de la maniobrabilidad del B/O, y la máxima profundidad se situó en 200 m (**Figura 4.1**). Los resultados de la calibración se muestran en el **Anexo 3**.



La capa epipelágica descrita en la presente tesis, se distribuyó de forma continua sobre la plataforma continental del Golfo de Vera y del Mar de Alborán. La capa discurrió paralela a la superficie del mar, detectándose acústicamente con respecto a la superficie del mar, desde una profundidad mínima de 10 m hasta una profundidad máxima de 70 m.

Su espesor medio en el plano vertical fue de 44 m, presentando variaciones en función de la profundidad del fondo y de la frecuencia a la que fue detectada. Al disminuir la profundidad del fondo, la capa disminuyó su espesor hasta dejar de ser visualizada en áreas cercanas a la costa, aplicando un umbral de visualización de -70 dB. Hacia el final de la plataforma continental, el espesor medio se redujo entre un 25 y un 40 % con respecto al espesor máximo registrado sobre cada radial.

En cuanto a las frecuencias empleadas, la capa epipelágica presentó un mayor espesor al ser detectada por frecuencia de 38 kHz, disminuyendo éste entre un 2 y un 5 % al aumentar la frecuencia. La máxima densidad acústica se situó a una profundidad de entre

Figura 4.1: Área cubierta: en azul la plataforma continental hasta 200 m y en negro las millas prospectadas.

25 y 40 m, con respecto a la superficie del mar, coincidiendo esta profundidad para todas las frecuencias analizadas.

4.1.1. Estadísticos descriptivos

Los valores de densidad acústica, en forma de s_A , correspondientes a la capa epipelágica de dispersión acústica se agruparon por radiales. La dispersión y simetría de los valores de s_A registrados a múltiples frecuencias se exploraron mediante un diagrama de cajas (Figura 4.2).

El diagrama de cajas puso de manifiesto que:

- La frecuencia de 38 kHz presentó la mayor dispersión de valores, seguida de la frecuencia de 18 kHz. Las frecuencias de 120 y 200 kHz mostraron los valores más concentrados, resultados que se observaron tanto en 2013 como en 2014.
- El rango intercuartílico fue mayor para las frecuencias de 18 y 38 kHz respecto al resto de frecuencias, independientemente del año estudiado.
- La forma de la distribución resultó, para todas las frecuencias, asimétrica con sesgo positivo (hacia la derecha) en 2013, y cercana a la simetría en 2014.
- En todas las frecuencias, se registraron valores de densidad acústica muy elevados, alejados del percentil 90 entre 1.5 y más de 3 veces la distancia intercuartil.

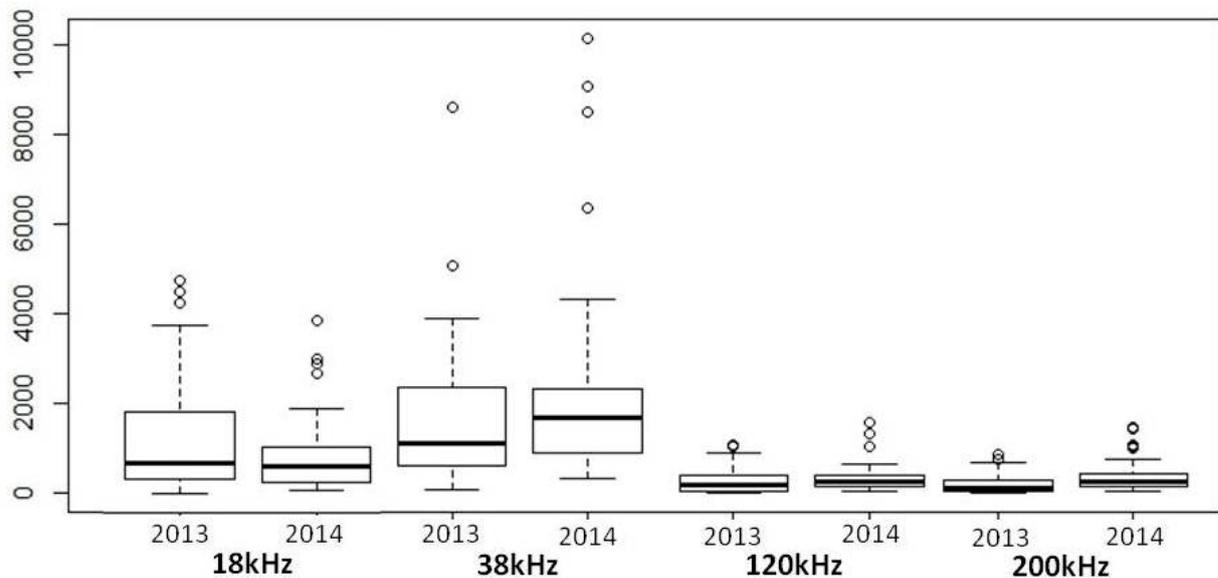


Figura 4.2: Diagrama de cajas para los valores de s_A de la capa epipelágica de dispersión acústica por año y frecuencia.

En estadística clásica, los valores que se encuentran por encima del percentil 90 se consideran anómalos. En este estudio, los valores extremos no sólo no resultaron erróneos, sino que fueron empleados para detectar zonas donde la concentración de plancton fue elevada, indicando una gran productividad. El análisis de estos datos, sobre los ecogramas, reveló áreas (radiales) concretas de elevada productividad asociada a la comunidad planctónica (Tabla 4.1 y Figura 4.3).

Tabla 4.1: Áreas geográficas asociadas a los valores elevados de densidad acústica detectados en el diagrama de cajas.

Año	Frecuencia	Zona	Radiales
2013	18	Bahía de Almería, oeste de Motril y bahía de Málaga	92, 106 y 115
2013	38	Bahía de Almería y bahía de Málaga	92 y 115
2013	120	Bahía de Almería y bahía de Málaga	92 y 116
2013	200	Oeste de Motril y bahía de Málaga	106 y 115
2014	18	Bahía de Málaga y este de Fuengirola	115, 116, 117 y 118
2014	38	Bahía de Málaga y este de Fuengirola	115, 116, 117 y 118
2014	120	Oeste de la bahía de Málaga y este de Fuengirola	116, 117 y 118
2014	200	Bahía de Málaga y este de Fuengirola	115, 116, 117 y 118

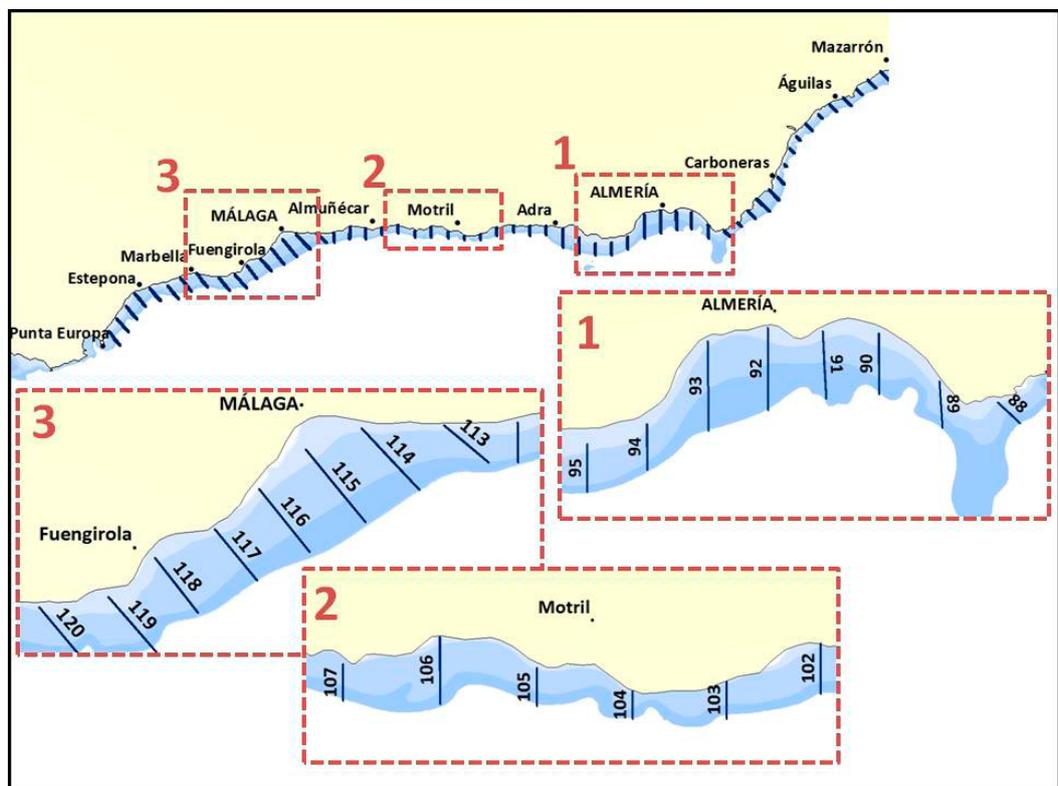


Figura 4.3: Áreas y radiales donde se detectaron los máximos valores de densidad acústica.

Los estadísticos descriptivos de las observaciones de s_A por año y frecuencia (**Tabla 4.2**) mostraron que:

- Los valores de s_A medios registrados a la frecuencia de 18 kHz fueron superiores en 2013 que en 2014, mientras que a las frecuencias de 38, 120 y 200 kHz fueron superiores en 2014 que en 2013.
- La desviación estándar y la varianza alcanzaron un mayor valor en 2014 que en 2013 para todas las frecuencias, salvo para la de 18 kHz.
- El coeficiente de variación resultó extremadamente elevado para los dos años estudiados y para todas las frecuencias.

Tabla 4.2: Estadísticos descriptivos correspondientes a la capa epipelágica de dispersión acústica.

Año	Frecuencia (kHz)	Media	Desviación estándar	CV	Varianza	Máximo	Mínimo	Mediana
2013	18	1201	1195	0.99	1496040	4774	24	700
2013	38	1625	1508	0.92	2318113	8614	68	1114
2013	120	276	258	0.93	67917	1069	7	203
2013	200	204	200	0.97	40723	862	8	131
2014	18	848	783	0.92	624937	3864	68	605
2014	38	2212	2071	0.93	4368773	10164	337	1683
2014	120	341	317	0.92	102088	1593	54	261
2014	200	361	318	0.87	102746	1463	54	275

Este hecho fue debido a la heterogeneidad y dispersión de los valores de densidad acústica detectados.

- El máximo valor de densidad acústica se registró a la frecuencia de 38 kHz para los dos años estudiados.
- El mínimo valor de densidad acústica se observó en 2013 a la frecuencia de 120 kHz, y en 2014 a las frecuencias de 120 y 200 kHz.

4.1.2. Distribución espacial

4.1.2.1. Densidad acústica por intervalos de profundidad

Las observaciones de s_A asociadas a la capa epipelágica de dispersión acústica, se integraron por intervalos horizontales de profundidad, acotados por la profundidad del fondo. Cada intervalo de profundidad, se asoció con una zona batimétrica: zona costera, zona intermedia y zona profunda (**Figura 3.11**).

El valor de s_A medio registrado a múltiples frecuencias para los dos años estudiados, y representado por intervalos batimétricos puso de manifiesto que (**Figura 4.4**):

- La mayor densidad acústica se concentró en la zona intermedia de la plataforma continental y la menor se localizó en la zona costera, con independencia del año y la frecuencia.
- El único año en el que el B/O estuvo equipado con la frecuencia de 70 kHz, se constató que esta frecuencia registró el máximo valor de s_A en las zonas costeras (**Figura 4.4A**).
- En 2013, en las zonas intermedia y profunda el mayor valor de s_A medio se registró a la frecuencia de 38 kHz (**Figura 4.4A**).
- En 2014, para todas las zonas batimétricas el mayor valor de s_A medio fue registrado a la frecuencia de 38 kHz (**Figura 4.4B**).
- Existieron diferencias interanuales en el valor de s_A medio registrado por las diferentes frecuencias a lo largo de la plataforma continental. El valor de s_A registrado a la frecuencia de 18 kHz resultó, para todas las zonas estudiadas, mayor en 2013 que en 2014. Para el resto de frecuencias (38, 120 y 200 kHz), el valor de s_A medio solo fue mayor en 2013, respecto a 2014, en la zona costera.

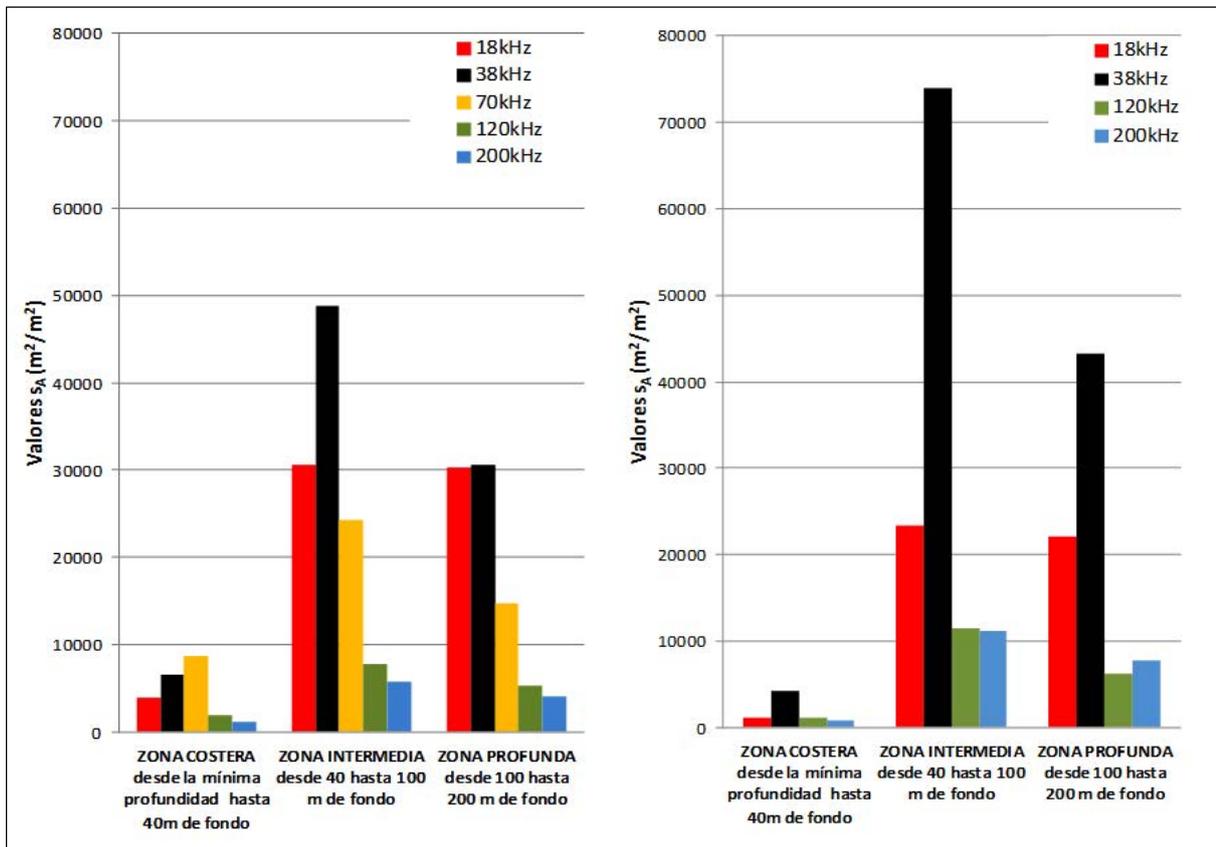


Figura 4.4: Valores de s_A medios registrados a múltiples frecuencias por intervalos de profundidad. A: 2013. B: 2014.

4.1.2.2. Mapas de densidad acústica

La distribución espacial de los valores de s_A en el área de estudio para la **frecuencia de 18 kHz**, representada mediante mapas de densidad Kernel para los dos años estudiados, puso de manifiesto que:

En 2013 (Figura 4.5), la mayor concentración de densidad acústica se detectó en la bahía de Almería, en las inmediaciones de Adra, desde Motril hasta la bahía de Málaga y en las inmediaciones de Estepona.

En 2014 (Figura 4.6), la mayor concentración de densidad acústica se detectó en las inmediaciones de Carboneras, en la bahía de Almería, desde la bahía de Málaga hasta Fuengirola y desde Estepona hasta Punta Europa.

El centro espacial de la distribución se desplazó, de 2013 a 2014, 8 mn hacia el oeste y 3 mn hacia el sur. El centro de la distribución se localizó en 2013 en el mismo paralelo que la localidad de Motril, y en 2014 a 8 mn al oeste de ésta. Indicando que los máximos valores en 2013 se hallaron en zonas más costeras.

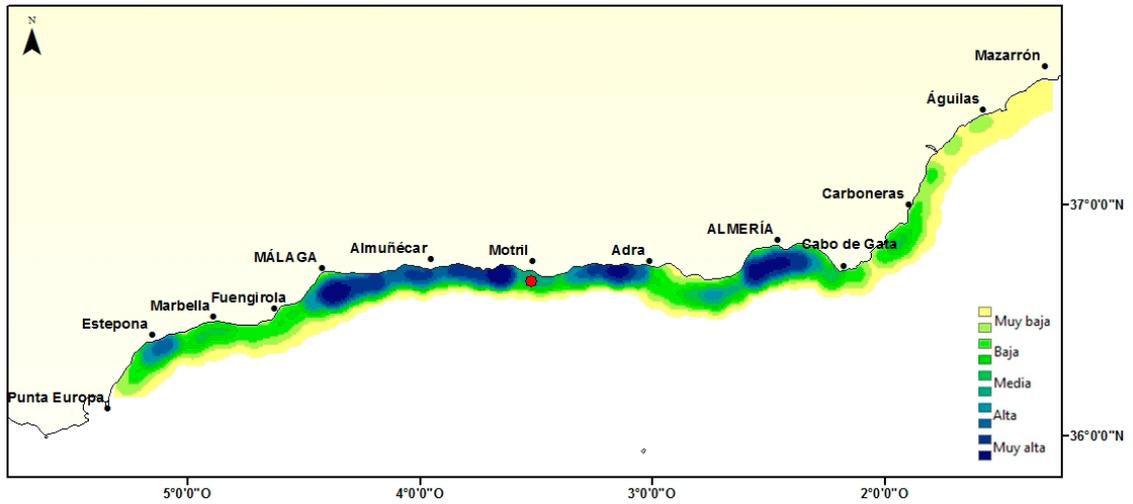


Figura 4.5: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 18 kHz en 2013, y el centro el espacial de la distribución (círculo rojo).

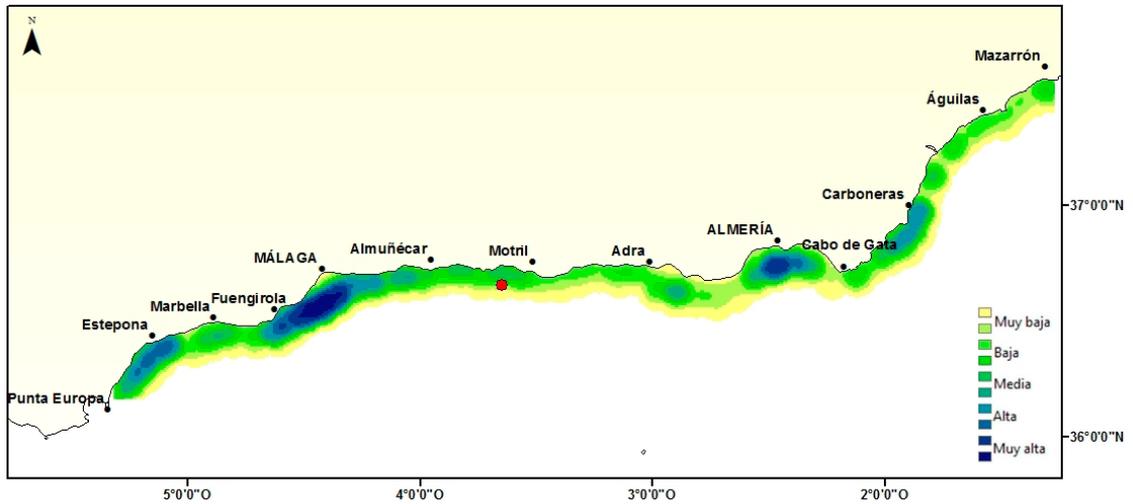


Figura 4.6: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 18 kHz en 2014, y el centro el espacial de la distribución (círculo rojo).

Para los dos años estudiados, la distribución espacial de los valores de s_A para la frecuencia de **38 kHz**, representada mediante mapas de densidad Kernel, puso de manifiesto que:

En 2013 (Figura 4.7), la mayor concentración de densidad acústica se detectó en las inmediaciones de Carboneras, en la bahía de Almería, desde Adra hasta la bahía de Málaga y en las inmediaciones de Estepona.

En 2014 (Figura 4.8), la mayor concentración de densidad acústica se detectó desde Carboneras a Cabo de Gata, en la bahía de Almería, en las inmediaciones de Adra, desde Motril hasta Fuengirola y desde Estepona hasta punta Europa.

El centro espacial de la distribución se desplazó, de 2013 a 2014, 8 mn hacia el oeste y 3 mn hacia el sur. El centro de la distribución se desplazó desde 4 hasta 12 mn al oeste de Motril. Este hecho

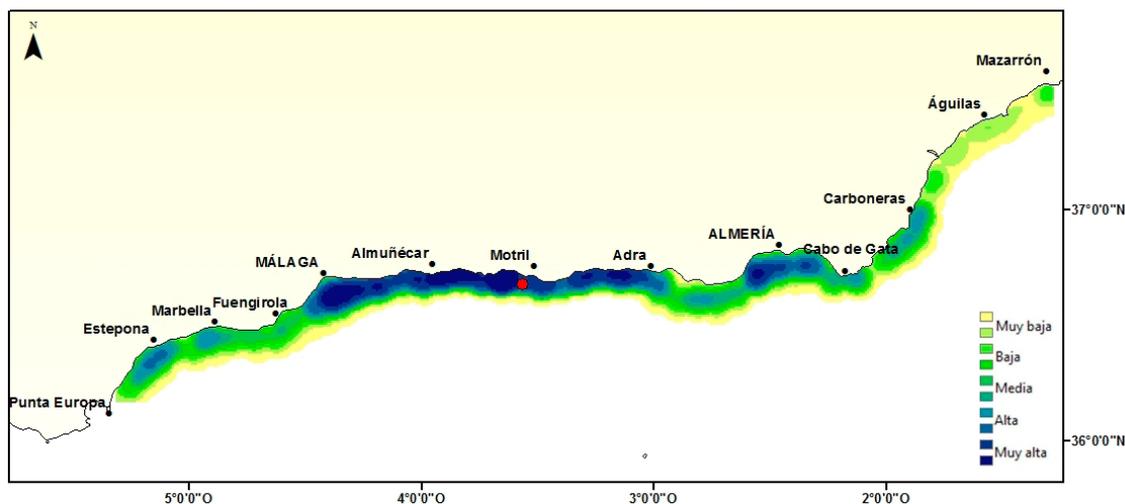


Figura 4.7: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 38 kHz en 2013, y el centro el espacial de la distribución (círculo rojo).

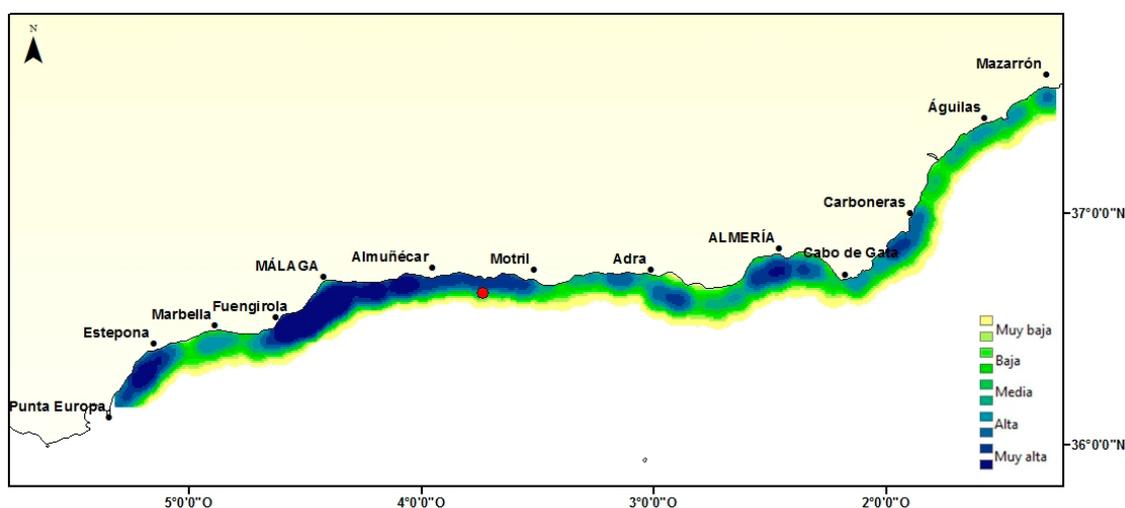


Figura 4.8: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 38 kHz en 2014, y el centro el espacial de la distribución (círculo rojo).

indicó que los valores registrados en áreas costeras en 2013 fueron superiores a los de 2014.

La distribución espacial de los valores de s_A para la **frecuencia de 120 kHz**, representada mediante mapas de densidad Kernel para los dos años estudiados puso de manifiesto que:

En 2013 (Figura 4.9), la mayor concentración de densidad acústica se detectó en el área localizada desde Cabo de Gata hasta la bahía de Málaga.

En 2014 (Figura 4.10), la mayor concentración de densidad acústica se detectó desde la localidad de Carboneras hasta el oeste de la bahía de Almería, en las inmediaciones de Adra, desde Motril hasta la bahía de Málaga y desde Estepona hasta Punta Europa.

El centro espacial de la distribución se desplazó 9 mn hacia el oeste y 1 mn hacia el sur de 2013 a 2014. El centro de la distri-

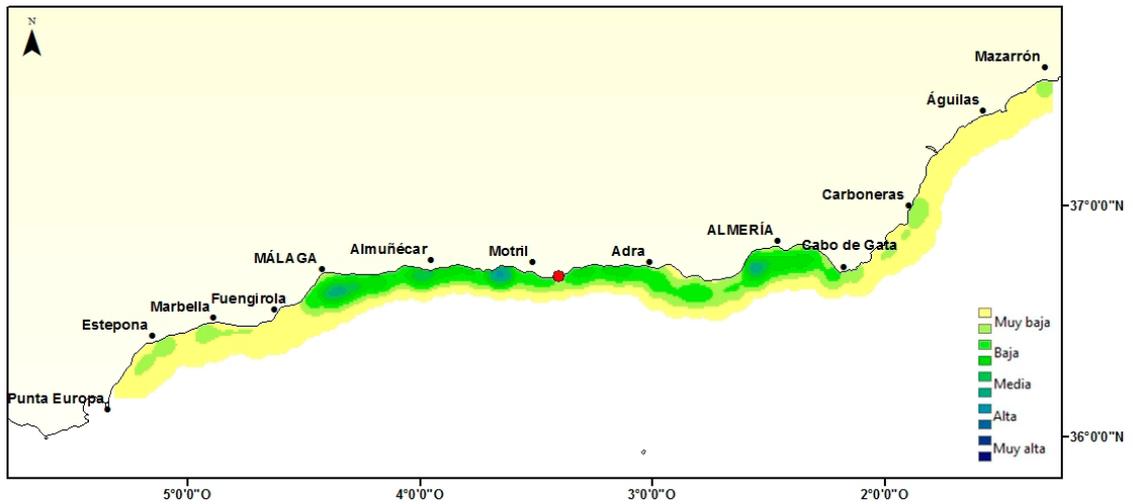


Figura 4.9: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 120 kHz en 2013, y el centro espacial de la distribución (círculo rojo).

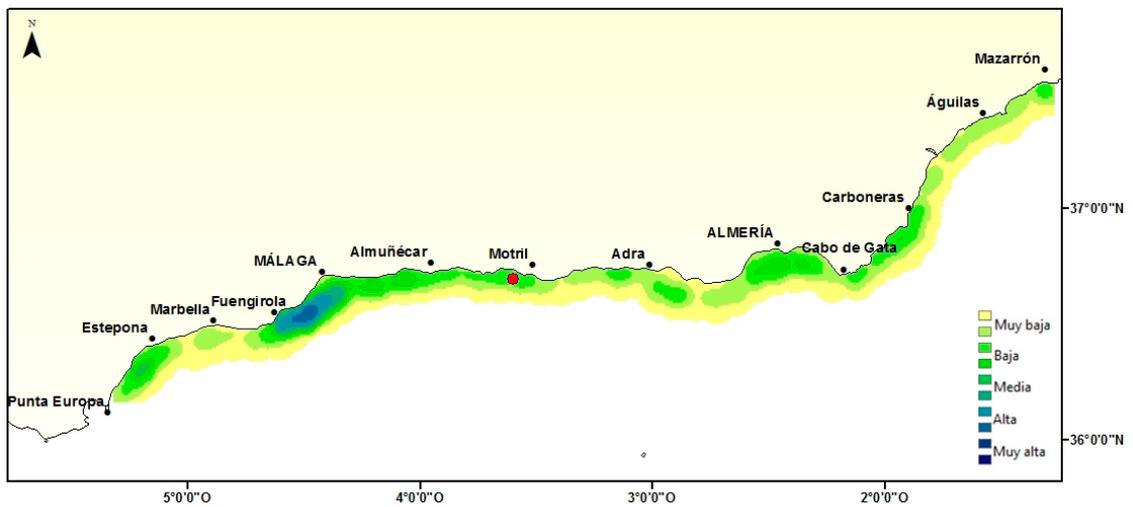


Figura 4.10: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 120 kHz en 2014, y el centro espacial de la distribución (círculo rojo).

bución se desplazó desde 5 mn al este de Motril hasta 4 mn al oeste de esta localidad. En el caso de esta frecuencia, la variación latitudinal fue menos acusada que para las frecuencias de 18 y 38 kHz, indicando que los máximos valores se encontraron en un rango batimétrico similar para los dos años.

La distribución espacial de los valores de s_A para la **frecuencia de 200 kHz**, representada mediante mapas de densidad Kernel para los dos años estudiados puso de manifiesto que:

En 2013 (Figura 4.11), la mayor concentración de densidad acústica se detectó en la bahía de Almería y desde la localidad de Adra hasta el oeste de la bahía de Málaga.

En 2014 (Figura 4.12), la mayor concentración de densidad acústica se detectó desde la localidad de Carboneras hasta la bahía de Almería, en las inmediaciones de Adra, desde Motril hasta Fuengirola y desde Estepona hasta Punta Europa.

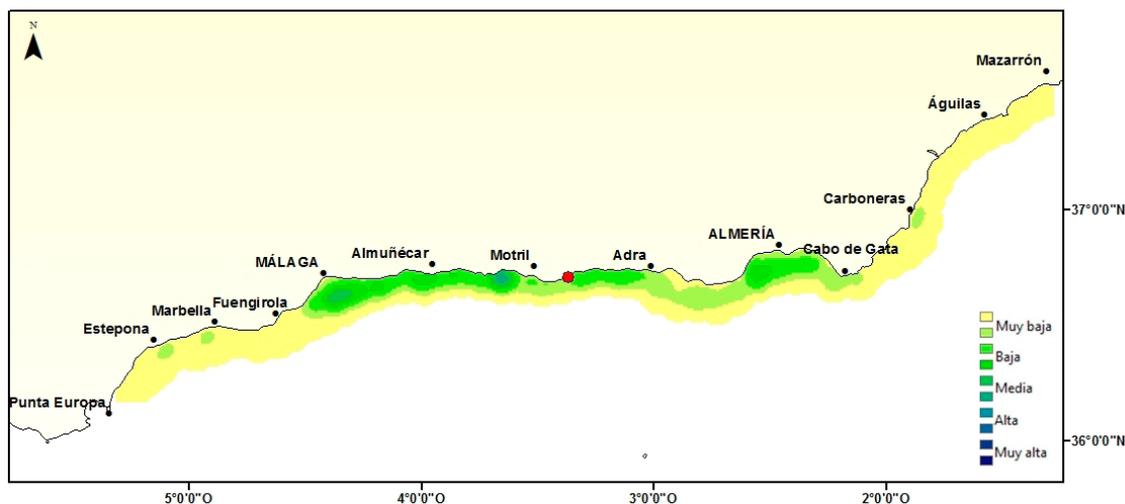


Figura 4.11: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 200 kHz en 2013, y el centro el espacial de la distribución (círculo rojo).

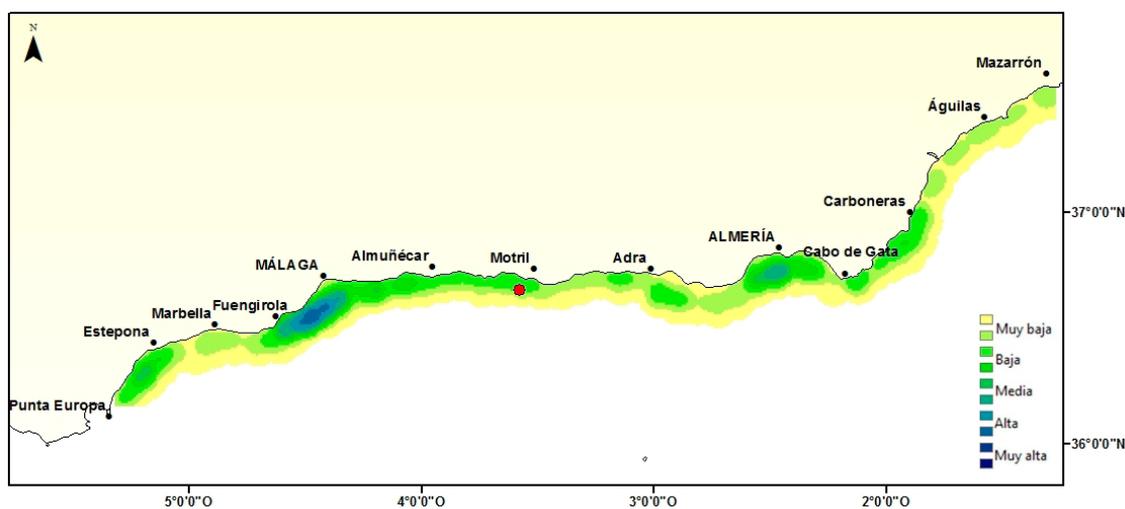


Figura 4.12: Distribución de la densidad acústica registrada a la frecuencia de 200 kHz en 2014, y el centro el espacial de la distribución (círculo rojo).

El centro espacial de la distribución se desplazó 11 mn hacia el oeste y 4 mn hacia el sur de 2013 a 2014. El centro de la distribución se desplazó desde 6 mn al este de Motril hasta 5 mn al oeste de esta localidad.

Para los dos años y las cuatro frecuencias analizadas, se registraron cuatro áreas donde se concentró la mayor densidad acústica asociada a la capa epipelágica de dispersión acústica. Dichas áreas fueron: bahía de Almería, inmediaciones de Adra, desde Motril a la bahía de Málaga y desde Estepona a Punta Europa.

4.1.3. Relación entre frecuencias

Para realizar una correcta estimación de la abundancia de peces, es necesario aislar sus registros acústicos de todos los demás registros detectados por la ecosonda científica. La frecuencia de evaluación (38 kHz) detectó peces de forma eficaz, y además una capa epipelágica de dispersión acústica asociada a la comunidad planctónica. Este tipo de registros acústicos interfieren con los ecotrazos correspondientes a los cardúmenes de peces, pudiendo sobreestimar su abundancia y afectando negativamente al proceso de evaluación. Si una misma comunidad es detectada a diferentes frecuencias, su valor a una frecuencia podría predecirse combinando el resto. En esta tesis, se trató de mejorar el proceso de evaluación de peces pelágicos a través de la optimización de la interpretación de ecogramas, el valor a predecir fue el registrado por la frecuencia de 38 kHz.

En 2013, el análisis de regresión lineal múltiple (Tabla 4.3) mostró que la capa de dispersión acústica detectada a la frecuencia de 38 kHz, se ajustó adecuadamente al modelo basado en la combinación de las demás frecuencias (R^2 : 0.86, p-valor: $< 2.2e-16$). Las frecuencias de 120 y 200 kHz resultaron significativas para la explicación del valor de s_A registrado a la frecuencia de 38 kHz.

Tabla 4.3: Resultados del análisis de regresión lineal múltiple en 2013. Códigos = '***' 0.01 '*' 0.05.

2013	Valor estimado	Error estándar	Valor del estadístico t	Pr(> t)
Intercepto	212.21	118.28	1.79	0.07
s_A 18 kHz	0.09	0.19	0.49	0.62
s_A 70 kHz	0.60	0.36	1.66	0.10
s_A 120 kHz	-3.22	1.54	-2.09	0.04*
s_A 200 kHz	0.24	3.10	2.65	0.01**

La ecuación lineal que predijo la energía acústica detectada a la frecuencia de 38 kHz, en función del resto de frecuencias, quedó formulada de la siguiente manera:

$$s_{A, 38 \text{ kHz}} = 212.21 + 0.09s_{A 18 \text{ kHz}} + 0.60s_{A 70 \text{ kHz}} - 3.22s_{A 120 \text{ kHz}} + 0.24s_{A 200 \text{ kHz}}$$

En 2014, el ajuste de los datos mediante un modelo de regresión lineal múltiple (Tabla 4.4) resultó muy adecuado (R^2 : 0.93, p-valor: $< 2.2e-16$), siendo todas las frecuencias significativas en la explicación del valor de s_A registrado en la frecuencia de 38 kHz.

Tabla 4.4: Resultados del análisis de regresión lineal múltiple en 2014. Códigos: '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05.

2014	Valor estimado	Error estándar	Valor del estadístico t	Pr(> t)
Intercepto	43.51	116.16	0.37	0.70
s_A 18 kHz	0.60	0.26	-2.27	0.02*
s_A 120 kHz	6.23	0.92	6.71	1.7e-08***
s_A 200 kHz	-1.28	1.18	-1.08	0.01**

La ecuación lineal que predijo la energía acústica detectada a la frecuencia de 38 kHz, en función del resto de frecuencias, se construyó como sigue:

$$s_{A\ 38\ kHz} = 43.51 + 0.60s_{A\ 18\ kHz} + 6.23s_{A\ 120\ kHz} - 1.28s_{A\ 200\ kHz}$$

Para el conjunto de los datos, el modelo se basó en la combinación de las cuatro frecuencias comunes (Tabla 4.5), y resultó ajustarse muy adecuadamente al modelo de regresión lineal múltiple (R^2 : 0.88, p-valor: $< 2.2e-16$). Las variables significativas fueron los valores de s_A a las frecuencias de 120 y 200 kHz.

2013+2014	Valor estimado	Error estándar	Valor del estadístico t	Pr(> t)
Intercepto	91.02	91.58	0.99	0.32
$s_{A\ 18\ kHz}$	0.04	0.10	0.42	0.67
$s_{A\ 120\ kHz}$	3.30	0.79	4.19	5.8e-05***
$s_{A\ 200\ kHz}$	2.71	0.72	3.76	0.0002***

Tabla 4.5: Resultados del análisis de regresión lineal múltiple para el conjunto de los datos. Código: '***' 0.001.

La ecuación que gobernó la energía acústica dispersada a la frecuencia de 38 kHz, basada en la combinación de los valores registrados por el resto de frecuencias para los dos años estudiados, fue la siguiente:

$$s_{A\ 38\ kHz} = 91.02 + 0.04s_{A\ 18\ kHz} + 3.30s_{A\ 120\ kHz} + 2.71s_{A\ 200\ kHz}$$

La transcripción de las ecuaciones a ecogramas virtuales o máscaras generadas con el programa Echoview y finalmente aplicadas al área de estudio se recogen en el **Anexo 4**.

Los resultados demostraron que es posible eliminar los registros acústicos correspondientes a la comunidad planctónica, que es detectada a la frecuencia de evaluación, combinando el resto de frecuencias. La ecuación que explicó la dispersión acústica presentó cambios interanuales, indicando que para aumentar la efectividad de la separación entre comunidades pelágicas los algoritmos deben adaptarse a la situación acústica muestreada en cada momento y en cada lugar.

4.1.4. Implicación en la evaluación de la comunidad de peces pelágicos

4.1.4.1. Correlación entre comunidades pelágicas

La comunidad de peces pelágicos coexistió con una capa epipelágica de dispersión acústica asociada a la comunidad planctónica. Los registros acústicos asociados a la comunidad de peces se delimitaron y cuantificaron en la frecuencia de evaluación. Los registros relacionados con la comunidad planctónica se delimitaron y cuantificaron en las frecuencias de 18, 38, 70, 120 y 200 kHz en 2013, y en las frecuencias de 18, 38, 120 y 200 kHz en 2014. La

relación entre la comunidad de peces y la comunidad planctónica se estudió a las frecuencias disponibles en cada año.

En 2013, la relación entre la comunidad de peces pelágicos detectada a la frecuencia de evaluación y la comunidad planctónica detectada a múltiples frecuencias (18, 38, 70, 120 y 200 kHz) resultó muy débil, independientemente de la frecuencia a la que se detectó la comunidad planctónica. Sin embargo, la relación entre la comunidad planctónica detectada a diferentes frecuencias resultó muy fuerte. El grado de correlación entre los valores de s_A atribuido a la comunidad planctónica, a las cinco frecuencias, resultó mayor para los pares de frecuencias 120-200 kHz respecto al resto de combinaciones de pares de frecuencias (Tabla 4.6).

Tabla 4.6: Correlación entre los valores de s_A asociados a la comunidad de peces pelágicos (peces) y a la capa de dispersión acústica (plancton) en 2013.

	38 kHz peces	18 kHz plancton	38 kHz plancton	70 kHz plancton	120 kHz plancton	200 kHz plancton
38 kHz_ peces	1.000					
18 kHz_ plancton	0.053	1.000				
38 kHz_ plancton	0.058	0.844	1.000			
70 kHz_ plancton	0.097	0.815	0.906	1.000		
120 kHz_ plancton	0.202	0.907	0.880	0.922	1.000	
200 kHz_ plancton	0.148	0.925	0.922	0.948	0.981	1.000

En 2014, al igual que en 2013, la relación entre la comunidad de peces pelágicos detectada a 38 kHz y la comunidad planctónica detectada a múltiples frecuencias (18, 38, 120 y 200 kHz) resultó muy débil, independientemente de la frecuencia a la que se detectó la comunidad planctónica. Mientras que la relación establecida para la comunidad de plancton entre pares de frecuencias resultó muy fuerte (Tabla 4.7).

Tabla 4.7: Correlación entre los valores de s_A asociados a la comunidad de peces pelágicos (peces) y a la capa de dispersión acústica (plancton) en 2014.

	38 kHz peces	18 kHz plancton	38 kHz plancton	120 kHz plancton	200 kHz plancton
38 kHz_ peces	1.000				
18 kHz_ plancton	-0.162	1.000			
38 kHz_ plancton	-0.124	0.789	1.000		
120 kHz_ plancton	-0.147	0.776	0.961	1.000	
200 kHz_ plancton	-0.174	0.727	0.932	0.964	1.000

Tanto en 2013 como en 2014, la comunidad de peces pelágicos detectada a la frecuencia de evaluación no presentó relación lineal con la comunidad planctónica detectada a diferentes frecuencias. En el caso de la comunidad planctónica, los valores de s_A detectados a las frecuencias de 38, 70, 120 y 200 kHz estuvieron fuertemente correlacionados, indicando que detectaron una comunidad planctónica similar. Las comparaciones entre pares de frecuencias en las que participó la frecuencia de 18 kHz presentaron un menor grado de correlación respecto al resto de combinaciones, indicando que la frecuencia de 18 kHz detectó otro tipo de organismos o comunidad planctónica.

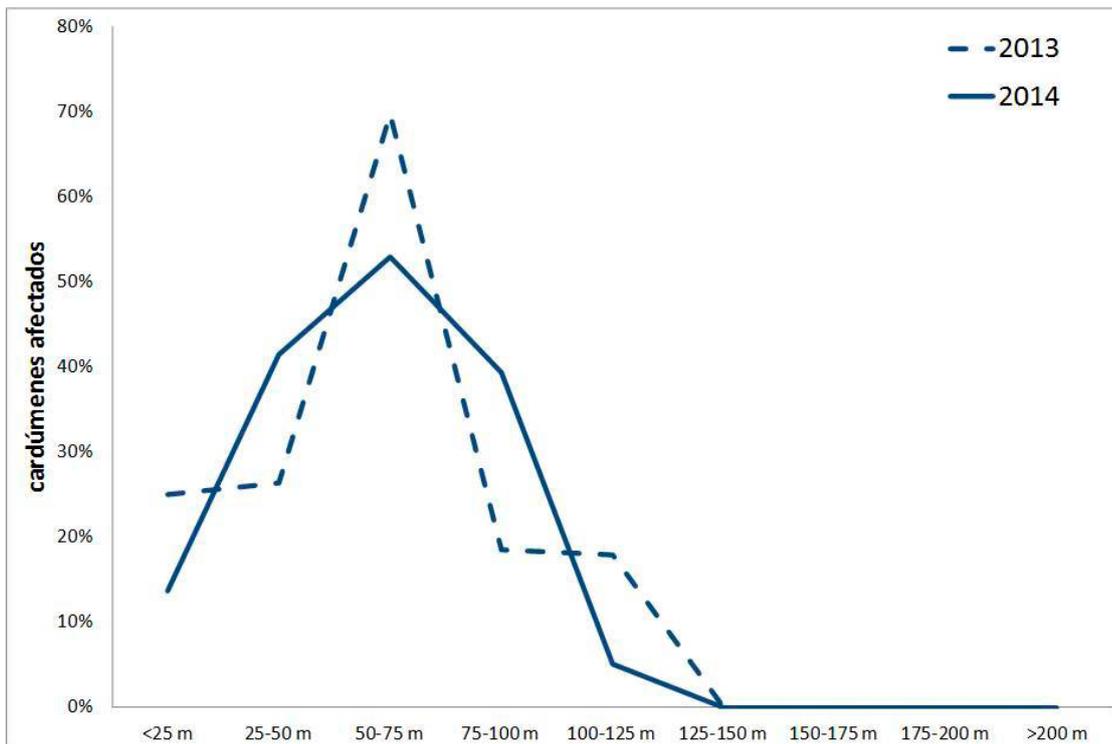
4.1.4.2. Co-ocurrencia de comunidades pelágicas

La columna de agua constituye un espacio finito, delimitado por la superficie y el fondo del mar. El espacio vertical disponible para que las comunidades pelágicas se distribuyan aumenta con la profundidad. Cuando se producen interacciones entre las dos comunidades, la capa de dispersión acústica enmascara a los cardúmenes de peces dificultando el proceso de interpretación de ecogramas.

El índice experimental de co-ocurrencia, aplicado por intervalos de profundidad (**Figura 3.13**) detectó eficazmente los cardúmenes enmascarados por la capa de dispersión acústica registrados a la frecuencia de 38 kHz.

En 2013, se detectaron 473 cardúmenes en el área de estudio. El número de cardúmenes afectados por la presencia de la capa de dispersión acústica fue 145, lo que representó el 33.48% de los cardúmenes detectados.

En 2014, se detectaron 511 cardúmenes en el área de estudio. El número de cardúmenes afectados por la presencia de la capa de dispersión acústica fue 192, lo que representó el 37.57% de los cardúmenes detectados.



El enmascaramiento de los cardúmenes por parte de la capa de dispersión acústica varió según la profundidad del fondo. La mayor co-ocurrencia de comunidades pelágicas se produjo, independientemente del año, a profundidades de entre 50 y 75 m de fondo. La aplicación de ecogramas virtuales, basados en la combinación de frecuencias, supuso una mejora global de la es-

Figura 4.13: Porcentaje cardúmenes afectados por la presencia de la capa de dispersión acústica por intervalo de profundidad.

timación de la abundancia de peces de un 33 y un 37 % en 2013 y 2014, respectivamente. A profundidades de entre 50 y 75 m, este porcentaje aumentó hasta el 69 % en 2013 y hasta el 54 % en 2014 (Figura 4.13).

4.2. Identificación biológica de la capa epipelágica de dispersión acústica

Para la caracterización biológica de la capa de dispersión acústica presente en el área de estudio, se realizaron un total de diez y ocho estaciones de identificación de zooplancton: diez en 2013 y ocho en 2014 (Figura 4.14). En todas las estaciones se emplearon dos muestreadores: redes bongo 90 y 40, excepto en la St_13.9 de MEDIAS 2013 donde sólo se muestreó con la red bongo 90 (Tabla 4.8).

Tabla 4.8: Estaciones de zooplancton.

Año	Estación	Fecha (ddmmaa)	Hora (GMT)	Profundidad fondo (m)	Bongo 40		Bongo 90	
					Velocidad (mn/h)	Profundidad Arrastre (m)	Velocidad (mn/h)	Profundidad arrastre (m)
2013	St_13.1	20072013	17:04	48.0	2.2	15.6	2.2	13.9
	St_13.2	20072013	14:57	200.6	2.2	62.0	2.2	80.0
	St_13.3	21072013	16:23	112.5	2.2	27.9	2.2	26.2
	St_13.4	22072013	17:17	95.0	2.2	15.0	2.2	13.4
	St_13.5	23072013	17:01	57.5	2.2	41.8	2.2	30.2
	St_13.6	24072013	16:02	97.5	2.2	11.9	2.2	10.7
	St_13.7	25072013	15:47	114.5	2.2	24.8	2.2	22.6
	St_13.8	26072013	15:08	99.0	2.2	11.7	2.2	11.3
	St_13.9	28072013	17:26	33.0	-	-	2.2	10.5
	St_13.10	29072013	15:26	92.5	2.2	11.1	2.2	9.0
2014	St_14.1	12072014	15:33	90.0	2.3	33.5	2.4	24.5
	St_14.2	14072014	16:06	83.0	2.5	30.5	2.5	34.0
	St_14.3	15072014	16:46	90.0	2.6	37.5	2.7	38.5
	St_14.4	17072014	17:19	44.0	2.6	22.0	2.7	20.4
	St_14.5	18072014	16:03	35.0	2.9	22.0	2.7	23.5
	St_14.6	19072014	16:57	102.0	2.2	55.5	2.6	47.0
	St_14.7	20072014	15:23	95.0	2.5	46.5	2.4	45.0
	St_14.8	21072014	08:41	115.0	3.1	48.5	2.6	85.0

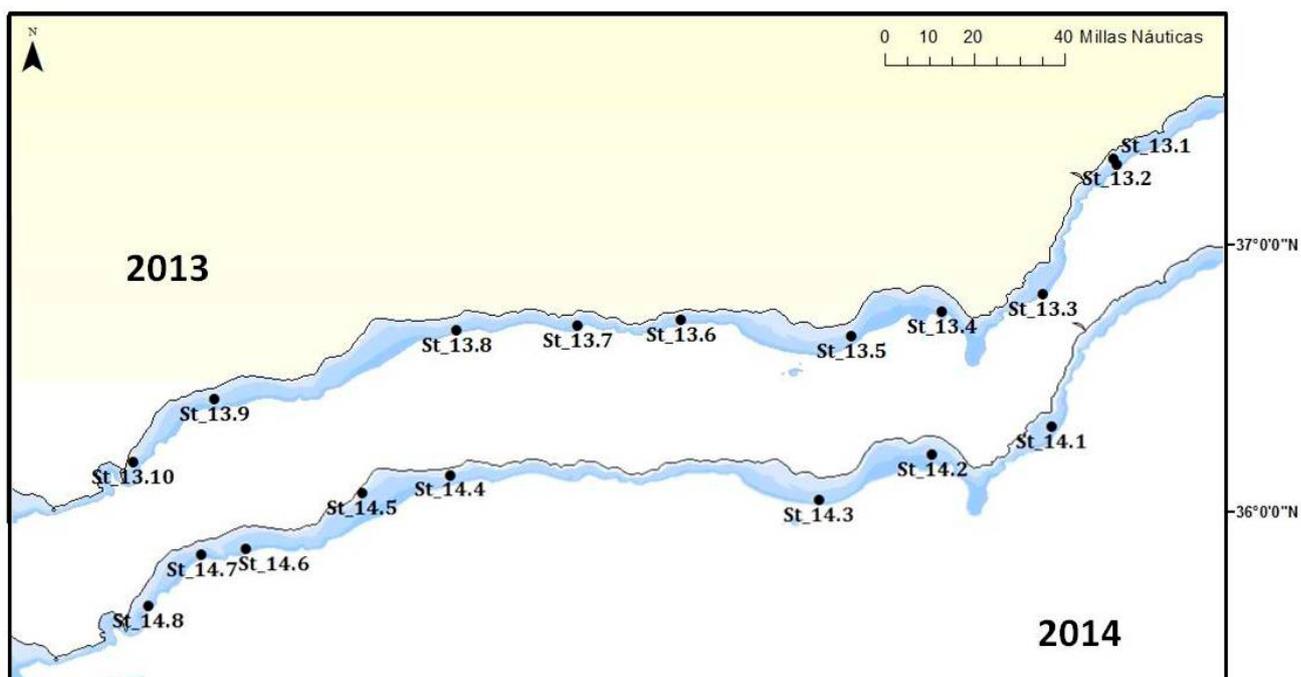


Figura 4.14: Estaciones de zooplankton realizadas en 2013 y 2014.

4.2.1. Estaciones muestreadas biológicamente

4.2.1.1. Registros acústicos

Las posiciones del muestreo biológico se decidieron en función de los registros acústicos observados en los ecogramas a diferentes frecuencias. Al finalizar las labores dirigidas a la evaluación de peces pelágicos, se visualizaron los ecogramas almacenados durante la jornada, y se puso rumbo a la situación deseada más cercana, optimizando el tiempo de trabajo.

En 2013 y en 2014, los escenarios acústicos más habitualmente registrados en el área de estudio fueron:

- Máxima respuesta acústica en la frecuencia de 120 kHz y mínima en las frecuencias de 18 y 38 kHz (**Figura 4.15**). Esta situación fue característica de áreas cercanas a la costa.
- Máxima respuesta acústica registrada en la frecuencia de 38 kHz y mínima en la de 18 kHz (**Figura 4.16**). Esta situación fue la más común entre los 40 m y el final de la plataforma continental.
- Máxima respuesta acústica registrada en la frecuencia de 18 kHz (**Figura 4.17**). Esta situación fue distintiva de áreas situadas al final de la plataforma continental.

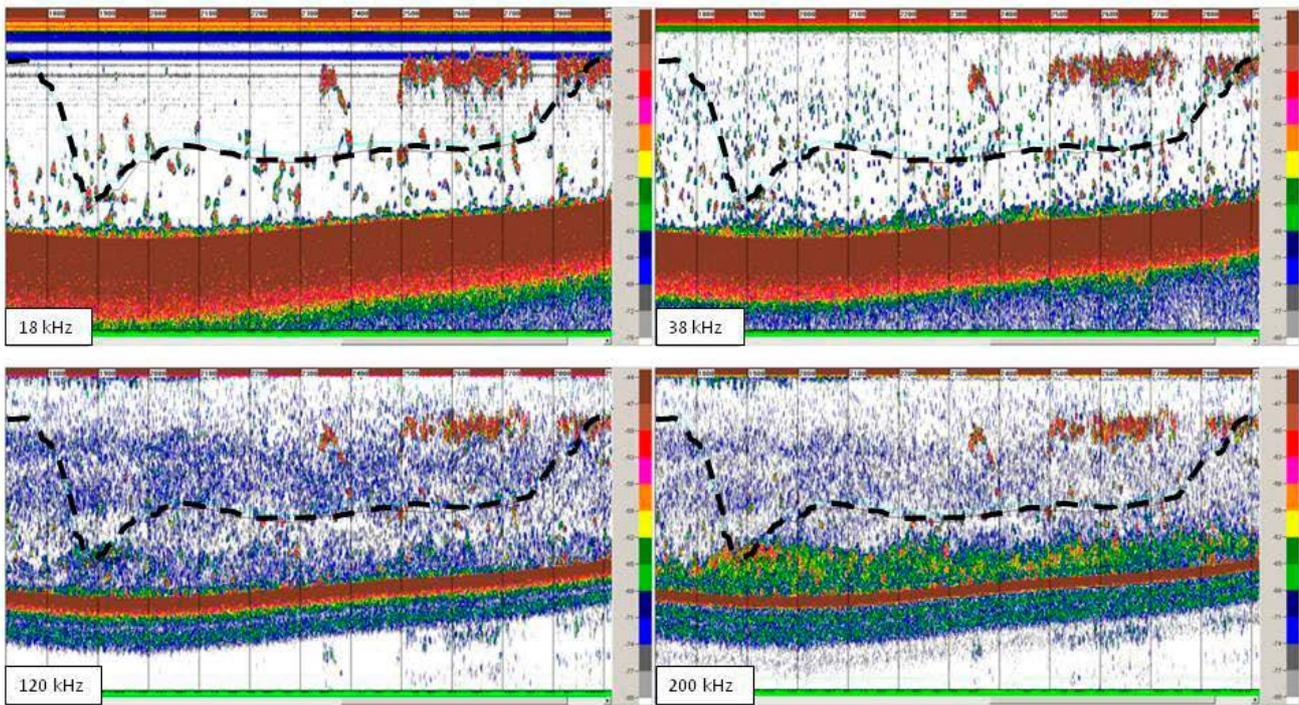


Figura 4.15: Ecogramas estación 14.5. Bongo 90. Fecha: 18/07/2014. Profundidad del fondo: 35 m. Profundidad del arrastre: 23 m.

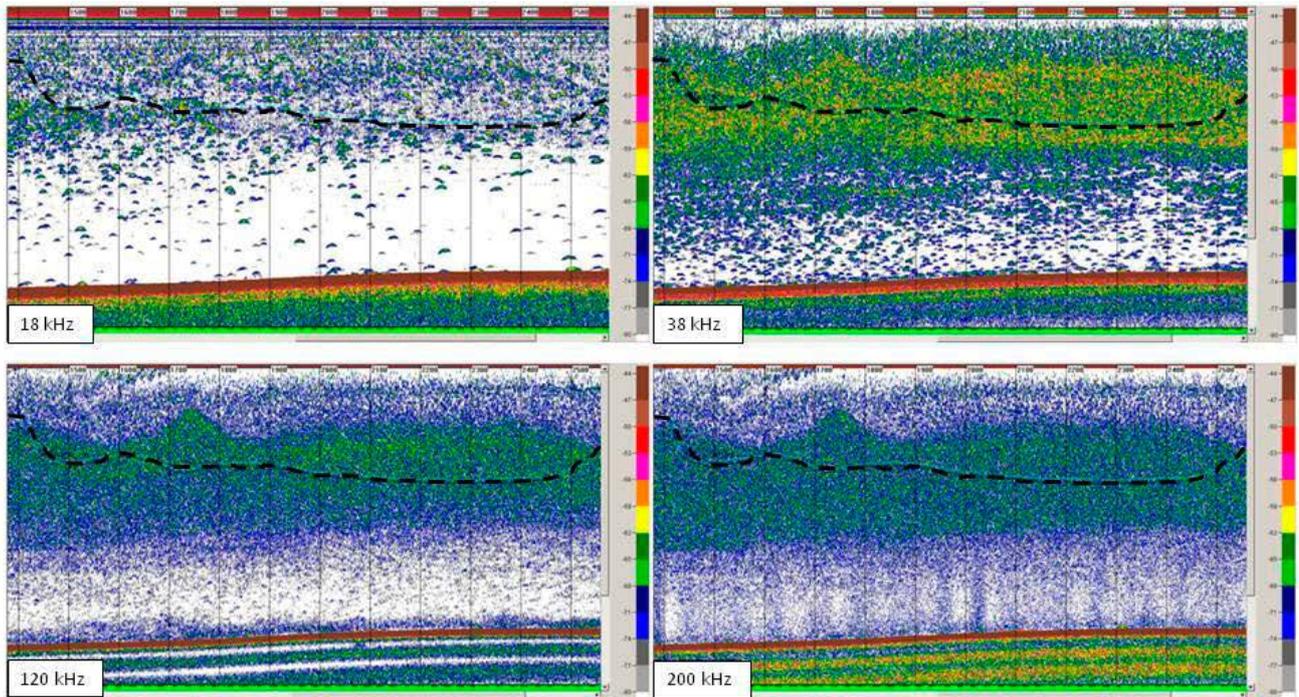


Figura 4.16: Ecogramas estación 14.2. Bongo 40. Fecha: 14/07/2014. Profundidad del fondo: 83 m. Profundidad del arrastre: 34 m.

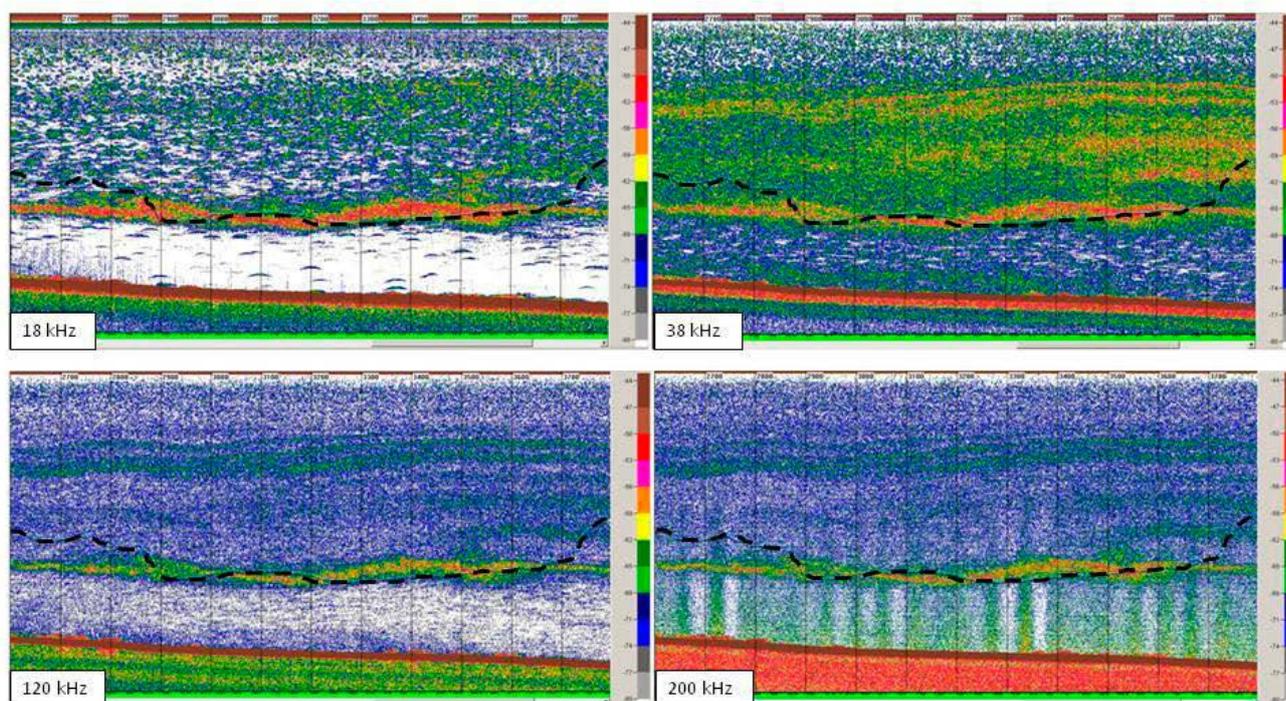


Figura 4.17: Ecogramas estación 14.8. Bongo 90. Fecha: 21/07/2014. Profundidad del fondo: 115 m. Profundidad del arrastre: 85 m.

4.2.1.1.1. Determinación de los valores de ruido constante

A la velocidad a la que se llevaron a cabo los arrastres de zooplancton, no se obtuvieron valores de ruido constante, operando los transductores en modo pasivo. Por esto, el nivel de ruidos provocados por los equipos electrónicos y la hidrodinámica del B/O, se calculó en el post-proceso de los datos acústicos. Los valores de ruido fueron calculados en cada estación, para cada red de plancton y para cada frecuencia.

En 2013, se constató que los niveles de ruido disminuyeron al aumentar la frecuencia, salvo en la estación St_13.10 donde la frecuencia de 38 kHz presentó 3 dB más de ruido que la frecuencia de 18 kHz. Para todas las frecuencias, el nivel de ruido resultó inversamente proporcional a la profundidad (Tabla 4.9).

Tabla 4.9: Valores de S_v correspondientes al ruido constante calculados en 2013.

MEDIAS 2013	18 kHz (dB)	38 kHz (dB)	70 kHz (dB)	120 kHz (dB)	200 kHz (dB)	Profundidad fondo (m)
St_13.1	-125	-125	-129	-129	-132	48.0
St_13.2	-137	-138	-148	-151	-152	200.6
St_13.3	-136	-137	-147	-150	-150	112.5
St_13.4	-132	-138	-142	-145	-148	95.0
St_13.5	-123	-126	-139	-144	-146	57.5
St_13.6	-127	-137	-140	-149	-147	97.5
St_13.7	-127	-133	-141	-152	-151	114.5
St_13.8	-133	-134	-140	-142	-149	99.0
St_13.9	-116	-118	-122	-126	-131	33.0
St_13.10	-133	-130	-138	-141	-149	92.5

En 2014, los niveles de ruido disminuyeron al aumentar la frecuencia, salvo en el caso de la frecuencia de 200 kHz. La frecuencia de 200 kHz presentó un nivel de ruidos inusualmente elevado. Como en el caso anterior, para todas las frecuencias el nivel de ruido resultó inversamente proporcional a la profundidad (**Tabla 4.10**).

Tabla 4.10: Valores de S_v correspondientes al ruido constante calculados en 2014.

MEDIAS 2014	18 kHz (dB)	38 kHz (dB)	120 kHz (dB)	200 kHz (dB)	Profundidad fondo (m)
St_14.1	-131	-138	-150	-127	90.0
St_14.2	-131	-136	-142	-130	83.0
St_14.3	-133	-135	-144	-131	90.0
St_14.4	-130	-127	-134	-131	44.0
St_14.5	-129	-128	-139	-126	35.0
St_14.6	-133	-137	-148	-129	102.0
St_14.7	-132	-136	-148	-131	95.0
St_14.8	-134	-137	-149	-130	115.0

Los niveles de ruido para las frecuencias de 18, 38 y 120 kHz no mostraron diferencias significativas entre años como demostró el test de la varianza ANOVA. Para un nivel de significación ($\alpha=0.05$), el estadístico F obtuvo valores de 1.42, 1.11 y 1.63 para 18, 38 y 120 kHz respectivamente, siendo el $F_{\text{critico}} = 4.49$. La variación en el nivel de ruido para la frecuencia de 200 kHz no se debió al azar ($F=23.92$, $F_{\text{critico}} = 4.49$), sino a un fallo en el apantallamiento de los cables de conexión entre el GPT y el transductor desde su instalación en el B/O.

4.2.1.1.2. Valores de densidad acústica

Los valores de energía acústica registrados en las estaciones de zooplancton, se calcularon como la energía media reflejada en el volumen acústico muestreado (región acotada sobre el ecograma), en inglés se denomina Mean Volume Backscattering Strength (MVBS).

En 2013, los mínimos valores de MVBS registrados en todas las frecuencias se obtuvieron en la estación St_13.1, situada en el Golfo de Vera a una profundidad de fondo de 49 m. Los valores máximos se registraron en la estación St_13.7, situada en las inmediaciones de la localidad de Motril con una profundidad de fondo de 114.5 m. En todas las estaciones, menos en las estaciones St_13.2 y St_13.9, la frecuencia de 38 kHz registró el valor más elevado de MVBS (**Tabla 4.11**).

Tabla 4.11: Valores de MVBS registrados para la capa epipelágica de dispersión acústica en 2013.

MEDIAS 2013	Bongo 40					Bongo 90				
	18 kHz	38 kHz	70 kHz	120 kHz	200 kHz	18 kHz	38 kHz	70 kHz	120 kHz	200 kHz
St_13.1	-80.46	-77.03	-77.15	-82.06	-83.28	-79.35	-77.73	-76.40	-81.77	-83.60
St_13.2	-65.49	-66.51	-71.95	-73.69	-73.72	-64.33	-65.49	-69.83	-72.30	-72.64
St_13.3	-80.52	-63.57	-61.60	-67.70	-71.83	-78.98	-70.43	-71.16	-75.98	-77.24
St_13.4	-69.89	-61.68	-64.86	-67.94	-69.92	-70.64	-63.07	-65.12	-67.40	-69.60
St_13.5	-71.48	-66.00	-67.83	-73.91	-70.00	-70.07	-66.53	-70.91	-74.75	-74.55
St_13.6	-68.97	-63.57	-65.62	-68.76	-69.85	-67.71	-66.11	-65.05	-69.93	-71.15
St_13.7	-58.08	-57.23	-61.43	-65.69	-66.21	-57.39	-57.35	-62.09	-65.59	-66.49
St_13.8	-66.23	-63.27	-64.27	-69.06	-70.05	-64.14	-61.86	-64.02	-68.71	-69.40
St_13.9	-	-	-	-	-	-80.20	-77.59	-76.86	-77.02	-80.03
St_13.10	-73.09	-69.97	-73.15	-74.80	-77.10	-73.34	-71.47	-73.4	-74.91	-77.53

En 2014, los mínimos valores de MVBS se registraron, en todas las frecuencias, en la estación St_14.4 situada en las inmediaciones de Almuñecar a una profundidad de 44 m de fondo. Los valores máximos se obtuvieron en la estación St_14.8, realizada entre Estepona y Punta Europa a 95 m de profundidad de fondo. Los valores detectados en las frecuencias de 18 y 38 kHz fueron similares en dos de las ocho estaciones (St_14.3 y St_14.7). La frecuencia de 18 kHz registró el mayor valor en la estación St_14.8. La frecuencia de 120 kHz registró el máximo valor en la estación St_14.5. El resto de estaciones presentaron la mayor respuesta acústica en la frecuencia de 38 kHz (Tabla 4.12).

Tabla 4.12: Valores de MVBS registrados para la capa epipelágica de dispersión acústica en 2014.

MEDIAS 2014	Bongo 40				Bongo 90			
	18 kHz	38 kHz	120 kHz	200 kHz	18 kHz	38 kHz	120 kHz	200 kHz
St_14.1	-67.82	-66.51	-70.98	-69.77	-65.92	-65.66	-72.30	-72.14
St_14.2	-71.39	-61.35	-67.75	-68.90	-72.63	-62.51	-67.38	-68.37
St_14.3	-67.38	-67.37	-73.52	-72.79	-72.00	-69.01	-74.89	-74.47
St_14.4	-79.73	-72.39	-74.01	-75.64	-79.19	-71.05	-74.57	-76.01
St_14.5	-78.60	-79.79	-75.03	-78.13	-77.97	-77.41	-75.10	-77.09
St_14.6	-63.75	-64.10	-72.83	-73.06	-66.49	-64.56	-72.99	-72.82
St_14.7	-60.97	-60.97	-68.53	-69.01	-60.80	-60.80	-67.68	-67.57
St_14.8	-66.41	-65.69	-73.27	-72.85	-59.88	-60.88	-64.90	-64.75

4.2.1.1.3. Patrones acústicos multifrecuencia

Los valores de MVBS observados en cada estación realizada con la red bongo 90 (Tabla 4.11 y 4.12), se graficaron para cada año. El perfil o patrón acústico de cada estación, se obtuvo a partir de los valores de MVBS registrados en el intervalo de frecuencias empleadas (de 18 a 200 kHz).

En 2013, los perfiles multifrecuencia de las diez estaciones llevadas a cabo (Figura 4.18) fueron agrupadas en seis patrones comunes.

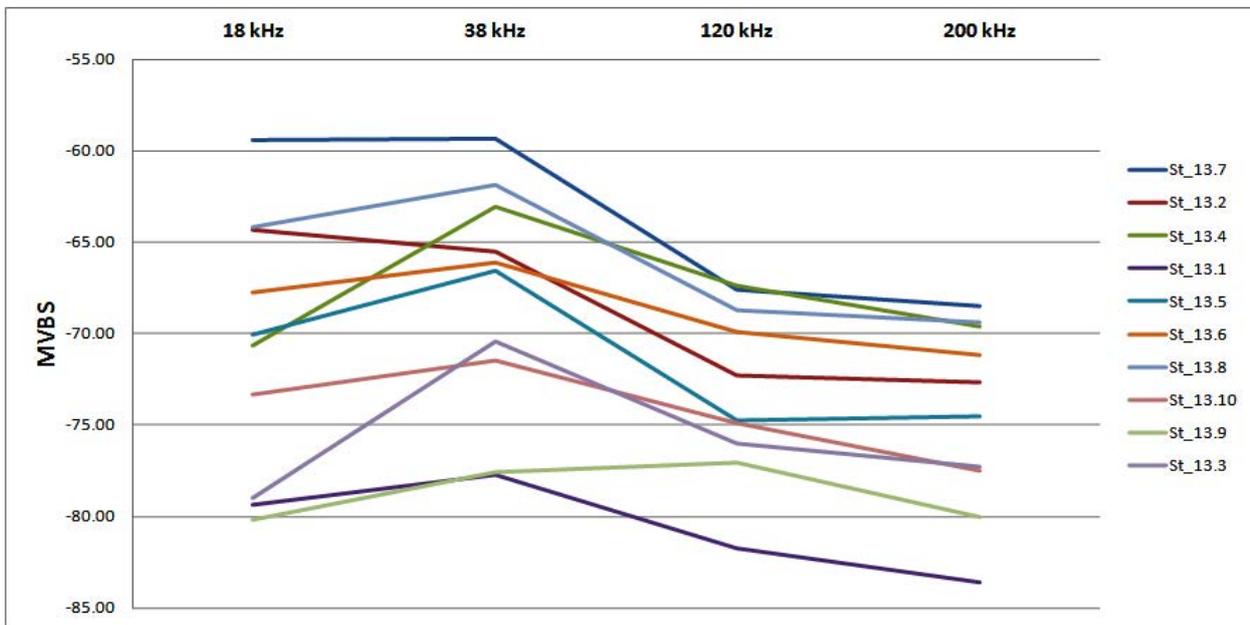


Figura 4.18: Perfiles multifrecuencia observados en 2013.

En 2014, las ocho estaciones realizadas (Figura 4.19) se ajustaron a cinco de los seis patrones establecidos el año anterior.

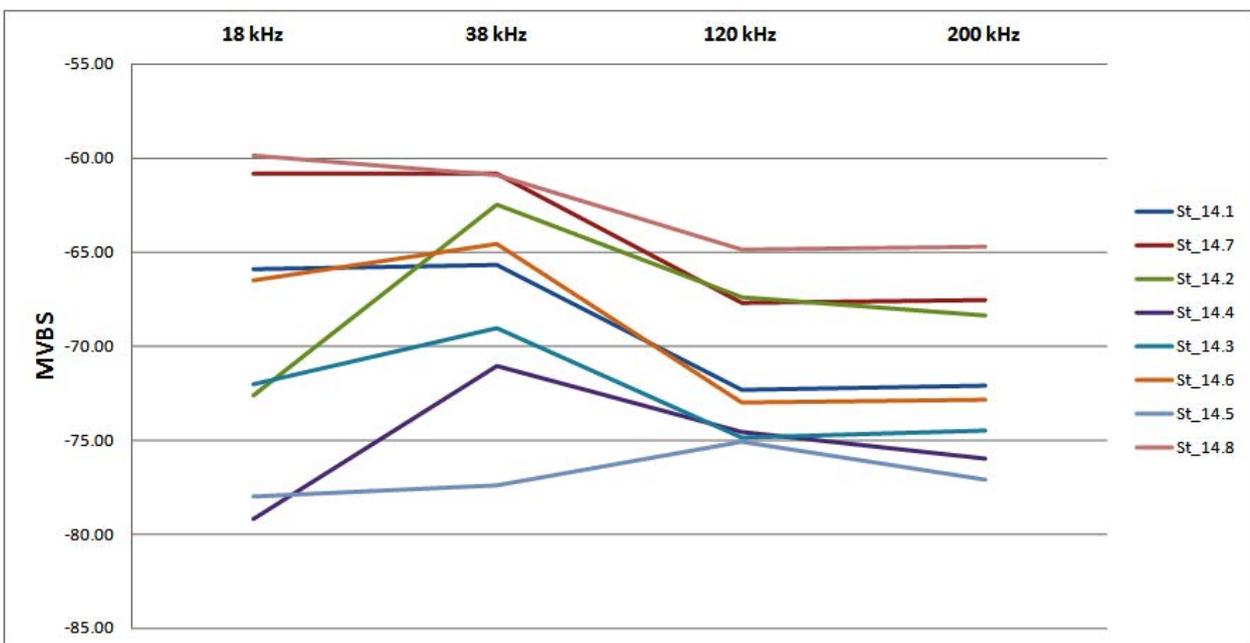


Figura 4.19: Perfiles multifrecuencia observados en 2014.

Las estaciones que mostraron un mismo un patrón acústico fueron muy similares entre sí, y diferentes al resto. De esta manera, se determinaron seis patrones acústicos distintos:

El patrón 1, se caracterizó por valores similares registrados por los pares de frecuencias 18, 38 kHz y 120, 200 kHz, siendo los

valores registrados a las frecuencias más bajas superiores a los registrados a las más altas (Figura 4.20).



Figura 4.20: Patrón acústico número 1.

El patrón 2, se caracterizó por presentar el máximo valor a la frecuencia de 18 kHz, aunque cercano al valor registrado a la frecuencia de 38 kHz. Ambos valores, resultaron mayores que los registrados a las frecuencias de 120 y 200 kHz, siendo éstos últimos muy similares entre sí (Figura 4.21).

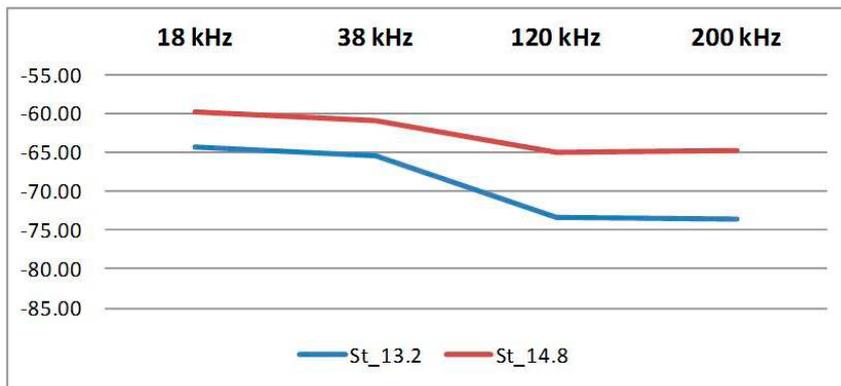


Figura 4.21: Patrón acústico número 2.

El patrón 3, se caracterizó por registrar el mínimo valor a la frecuencia de 18 kHz, inferior al registrado por 120 y 200 kHz, y el máximo en 38 kHz (Figura 4.22).

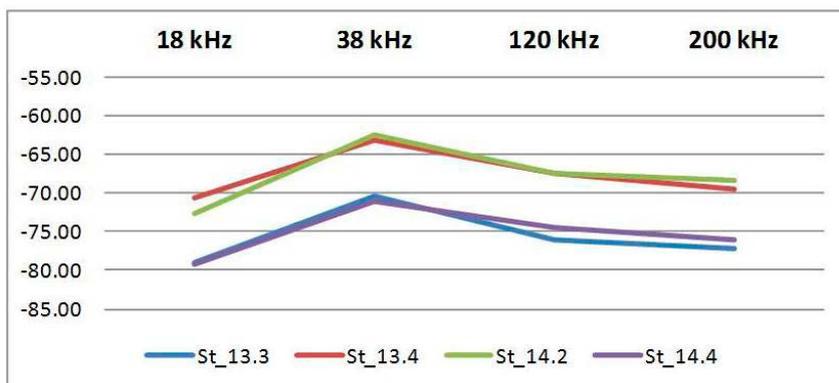


Figura 4.22: Patrón acústico número 3.

El patrón 4, se caracterizó por alcanzar el máximo valor en la frecuencia de 38 kHz, seguida de los valores registrados a 18, 120 y 200 kHz. En este caso, el valor registrado a la frecuencia de 18

kHz superó el valor registrado a 120 y 200 kHz. El mínimo valor se detectó en la frecuencia de 200 kHz (Figura 4.23).

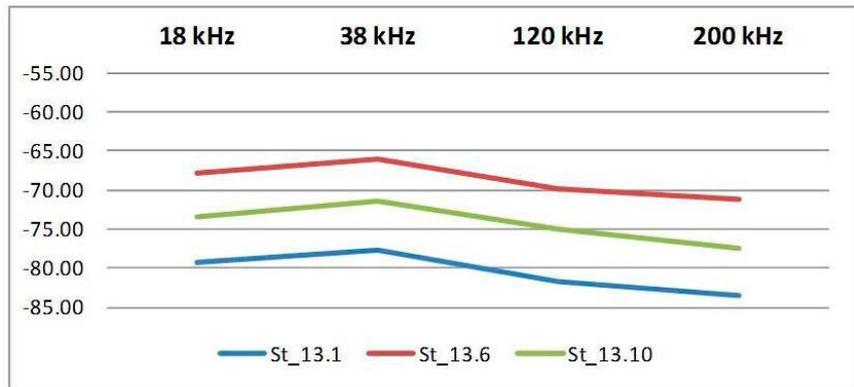


Figura 4.23: Patrón acústico número 4.

El patrón 5, se caracterizó por alcanzar el máximo valor en la frecuencia de 38 kHz, seguida de 18 kHz. Los valores registrados a las frecuencias de 120 y 200 kHz fueron inferiores a las demás y muy similares entre sí (Figura 4.24).

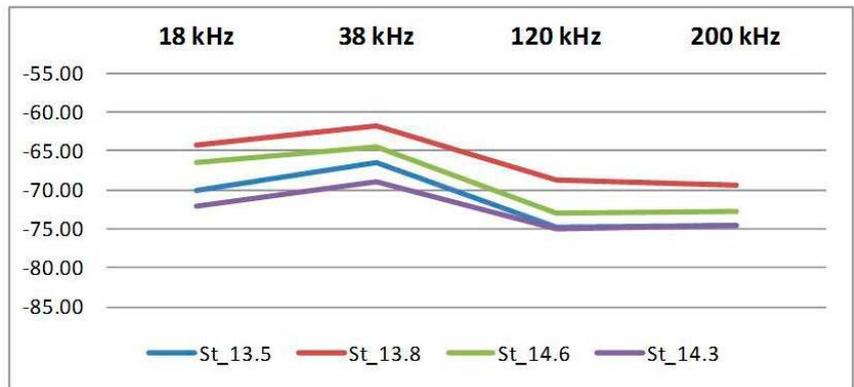


Figura 4.24: Patrón acústico número 5.

El patrón 6, se caracterizó por valores muy bajos en todas las frecuencias, destacando como valor máximo el detectado a la frecuencia de 120 kHz (Figura 4.25).



Figura 4.25: Patrón acústico número 6.

4.2.1.2. Muestras biológicas

En cada estación de zooplancton se analizaron cuatro muestras, cada una de ellas recogidas por un tamaño de malla diferente (250, 333, 500 y 2000 μm). El total de análisis realizados en los dos años estudiados fue de 210, 3 réplicas de 70 muestras. En 2013 se procesaron 38 muestras y en 2014 se analizaron 32 muestras.

En 2013, el volumen filtrado por la red bongo 40 se mantuvo entre 59.8 y 84.8 m^3 . De la muestra obtenida con las mallas de 250 y 333 μm , se analizó entre un séptimo y un doceavo del volumen muestral. La red bongo 90 filtró entre 306.9 y 381.7 m^3 . De la muestra obtenida con la malla de 500 μm , se analizó entre un octavo y un catorceavo del volumen de la muestra, y de la obtenida por la malla de 2000 μm se analizó entre un sexto y un noveno (Tabla 4.13).

Tabla 4.13: Muestras biológicas analizadas en 2013.

Estación	Bongo 40					Bongo 90				
	Volumen Filtrado (m^3)	250 μm		333 μm		Volumen Filtrado (m^3)	500 μm		2000 μm	
		Volumen Muestra (ml)	Volumen Analizado (%)	Volumen Muestra (ml)	Volumen Analizado (%)		Volumen Muestra (ml)	Volumen Analizado (%)	Volumen Muestra (ml)	Volumen Analizado (%)
St_13.1	76.8	275	10.9	275	10.9	331.7	280	10.7	210	14.3
St_13.2	84.8	290	10.3	285	10.5	352.2	265	11.3	270	11.1
St_13.3	69.9	190	15.7	215	13.9	332.8	225	13.3	165	15.4
St_13.4	59.8	190	15.7	320	9.3	334.4	310	9.7	160	18.8
St_13.5	60.1	240	12.5	230	13.0	372.4	310	9.7	180	16.7
St_13.6	84.1	295	10.1	235	12.7	368.5	285	10.5	215	13.9
St_13.7	70.9	290	10.3	295	10.1	341.6	510	7.8	230	13.0
St_13.8	77.4	320	9.3	275	10.9	337.2	270	11.1	230	13.0
St_13.9	-	-	-	-	-	381.7	325	9.2	265	11.3
St_13.10	79.4	355	8.4	200	15.0	306.9	420	7.1	250	12.0

En 2014, el volumen filtrado por la red bongo 40 fue de entre 59.9 y 84.4 m^3 . De la muestra obtenida con las mallas de 250 y 333 μm , se analizó entre un octavo y un décimo del volumen muestral. La red bongo 90 filtró entre 420.0 y 474.8 m^3 . De la muestra obtenida con la malla de 500 μm , se analizó entre un décimo y un veinticincoavo del volumen de la muestra, y de la obtenida por la malla de 2000 μm se analizó entre un sexto y un décimo (Tabla 4.14).

Tabla 4.14: Muestras biológicas analizadas en 2014.

Estación	Bongo 40					Bongo 90				
	Volumen Filtrado (m ³)	250 µm		333 µm		Volumen Filtrado (m ³)	500 µm		2000 µm	
		Volumen Muestra (ml)	Volumen Analizado (%)	Volumen Muestra (ml)	Volumen Analizado (%)		Volumen Muestra (ml)	Volumen Analizado (%)	Volumen Muestra (ml)	Volumen Analizado (%)
St_14.1	62.4	275	10.9	255	11.8	420.0	300	10.0	280	10.7
St_14.2	68.8	270	11.1	270	11.1	443.8	510	5.9	215	13.9
St_14.3	72.3	285	10.5	275	10.9	473.7	285	10.5	160	18.7
St_14.4	71.4	315	9.5	245	12.2	474.8	580	5.2	245	12.2
St_14.5	79.3	270	11.1	295	10.2	474.8	305	9.8	270	11.1
St_14.6	59.9	275	10.9	245	12.2	457.2	550	5.4	290	10.3
St_14.7	68.2	245	12.2	270	11.1	421.0	775	4.0	280	10.7
St_14.8	84.4	265	11.3	285	10.5	456.1	835	4.0	265	11.3

Tabla 4.15: Niveles taxonómicos considerado en este estudio (en negrita).

Filo: Cnidaria Clase: Hidrozoa Orden: Sifonophora
Filo: Chaetognata
Filo: Mollusca Subclase: Prosobranchia Orden: Mesogastropoda Suborden: Heteropoda
Filo: Artrópoda Subfilo: Crustacea
Filo: Cordata Subfilo: Tunicata Clase: Larvacea Clase: Thaliacea Orden: Doliolida Subfilo: Vertebrata Superclase: Gnathostomata Clase: Osteictia (peces óseos)

4.2.1.2.1. Principales grupos faunísticos capturados

Los organismos presentes en las muestras biológicas fueron englobados en los grandes grupos taxonómicos ya establecidos (Harris et al., 2002). El nivel taxonómico tenido en cuenta en este estudio se presenta en la siguiente tabla (Tabla 4.15).

El filo Cnidaria estuvo principalmente representado por sifonóforos y se consideró como un grupo faunístico aislado (Figura 4.26A). La aparición de medusas (Clase: Scyphozoa) fue muy poco frecuente en las muestras, capturándose en tres de los diez muestreos de 2013 y en dos de los ocho de 2014. Todas las medusas capturadas pertenecieron a la especie *Pelagia noctiluca* (Figura 4.26B).

El filo Chaetognata se consideró un grupo faunístico separado del resto (Figura 4.27).

El filo Mollusca conformó el grupo faunístico de heterópodos (Figura 4.28). Aunque se muestrearon representantes del suborden Pteropoda, tuvieron una frecuencia de aparición muy baja en 2013 (en 2 de las 10 estaciones), y baja en 2014 (en 3 de las 8 estaciones), por lo que no se tuvieron en cuenta para el análisis.

El subfilo Crustacea (Figura 4.29), debido a la gran heterogeneidad de organismos y tamaños que englobó, se dividió en dos grupos faunísticos en base a su tamaño: Crustáceos grandes y Crustáceos pequeños. Los crustáceos grandes, mayores de 1.2 mm, estuvieron representados principalmente por: larvas de decápodos, misidáceos, anfípodos y copépodos de gran tamaño. Los crustáceos pequeños, menores de 1.2 mm, incluyeron principalmente cladóceros, diferentes estadios de copépodos y ostrácodos.



Figura 4.26: Cnidarios. A: Sifonóforo. B: Medusa *Pelagia noctiluca*.



Figura 4.27: Quetognatos. A: visión dorsal. B: detalle mandíbula.

El filo Cordata se dividió en cuatro grupos faunísticos: Apendicularias, Doliólidos, Huevos y Larvas. El subfilo Tunicata (Figura 4.30) se subdividió, en base a sus características corporales, en dos grupos faunísticos: Apendicularias y Doliólidos. El orden salpida no se tuvo en cuenta dada su infrecuente aparición en las muestras. La clase Octeíctia se dividió en dos grupos faunísticos en función de la fase de desarrollo vital en el que se encontrara el pez: Huevos y Larvas (Figura 4.31).

Finalmente, se consideraron nueve grupos faunísticos:

- Grupo 1: Crustáceos pequeños.
- Grupo 2: Crustáceos grandes.
- Grupo 3: Quetognatos.
- Grupo 4: Sifonóforos.
- Grupo 5: Doliólidos.
- Grupo 6: Apendicularias.
- Grupo 7: Huevos.
- Grupo 8: Larvas.
- Grupo 9: Heterópodos.

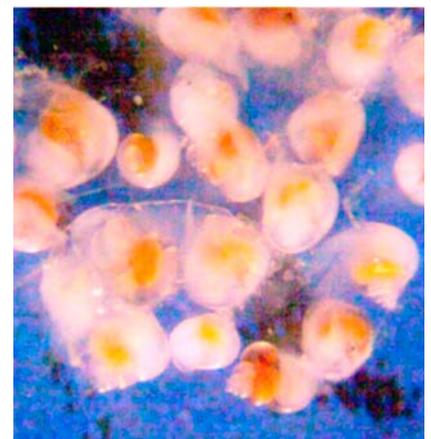


Figura 4.28: Heterópodos.

Con objeto de simplificar la terminología empleada y mantener la diferenciación entre la comunidad de peces pelágicos y la comunidad zooplanctónica, los huevos y las larvas de peces denominados específicamente "ictioplancton", se engloban dentro de "comunidad zooplanctónica".

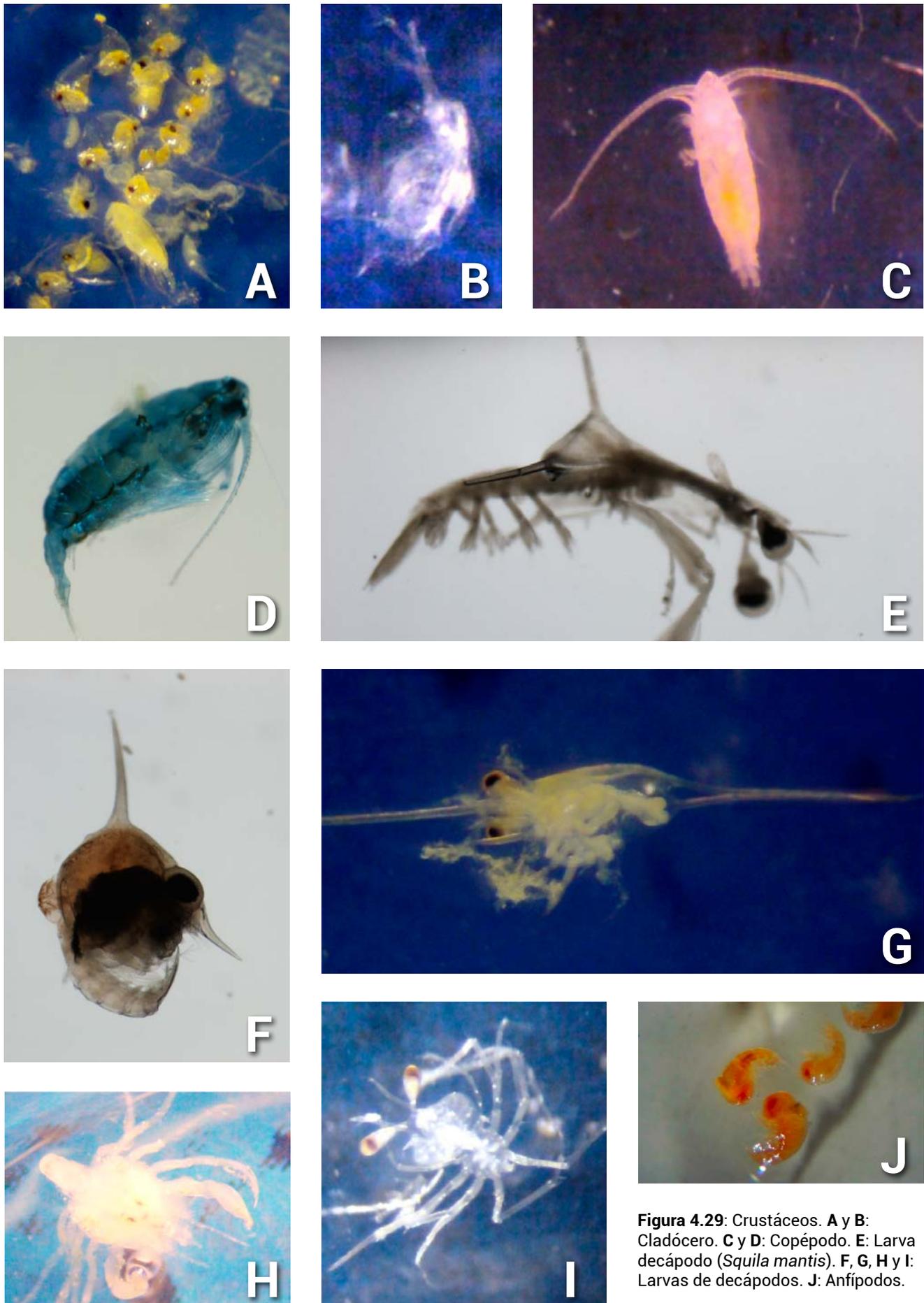


Figura 4.29: Crustáceos. **A y B:** Cladóceros. **C y D:** Copépodos. **E:** Larva decápodo (*Squilla mantis*). **F, G, H y I:** Larvas de decápodos. **J:** Anfípodos.

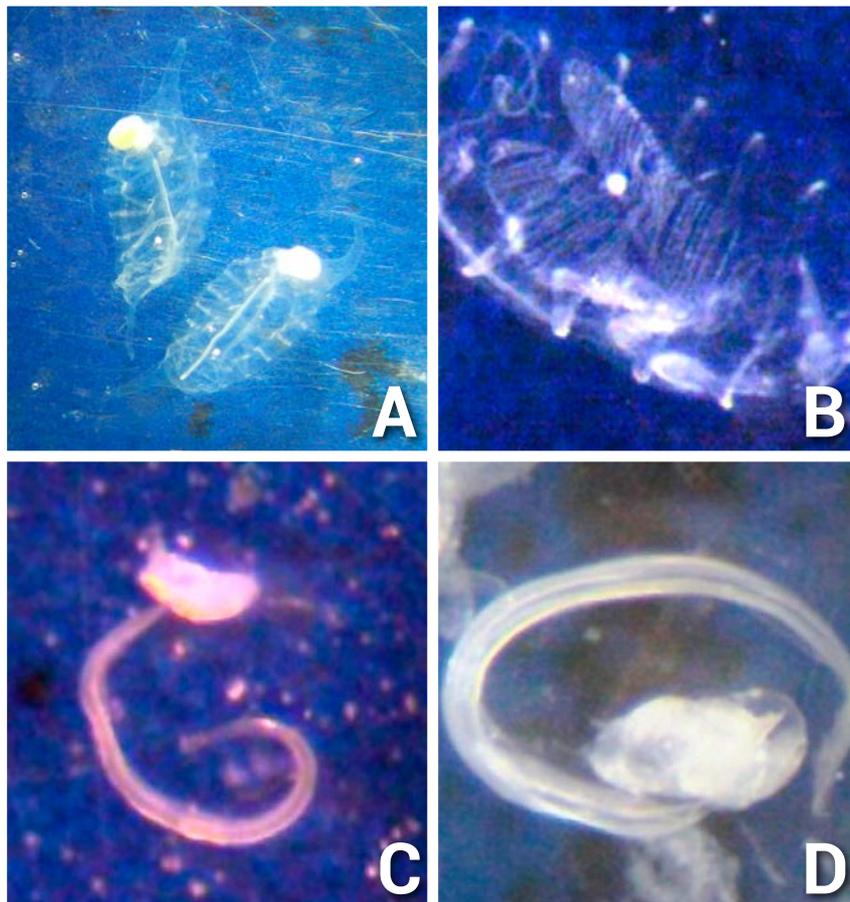


Figura 4.30: Tunicados. A: Sálpidos, B: Doliólidos, C y D: Apendicularias.

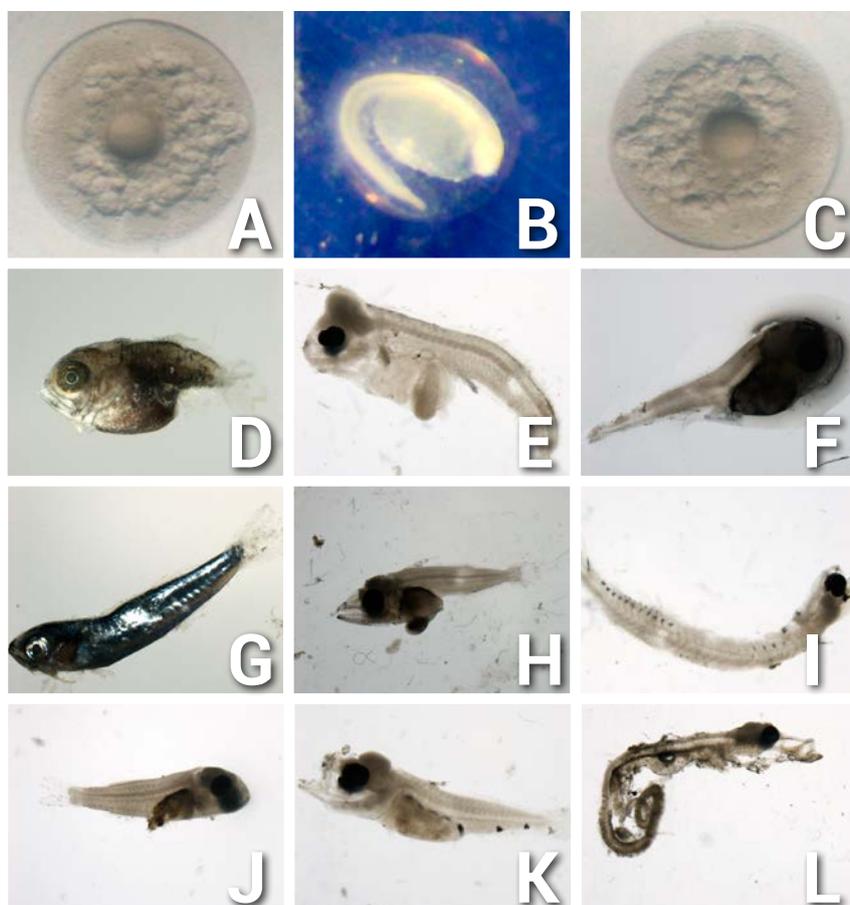


Figura 4.31: Ictioplancton. A, B y C: Huevos. D: *Uranoscopus* sp. E: *Arnoglossus* sp. F: *Cepola* sp. G: *Mullus* sp. H: *Auxis* sp. I: *Cyclothone* sp. J: Espárido. K: *Serranus* sp. L: Signatiforme.

4.2.1.2.2. Abundancia y distribución de los principales grupos faunísticos

En 2013, el grupo dominante en las muestras recogidas por la red de 250 μm fueron los crustáceos pequeños, seguidos de los crustáceos grandes y doliolidos. Los más escasos fueron los sifonóforos y los componentes del ictioplancton (huevos y larvas). Los organismos más abundantes en la red de 333 μm fueron los crustáceos pequeños, seguidos de doliólidos y crustáceos grandes, los menos abundantes fueron huevos y sifonóforos. Los organismos que dominaron la red de 500 μm fueron los crustáceos grandes, seguidos de crustáceos pequeños y quetognatos, siendo los menos abundantes los heterópodos, huevos y apendicularias. En

Tabla 4.16: Abundancia media (ind/m³) y desviación típica (s) de cada grupo faunístico por muestreador en 2013.

	250 μm	333 μm	500 μm	2000 μm
	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s
Crustáceos pequeños	252.9 \pm 117.7	145.5 \pm 66.2	21.1 \pm 10.9	0.0 \pm 0.0
Crustáceos grandes	61.4 \pm 55.1	41.2 \pm 40.4	43.3 \pm 42.1	2.6 \pm 4.8
Quetognatos	20.1 \pm 14.0	16.6 \pm 15.1	10.9 \pm 10.5	1.6 \pm 1.6
Apendicularias	33.4 \pm 27.0	21.3 \pm 20.8	2.8 \pm 2.4	0.2 \pm 0.5
Doliolidos	57.9 \pm 70.3	53.9 \pm 50.6	3.2 \pm 4.5	0.1 \pm 0.1
Sifonóforos	3.0 \pm 3.4	3.2 \pm 3.2	3.7 \pm 4.8	4.9 \pm 7.0
Huevos	4.1 \pm 6.5	1.2 \pm 1.2	2.2 \pm 4.3	0.2 \pm 0.1
Larvas	4.4 \pm 3.8	4.5 \pm 3.5	2.8 \pm 2.3	0.5 \pm 0.1
Heterópodos	11.5 \pm 10.9	10.0 \pm 9.8	1.6 \pm 1.7	0.1 \pm 0.1

la red de 2000 μm predominaron los organismos de gran tamaño como son los sifonóforos y los crustáceos grandes (Tabla 4.16).

En 2014, el grupo dominante en las muestras recogidas por la red de 250 μm fueron los crustáceos pequeños, seguidos de los doliólidos y crustáceos grandes, mientras que los más escasos fueron los heterópodos, sifonóforos y huevos. Los organismos más abundantes en la red de 333 μm , fueron los crustáceos pequeños, seguidos de los doliólidos y crustáceos grandes, los menos abundantes fueron los huevos y heterópodos. Los organismos que dominaron la red de 500 μm fueron los crustáceos grandes, seguidos de crustáceos pequeños y quetognatos, siendo los menos abundantes las apendicularias, huevos y heterópodos. La red de 2000 μm estuvo dominada por los crustáceos grandes y sifonóforos. (Tabla 4.17).

	250 μm	333 μm	500 μm	2000 μm
	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s
Crustáceos pequeños	647.4 \pm 333.0	354.0 \pm 128.2	10.5 \pm 10.0	0.0 \pm 0.0
Crustáceos grandes	160.6 \pm 88.6	112.0 \pm 114.8	119.9 \pm 132.1	4.9 \pm 6.7
Quetognatos	24.6 \pm 21.6	17.6 \pm 15.7	5.8 \pm 6.8	1.5 \pm 2.9
Apendicularias	87.2 \pm 54.2	23.5 \pm 13.9	0.5 \pm 1.2	0.0 \pm 0.0
Doliolidos	468.0 \pm 255.1	260.3 \pm 235.6	8.5 \pm 14.0	1.1 \pm 1.5
Sifonóforos	7.0 \pm 3.6	7.1 \pm 3.6	2.1 \pm 2.5	2.1 \pm 2.6
Huevos	6.6 \pm 9.0	2.5 \pm 3.4	0.9 \pm 8.8	0.1 \pm 0.1
Larvas	8.6 \pm 3.9	5.4 \pm 1.9	5.7 \pm 1.6	0.1 \pm 0.1
Heterópodos	3.5 \pm 3.8	2.6 \pm 3.2	1.9 \pm 1.9	0.0 \pm 0.0

Tabla 4.17: Abundancia media (ind/m³) y desviación típica (s) de cada grupo faunístico por muestreador en 2014.

Para los dos años muestreados, las estaciones resultaron muy heterogéneas en cuanto a su composición y número de individuos capturados, como demuestran la desviación estándar de la abundancia y los gráficos de abundancia por estación (**Figuras 4.32, 4.34, 4.36 y 4.38**).

La abundancia total de organismos retenida por la **malla de 250 μm** , presentó una variación entre los dos años, capturándose un mayor número de individuos en 2014 que en 2013. Los doliólidos aparecieron masivamente en las muestras recogidas en 2014, superando en algunas estaciones al número de crustáceos. La abundancia de crustáceos grandes aumentó de este a oeste y de las estaciones costeras a las mas profundas (**Figura 4.32**).

En 2013, la proporción de crustáceos presentó una sustitución de este a oeste. Las estaciones orientales estuvieron dominadas por crustáceos pequeños, mientras que en las occidentales dominaron los crustáceos grandes. Las estaciones llevadas a cabo en el Golfo de Vera estuvieron dominadas por crustáceos pequeños. Las estaciones del Mar de Alborán resultaron de composición faunística heterógena (**Figura 4.33**).

En 2014, se detectó el mismo gradiente para los crustáceos que el registrado en 2013. La proporción de doliólidos fue muy elevada en todo el área de estudio (**Figura 4.33**).

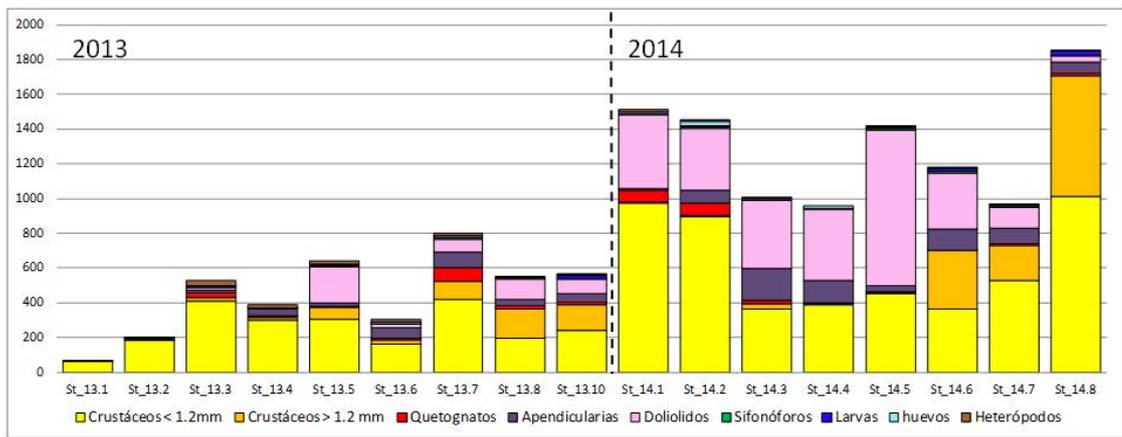


Figura 4.32: Abundancia total (org/m³) de grupos faunísticos capturados por la red de 250 µm en los años 2013 y 2014, representando las estaciones de este a oeste.

La abundancia total de organismos retenida por la **mall**a de 333 µm resultó mayor en las estaciones realizadas en 2013 que en 2014. Los resultados indicaron un aumento interanual de la abundancia relativa de crustáceos pequeños y doliólidos, con respecto a otros grupos faunísticos. La abundancia de crustáceos grandes aumentó de este a oeste y de las estaciones costeras a las más profundas (**Figura 4.34**).

En 2013, la proporción de crustáceos grandes aumentó de este a oeste y la mayor cantidad de doliólidos se localizó al oeste de la bahía de Almería (**Figura 4.35**).

En 2014, se detectó el mismo gradiente para los crustáceos que el registrado en 2013. La proporción de doliólidos fue muy elevada desde Águilas hasta Estepona, disminuyendo notablemente su proporción en las estaciones realizadas entre esta localidad y Punta Europa. (**Figura 4.35**).

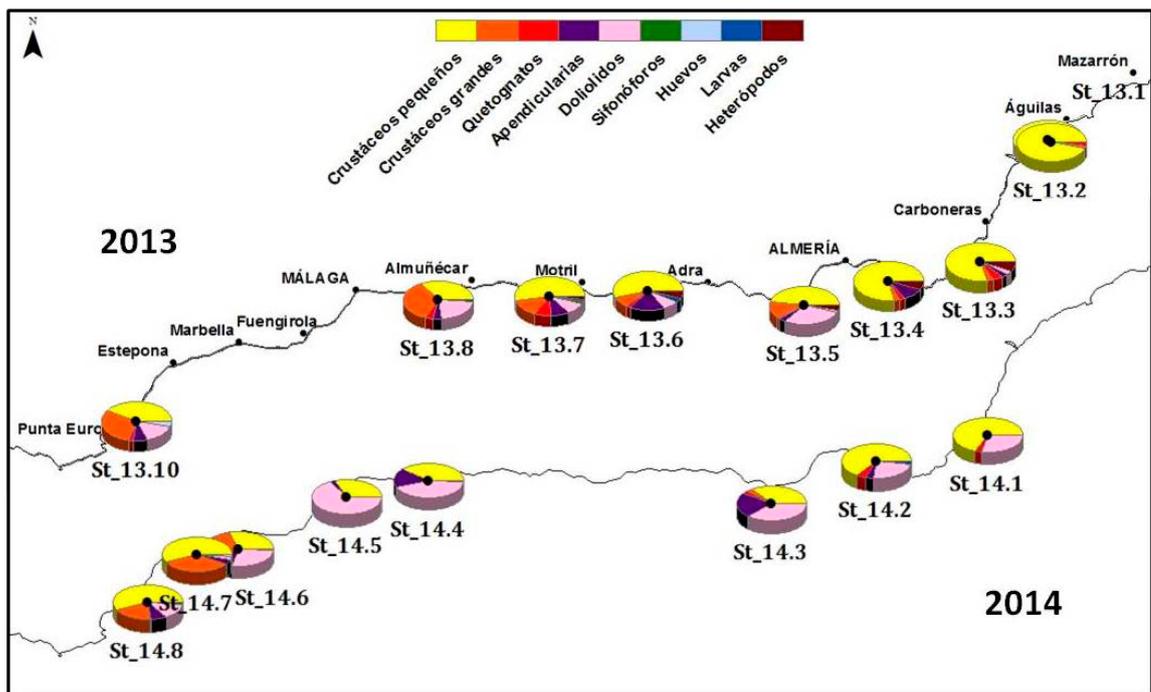
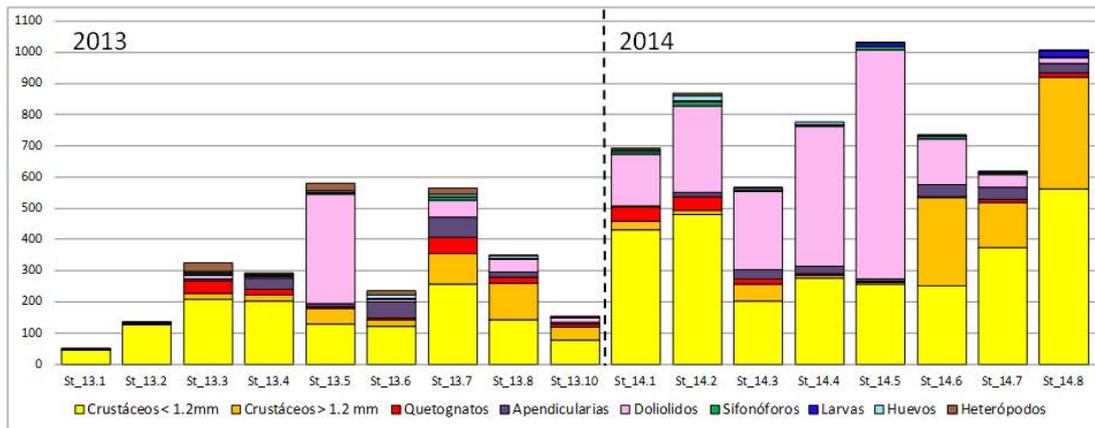


Figura 4.33: Distribución espacial del porcentaje de grupos faunísticos capturados por la red de 250 µm en 2013 y 2014.



La abundancia total de organismos retenida por la malla de 500 μm presentó un gradiente de este a oeste para los dos años estudiados. Los crustáceos grandes presentaron dos tipos de gradiente, de este a oeste y costero-oceánico. Los componentes ictoplánctónicos presentaron un gradiente desde la costa hasta el final de la plataforma continental. En las estaciones costeras la mayor abundancia correspondió a huevos, mientras que en estaciones realizadas en zonas más profundas, dominaron las larvas. En 2013, la mayor concentración zooplanctónica se registró desde Motril hasta Punta Europa, y en 2014 desde Marbella a Punta Europa (Figura 4.36).

Figura 4.34: Abundancia total (org/m^3) de grupos faunísticos capturados por la red de 333 μm en los años 2013 y 2014, representando las estaciones de este a oeste.

En 2013, las estaciones resultaron muy diversas en cuanto a su composición faunística, aunque los crustáceos grandes dominaron mayoritariamente las muestras (Figura 4.37).

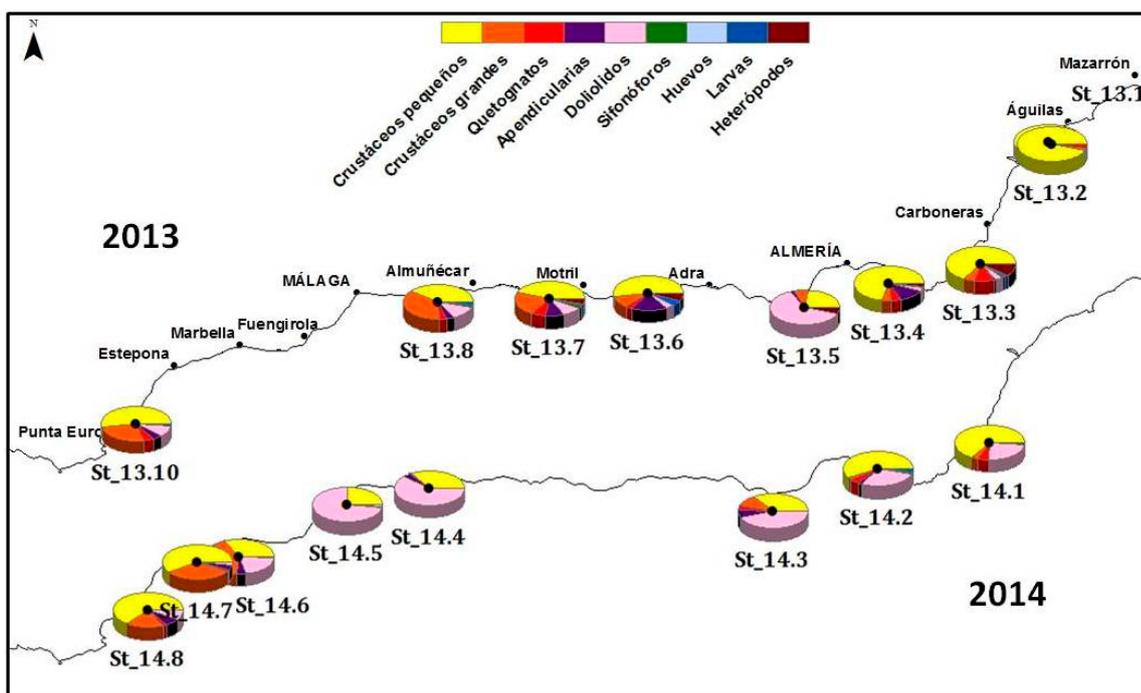


Figura 4.35: Distribución espacial del porcentaje de grupos faunísticos capturados por la red de 333 μm en 2013 y 2014.

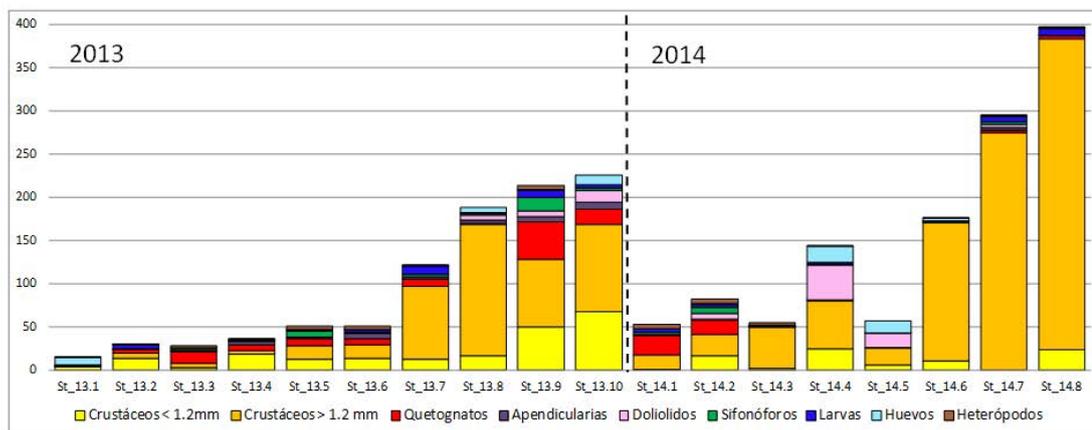


Figura 4.36: Abundancia total (org/m³) de grupos faunísticos capturados por la red de 500 µm en los años 2013 y 2014, representando las estaciones de este a oeste.

En 2014, la mayor diversidad se concentró en las dos primeras estaciones realizadas. Las estaciones St_14.4 y St_14.5 registraron la mayor proporción de doliólidos. Las tres últimas estaciones estuvieron dominadas por crustáceos grandes, apareciendo gran cantidad de larvas de peces en la estación St_14.8 (Figura 4.37).

La abundancia total de organismos retenida por la malla de 2000 µm fue muy baja (de 1 a 26 org/m³), indicando que la comunidad zooplanctónica objetivo de este estudio estuvo compuesta mayoritariamente por organismos macrozooplanctónicos. La abundancia relativa de sifonóforos presentó un descenso interanual. En 2013, la mayor abundancia se registró al oeste de la bahía de Almería, y en las inmediaciones de Motril y Marbella, y en 2014 al este en Carboneras y bahía de Almería y al oeste en Estepona y Punta Europa (Figura 4.38).

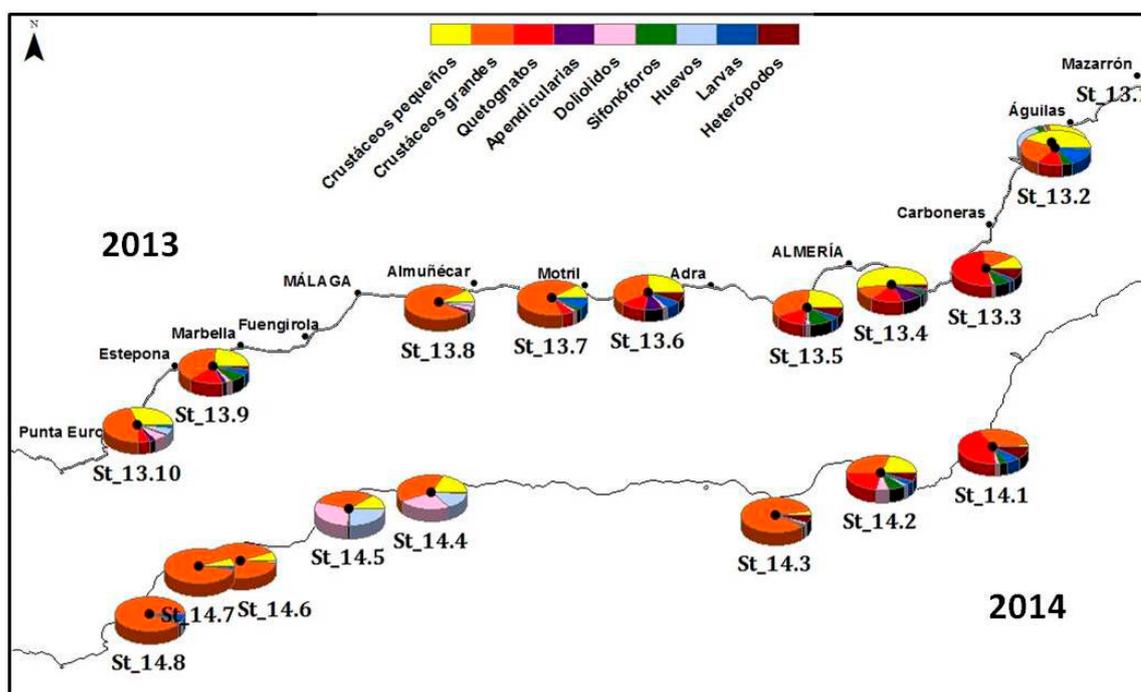
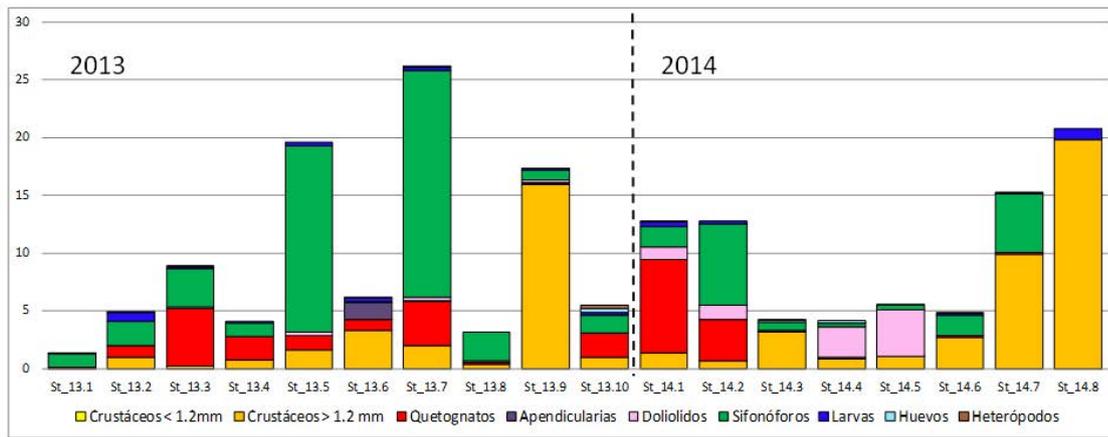


Figura 4.37: Distribución espacial del porcentaje de grupos faunísticos capturados en 2013 y 2014 por la red de 500 µm.



En 2013, los sifonóforos dominaron 7 de las 10 estaciones, mientras que en las tres restantes la mayor proporción correspondió a crustáceos grandes. (Figura 4.39).

Figura 4.38: Abundancia total (org/m³) de grupos faunísticos capturados por la red de 2000 µm en los años 2013 y 2014, representando las estaciones de este a oeste.

En 2014, las muestras resultaron muy heterogéneas, los grupos faunísticos alternaron su dominancia a lo largo del área de estudio. Los quetognatos dominaron la abundancia de las estaciones situadas al este. Las estaciones localizadas al oeste estuvieron compuestas principalmente por crustáceos y sifonóforos. (Figura 4.39).

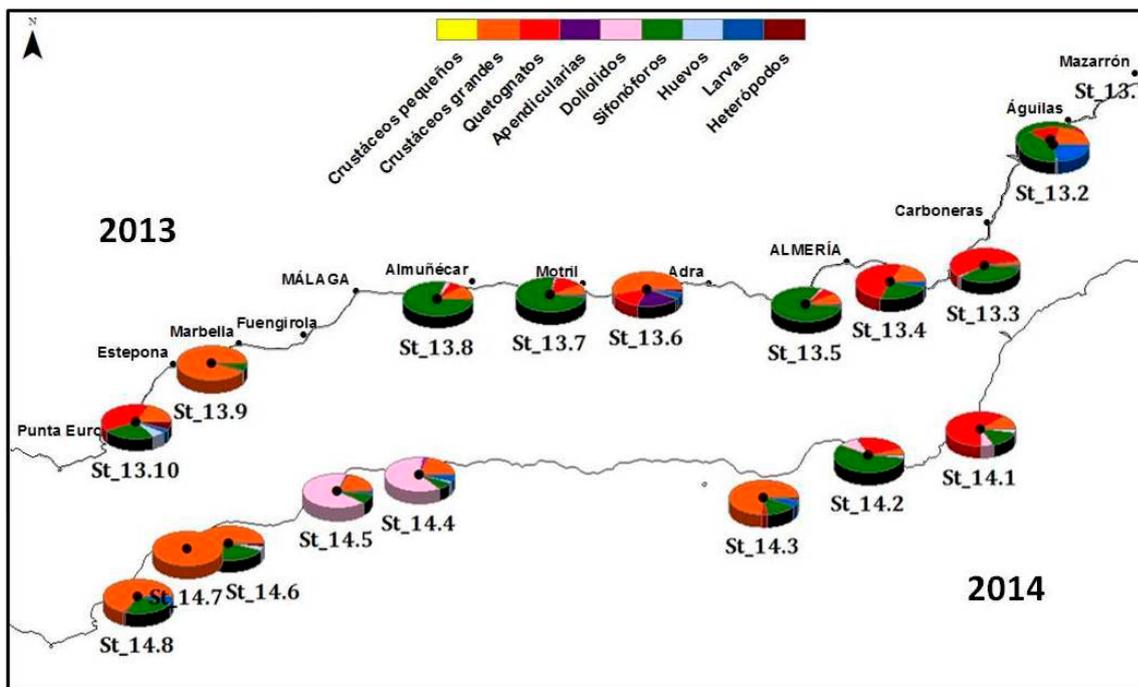


Figura 4.39: Distribución espacial del porcentaje de grupos faunísticos capturados en 2013 y 2014 por la red de 2000 µm.

4.2.1.2.2.1. Dimensiones de los organismos

En 2014, las dimensiones estimadas para los grupos faunísticos recogidos por la malla de 500 μm se resumen en la **Tabla 4.18**.

Los quetognatos resultaron los organismos de mayor tamaño, medido en el eje antero-posterior (largo), seguidos de las larvas de peces y los sifonóforos. Los heterópodos fueron los organismos de menor tamaño, presentando muy poca variabilidad entre ejemplares en todas las estaciones muestreadas. Los crustáceos se caracterizaron por presentar una alta desviación estándar en todas las estaciones, debido a la gran diversidad de tamaños y formas de los organismos que pertenecieron a este grupo.

Tabla 4.18: Valores medios y desviación típica (s) de las variables biológicas estimadas para cada grupo faunístico capturado por la malla de 500 μm en cada estación.

La dimensión antero-posterior (largo) resultó más variable que la dorso-ventral (ancho) para todas las estaciones y grupos faunísticos.

	Variable (mm)	St_14.1	St_14.2	St_14.3	St_14.4	St_14.5	St_14.6	St_14.7	St_14.8
		Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s	Media \pm s
Crustáceos	Largo	5.45 \pm 2.83	3.12 \pm 1.86	2.49 \pm 1.55	2.79 \pm 1.11	2.03 \pm 0.46	4.88 \pm 1.02	5.15 \pm 2.43	2.84 \pm 1.52
	Ancho	1.16 \pm 0.37	1.26 \pm 0.70	1.56 \pm 0.70	1.11 \pm 0.32	1.00 \pm 0.00	1.18 \pm 0.39	1.26 \pm 0.45	1.19 \pm 0.42
	n	64	37	77	72	77	50	34	95
Heterópodos	Diámetro	0.68 \pm 0.10	0.50 \pm 0.08	0.50 \pm 0.10	-	-	0.66 \pm 0.09	0.74 \pm 0.10	-
	n	29	20	30	-	-	30	6	-
Larvas	Largo	10.28 \pm 4.47	5.26 \pm 3.17	6.71 \pm 2.59	5.23 \pm 1.87	1.71 \pm 2.05	7.19 \pm 3.81	8.79 \pm 4.14	11.45 \pm 3.70
	Ancho	1.41 \pm 0.79	1.34 \pm 0.95	1.71 \pm 0.59	1.21 \pm 0.54	1.00 \pm 0.00	2.22 \pm 0.89	1.96 \pm 1.32	2.45 \pm 0.60
	n	39	34	17	55	8	86	96	74
Quetognatos	Largo	13.07 \pm 3.27	10.67 \pm 1.67	-	-	8.00 \pm 0.50	-	9.03 \pm 0.39	8.52 \pm 0.50
	Ancho	1.00 \pm 0.10	1.50 \pm 0.03	-	-	0.50 \pm 0.00	-	0.39 \pm 0.21	0.50 \pm 0.00
	n	60	30	-	-	15	-	38	33
Sifonóforos	Largo	8.38 \pm 4.13	5.11 \pm 3.03	5.87 \pm 3.46	2.10 \pm 0.61	1.39 \pm 0.58	5.58 \pm 4.21	3.91 \pm 3.01	-
	Ancho	2.97 \pm 1.38	2.62 \pm 0.83	3.46 \pm 2.40	1.87 \pm 0.35	1.03 \pm 0.17	2.79 \pm 2.28	2.77 \pm 2.47	-
	n	34	100	67	30	66	86	93	-

4.2.1.2.3 Influencia del muestreador

Las redes de 250 y 333 μm capturaron de forma más eficiente crustáceos pequeños, apendicularias, doliólidos, heterópodos, huevos y quetognatos de pequeños tamaño.

Por el contrario, las redes de 500 y 2000 μm resultaron más adecuadas para la captura de larvas de peces, quetognatos de gran tamaño, sifonóforos y crustáceos grandes.

4.2.1.2.3.1. Correlación entre grupos faunísticos

El análisis de correlación se llevó a cabo para la abundancia (ind/m³) recogida por las mallas de 250, 333 y 500 µm. La red de 2000 µm fue excluida del análisis dado su escasa representatividad de la comunidad zooplanctónica objetivo de este estudio.

Entre los grupos faunísticos capturados por la **malla de 250 µm** se detectaron las siguientes relaciones (**Tabla 4.19**):

- Los crustáceos grandes presentaron una correlación alta con huevos ($r=0.78$), y moderada con crustáceos pequeños ($r=0.50$).
- Los crustáceos pequeños correlacionaron moderadamente con quetognatos ($r=0.50$).
- Las larvas de peces mostraron una alta correlación con quetognatos ($r=0.72$).

Entre los grupos faunísticos capturados por la **malla de 333 µm** se detectaron las siguientes relaciones (**Tabla 4.19**):

- Los crustáceos pequeños presentaron una correlación moderada con quetognatos ($r=0.50$), y alta con sifonóforos ($r=0.65$).
- Las larvas de peces mostraron una correlación moderada con sifonóforos ($r=0.58$) y quetognatos ($r=0.58$).
- Los quetognatos exhibieron una correlación moderada con sifonóforos ($r=0.59$).

Entre los grupos faunísticos capturados por la **malla de 500 µm** se detectaron las siguientes relaciones (**Tabla 4.19**):

- Las apendicularias mostraron una alta correlación con crustáceos pequeños ($r=0.69$) y con larvas ($r=0.66$).
- Los crustáceos pequeños presentaron una correlación alta con larvas de peces ($r=0.63$), y moderada con quetognatos ($r=0.53$).
- Las larvas de peces exhibieron una alta correlación con quetognatos ($r=0.76$) y con sifonóforos ($r=0.71$).
- Los quetognatos presentaron una muy alta correlación con sifonóforos ($r=0.84$).

La correlación entre la abundancia de los grupos faunísticos capturados por las **mallas de 250, 333 y 500 µm** puso de manifiesto que (**Tabla 4.19**):

- Los organismos capturados por la malla de 250 µm presentaron una excelente correlación con los capturados con la malla de 333 µm, salvo en el caso de huevos.
- Los crustáceos pequeños capturados por la malla de 250 µm mostraron una alta correlación con las larvas ($r=0.64$), quetognatos ($r=0.74$) y sifonóforos ($r=0.67$) capturados por la malla de 500 µm.
- Las apendicularias capturadas por la malla de 333 µm presentaron una alta correlación con las larvas capturadas por la malla de 500 µm ($r=0.62$).

Ap	Apendicularias
Cg	Crustáceos grandes
Cp	Crustáceos pequeños
Do	Doliólidos
He	Heterópodos
Hu	Huevos
La	Larvas
Qu	Quetognatos
Si	Sifonóforos

Tabla 4.19: Correlación entre la densidad de grupos faunísticos y los diferentes tamaños de malla.

		Bongo 40, 250 µm									Bongo 40, 333 µm									Bongo 90, 500 µm																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Ap	Cg	Cp	Do	He	Hu	La	Qu	Si	Ap	Cg	Cp	Do	He	Hu	La	Qu	Si	Ap	Cg	Cp	Do	He	Hu	La	Qu	Si	Ap	Cg	Cp	Do	He	Hu	La	Qu	Si																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Bongo 40, 250 µm		Ap	1.00								Ap	0.58	0.29	0.02	-0.11	0.12	-0.04	0.08	0.17	0.37	1.00	Ap	0.05	-0.05	-0.28	-0.35	0.14	0.04	-0.02	0.12	-0.07	0.51	-0.11	-0.30	-0.38	0.14	-0.30	0.08	0.09	-0.19	1.00	Ap	0.32	0.90	0.52	-0.13	-0.40	0.64	-0.15	-0.11	0.20	0.38	0.87	0.48	-0.21	-0.29	-0.22	-0.20	-0.12	-0.05	0.06	1.00	Ap	0.06	0.18	-0.07	-0.11	-0.14	0.43	0.11	0.23	-0.12	0.24	0.06	-0.21	-0.18	-0.05	-0.20	0.06	0.10	-0.08	0.69	0.13	1.00	Ap	0.29	-0.21	-0.03	0.81	-0.33	0.03	0.23	-0.06	0.01	-0.02	-0.26	0.04	0.57	-0.25	0.37	0.15	-0.16	0.15	0.06	-0.07	0.34	1.00	He	0.10	-0.23	0.35	-0.11	0.53	-0.36	0.63	0.74	0.34	0.27	-0.15	0.40	-0.01	0.65	-0.31	0.71	0.72	0.47	0.11	-0.21	-0.09	-0.28	1.00	Hu	0.19	-0.20	-0.18	0.76	-0.45	0.17	-0.02	-0.32	-0.11	-0.19	-0.26	-0.15	0.56	-0.41	0.55	-0.14	-0.41	-0.01	-0.04	-0.10	0.25	0.90	-0.41	1.00	La	0.42	0.24	0.64	-0.36	0.14	0.09	0.07	0.45	0.12	0.62	-0.18	0.72	-0.36	0.33	-0.39	0.24	0.38	0.03	0.66	0.22	0.63	-0.07	0.33	-0.25	1.00	Qu	-0.13	-0.08	0.74	-0.26	0.34	-0.13	0.42	0.86	0.29	0.29	-0.08	0.17	-0.25	0.46	-0.30	0.44	0.82	0.38	0.46	-0.08	0.53	-0.07	0.49	-0.30	0.76	1.00	Si	0.02	-0.11	0.67	-0.16	0.25	-0.22	0.47	0.73	0.47	0.38	-0.05	0.11	-0.04	0.51	-0.16	0.50	0.62	0.45	0.32	-0.08	0.42	-0.02	0.48	-0.25	0.71	0.84	1.00																																																																																												
Bongo 40, 333 µm		Cg	0.18	1.00							Cg	0.31	0.96	0.45	-0.19	-0.26	0.66	-0.17	-0.08	0.22	0.41	1.00	Cg	0.06	0.18	-0.07	-0.11	-0.14	0.43	0.11	0.23	-0.12	0.24	0.06	-0.21	-0.18	-0.05	-0.20	0.06	0.10	-0.08	0.69	0.13	1.00	Cg	0.29	-0.21	-0.03	0.81	-0.33	0.03	0.23	-0.06	0.01	-0.02	-0.26	0.04	0.57	-0.25	0.37	0.15	-0.16	0.15	0.06	-0.07	0.34	1.00	Do	0.23	-0.26	0.13	0.87	-0.18	-0.05	0.21	-0.07	0.35	-0.18	-0.23	0.23	1.00	Do	-0.20	-0.23	-0.05	-0.28	0.89	-0.24	0.15	0.33	0.10	0.15	-0.19	-0.09	0.09	1.00	Do	-0.10	-0.25	-0.05	0.56	-0.15	0.02	-0.12	-0.24	0.27	-0.31	-0.27	-0.02	0.46	-0.12	1.00	Do	0.27	-0.21	0.26	0.16	0.25	-0.35	0.91	0.66	0.36	0.27	-0.16	0.37	0.13	0.39	-0.19	1.00	He	-0.04	-0.13	0.49	-0.14	0.45	-0.33	0.59	0.95	0.40	0.15	-0.09	0.50	-0.18	0.45	-0.26	0.58	1.00	He	0.32	-0.09	0.49	0.42	0.09	-0.20	0.65	0.65	0.83	0.22	0.03	0.65	0.40	0.16	0.37	0.58	0.59	1.00	He	0.05	-0.05	-0.28	-0.35	0.14	0.04	-0.02	0.12	-0.07	0.51	-0.11	-0.30	-0.38	0.14	-0.30	0.08	0.09	-0.19	1.00	Hu	0.32	0.90	0.52	-0.13	-0.40	0.64	-0.15	-0.11	0.20	0.38	0.87	0.48	-0.21	-0.29	-0.22	-0.20	-0.12	-0.05	0.06	1.00	Hu	0.06	0.18	-0.07	-0.11	-0.14	0.43	0.11	0.23	-0.12	0.24	0.06	-0.21	-0.18	-0.05	-0.20	0.06	0.10	-0.08	0.69	0.13	1.00	La	0.29	-0.21	-0.03	0.81	-0.33	0.03	0.23	-0.06	0.01	-0.02	-0.26	0.04	0.57	-0.25	0.37	0.15	-0.16	0.15	0.06	-0.07	0.34	1.00	La	0.10	-0.23	0.35	-0.11	0.53	-0.36	0.63	0.74	0.34	0.27	-0.15	0.40	-0.01	0.65	-0.31	0.71	0.72	0.47	0.11	-0.21	-0.09	-0.28	1.00	Qu	0.42	0.24	0.64	-0.36	0.14	0.09	0.07	0.45	0.12	0.62	-0.18	0.72	-0.36	0.33	-0.39	0.24	0.38	0.03	0.66	0.22	0.63	-0.07	0.33	-0.25	1.00	Si	-0.13	-0.08	0.74	-0.26	0.34	-0.13	0.42	0.86	0.29	0.29	-0.08	0.17	-0.25	0.46	-0.30	0.44	0.82	0.38	0.46	-0.08	0.53	-0.07	0.49	-0.30	0.76	1.00
Bongo 90, 500 µm		Si	0.02	-0.11	0.67	-0.16	0.25	-0.22	0.47	0.73	0.47	0.38	-0.05	0.11	-0.04	0.51	-0.16	0.50	0.62	0.45	0.32	-0.08	0.42	-0.02	0.48	-0.25	0.71	0.84	1.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																												

- Los crustáceos pequeños capturados por la malla de 333 μm exhibieron una alta correlación con las larvas capturadas por la malla de 500 μm ($r=0.72$).
- Los quetognatos capturados por la red de 333 μm mostraron una alta correlación con los sifonóforos capturados por la malla de 500 μm ($r=0.62$).

4.2.1.3. Condiciones ambientales en las estaciones de muestreo

Los perfiles de fluorescencia, temperatura y salinidad registrados en las 10 estaciones realizadas en 2013 y en las 8 llevadas a cabo en 2014, a lo largo del área de estudio, se muestran en las figuras siguientes (**Figuras 4.40 y 4.41**).

En 2013, los perfiles de fluorescencia (**Figura 4.40A**) registrados en las estaciones más costeras (St_13.1 y St_13.9), mostraron un incremento longitudinal, de este a oeste, en la concentración de clorofila-a. Para las estaciones llevadas a cabo a profundidades superiores de 100 m, en las que se pudo determinar la profundidad del máximo de fluorescencia, se constató que las estaciones orientales, como la estación St_13.2, presentaron el máximo valor de clorofila en capas más profundas que las estaciones occidentales, como la estación St_13.9. El estrato vertical de profundidad donde se registraron los mayores valores de fluorescencia se situó entre los 20 y 90 m.

Los perfiles de temperatura (**Figura 4.40B**) mostraron una columna de agua fuertemente estratificada, apareciendo una termoclina estacional muy marcada en todas las estaciones, salvo en las dos localizadas más al oeste (St_13.9 y St_13.10). La capa de la termoclina se situó entre los 15 y los 40-50 m. Además se registró un fuerte gradiente en la temperatura superficial del mar, de los 25.5°C registrados en la estación St_13.1 hasta los 16.8°C registrados en la estación St_13.9.

Los perfiles de salinidad (**Figura 4.40C**) no evidenciaron un gradiente longitudinal, aunque las estaciones más occidentales (St_13.9 y St_13.10) fueron las que presentaron una menor salinidad superficial. Los primeros metros de la columna de agua, presentaron un valor de salinidad homogéneo, desarrollándose después la capa de la haloclina hasta una profundidad de 80 m.

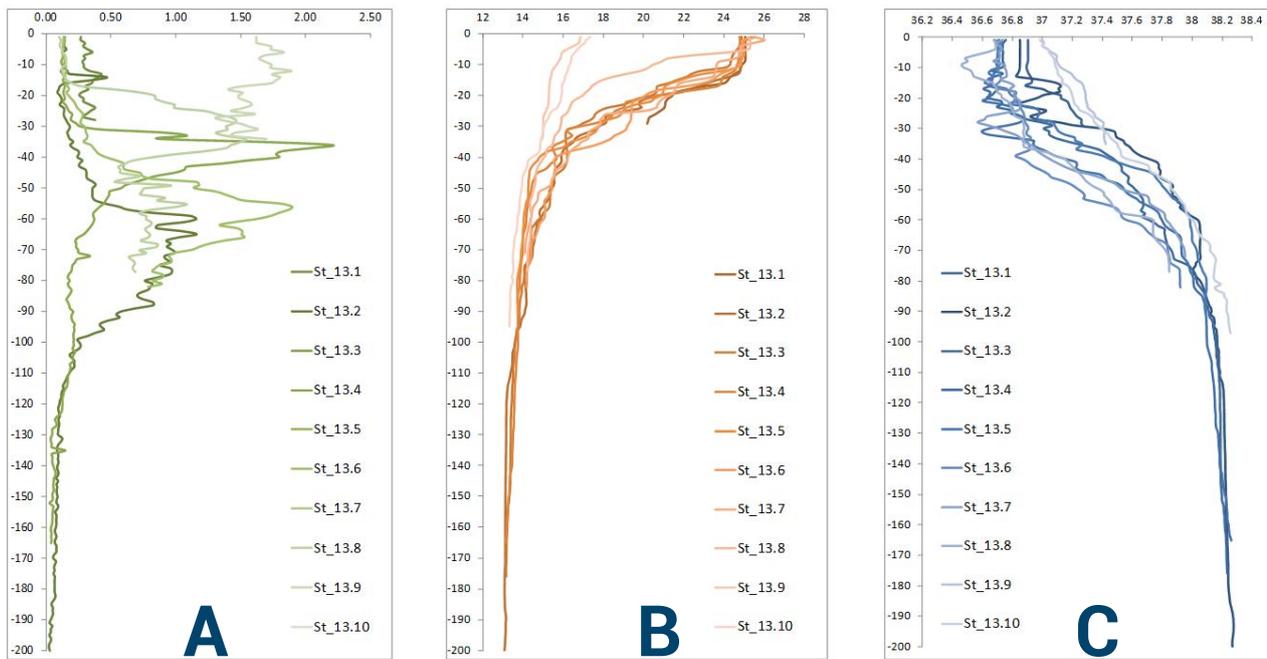
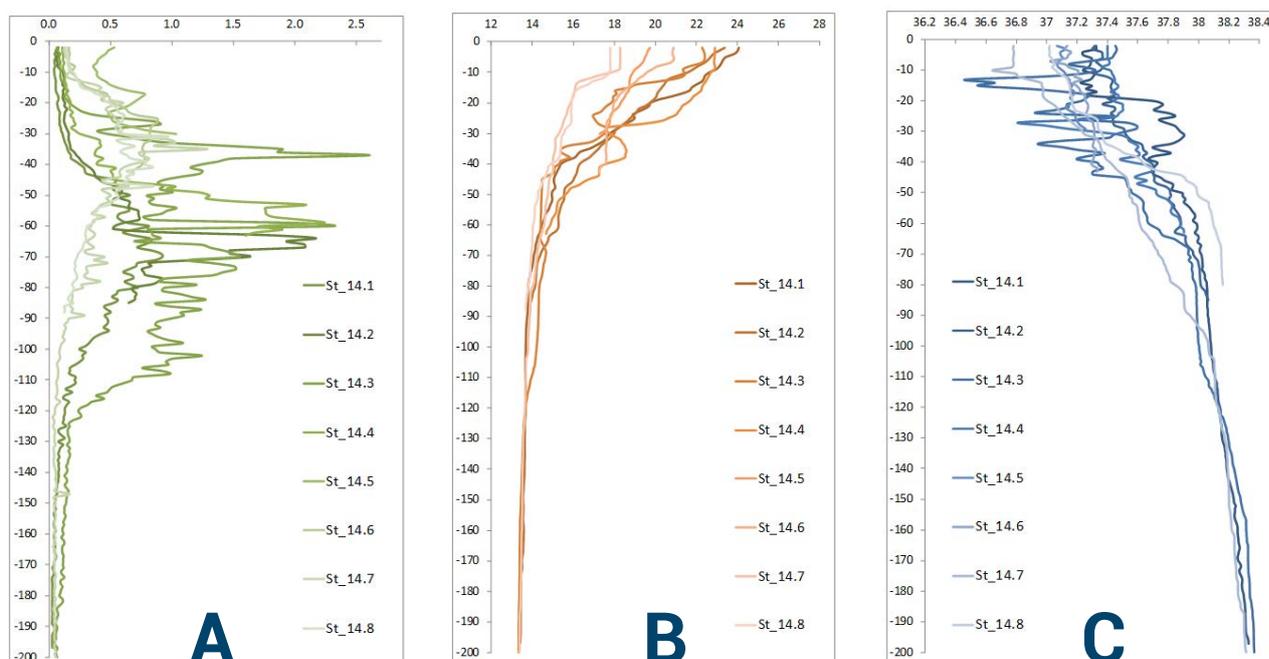


Figura 4.40: Perfiles de CTD realizados en 2013. El gradiente de color (de más oscuro a más claro) se corresponde con la variación longitudinal de la estaciones (de este a oeste). **A:** Fluorescencia. **B:** Temperatura. **C:** Salinidad.

En 2014, los perfiles de fluorescencia (**Figura 4.41A**) mostraron que la profundidad a la que se detectó el máximo de fluorescencia varió longitudinalmente, en las estaciones más orientales se encontró a una mayor profundidad que en las occidentales. La estación St_14.5, realizada en la zona más costera, presentó los valores más elevados de concentración superficial de clorofila-a, respecto al resto de estaciones. El estrato donde se registró la mayor concentración de clorofila-a se localizó entre los 30 y los 110 m.

Los perfiles de temperatura (**Figura 4.41B**) mostraron un gradiente longitudinal, localizándose las estaciones más cálidas en la parte este del Mar de Alborán. En la estación St_14.01 la temperatura superficial alcanzó los 24.1 °C, mientras que ésta disminuyó hasta los 16.8 °C en la St_14.8. La homotermia de las capas superficiales aumentó de este a oeste, las estaciones orientales no presentaron una capa de mezcla visible, mientras que ésta fue evidente en las estaciones más occidentales (St_14.7 y St_14.8). En general, la capa de la termoclina se situó entre 5 y 70 m de profundidad.

Los perfiles de salinidad (**Figura 4.41C**) presentaron un gradiente este-oeste, las estaciones localizadas en el este de la zona de estudio, presentaron una mayor salinidad que las situadas al oeste. La capa de la haloclina se desarrolló desde los 10 hasta los 150 m.



En general, para los dos años estudiados, la capa donde se concentraron los mayores valores de fluorescencia se situó a una mayor profundidad en 2013 que en 2014. La temperatura presentó una capa de mezcla más acusada y los valores de temperatura superficial alcanzaron valores más elevados en 2013, respecto a 2014. Los valores de salinidad superficial registrados en 2013 resultaron menores que los registrados en 2014 para todas las estaciones, con la excepción de la St_14.07.

Figura 4.41: Perfiles de CTD realizados en 2014. El gradiente de color (de más oscuro a más claro) se corresponde con la variación longitudinal de la estación (de este a oeste). A: Fluorescencia. B: Temperatura. C: Salinidad.

Los valores extraídos de los perfiles verticales correspondientes a la profundidad de muestreo biológico se muestran en las tablas siguientes (**Tabla 4.20** y **Tabla 4.20**).

En 2013, la temperatura registrada en la profundidad del muestreo de la capa de dispersión acústica se encontró entre 13.7 y 24.4 °C. La salinidad varió entre 36.5 y 37.9 ups. El valor de fluorescencia se halló entre 0.1 y 1.7 mg Cl-a/m³ (**Tabla 4.20**).

Tabla 4.20: Variables físico-químicas recogidas en las estaciones de muestreo en 2013. Códigos: Z=Profundidad, T^a=Temperatura, Sal.=Salinidad, Fluo.=Fluorescencia.

2013	St_13.1	St_13.2	St_13.3	St_13.4	St_13.5	St_13.6	St_13.7	St_13.8	St_13.9	St_13.10
Fecha (ddmm)	2007	2007	2107	2207	2307	2407	2507	2607	2807	2907
Z_Fondo (m)	48	200.6	112.5	95	57.5	97.5	114.5	99	33	92.5
Z_muestra (m)	14.8	80.4	27.1	14.2	36	11.3	23.7	10.5	10.5	10.1
T ^a Capa (°C)	24.2	13.7	17.6	23.9	17	24.4	20.6	20.2	15.6	16.3
Sal. Capa (ups)	36.9	37.9	36.9	36.7	37.3	36.7	36.8	36.5	37.2	37.1
Fluo. Capa (mg Cl a/m ³)	0.4	0.5	0.2	0.1	0.9	0.2	0.2	0.1	1.7	1.5
Z_Max Fluo.	-	60	62	36	40	56	49	34	-	20

Tabla 4.21: Variables físico-químicas recogidas en las estaciones de muestreo en 2014. Códigos: Z=Profundidad, Tª=Temperatura, Sal.=Salinidad, Fluo.=Fluorescencia.

En 2014, la temperatura registrada en la profundidad del muestreo varió entre 13.7 y 18.1 °C. La salinidad se halló entre 37.1 y 38.1 ups. El valor de fluorescencia en 2013 se encontró entre 0.1 y 2.1 mg Cl-a/m¹ (Tabla 4.21).

2014	St_14.1	St_14.2	St_14.3	St_14.4	St_14.5	St_14.6	St_14.7	St_14.8
Fecha (ddmm)	1207	1407	1507	1707	1807	1907	2007	2107
Z_Fondo (m)	91.4	82.5	84.7	44.5	33.5	102.7	96.2	115.5
Z_muestra (m)	29	32.2	38	21.2	22.8	51.2	45.7	66.7
Tª Capa (°C)	18.1	17.7	15.7	18.2	17.9	14.7	14.5	13.7
Sal. Capa (ups)	37.8	37.6	37.3	37.1	37.2	37.6	37.7	38.1
Fluo. Capa (mg Cl a/m ³)	0.1	0.2	2.1	0.6	0.7	0.5	0.6	0.1
Z_Max Fluo.	70	67	37	-	26	35	31	27

4.2.1.3.1. Relación con la capa epipelágica de dispersión acústica

En la figura que se presenta a continuación (Figura 4.42) se muestra, para los dos años estudiados, el espesor de la termoclina en cada estación de muestreo como una barra amarilla y, el espesor de la capa epipelágica, detectada acústicamente a la frecuencia de 38 kHz, como una barra morada. La profundidad del fondo de cada una de las estaciones está marcada por un segmento negro. Además, se localiza con una cruz roja la profundidad a la que se realizó el muestreo biológico y con una flecha verde la profundidad donde se localizó el máximo de fluorescencia. De la interpretación del gráfico se desprende que la capa epipelágica de dispersión acústica estuvo contenida dentro de los límites de la termoclina, salvo en las estaciones localizadas cerca del final de la plataforma continental (St_13.2 y St_14.8). En zonas costeras, la termoclina no llegó a desarrollarse, encontrándose sólo la capa de mezcla.

Los resultados obtenidos del análisis de los ecogramas a la profundidad del máximo de fluorescencia, demostraron que las frecuencias empleadas en esta tesis no fueron adecuadas para la localización de la comunidad fitoplanctónica, resultando más adecuado el uso de datos provenientes de CTD.

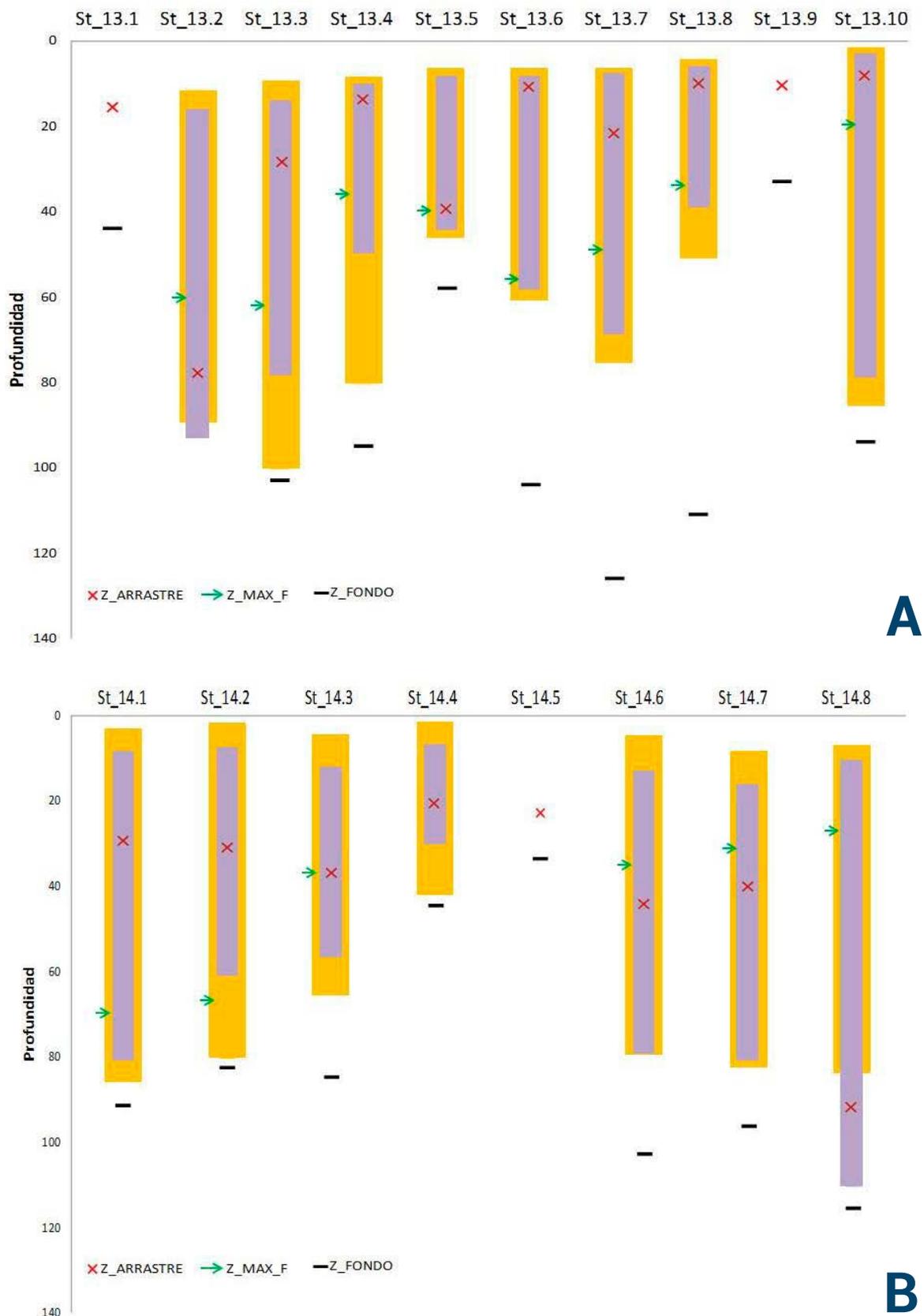


Figura 4.42: Relación de la capa de dispersión acústica con la termoclina y el máximo de fluorescencia. **A:** 2013, **B:** 2014 La barra amarilla simboliza el espesor de la termoclina, la barra morada representa el espesor de la capa registrada a la frecuencia de 38 kHz. Z_ARRASTRE= profundidad de muestreo, Z_MAX_F= profundidad del máximo de fluorescencia, Z_FONDO= profundidad del fondo.

4.2.2. Grupos faunísticos detectados por la ecosonda científica a múltiples frecuencias

4.2.2.1. Análisis SIMPER

Los resultados del análisis de similaridad SIMPER, determinaron qué grupos faunísticos y en qué proporción contribuyeron a explicar cada uno de los patrones acústicos detectados.

El **patrón acústico 1 (Figura 4.20)**, caracterizado por una elevada señal acústica en las frecuencias de 18 y 38 kHz, se debió a la presencia de crustáceos (25.5%), larvas de peces (13.9%), apendicularias (12.7%), sifonóforos (12.2%) y heterópodos (11.6%).

El **patrón acústico 2 (Figura 4.21)**, caracterizado por presentar el máximo valor en la frecuencia de 18 kHz, quedó explicado por la presencia de crustáceos (16.2%), larvas (14.9%), quetognatos (14.3%), heterópodos (13.2) y apendicularias (12.6%).

El **patrón acústico 3 (Figura 4.22)**, caracterizado por mostrar el mínimo valor en la frecuencia de 18 kHz, se debió a la presencia de crustáceos (46.5%), quetognatos (18.1%), sifonóforos (12.4%) apendicularias (9.6%) y heterópodos (8.5%).

El **patrón acústico 4 (Figura 4.23)**, caracterizado por mostrar el máximo valor en la frecuencia de 38 kHz y el resto de valores disminuyó al disminuir la frecuencia, quedó explicado por la presencia de crustáceos (39.6%), quetognatos (16.2%), sifonóforos (13.9%), huevos (11.8%) y larvas (10.3%).

El **patrón acústico 5 (Figura 4.24)**, caracterizado por presentar el máximo valor en la frecuencia de 38 kHz y valores similares en 18, 120 y 200 kHz, se debió a la presencia de crustáceos (45.3%), heterópodos (14.41%), sifonóforos (12.5%), larvas (9.9%) y huevos (9.5%).

El **patrón acústico 6 (Figura 4.25)**, caracterizado por presentar el máximo valor en 120 kHz, se explicó por la presencia de crustáceos (63.16%), sifonóforos (15.7%) y quetognatos (11.5%).

La respuesta acústica multifrecuencia detectada por la ecosonda científica, varió en función de la composición faunística de la comunidad zooplanctónica presente en las estaciones de muestreo. Los patrones acústicos determinados en base a la respuesta de frecuencia detectada en cada estación, compartieron tanto la presencia de ciertos grupos faunísticos como la proporción en la éstos contribuyeron a explicar dichos patrones. Por esto, los 6 patrones determinados únicamente en base a la respuesta acústica, pudieron reducirse a tres patrones generales basados en los resultados del análisis de las muestras biológicas.

El **patrón general número 1** englobó los patrones acústicos 1 y 2. La frecuencia clave para definir este patrón fue la frecuencia de 18 kHz (**Figura 4.17**). Cuando esta frecuencia registró valores elevados de densidad acústica, la comunidad zooplanctónica asociada perteneció a la categoría acústica "Gas-bearing", fundamentalmente larvas de peces (**Figura 4.31**).

El **Patrón general número 2** agrupó los patrones acústicos 3, 4 y 5. La frecuencia clave para definir este patrón fue 38 kHz (**Figura 4.16**). Cuando esta frecuencia registró el mayor valor respecto al resto de frecuencias, la comunidad zooplanctónica presente en el medio se asoció con una comunidad heterogénea compuesta por organismos pertenecientes a las tres categorías acústicas: "Fluid-like", especialmente apendicularias (**Figura 4.30C y D**), "Gas-bearing" como son las larvas de peces (**Figura 31**) y "Elastic-shelled" como son los heterópodos (**Figura 4.28**).

El **Patrón general número 3** se correspondió con el patrón acústico 6. La frecuencia clave para definir este patrón fue la de 120 kHz. Cuando esta frecuencia detectó el mayor valor, y no se visualizó señal acústica a las frecuencias de 18 y 38 kHz, aplicando un umbral de -80 dB, la comunidad zooplanctónica presente en el medio estuvo compuesta por organismos pertenecientes a la categoría acústica "Fluid-like", especialmente crustáceos (**Figura 4.29**).

4.2.2.2. Análisis de la regresión lineal

4.2.2.2.1. Regresión lineal múltiple

Para la densidad de los grupos faunísticos capturados por la **mall**a de 250 μm , el modelo de regresión lineal múltiple solo resultó aceptable para la frecuencia de 18 kHz (**Tabla 4.22**). Aunque, ninguno de los grupos faunísticos resultó significativo en la explicación de la energía acústica detectada a ninguna frecuencia.

250 μm	18 kHz	38 kHz	120 kHz	200 kHz
R² múltiple	0.81	0.76	0.71	0.61
R² ajustado	0.56	0.46	0.35	0.09
Error típico	2.49E-07	3.46E-07	5.62E-08	6.06E-08
F calculado	3.24	2.54	1.96	1.19
p-valor	0.07	0.11	0.19	0.41

Tabla 4.22: Ajuste por regresión múltiple entre la densidad de organismos capturada por la red de 250 μm y los valores de energía acústica a múltiples frecuencias.

Para la densidad de los grupos faunísticos capturados por la **mall**a de 333 μm , el modelo de regresión lineal múltiple resultó aceptable para las frecuencias de 38 kHz y 120 kHz (**Tabla 4.23**). El grupo faunístico que resultó significativo para ambas frecuencias fue apendicularias (p-valor_38 kHz= 0.01 y p-valor_120 kHz=0.03).

Tabla 4.23: Ajuste por regresión múltiple entre la densidad de organismos capturada por la red de 333 μm y los valores de energía acústica a múltiples frecuencias.

333 μm	18 kHz	38 kHz	120 kHz	200 kHz
R2 múltiple	0.76	0.84	0.80	0.72
R2 ajustado	0.44	0.62	0.55	0.35
Error típico	2.8E-07	2.89E-07	4.7E-08	5.14E-08
F calculado	2.39	3.94	3.17	1.95
p-valor	0.13	0.04	0.07	0.20

Para la densidad de los grupos faunísticos capturados por la **mallada de 500 μm** , el modelo de regresión lineal múltiple resultó aceptable para las frecuencias de 18, 38 y 200 kHz (**Tabla 4.24**). El grupo faunístico que resultó significativo para las frecuencias de 18 y 38 kHz fue larvas (p-valor 18 kHz =0.003, p-valor 38 kHz =0.051). Para la frecuencia de 200 kHz el grupo significativo fue crustáceos grandes (p-valor=0.012).

Tabla 4.24: Ajuste por regresión múltiple entre la densidad de organismos capturada por la red de 500 μm y los valores de energía acústica a múltiples frecuencias.

500 μm	18 kHz	38 kHz	120 kHz	200 kHz
R2 múltiple	0.94	0.87	0.66	0.76
R2 ajustado	0.88	0.73	0.26	0.50
Error típico	1.6E-07	2.30E-07	8.05E-08	6.17E-08
F calculado	15.88	6.31	1.69	2.92
p-valor	0.00003	0.008	0.26	0.07

Para la mallada de 2000 μm no se llevó a cabo este análisis dada la escasez de individuos.

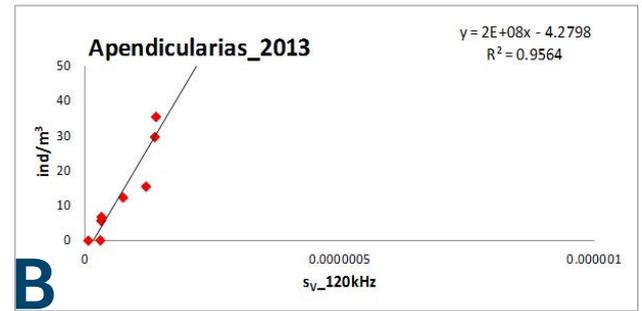
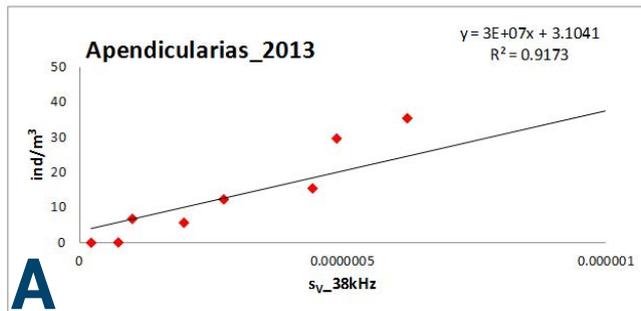
Los grupos faunísticos significativamente relevantes en el modelo de regresión múltiple fueron:

- Las apendicularias capturadas por la mallada de 333 μm en las frecuencias de 38 y 120 kHz.
- Las larvas capturadas con la mallada de 500 μm a las frecuencias de 18 y 38 kHz.
- Los crustáceos grandes capturados con la mallada de 500 μm a la frecuencia de 200 kHz.

4.2.2.2. Regresión lineal simple

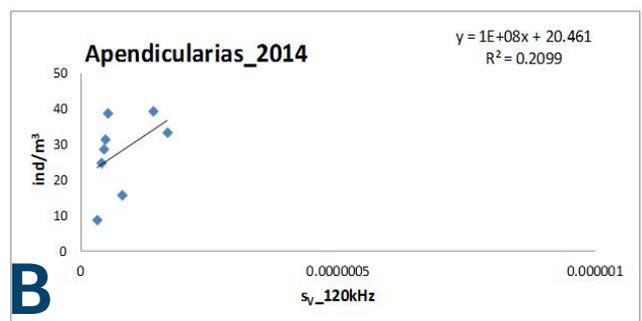
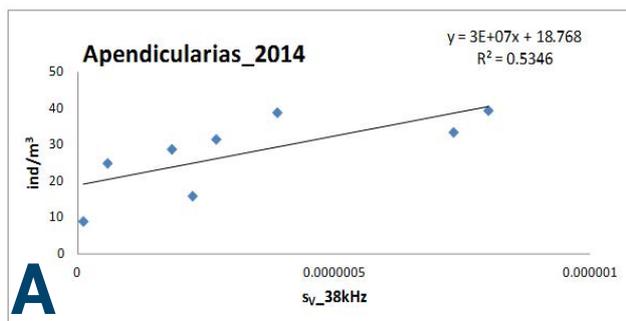
El ajuste por regresión lineal simple para la **densidad de apendicularias**, capturadas por la mallada de 333 μm , y la energía acústica detectada a las frecuencias de 38 y 120 kHz, varió para los dos años estudiados.

En 2013, el coeficiente de regresión lineal resultó muy aceptable para ambas frecuencias, lo que indicó que se cumplió el principio de linealidad. La pendiente de la recta de ajuste para la frecuencia de 38 kHz resultó menor que para la frecuencia de 120 kHz. Esto, indicó que para un mismo número de organismos la energía dispersada por el grupo de las apendicularias fue mayor en la frecuencia de 38 kHz que en la de 120 kHz (**Figura 4.43**).



En 2014, el coeficiente de regresión lineal resultó inferior al registrado en 2013 para las dos frecuencias. La energía detectada en 38 kHz, se explicó por la densidad de apendicularias, aunque el grado de ajuste resultó bastante débil. Para la frecuencia de 120 kHz, las apendicularias no cumplieron el principio de linealidad, como demostró el coeficiente de regresión, por lo que no pudo considerarse que el grupo de las apendicularias participaran de la señal registrada por la frecuencia de 120 kHz (Figura 4.44).

Figura 4.43: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de apendicularias registrados en 2013. A: Frecuencia de 38 kHz. B: Frecuencia de 120 kHz.



El ajuste por regresión lineal simple para la **densidad de larvas de peces**, capturadas por la malla de 500 μm , y la energía acústica detectada a las frecuencias de 18 y 38 kHz, resultó similar para los dos años estudiados.

Figura 4.44: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de apendicularias registrados en 2014. A: Frecuencia de 38 kHz. B: Frecuencia de 120 kHz.

En 2013, las larvas de peces cumplieron con el principio de linealidad aceptablemente como indicaron los coeficientes de regresión. La pendiente de la recta resultó mayor para la frecuencia de 18 kHz que para la frecuencia de 38 kHz, indicando que a igual número de larvas, el valor de energía acústica registrada fue mayor en la frecuencia de 38 kHz que en la de 18 kHz (Figura 4.45).

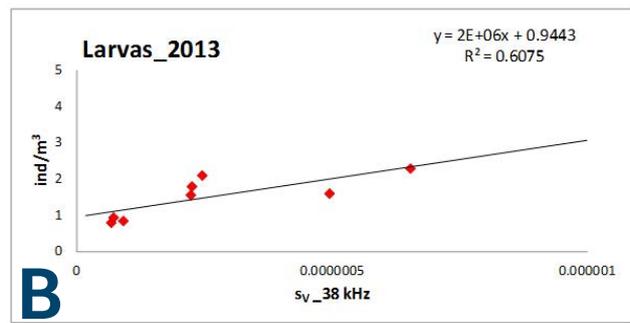
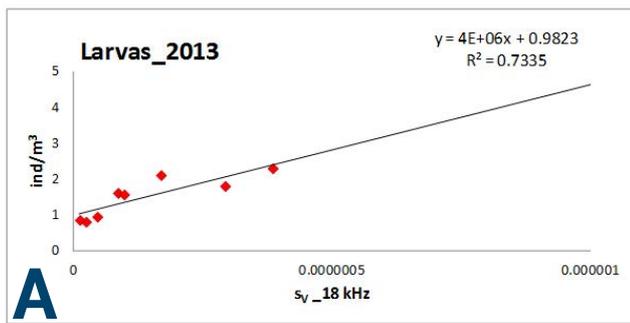


Figura 4.45: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de larvas de peces registrados en 2013. **A:** Frecuencia de 18 kHz. **B:** Frecuencia de 38 kHz.

En 2014, los coeficientes de regresión resultaron superiores a los calculados en 2013 para las dos frecuencias. A diferencia del año anterior, para un mismo número de larvas la mayor respuesta acústica se detectó en la frecuencia de 18 kHz (Figura 4.46).

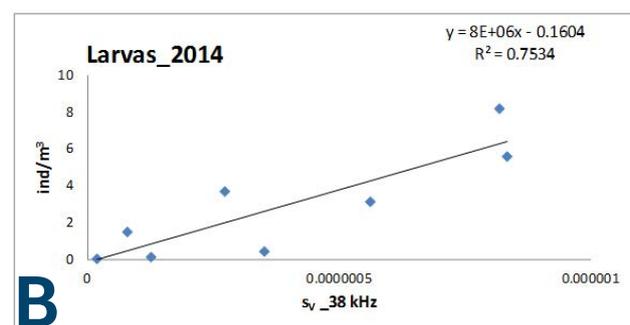
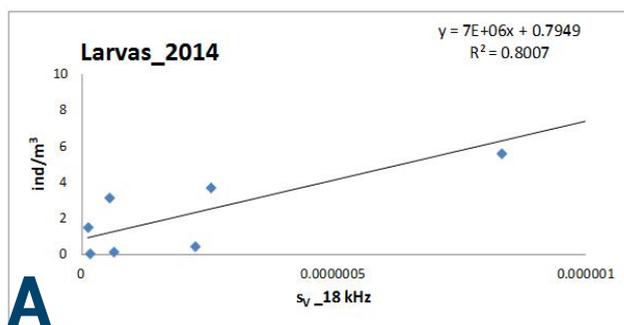


Figura 4.46: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de larvas de peces registrados en 2014. **A:** Frecuencia de 18 kHz. **B:** Frecuencia de 38 kHz.

El ajuste por regresión lineal simple para la **densidad de crustáceos grandes**, capturados por la malla de 500 μm , y la energía acústica detectada a la frecuencia de 200 kHz, resultó similar para los dos años estudiados.

En 2013, los crustáceos grandes cumplieron con el principio de linealidad, lo que indicó que contribuyeron a la señal acústica detectada en la frecuencia de 200 kHz (Figura 4.47A).

En 2014, el coeficiente de regresión resultó menor que el registrado en 2013, aunque se pudo aceptar el principio de linealidad para la frecuencia de 200 kHz y el grupo faunístico de crustáceos grandes (Figura 4.47B).

4.2.2.3. Determinación de la categoría acústica dominante

La energía acústica, registrada a las **frecuencias de 18, 38 y 120 kHz**, estuvo fuertemente dominada por organismos zooplanctónicos pertenecientes a la clase acústica "Gas-bearing" (larvas de peces) para los dos años y todas las localizaciones. (Tabla 25).

La energía acústica, registrada a la **frecuencia de 200 kHz**, estuvo dominada por la clase acústica "Gas-bearing" (larvas de peces) en tres de las ocho estaciones, aunque la contribución relativa de la clase "Fluid-like" (crustáceos, sifonóforos y quetognatos) dominó en las cinco estaciones restantes (Tabla 25).

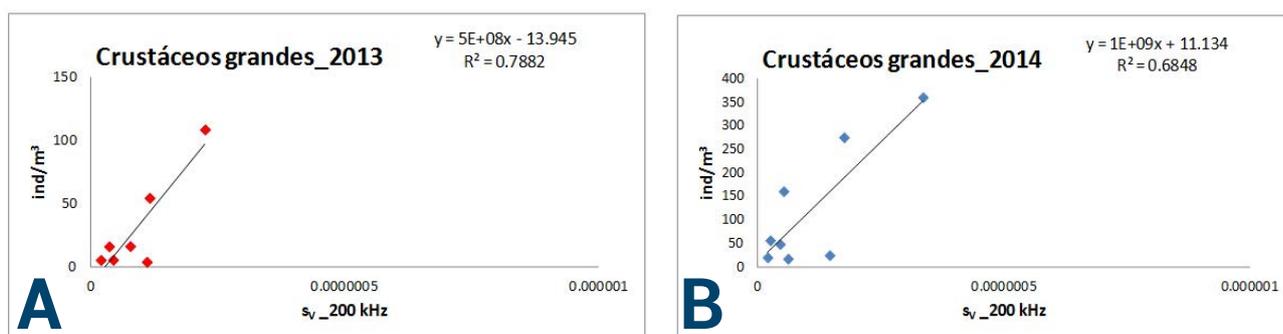


Figura 4.47: Ajuste por regresión lineal del valor de s_v y la abundancia de crustáceos grandes registrados a la frecuencia de 120 kHz. **A:** 2013. **B:** 2014.

En general, la contribución relativa al MVBS estimado por parte de crustáceos, quetognatos, sifonóforos (categoría acústica "Fluid-like") y heterópodos ("Elastic-shelled") aumentó al aumentar la frecuencia. Las larvas de peces ("Gas-bearing") presentaron un patrón inverso, disminuyendo su contribución al aumentar la frecuencia. El MVBS aumentó, con independencia del grupo faunístico, al aumentar el tamaño de los individuos y su concentración en el medio marino (**Tabla 25**).

Las larvas de peces alternaron su frecuencia de máxima respuesta entre 18 y 38 kHz, hecho que fue asociado a su tamaño. Al aumentar el tamaño de las larvas, la máxima respuesta acústica se desplazó de la frecuencia de 38 kHz a la de 18 kHz, indicando que la respuesta acústica registrada a la frecuencia de 18 kHz se debe a la presencia en el medio de larvas de gran tamaño.

La detección acústica de los grupos "Fluid-like" y "Elastic-shelled", a las frecuencias a las que trabajó la ecosonda científica, estuvo supeditada a la presencia de organismos "Gas-bearing" en el medio. En ausencia de larvas, el MVBS registrado en las frecuencias de 120 y 200 kHz resultó un buen indicador de la abundancia de categoría acústica "Fluid-like".

Los resultados obtenidos (**Tabla 4.25**), demostraron que cuando la comunidad de zooplancton es heterogénea, un único grupo faunístico no suele dominar la dispersión acústica observada en todas las frecuencias. Organismos que no contribuyeron en gran proporción a la abundancia total de individuos en las muestras biológicas analizadas (como las larvas de peces), dominaron la dispersión acústica en un amplio rango de frecuencias debido a su elevado valor de TS. Por otra parte, organismos con un bajo TS, como crustáceos grandes, aunque fueron muy abundantes en las muestras, su contribución a la señal acústica sólo fue evidente a altas frecuencias.

Tabla 4.25: Valores de MVBS estimados y categoría acústica dominante para cada frecuencia y estación.

Grupo taxonómico	Frecuencia	St_14.1	St_14.2	St_14.3	St_14.4	St_14.5	St_14.6	St_14.7	St_14.8
Crustáceos	18	-118.09	-119.90	-115.17	-117.05	-128.54	-108.92	-104.91	-109.93
	Larvas	-57.15	-72.74	-78.41	-78.88	-121.93	-66.63	-57.01	-56.62
Quetognatos	18	-122.47	-118.24	-	-	-159.44	-	-151.35	-146.04
	Sifonóforos	-116.11	-118.27	-122.64	-141.95	-156.37	-125.86	-123.19	-
Heterópodos	18	-129.75	-137.76	-139.64	-	-	-138.64	-132.44	-
	Categoría acústica dominante	"Gas-Bearing"							
Crustáceos	38	-105.11	-106.92	-102.19	-104.07	-115.56	-95.94	-91.94	-96.96
	Larvas	-63.99	-58.25	-73.30	-70.91	-107.49	-68.00	-63.17	-64.05
Quetognatos	38	-109.28	-104.83	-	-	-146.41	-	-138.34	-133.01
	Sifonóforos	-101.81	-104.20	-108.05	-128.33	-143.17	-111.68	-109.01	-
Heterópodos	38	-116.77	-124.78	-126.66	-	-	-125.66	-119.45	-
	Categoría acústica dominante	"Gas-Bearing"							
Crustáceos	120	-85.17	-86.99	-82.29	-84.12	-91.61	-76.00	-72.00	-77.02
	Larvas	-65.19	-66.22	-77.80	-76.25	-89.37	-71.19	-65.79	-66.51
Quetognatos	120	-87.57	-82.01	-	-	-125.88	-	-118.00	-112.48
	Sifonóforos	-77.64	-80.10	-83.94	-104.90	-121.39	-87.53	-84.87	-
Heterópodos	120	-96.80	-104.80	-106.68	-	-	-105.68	-99.48	-
	Categoría acústica dominante	"Gas-Bearing"	"Gas-Bearing"	"Gas-Bearing"	"Gas-Bearing"	"Fluid-like"	"Gas-Bearing"	"Gas-Bearing"	"Gas-Bearing"
Crustáceos	200	-76.38	-78.22	-73.59	-75.33	-84.80	-67.22	-63.24	-68.24
	Larvas	-65.24	-66.59	-78.05	-76.54	-93.50	-71.38	-65.92	-66.66
Quetognatos	200	-76.86	-71.10	-	-	-116.12	-	-108.51	-102.72
	Sifonóforos	-67.92	-70.06	-74.60	-94.18	-110.65	-77.65	-74.97	-
Heterópodos	200	-87.92	-95.93	-97.81	-	-	-96.81	-90.61	-
	Categoría acústica dominante	"Gas-Bearing"	"Gas-Bearing"	"Fluid-like"	"Fluid-like"	"Fluid-like"	"Fluid-like"	"Fluid-like"	"Gas-Bearing"

4.2.2.4. Relación entre la energía acústica observada y esperada

La comparación entre los datos de MVBS estimados en base a las muestras biológicas y los observados, mostró una tendencia a la sobreestimación, excepto para la estación St_14.5 (Figura 4.48). Este hecho, fue debido a la contribución de las larvas de peces. Si éstas no se hubieran tenido en cuenta, el MVBS estimado habría sido de entre 30 y 35 dB menor que el observado en las frecuencias de 18 y 38 kHz.

La estación St_14.5 mostró una clara subestimación del valor de MVBS para las frecuencias de 18, 120 y 200 kHz. Aunque se detectó una mayor contribución de los crustáceos en las frecuencias de 120 y 200 kHz, los valores estimados resultaron unos 10 dB más bajos que los observados. Este hecho fue debido a que la mayor parte de los crustáceos muestreados en esta estación resultaron menores de 1.2 mm, como pusieron de manifiesto las redes de 250 y 333 μm , y no fueron capturados eficientemente por la red de 500 μm . El uso de la abundancia de crustáceos inferida de la red de 500 μm subestimó la concentración de crustáceos pequeños, y como consecuencia se subestimó la contribución de los crustáceos a la señal acústica registrada en esta estación.

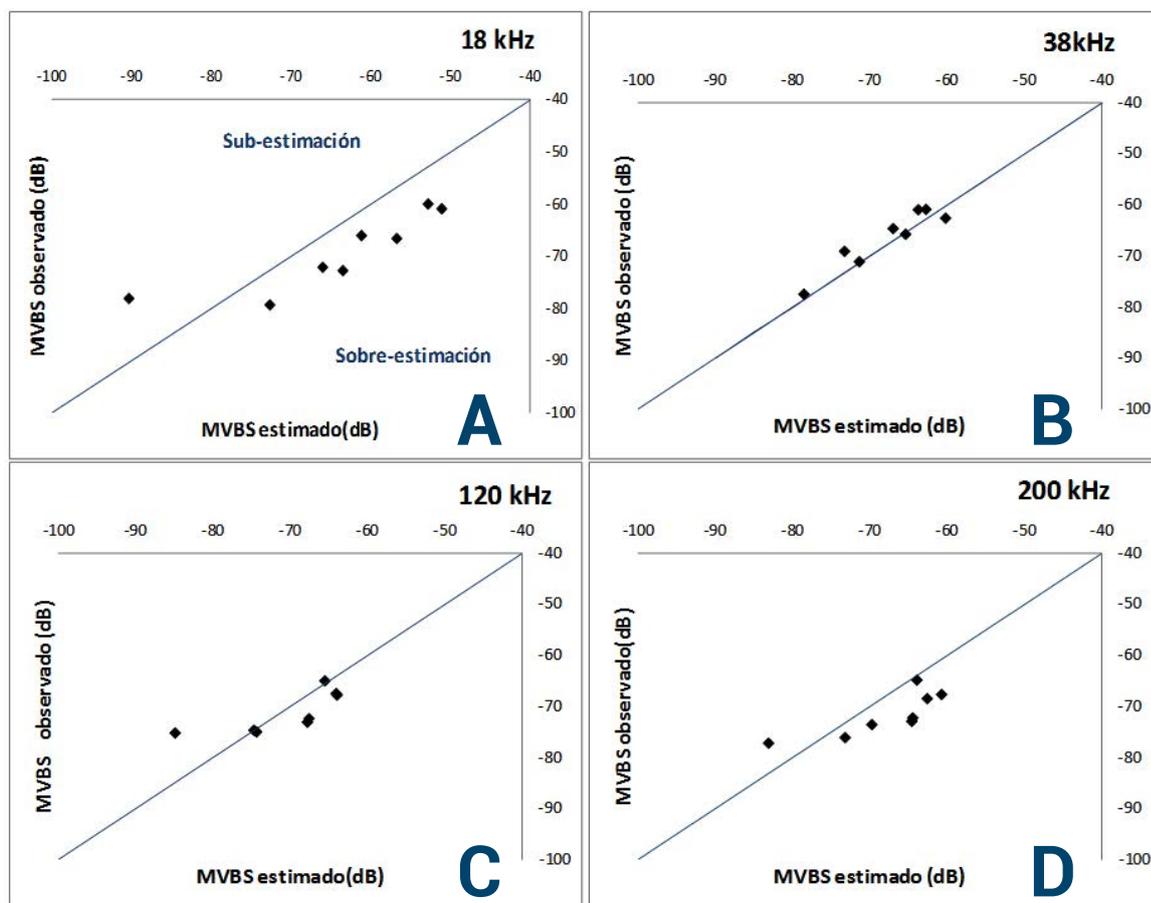
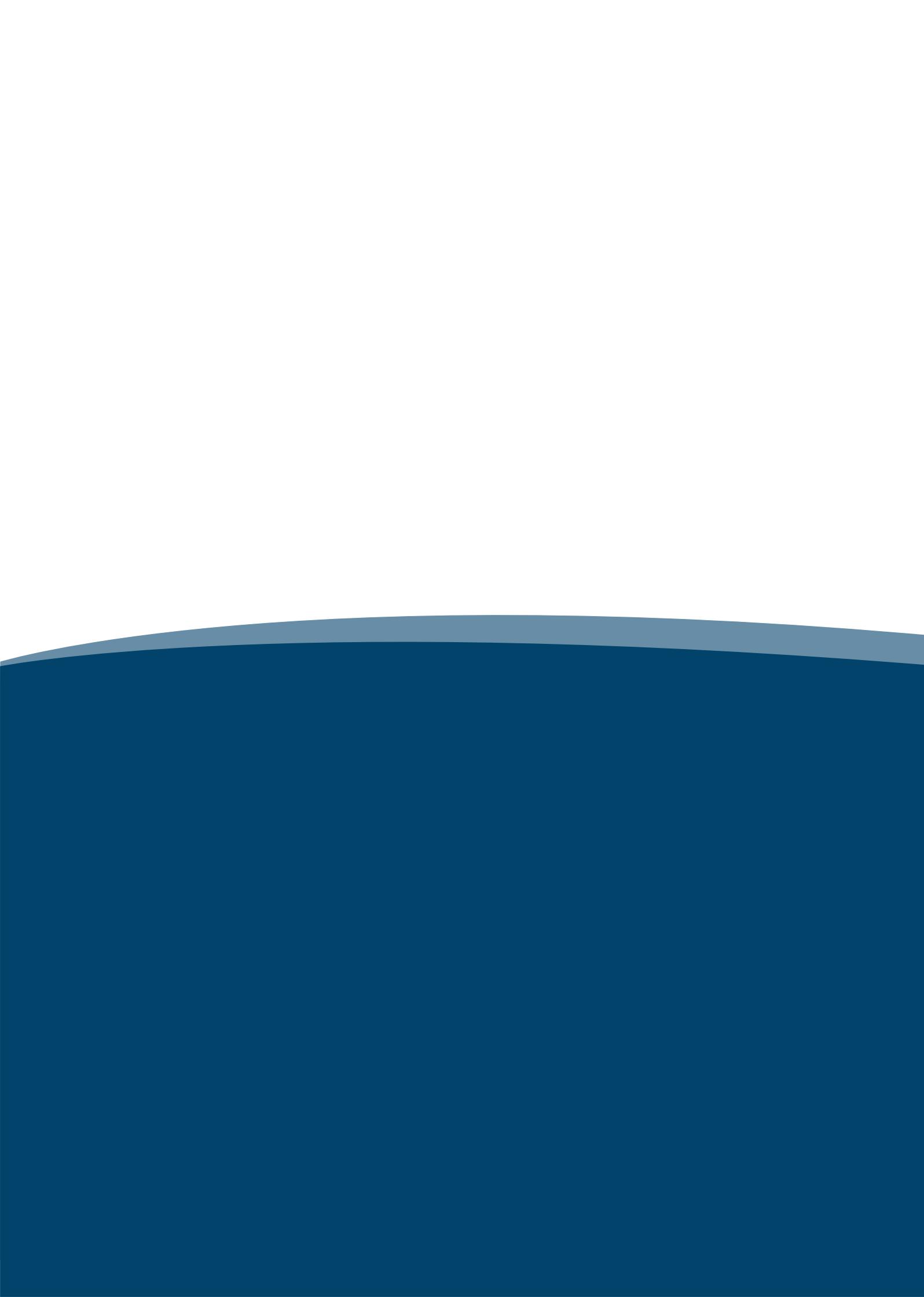
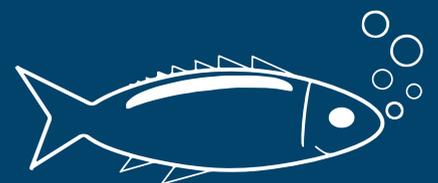


Figura 4.48: Valor de MVBS observado y estimado en base a las muestras biológicas a múltiples frecuencias. A: 18 kHz, B: 38 kHz, C: 120 kHz, D: 200 kHz. La línea roja se corresponde con la relación lineal 1:1, que se obtendría si el MVBS observado y estimado concordara perfectamente.



CAPÍTULO 5

Discusión



5.1. Las campañas de evaluación de stocks como plataformas para el estudio integrado del ecosistema pelágico

5.2. Optimización del proceso de evaluación de la comunidad de peces pelágicos

5.3. Influencia del sistema de muestreo en la identificación acústica de la comunidad zooplanctónica

5.4. Composición y distribución de la comunidad zooplanctónica

5.4.1. Relaciones tróficas entre la comunidad zooplanctónica

5.5. Fitoplancton y condiciones ambientales

5.6. Cambios en la comunidad zooplanctónica detectados acústicamente sobre la plataforma continental.

5.6.1. Zona costera

5.6.2. Zona intermedia

5.6.3. Zona profunda

5.7. Organismos detectados por la ecosonda científica.

5.8. Propuestas para el futuro.

5.1. Las campañas de evaluación de stocks como plataformas para el estudio integrado del ecosistema pelágico

Los progresos en el campo de la acústica pesquera (Chu, 2011), han hecho posible recoger información simultánea de diferentes comunidades pelágicas a una escala espacial y temporal, hasta ahora inaccesible empleando métodos de muestreo tradicionales (Bertrand *et al.*, 2014; Godo *et al.*, 2014). El uso de tecnologías acústicas, permite estudiar desde la comunidad planctónica hasta los depredadores superiores (Bertrand *et al.*, 2014; Benoit-Bird y McManus, 2014), dentro de un amplio rango de escalas espaciales (Trenkel *et al.*, 2011), desde centímetros (Benoit-Bird *et al.*, 2010; Moline *et al.*, 2010) hasta centenares de kilómetros (Lebourges-Dhaussy *et al.*, 2009; Lezama-Ochoa *et al.*, 2014), lo que posibilita la gestión integrada de los ecosistemas (Koslow, 2009).

Los datos recogidos durante las campañas acústicas, dirigidas a la evaluación de peces pelágicos, están infra-utilizados. Los datos acústicos se emplean principalmente para generar índices de abundancia de las especies de interés pesquero, dejando de lado a todas aquellas comunidades presentes en la columna de agua, que carecen de valor comercial (Trenkel *et al.*, 2011). El escaso interés económico que posee la comunidad zooplanctónica, contrasta con su elevada importancia en términos ecológicos, puesto que constituye el nexo entre los productores primarios y los consumidores secundarios y terciarios (Margalef, 1985).

Las campañas acústicas para la evaluación de stocks constituyen plataformas ideales para el estudio integrado del ecosistema pelágico, ya que proporcionan una observación sinóptica de la columna de agua (Simmonds y MacLennan, 2005), y aportan información sobre diferentes niveles tróficos (Trenkel y Berger, 2013). Además, el conocimiento de la variación espacial y temporal de la distribución de las diferentes comunidades pelágicas, es esencial para alcanzar una gestión eficaz de los recursos pesqueros basada en la aproximación ecosistémica (Christensen *et al.*, 1996; FAO, 2008; Trenkel *et al.*, 2011; Bertrand *et al.*, 2014).

Partiendo de los ecogramas procedentes del Golfo de Vera y el Mar de Alborán, almacenados durante las campañas MEDIAS, esta tesis ha sentado las bases para el estudio sistemático de la comunidad zooplanctónica a una escala macroespacial, y ha contribuido al estudio integrado del ecosistema pelágico. El método empleado para la caracterización acústica de la capa de plancton

es extrapolable espacial y temporalmente, por lo que puede ser aplicado a otras áreas geográficas y a campañas realizadas con anterioridad.

La energía acústica asociada a la comunidad zooplanctónica presentó una alta variabilidad a lo largo de la plataforma continental. Este hecho, indicó que la comunidad zooplanctónica se concentró preferentemente en ciertas áreas. Las áreas de preferencia presentaron valores extremadamente elevados de densidad acústica, contrastando con los valores observados en el resto del área de estudio que resultaron muy inferiores al valor medio.

Las zonas adyacentes a la bahía de Málaga presentaron los valores más altos de densidad acústica en los dos años estudiados, interpretándose como un área de producción secundaria elevada. La alta productividad de la bahía de Málaga se debe al afloramiento costero inducido por el viento y a la circulación de las masas de agua en el mar de Alborán (Margalef, 1985; Parrilla y Kinder, 1987; Sarhan *et al.*, 2000; Renault *et al.*, 2011; Oguz *et al.*, 2014).

La elección del diagrama de cajas para el estudio exploratorio de los datos acústicos, resultó muy adecuada, ya que su interpretación es sencilla e intuitiva y permite la localización de áreas de gran producción secundaria mediante el análisis de los valores extremos. En el caso de datos acústicos, queda demostrado que los valores extremos no pueden ser considerados *a priori* anómalos, como sugiere la estadística robusta (García Pérez, 2005), sino indicativos de zonas altamente productivas.

La escala de agregación para la aplicación del diagrama de cajas resultó apropiada, dada la gran diferencia entre los valores máximos y mínimos de densidad acústica registrados y el tipo de plataforma continental que caracteriza la zona de estudio (entre 2 y 5 mn desde la costa). En zonas con plataformas continentales amplias, se recomienda establecer una menor escala de agregación para detectar procesos que se producen a pequeña escala (Moline *et al.*, 2010).

La representación de la densidad acústica a múltiples frecuencias mediante mapas de densidad georeferenciados reflejó fielmente la distribución de los registros acústicos en el área de estudio, y puso de manifiesto cuatro áreas de elevada producción zooplanctónica: Bahía de Almería, inmediaciones de Adra, la zona ubicada entre Motril y la bahía de Málaga y de Estepona a Punta Europa. Los mapas de densidad pueden ser usados como una herramienta para representar las zonas de mayor producción zooplanctónica, y una vez definidos los organismos que producen los registros acústicos, pueden interpretarse en términos de grupos ecológicos o especies subrogadas (Trenkel y Berger, 2013).

Los datos acústicos necesarios para generar este tipo de mapas de distribución de producción secundaria han sido recopilados durante la serie de campañas MEDIAS llevadas a cabo anual-

mente desde 2009 en el Mediterráneo español. Actualmente, se cuenta con una serie temporal extensa, a través de la cual se podría detectar cambios interanuales en las zonas de productividad secundaria y en la composición de la comunidad zooplanctónica.

5.2. Optimización del proceso de evaluación de la comunidad de peces pelágicos

Una de las fuentes de incertidumbre, asociada al proceso de evaluación de stocks por métodos acústicos, es la interpretación de ecogramas. En la mayoría de campañas acústicas orientadas a la evaluación se detectan agregaciones de organismos planctónicos. Estas agregaciones impiden la identificación de las especies objetivo, y se consideran registros indeseados. Un método usado normalmente para separar la energía acústica reflejada por los peces de la reflejada por el resto de organismos presentes en la columna de agua, es incrementar el umbral de visualización de los ecogramas. Sin embargo, en presencia de grandes concentraciones de zooplancton, el aumento del umbral de visualización puede conllevar la supresión de determinados ecotrazos correspondientes a peces. Este hecho, adquiere especial relevancia en el caso de que los peces se encuentran dispersos o formando cardúmenes poco densos (Simmonds y MacLennan, 2005).

Las propiedades acústicas del zooplancton y de los peces deberían permitir su separación al usar múltiples frecuencias. La dispersión del sonido por parte del zooplancton, en el rango de frecuencias de 18 a 200 kHz, aumenta rápidamente con la frecuencia, debido a que por su tamaño se encuentran en la zona de Rayleigh. Por su parte, los peces con vejiga natatoria se encuentran en la zona geométrica, donde la señal acústica presenta una menor variabilidad entre frecuencias. Estos dos comportamientos acústicos característicos y diferenciados, pueden ser explotados para discriminar comunidades, siempre que la dispersión por parte de los organismos zooplanctónicos no esté sujeta a procesos de resonancia. El uso de ecogramas virtuales ha supuesto un gran avance en la discriminación entre peces y plancton. Aún así, quedan por resolver aquellas situaciones donde la comunidad zooplanctónica presenta características similares a pequeñas burbujas de aire, cuyo pico de mayor respuesta acústica se encuentra dentro del rango de frecuencias de 10 y 50 kHz (Fernandes *et al.*, 2006).

En el área de estudio, la comunidad zooplanctónica exhibe la mayor respuesta acústica en la frecuencia de 38 kHz, salvo en zonas costeras donde la mayor respuesta se registra en la frecuencia de 70 kHz. Las elevadas concentraciones zooplanctónicas que han

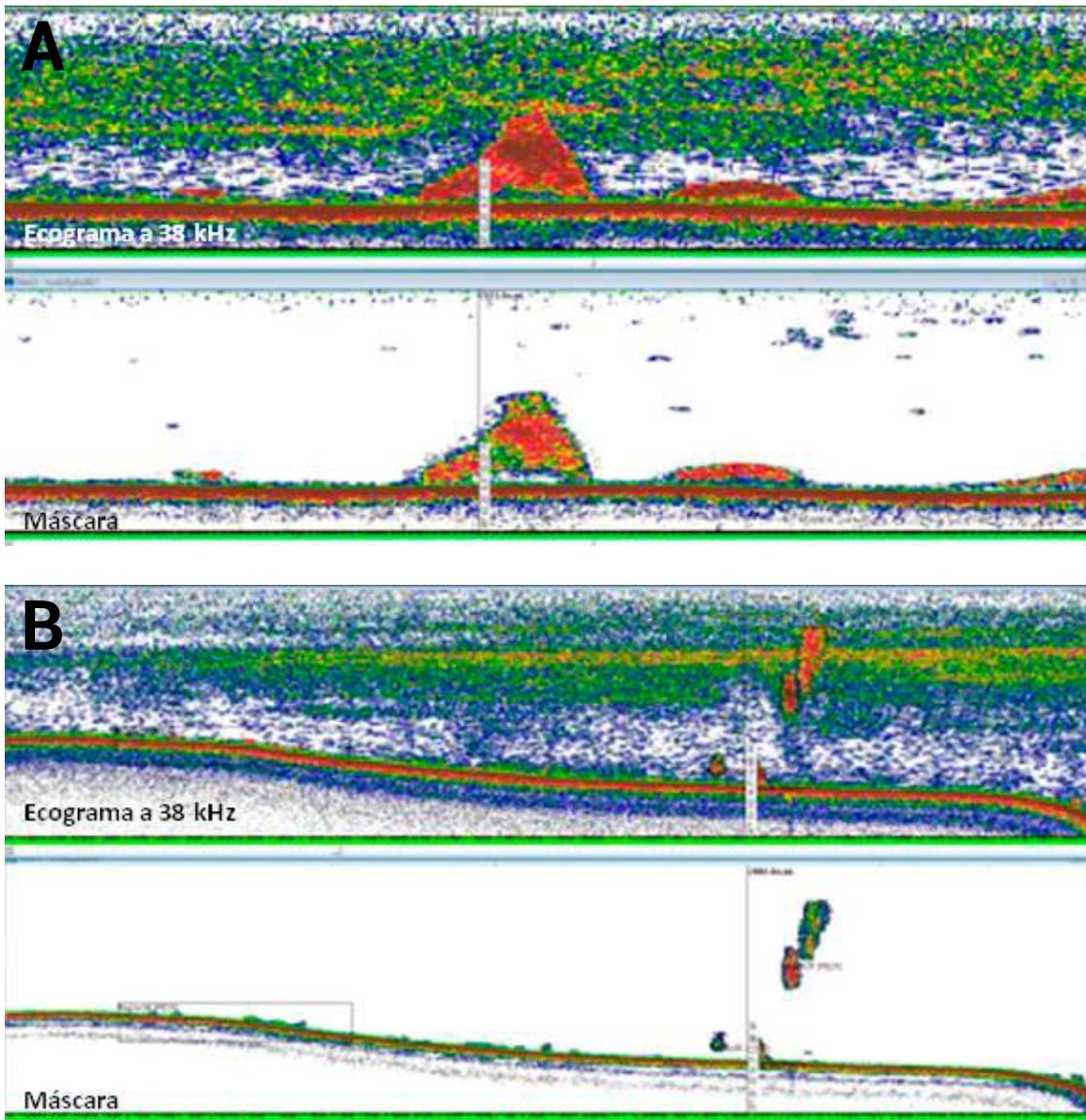
sido detectadas en determinadas áreas, hacen que el aumento del umbral de visualización no sea adecuado para la identificación de peces, resultando más conveniente el desarrollo de algoritmos basados en la combinación de múltiples frecuencias.

En la presente tesis, se ha definido el algoritmo multifrecuencia que categorizó a la comunidad planctónica estival del Golfo de Vera y del Mar de Alborán. Además, se ha cuantificado el grado de mejora en la interpretación de ecogramas, contribuyendo a optimizar la determinación de la abundancia de los stocks de peces pelágicos.

La comunidad planctónica detectada en la frecuencia de 38 kHz puede ser eliminada del ecograma aplicando un algoritmo matemático, basado en la combinación lineal del resto de frecuencias (**Figura 5.1**). El algoritmo empleado para la separación de peces y plancton se diseñó aplicando una metodología híbrida, en la que se combinan operaciones aditivas en el dominio lineal con la categorización multifrecuencia (Korneliusen, 2002). La comunidad zooplanctónica presentó una variación interanual en su distribución espacial y en el gráfico de frecuencia relativa de respuesta (Korneliusen y Ona, 2003), lo que se tradujo en una contribución diferente de cada una de las frecuencias a la ecuación final para cada año estudiado.

La interpretación de ecogramas debe adaptarse a cada situación específica. La comunidad zooplanctónica es dinámica y variable, puesto que está sujeta a cambios estacionales y además, se halla sometida a cambios interanuales dentro de la misma estación. Los cambios interanuales en la composición y distribución de la comunidad zooplanctónica han sido constatados por otros autores en base a muestreos biológicos realizados en el Mar de Alborán (Sampaio de Souza *et al.*, 2005; Mercado *et al.*, 2007) y en otras áreas del litoral español (Valdés *et al.*, 2007; García la Fuente y Ruiz, 2007; Calbet *et al.*, 2001; Fernández de Puellas *et al.*, 2007). La aplicación de un mismo algoritmo a diferentes áreas, a diferentes épocas o a diferentes años conllevaría la disminución en su efectividad para la separación entre comunidades. Sin embargo, el método para generar el algoritmo puede ser aplicado a cualquier conjunto de datos, independientemente de las frecuencias con las que se cuente, puesto que es reproducible y adaptable.

El índice experimental de co-ocurrencia desarrollado en esta tesis permite detectar interacciones entre comunidades pelágicas (peces y zooplancton). El resultado de su aplicación puso de manifiesto que, durante las horas diurnas la coexistencia entre comunidades se maximiza a profundidades de entre 50 y 75 metros (**Figura 5.1**), lo que afecta hasta en un 70 % a la detección de cardúmenes de peces. La generación de ecogramas virtuales, basados en la frecuencia de respuesta de los organismos, supuso una mejora global en la interpretación de ecogramas. En 2013, dicha mejora fue de un 33 % y en 2014 del 37%.



La aplicación de este índice ha contribuido a ampliar el conocimiento sobre la distribución vertical de los dos principales grupos ecológicos pelágicos, y a determinar la forma en la que afecta la presencia de plancton a la evaluación de peces. Además, dicho índice podría ser empleado en futuros estudios ecológicos para determinar las profundidades de interacción entre comunidades, y junto a la identificación conjunta del contenido estomacal de los peces y la composición biológica de la capa de plancton, estudiar las posibles relaciones tróficas entre compartimentos pelágicos.

Figura 5.1: Co-ocurrencia de cardúmenes de peces y la capa de plancton (ecograma a 38 kHz) y aplicación del algoritmo para la separación de ambas (máscara). **A:** Zona: Carboneras; profundidad: 51 m; año: 2013. **B:** Zona: Motril; profundidad: de 71 a 108 m; año: 2014.

5.3. Influencia del sistema de muestreo en la identificación acústica de la comunidad zooplanctónica

El empleo de la acústica para la observación del medio marino permite obtener una imagen global de la columna de agua, lo cual supone una ventaja respecto a los métodos tradicionales de muestreo de plancton. Una respuesta acústica multifrecuencia constante a lo largo de un área geográfica determinada, indicaría que la comunidad zooplanctónica posee las mismas propiedades acústicas, y por tanto su composición faunística se mantendría invariable (Korneliusson y Ona, 2003). Partiendo de esta hipótesis, la toma de muestras biológicas se encaminó a la identificación y verificación de los registros acústicos correspondientes a la capa de plancton.

Uno de los grandes avances en cuanto al método de muestreo fue posicionar las redes de plancton a la profundidad deseada, visualizando su trayectoria en tiempo real sobre el ecograma. La adaptación de una tecnología existente (sensores de profundidad para la monitorización de redes de arrastre de fondo y pelágico) para un nuevo fin, conlleva la detección y resolución de errores, así como el desarrollo de programas informáticos que traduzcan la información a un lenguaje interpretable por el resto de sistemas y equipos. En el caso de la red de plancton, hubo que desarrollar diferentes sistemas de anclaje para evitar que el cambio de posición del sensor, durante la largada, provocara la pérdida de la señal.

El uso de un único tamaño de malla no es adecuado para muestrear tanto organismos mesozooplanctónicos como macrozooplanctónicos (Skjoldal *et al.*, 2013). Por este motivo, para la realización del muestreo biológico, se optó por el uso de diferentes muestreadores equipados con distintos tamaños de malla. Las mallas de menor tamaño (250 y 333 μm) capturaron eficazmente apendicularias, crustáceos pequeños, doliólidos, huevos y quetognatos de pequeño tamaño, aunque resultaron ser las más tediosas de analizar, dado la gran abundancia de organismos que capturan. La malla de 500 micras capturó una pequeña fracción de los organismos recogidos por las redes más pequeñas, no siendo representativa de la fracción zooplanctónica de menor tamaño. Por otro lado, resultó ser muy adecuada para la captura de crustáceos grandes, larvas de peces, sifonóforos y quetognatos de gran tamaño. La malla de 2000 micras capturó los organismos de mayor tamaño presentes en el medio (macrozooplankton), que en este estudio resultaron ser los menos abundantes en las muestras. Para los objetivos planteados inicialmente, la abundancia recogida por este último muestreador no pudo con-

siderarse representativa de la comunidad susceptible de generar la respuesta acústica observada, aunque sí resultó válida para corroborar la captura de grandes organismos (larvas de peces y sifonóforos) capturados por la malla de 500 μm .

La energía acústica que reflejan los organismos varía en función de su concentración en el medio, de su tamaño, de sus características corporales y de su comportamiento (Simmonds y MacLennan, 2005).

Como puede deducirse de la ecuación para el cálculo del valor de s_v en función del TS y la abundancia de organismos, los organismos presentes en el medio que reflejan una cantidad muy baja de energía acústica, no serán detectados acústicamente a no ser que su abundancia sea muy elevada. El grupo faunístico más abundante en el zooplancton son los crustáceos pequeños (Margalef, 1974). Por este motivo, se empleó la red de plancton bongo 40 equipada con redes de 250 y 333 μm , corroborándose que la malla de 250 μm es más eficiente que la de 333 μm en la captura de crustáceos pequeños (copépodos y cladóceros), y por lo tanto más adecuada para el muestreo de estos organismos.

La frecuencia a la que es detectado un organismo depende de la longitud de onda (λ) con la que es insonificado, si la longitud de onda es mucho más grande que el organismo éste no será detectado (Simmonds y MacLennan, 2005). Para capturar tallas más grandes de los mismos grupos faunísticos que los capturados por las mallas pequeñas, se empleó la red de plancton bongo 90 comprobándose que la malla de 500 μm es más adecuada que la malla de 2000 μm .

Las características corporales de los organismos influyen en gran medida en su capacidad de reflejar sonido. Por ello, si los organismos poco abundantes en el medio son muy eficientes reflejando la energía acústica, por ejemplo debido a que contienen aire en sus estructuras internas, pueden ser los responsables de la señal acústica (Lavery *et al.*, 2007). Además, aunque un animal aislado sea detectable acústicamente si aparece al lado de otro que posea un mayor valor de TS, este último será el detectado, enmascarando la presencia del otro (Mullu, 2005). Por esto, aunque la red de 2000 μm capturó el menor número de individuos, podría ser muy útil en el caso de organismos de gran tamaño y poco frecuentes con un TS elevado.

El resultado de la combinación de los datos acústicos con los datos biológicos puso de manifiesto que, de todos los organismos presentes en el medio solo las apendicularias capturadas por la malla de 333 μm , y las larvas y crustáceos grandes capturados por la malla de 500 μm , fueron responsables de la señal acústica observada en alguna de las frecuencias empleadas. En el caso de las apendicularias, el análisis de los datos obtenidos muestra que la malla de 333 μm , aunque capturó una menor abundancia, presenta un mejor ajuste que la malla de 250 μm . Este hecho, po-

dría deberse a las diferentes tallas capturadas por ambas redes, e indicarnos que un número menor de apendicularias de mayor tamaño contribuyen en mayor medida a la señal acústica que un grupo más numeroso de menor tamaño. Al comparar los datos de 2013 y 2014, se aprecia un claro descenso en el grado de ajuste de la recta, lo cual puede ser interpretado como una alta variabilidad para el grupo de las apendicularias, por lo que para asegurar que las frecuencias de 38 y 120 kHz detecten la presencia de apendicularias en el medio sería recomendable realizar más experiencias. Sin embargo, los grupos faunísticos larvas y crustáceos grandes capturados por la red de 500 μm , pueden considerarse como responsables de la señal acústica observada. Las larvas de peces son detectadas a bajas frecuencias, 18 y 38 kHz, debido al aire que contiene su vejiga natatoria. Los crustáceos grandes son detectados a la frecuencia de 200 kHz, debido a su tamaño (Korneliussen y Ona, 2003; Simmonds y MacLennan, 2005; Fernandes *et al.*, 2006).

Las fuentes de incertidumbre asociadas al muestreo biológico estuvieron relacionadas con el cálculo del volumen filtrado y la mezcla entre comunidades. Las redes empleadas para el muestreo biológico carecieron de sistema de apertura y cierre, y aunque el largado y virado de la red se realizó a la máxima velocidad para evitar el filtrado, la asunción de que la red no filtró durante el virado introdujo un sesgo en la determinación del volumen filtrado. Así, el volumen filtrado en cada estación fue subestimado, sobreestimando la abundancia. Al tratarse de un error sistemático pudo ser determinado y corregido, por lo que no afectó al cálculo de la abundancia final de organismos en las muestras. La mezcla entre comunidades en la zona epipelágica pudo considerarse mínima, ya que la respuesta de frecuencias se mantuvo constante a lo largo de la columna de agua, variando únicamente la intensidad de la señal. Consecuentemente, cuando se muestreó al final de la plataforma en la capa resonante a la frecuencia de 18 kHz situada entre 60 y 150 m con respecto a la superficie, se identificó una capa de peces mesopelágicos (Godo *et al.*, 2009; Peña *et al.*, 2014), por lo que las muestras recogidas contuvieron una mezcla de organismos epipelágicos y mesopelágicos.

Las mallas más adecuadas para el muestreo biológico de la capa de plancton detectado durante las campañas acústicas, considerando las frecuencias empleadas, serían 333 y 500 μm . En el caso de tener que prescindir de una ellas, se optaría por usar la red de 500 μm . La red bongo 90, aun careciendo de sistema de apertura y cierre, se considera muy adecuada para la identificación de organismos epipelágicos en campañas multidisciplinarias, dado que su manejo es sencillo, la maniobra es rápida y es estable durante el arrastre, lo que favorece la optimización del tiempo de trabajo. Para una campaña específica de identificación de capas acústicas asociadas a zooplancton, se recomendaría una red tipo Multinet con sistema de apertura y cierre, una sección mínima de un metro y un sensor de profundidad colocado en su parte superior compatible con la ecosonda científica.

5.4. Composición y distribución de la comunidad zooplanctónica

El grupo taxonómico más abundante en las muestras capturadas por las mallas de 250, 333 y 500 micras fueron los crustáceos, suponiendo en ciertas ocasiones hasta el 95 % de la captura. Las mallas de menor tamaño (250 y 333 μm) estuvieron dominadas por crustáceos pequeños, fundamentalmente cladóceros y diferentes estadios de copépodos. La gran abundancia de cladóceros en las muestras está relacionada con la época del año en la que se realizó el muestreo, pues se trata de un grupo cuya máxima abundancia se registra en los meses estivales (Mafalda *et al.*, 2007; Terbiyik Kurt y Polat, 2015; Calbet *et al.*, 2001; Fernández de Puellas *et al.*, 2007). Los crustáceos, entre los que destacaron los copépodos y las larvas de decápodos, también fueron el grupo dominante en la malla de 500 μm aunque en este caso de mayor tamaño que los capturados por las mallas de 250 y 333 μm .

Los copépodos, tanto grandes como pequeños, en su mayoría pertenecientes al orden Calanoidea, presentaron vesículas oleosas en su interior. Muchos copépodos convierten parte de su ingesta en lípidos y los almacenan dentro de sacos oleosos como reservorios de energía (Lee *et al.*, 2006). Según Zarubín (Zarubin *et al.*, 2014), el contenido en lípidos puede ser un factor determinante en la posición vertical de los copépodos dentro de la zona fótica, aún cuando se trata de áreas consideradas oligotróficas. La composición de los organismos influye en la respuesta acústica que generan al ser insonificados a diferentes frecuencias (Simmonds y MacLennan, 2005). Por este motivo, la acumulación de sustancias oleosas podría causar cambios en la impedancia acústica, e introducir cierta variabilidad en la dispersión del sonido por parte de los copépodos, haciendo que la frecuencia a la que comúnmente son detectados varíe.

El resto de grupos faunísticos presentó una abundancia altamente variable, lo cual estuvo propiciado por el diseño de muestreo, dirigido a la identificación de distintas situaciones acústicas multifrecuencia. Este hecho fue particularmente llamativo en el caso de larvas de peces, cuya abundancia estuvo muy relacionada con la presencia de señal acústica a las frecuencias de 18 y 38 kHz (Fernandes *et al.*, 2006).

El gran aumento interanual en la abundancia de los doliólidos sugiere, teniendo en cuenta el ciclo de vida de este grupo de organismos (Boero *et al.*, 2008; Deibel y Lowen, 2012), que el muestreo se realizó durante un episodio de explosión o "bloom". La respuesta acústica atribuible a los doliólidos sería muy débil dado que pertenecen a la categoría acústica "Fluid-like", aunque su

gran concentración en el medio podría influir en la señal acústica observada.

Cabe destacar que sólo se recogieron tres individuos de medusa adulta en 2013 y dos individuos en 2014, todas ellas de la especie *Pelagia noctiluca*. Las pescas mediante arrastre pelágico para la identificación de peces corroboraron la aparición esporádica de esta especie en el área de estudio. La observación directa indicó que la mayoría de ejemplares se hallaban flotando en la superficie del mar o a unos pocos metros de profundidad. Pudo deducirse que las medusas se encontraron en la zona no visible de la ecosonda y su captura se produjo accidentalmente, en superficie, durante el virado de la red de plancton.

En cuanto a la distribución de organismos inferida de la red bongo 90, la abundancia registrada aumentó de las estaciones orientales a las occidentales. En 2013, la mayor abundancia zooplanctónica se concentró en las inmediaciones de Motril y en las estaciones cercanas a Marbella y Punta Europa. En 2014, la mayor abundancia de zooplancton se concentró en el área comprendida entre Marbella y Punta Europa. Además de registrarse una mayor abundancia en la zona occidental, se detectaron cambios en la comunidad biológica, pasando de una comunidad diversa y heterogénea a otra dominada fundamentalmente por el grupo de los crustáceos. Se constata que las áreas donde se localizaron las mayores densidades acústicas (bahía de Almería, inmediaciones de Motril, bahía de Málaga y desde Estepona a Punta Europa) corresponden a zonas con elevadas densidades de organismos o puntos de gran diversidad. Además, coinciden con zonas de elevada producción primaria (Mercado *et al.*, 2014).

La abundancia zooplanctónica, principalmente de crustáceos, presentó un gradiente de densidad en sentido este-oeste, influenciado por las condiciones oceanográficas del Mar de Alborán. El flujo de agua atlántica (rica en nutrientes) que alcanza el mar de Alborán, tras su paso por el estrecho de Gibraltar, discurre por encima del flujo saliente de agua mediterránea, dada su menor densidad, y constituye el llamado "chorro atlántico". Después, sigue una ruta hacia el este dando lugar a la formación de dos giros anticiclónicos, el giro occidental y el oriental (**Figura 5.2**). Estos giros presentan un carácter estacional, quedando bien desarrollados en los meses estivales (Vargas-Yañez *et al.*, 2002). Por otra parte, los procesos de afloramiento, tanto por influencia de los vientos persistentes de componente NW, como por la posición del frente de la corriente Atlántica (Sarhan *et al.*, 2002; Renault *et al.*, 2012), favorecen la proliferación del zooplancton en las áreas cercanas a Punta Europa y en la bahía de Málaga (Vargas-Yañez *et al.*, 2007). Investigaciones llevadas a cabo en la misma área, registraron el mismo gradiente en el aumento de la abundancia o biomasa del zooplancton del área oriental al occidental del Mar de Alborán y de la costa hacia mar abierto (Camiñas *et al.*, 1983; Sampaño de Souza *et al.*, 2005). Aunque, dichos resultados fueron determinados en base a muestreos con una red malla de 200 y 250 μm , respectivamente.



Figura 5.2: Circulación general en Mar de Alborán.

En cuanto a la distribución de la fracción ictiopláctónica, se observó un gradiente costero-oceánico relacionado con el desarrollo ontogénico, siendo más abundantes los huevos en estaciones costeras y más frecuentes las larvas en estaciones alejadas de la costa, lo cual pudo ser debido a que la dispersión larvaria está fuertemente influenciada por factores oceanográficos (García La Fuente *et al.*, 2002; Sabatés *et al.*, 2007). En este caso, el principal factor de deriva podría estar relacionado con la dirección del viento. Según los datos de puertos del estado (www.puertos.es), el viento durante la época en la que se recogieron las muestras provino principalmente del noroeste, lo cual implicaría un desplazamiento de las corrientes superficiales hacia mar abierto, mediante el cual se explicaría el gradiente ictioplanctónico observado.

5.4.1. Relaciones tróficas entre la comunidad zooplanctónica

Los crustáceos pequeños (cladóceros y copépodos) son el nexo entre el fitoplancton (productores primarios) y los peces pelágicos (consumidores secundarios o terciarios) dentro de la cadena trófica (Mauchline *et al.*, 1998; Costalago *et al.*, 2012; Costalago y Palomera, 2014; Peterson y Ausubel, 1984; Santic *et al.*, 2013).

La caracterización de la comunidad zooplanctónica mediante el uso de diferentes tamaños de malla, reveló relaciones tróficas entre las diferentes fracciones de tamaños capturadas. Al interpretar el análisis de la correlación múltiple entre grupos faunísticos y muestreadores desde un punto de vista integrado, se pudieron establecer relaciones del tipo predador-presa dentro de la comunidad zooplanctónica presente en el área de estudio. La cantidad de sifonóforos, quetognatos y larvas de peces (organismos depredadores) capturada por la red de mayor tamaño, estuvo muy relacionada con crustáceos pequeños y apendicularias (presas) capturadas por las redes de tamaño de malla más pequeño.

Los resultados obtenidos concuerdan con los estudios específicos sobre alimentación realizados por otros autores, los cuales demostraron que los crustáceos pequeños, especialmente dife-

rentes estadios de copépodos, constituyen la principal fuente de alimento de las larvas de peces (Sánchez-Velasco, 1998; Calbet *et al.*, 2001), de los quetognatos (Pearre, 1980; Saito y Kiorboe, 2001) y de los sifonóforos de la clase Calycophora (Purcell, 1981).

5.5. Fitoplancton y condiciones ambientales

Los valores superficiales de temperatura y salinidad del agua del mar mostraron una variación longitudinal, encontrándose los valores más bajos de temperatura y de salinidad en las estaciones de CTD situadas entre Punta Europa y Estepona, lo cual se relaciona con el transporte de las aguas frías por la corriente Atlántica. Las bajas temperaturas en el sector más occidental del Mar de Alborán y en la bahía de Málaga, son consistentes con los máximos de clorofila que se observan en las mismas localizaciones, lo que indica el afloramiento de aguas profundas más frías y ricas en nutrientes (Vargas-Yáñez *et al.*, 2007). Los datos de distribución espacial de clorofila-a obtenidos en base a las mediciones del sensor MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer), emplazado a bordo del satélite TERRA y AQUA de la NASA, proporcionados por la consejería de Medioambiente y Ordenación de Territorio de la junta de Andalucía, confirman el gradiente de clorofila-a detectado en base a las estaciones discretas realizadas mediante CTD para los dos años estudiados (Figura 5.3).

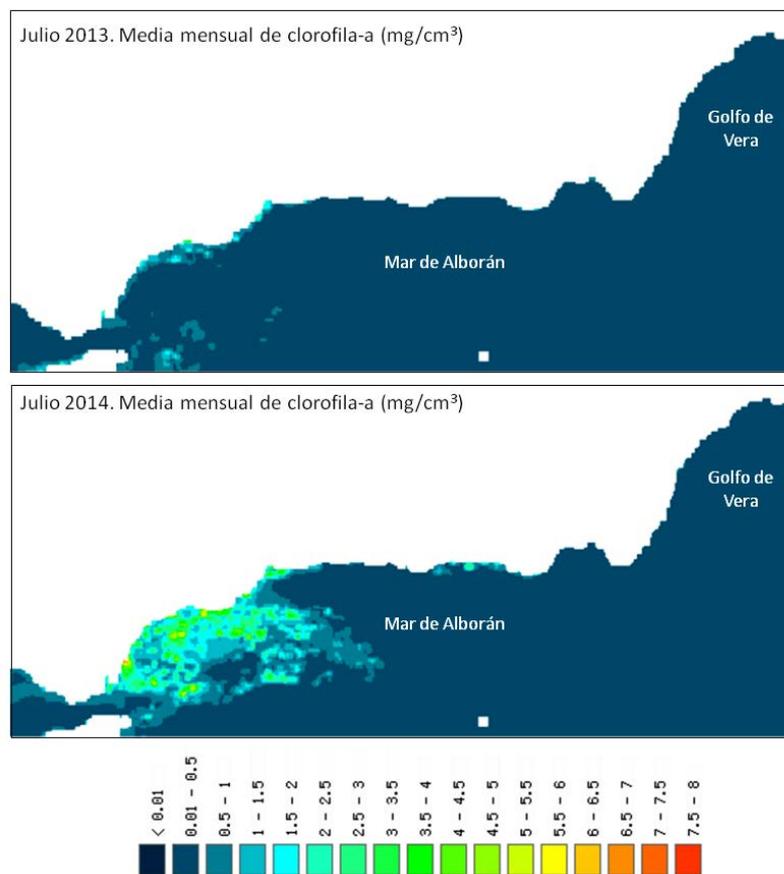
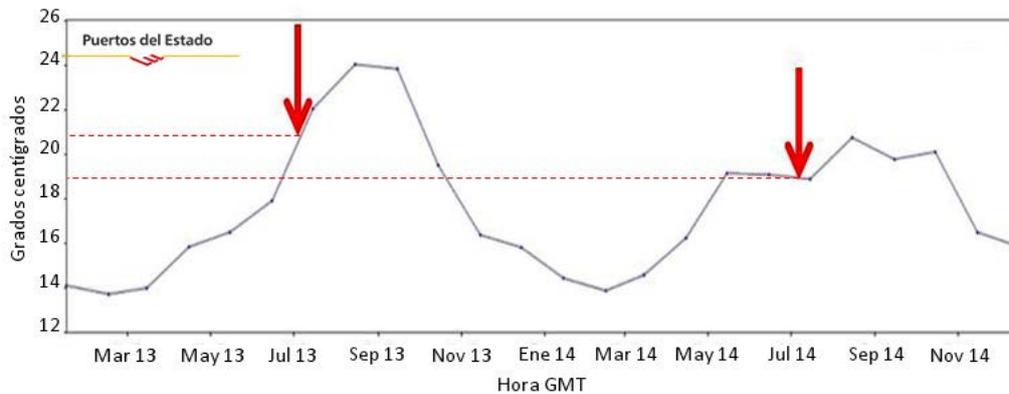


Figura 5.3: Datos satélite de clorofila-a correspondientes al mes de julio para los años 2013 y 2014. www.juntadeandalucia.es.

La temperatura superficial del mar registrada en los años 2013 y 2014 mostró un descenso interanual de dos grados centígrados. Las altas temperaturas alcanzadas en 2013 y la baja intensidad del viento, propiciaron una fuerte estratificación de la columna de agua en 2013. La base de datos históricos de puertos del estado (www.puertos.es), constató que la boya de Málaga registró en julio de 2013 una temperatura media mensual muy superior a la registrada en 2014 (**Figura 5.4**).



La estratificación de la columna de agua influye en la distribución vertical de los organismos (Margalef, 1985). La capa de plancton detectada acústicamente se situó a una mayor profundidad en 2013 que en 2014, hecho atribuido al mayor espesor de la capa de mezcla registrado en 2013. En el área de estudio se confirma, durante la época estival, que la capa de mezcla constituye el límite superior para la distribución vertical del zooplancton.

Figura 5.4: Temperatura media mensual registrada por la boya de Málaga desde enero de 2013 a diciembre de 2014. www.puertos.es.

La dispersión acústica por parte de la comunidad fitoplanctónica, sería detectada en el rango de frecuencias de 10 a 30 kHz en el caso de que los organismos contuvieran cavidades de aire en su interior, ya que acústicamente se comportarían como organismos de la clase "Gas-bearing" (Selivanovsky *et al.*, 1996). En el área de estudio, puesto que no se ha evidenciado ninguna señal acústica singular a la profundidad del máximo de fluorescencia, se deduce que los organismos formadores de la comunidad fitoplanctónica se comportan acústicamente como organismos del tipo "Fluid-like", y no son detectados en el rango de frecuencias empleadas. Por tanto, para estudios de distribución de fitoplancton es más adecuado y más habitual el uso de datos provenientes de sensores de fluorescencia (Benoit-Bird *et al.*, 2013; Benoit-Bird y McManus, 2014; Lebourges-Dhaussy *et al.*, 2014).

5.6. Cambios en la comunidad zooplanctónica detectados acústicamente sobre la plataforma continental

5.6.1. Zona costera

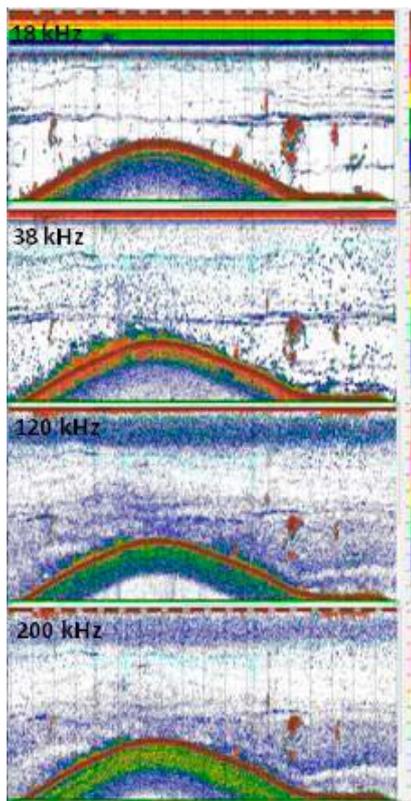


Figura 5.5: Ecograma a múltiples frecuencias de la estación 13.5 de 2013, perteneciente al patrón acústico global 1. Año: 2013. Profundidad: 25-37m

El patrón acústico detectado en las zonas costeras del Golfo de Vera y el Mar de Alborán, se caracterizó por presentar la mayor respuesta acústica en la frecuencia de 120 kHz (patrón global número 1, **Figura 5.5**). La identificación mediante redes de plancton confirmó que, la comunidad zooplanctónica asociada a este patrón está compuesta principalmente por organismos pertenecientes a la categoría acústica "Fluid-like", principalmente crustáceos pequeños. Por tanto, se deduce que la frecuencia de 120 kHz es adecuada para el estudio de la distribución de los crustáceos en el área de estudio, siempre que sea la de mayor respuesta acústica.

Los resultados obtenidos coinciden con los publicados por otros autores, confirmándose que cuando la diferencia entre la energía acústica registrada a las frecuencias de 120 y 38 kHz ($s_v(120) - s_v(38)$) resulta positiva, es decir los valores registrados en la frecuencia de 120 kHz superan los registrados por la frecuencia de 38 kHz, los ecotrazos pueden ser asociados a la presencia de crustáceos, fundamentalmente copépodos o kril (Madueira *et al.*, 1993; Mitson *et al.*, 1996; Fernandes *et al.*, 2006; Ballon *et al.*, 2011; Lezama-Ochoa *et al.*, 2011; Sato *et al.*, 2015). Las frecuencias de 120 y 200 kHz detectan eficazmente copépodos y otros crustáceos (Muntu, 2003). Cuando la comunidad zooplanctónica está constituida íntegramente por crustáceos, los datos de densidad acústica recogidos a las frecuencias de 120 y 200 kHz pueden ser usados como indicadores de la producción secundaria por parte del zooplancton (Benoit-Bird *et al.*, 2010; Moline *et al.*, 2010; Benoit-Bird and McManus, 2014).

El análisis de las muestras biológicas constató que el 85% de los copépodos capturados presentaron acúmulos de sustancias oleosas en su interior. El almacenamiento de aceites afecta a la flotabilidad de los organismos, y dado que los lípidos son menos densos que el agua de mar (Lee *et al.*, 2006; Zarubín *et al.*, 2014) la impedancia acústica aumenta, lo que constituye una fuente de variabilidad en la respuesta acústica observada. Este hecho explicaría los datos obtenidos en 2013 en la zona costera, donde la respuesta acústica detectada por la frecuencia de 70 kHz, superó la detectada por la frecuencia de 120 kHz. Stanton (Stanton *et*

al., 1987) examinó la respuesta acústica de los organismos en la frecuencia de 70 kHz, concluyendo que aunque los crustáceos se ajustan bien al modelo de dispersión a esta frecuencia, en zonas donde la comunidad es diversa hay que actuar con cautela en la interpretación de los registros acústicos.

5.6.2. Zona intermedia

La distancia a la costa, relacionada con la profundidad del fondo, constituyó un factor de variación en la respuesta acústica observada a múltiples frecuencias. Esta variación se tradujo en un cambio en la composición faunística del zooplancton.

El patrón acústico detectado en las zonas intermedias de la plataforma continental se caracterizó por presentar la mayor respuesta acústica en la frecuencia de 38 kHz (patrón acústico global número 2, **Figura 5.6**). Esta situación acústica ha sido clasificada por otros autores como "blue noise" (Ballón *et al.*, 2011) u "otros blancos" (Lezama-Ochoa *et al.*, 2012) cuando la diferencia entre la energía acústica registrada en las frecuencias de 120 y 38 kHz ($s_v(120) - s_v(38)$) resulta negativa, y ha sido asociada con organismos zooplanctónicos que no son peces adultos ni crustáceos. La identificación biológica de los registros acústicos demostró que la comunidad zooplanctónica es de composición heterogénea. A diferencia de las zonas costeras, en las zonas intermedias aparecen representantes de las tres categorías acústicas: "Fluid-like" (crustáceos, apendicularias, quetognatos y sifonóforos), "Elastic-shelled" (heterópodos) y "Gas-bearing" (Larvas de peces).

Cuando se trata de comunidades mixtas formadas por múltiples grupos taxonómicos o especies con diferentes características anatómicas, es complicado atribuir la señal acústica a un sólo grupo taxonómico (Stanton *et al.*, 1987). Aún así, el grupo faunístico responsable de la señal acústica con mayor probabilidad serían las larvas de peces, pues contienen aire en su interior (Mair *et al.*, 2005; Multu, 2007; Warren y Wiebe, 2008; Benoit-Bird *et al.*, 2013). Las larvas de peces al desarrollar la vejiga natatoria se convierten en los blancos acústicos dominantes, enmascarando al resto (Trenkel y Berger, 2013), además, dominan la señal acústica a todas las frecuencias, por lo que en presencia de larvas de peces la respuesta acústica en las frecuencias de 120 y 200 kHz no puede ser empleada para inferir la abundancia, ni la distribución del macroplankton asociado a crustáceos.

Otros organismos zooplanctónicos, diferentes de las larvas de peces, forman agregaciones detectables en la frecuencia de 38 kHz. En el Mar Balear, la capa epipelágica de zooplancton (hasta 200 m) detectada en verano, estuvo compuesta únicamente por medusas de la especie *Pelagia noctiluca* (Peña *et al.*, 2014). En el Mar de Alborán, las medusas fueron muy escasas y presumiblemente se localizaron en la zona no visible de la ecosonda científica, por lo que no pudo asumirse que tomaran partido en la señal acústica observada.

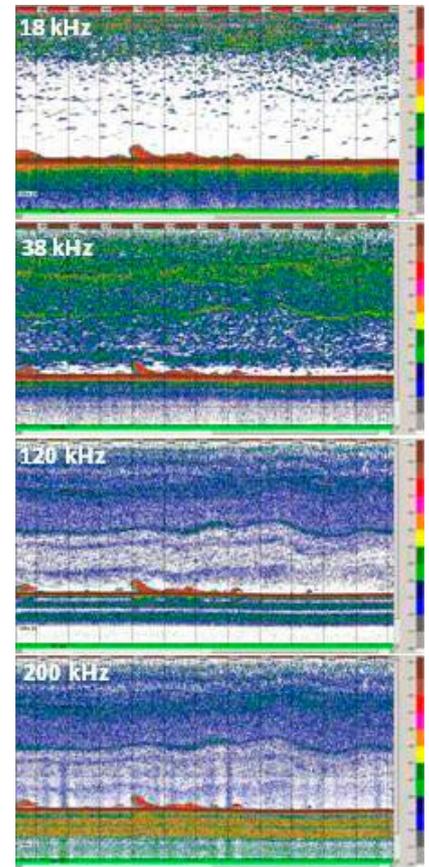


Figura 5.6: Ecograma a múltiples frecuencias de la estación 13.6 de 2013, perteneciente al patrón acústico global 2. Año: 2013. Profundidad: 87 m.

La concentración masiva de especies de tunicados también está relacionada con una fuerte señal acústica a bajas frecuencias, la salpa *lasis zonaria* forma grandes agregaciones que son detectadas a la frecuencia de 38 kHz (Alvarez-Colombo *et al.*, 2003), otras salpas parecen ser las responsables de la señal acústica detectada a la frecuencia de 43 kHz (Warren y Wiebe, 2008). En el área de estudio, los tunicados capturados pertenecieron a las clases doliólidos y apendicularias, no apareciendo especies de salpas. En 2014, se asistió a un episodio de "bloom" de doliólidos, y que éste no fuera detectado por las frecuencias empleadas sugiere que los doliólidos son blancos acústicos más débiles que las salpas. Las apendicularias sin embargo, constituyen un grupo de organismos susceptibles de ser detectados acústicamente.

Dada la variedad de organismos con capacidad de generar señal en la frecuencia de 38 kHz, para hacer una correcta asociación entre registros acústicos y composición biológica, es necesario realizar pescas de identificación o verificación.

5.6.3. Zona profunda

En la zona profunda de la plataforma continental, se detectaron ecotrazos cuyo pico de máxima resonancia coincidió con la frecuencia de 18 kHz (patrón acústico global número 3, **Figura 5.7**). En este caso, por la profundidad a la que se tomaron las muestras y por las características acústicas de la capa, no se pudo asumir que las muestras correspondiesen a la capa epipelágica, sino a una capa mesopelágica. La capa de dispersión acústica mesopelágica suele estar situada durante el día a una mayor profundidad, y no sobre la plataforma continental (Peña *et al.*, 2014). La capa de peces mesopelágicos migradores que se localiza durante el día a 200 m (Godo *et al.*, 2009), podría ascender por el talud continental del Mar de Alborán hasta situarse sobre la plataforma dada su acusada pendiente.

Las muestras biológicas determinaron que las larvas recogidas en estas estaciones pertenecieron a agrupaciones de carácter oceánico (Mafalda *et al.*, 2008) de peces mesopelágicos, de mayor talla que las muestreadas en el resto de las estaciones. Pescas de verificación con la red de arrastre pelágico confirmaron la presencia de adultos de *Maurolicus muelleri*. Por lo que, la mayor respuesta en la frecuencia de 18 kHz se debió a un mayor tamaño de los organismos, demostrándose que organismos con vejigas natatorias responden mejor en la frecuencia de 18 que en la 38 kHz, a partir de una determinada talla (Fernandes *et al.*, 2006).

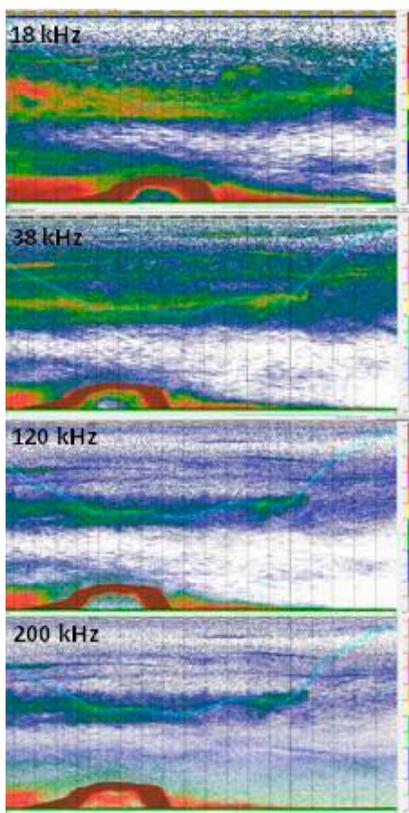


Figura 5.7: Ecograma a múltiples frecuencias de la estación 13.2 de 2013, perteneciente al patrón acústico global 3. Año: 2013. Profundidad: 200 m.

5.7. Organismos detectados por la ecosonda científica

Esta tesis ha demostrado que no todos los organismos que componen la comunidad zooplanctónica del Golfo de Vera y el Mar de Alborán, son detectables a las frecuencias comúnmente empleadas en la evaluación de peces. Solo aquellos organismos que cumplieron con el principio de linealidad (Foote, 1983) son detectados por la ecosonda científica. Los resultados obtenidos son coherentes con los encontrados en la bibliografía referente a la clasificación acústica de los organismos (Fernandes *et al.*, 2006). Los organismos que poseen vesículas de aire en su interior, superan la energía acústica reflejada por cualquier otra categoría de blancos en el rango de frecuencias de 18 a 200 kHz. El tamaño de la vesícula de aire condiciona la frecuencia a la que se detectará la mayor respuesta acústica, de esta manera las burbujas de aire de mayor tamaño desplazan la frecuencia de máxima respuesta de 38 a 18 kHz. En ausencia de organismos como larvas de peces, la señal acústica aumenta con la frecuencia, siendo indicativo de una comunidad compuesta por crustáceos. El tamaño de los crustáceos determina el rango de frecuencias a las que son detectados, así los crustáceos pequeños, como copépodos, sólo serán detectados en las frecuencias de 120 y 200 kHz al aplicar un umbral de visualización de -80 dB (**Figura 5.8**). Se deduce por tanto que los organismos detectados por la ecosonda científica serán las larvas de peces a las frecuencias de 18 y 38 kHz y los crustáceos grandes a las frecuencias de 120 y 200 kHz.

La energía acústica estimada en base a la aplicación de modelos de dispersión teóricos se ajustó adecuadamente a la observada, debido principalmente a la correcta elección del muestreador. La red de plancton bongo 90 equipada con la malla de 500 μm , capturó eficazmente los principales organismos susceptibles de generar la señal acústica observada, larvas de peces y crustáceos grandes.

Las discrepancias entre los valores observados y estimados pudieron estar causadas, principalmente, por la elección de las constantes necesarias para la aplicación de los modelos teóricos. Éstas no fueron específicas del área de estudio debido a la ausencia de trabajos de este tipo en el Mediterráneo. Los trabajos relativos a la determinación de los contrastes de densidad entre los organismos y el medio, indican que para determinar con exactitud estos parámetros es necesario una investigación exhaustiva sobre las variaciones estacionales, espaciales y los cambios biológicos que se producen en los organismos a lo largo de su ontogenia (Chu y Wiebe, 2005). Las mediciones de estos parámetros resultan muy variables entre diferentes regiones, por lo que la incertidumbre en la aplicación de modelos se vería reducida si los valores fueran específicos del lugar que se estudia y de cada taxón (Smith *et al.*, 2010).

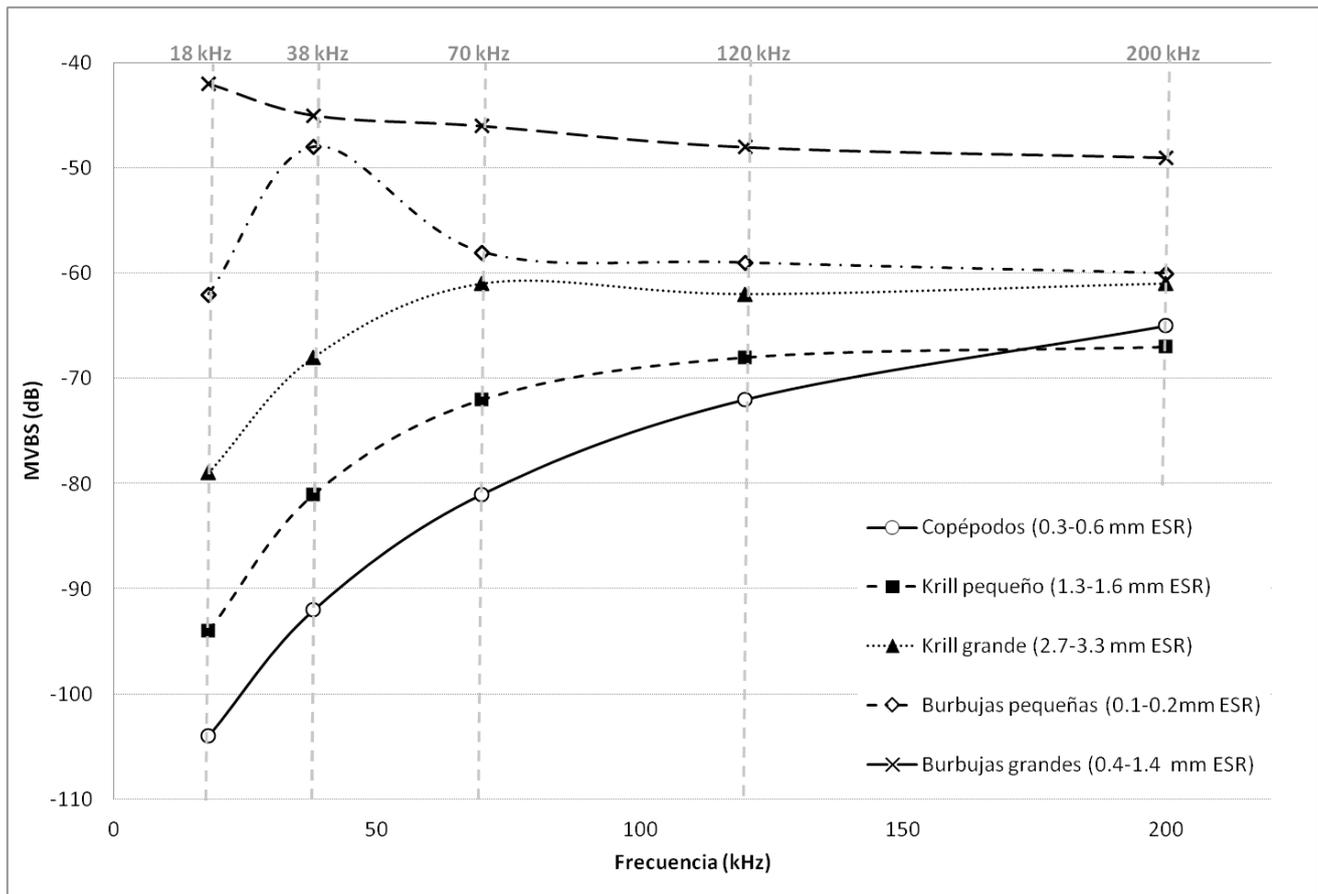


Figura 5.8: Perfiles de dispersión acústica identificados bajo el proyecto SIMFAMI. (Parcialmente rediseñado de Fernandes *et al.*, 2006, fig.9.29)

La aplicación de modelos de dispersión acústica demostró que en poblaciones zooplanctónicas mixtas, un solo grupo faunístico no domina la señal acústica a todas las frecuencias y que aunque un grupo faunístico presente una gran concentración en el medio, si no es eficiente reflejando sonido a las frecuencias a las que son insonificados, no será detectado por la ecosonda científica (Lavery *et al.*, 2007). Por otra parte, aunque un grupo faunístico sea detectable acústicamente a las frecuencias empleadas, como por ejemplo crustáceos grandes, cuando se encuentran en el medio junto a con blancos con una mayor capacidad de dispersar el sonido, como las larvas de peces, verán enmascarada su señal acústica. Cuando se trata de poblaciones mixtas, los organismos que reflejan una mayor cantidad de sonido estarán sobrerrepresentados en las detecciones acústicas, mientras que los organismos que reflejan una menor cantidad de sonido estarán infrarrepresentados (Korneliussen y Ona, 2003).

5.8. Propuestas para el futuro

El cambio de paradigma en la gestión de stocks de peces explotables, pasa por integrar todos los elementos que componen el ecosistema (FAO, 2008), y en este sentido, las campañas de evaluación acústica constituyen plataformas esenciales para alcanzar este fin.

En esta tesis, se ha llevado a cabo el estudio en profundidad de la comunidad planctónica de manera simultánea a la evaluación de peces pelágicos ya consolidada, determinándose los principales organismos susceptibles de ser detectados por la ecosonda científica a las frecuencias de 18, 38, 70, 120 y 200 kHz, sobre la plataforma continental del Golfo de Vera y el Mar de Alborán. Para ello, se ha desarrollado y establecido el método más adecuado para el muestreo biológico y para el tratamiento de los datos acústicos.

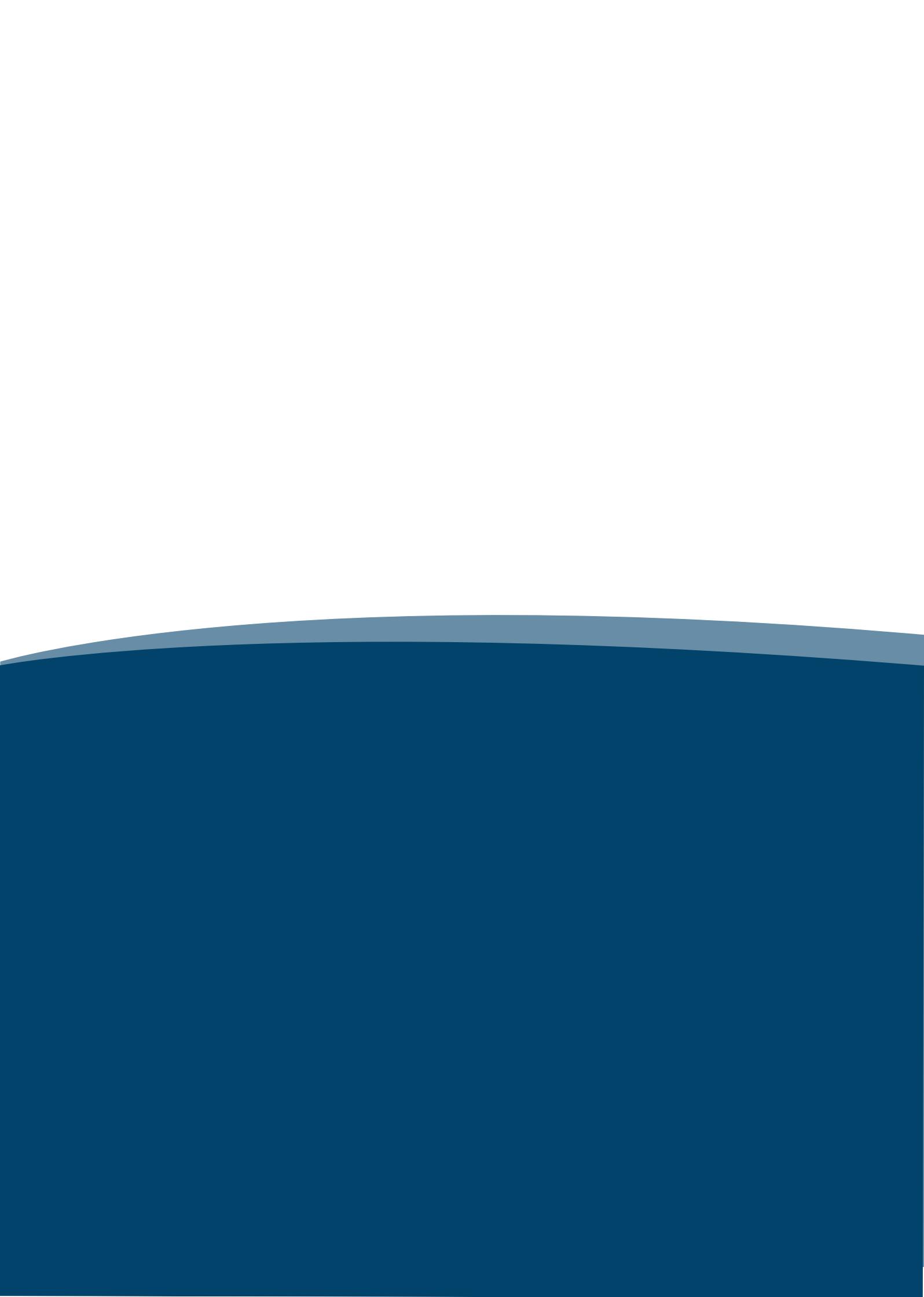
Como resultado, los principales eslabones de la cadena trófica pelágica del Golfo de Vera y del Mar de Alborán: fitoplancton, zooplancton, peces pelágicos y depredadores superiores han sido identificados, haciendo posible el desarrollo de futuros proyectos para el estudio del ecosistema pelágico en su conjunto. Asimismo, esta metodología puede replicarse a lo largo del Mediterráneo español, área que comprende la campaña MEDIAS, pudiéndose detectar cambios espaciales y/o temporales en las distribuciones de las comunidades pelágicas. Además, el grupo de Acústica del Centro Oceanográfico de Baleares cuenta con una amplia serie de datos acústicos históricos que puede volver a ser analizada en términos ecosistémicos.

Una de las principales diferencias entre la acústica pesquera y planctónica es el tiempo necesario para el análisis de la muestra biológica que identifica o verifica los registros acústicos. En el caso de los peces, el muestreo de identificación y biológico, es relativamente ágil y sencillo, y se lleva a cabo a bordo del buque oceanográfico, siempre que se cuente con un equipo de pesca formado por un número de personas suficientes y expertas, mientras que el análisis de las muestras de zooplancton es laborioso, dilatado en el tiempo y se necesita material especializado (campana de extracción de gases, estereomicroscopios, cámaras de fotos especiales, sistemas de recogida de residuos...) y personal taxónomo experimentado. El tiempo de análisis de las muestras zooplanctónicas podría ser reducido mediante el uso de sistemas de conteo automáticos basados en el escaneado de los organismos, como por ejemplo el sistema ZooScan (Gorsky *et al.*, 2010). Este tipo de sistemas, una vez calibrados, proporcionan datos tanto de la abundancia como de las dimensiones de los organismos planctónicos. Por otra parte, la comunidad fito y zooplanctónica podría ser analizada *in situ* por medio de perfiladores submarinos como el "underwater vision profiler 5" (Picherall *et al.*, 2010). Finalmente, en el caso de continuar empleando redes de plancton, sería muy recomendable que éstas estuvieran provistas de sis-

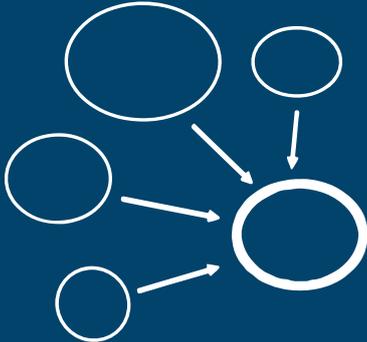
temas de apertura y cierre para que no se produzca ningún tipo de mezcla entre comunidades y de flujómetros para determinar el volumen filtrado de una manera más exacta. En todo caso, en vista de los resultados obtenidos en esta tesis, se recomendaría que la malla con la que se armen las redes sea de un tamaño de malla de 500 micras.

La tecnología acústica aplicada al estudio del medio pelágico y a la evaluación de peces está en continua evolución (Chu, 2011). La adquisición y el uso de más frecuencias permitiría realizar estudios sobre otro tipo de organismos, por ejemplo la frecuencia de 333 kHz permitiría el estudio más profundo de organismos pertenecientes a la clase acústica "fluid like" (Fernandes *et al.*, 2006) de pequeño tamaño como copépodos. El uso de ecosondas de banda ancha, como la ecosonda científica EK80 (Simrad®), proporcionaría una mayor información sobre los organismos presentes en la columna de agua y ampliaría los conocimientos actuales sobre las propiedades acústicas de los organismos y su comportamiento en el medio. Otros sistemas acústicos como ecosondas multihaz (ME70) o sonares (MS70) también podrían ser empleados complementariamente para avanzar en el conocimiento de los organismos presentes en la columna de agua y sus relaciones.

Las líneas de investigación futuras son múltiples y de gran relevancia para la comunidad científica, dado que una de las características de los métodos acústicos es su carácter multidisciplinar. Por este motivo, los datos referentes a diferentes niveles tróficos, recogidos durante las campañas de evaluación acústica, pueden nutrir a otras disciplinas, contribuyendo al avance de la investigación marina en su conjunto.



CAPÍTULO 6
Conclusiones

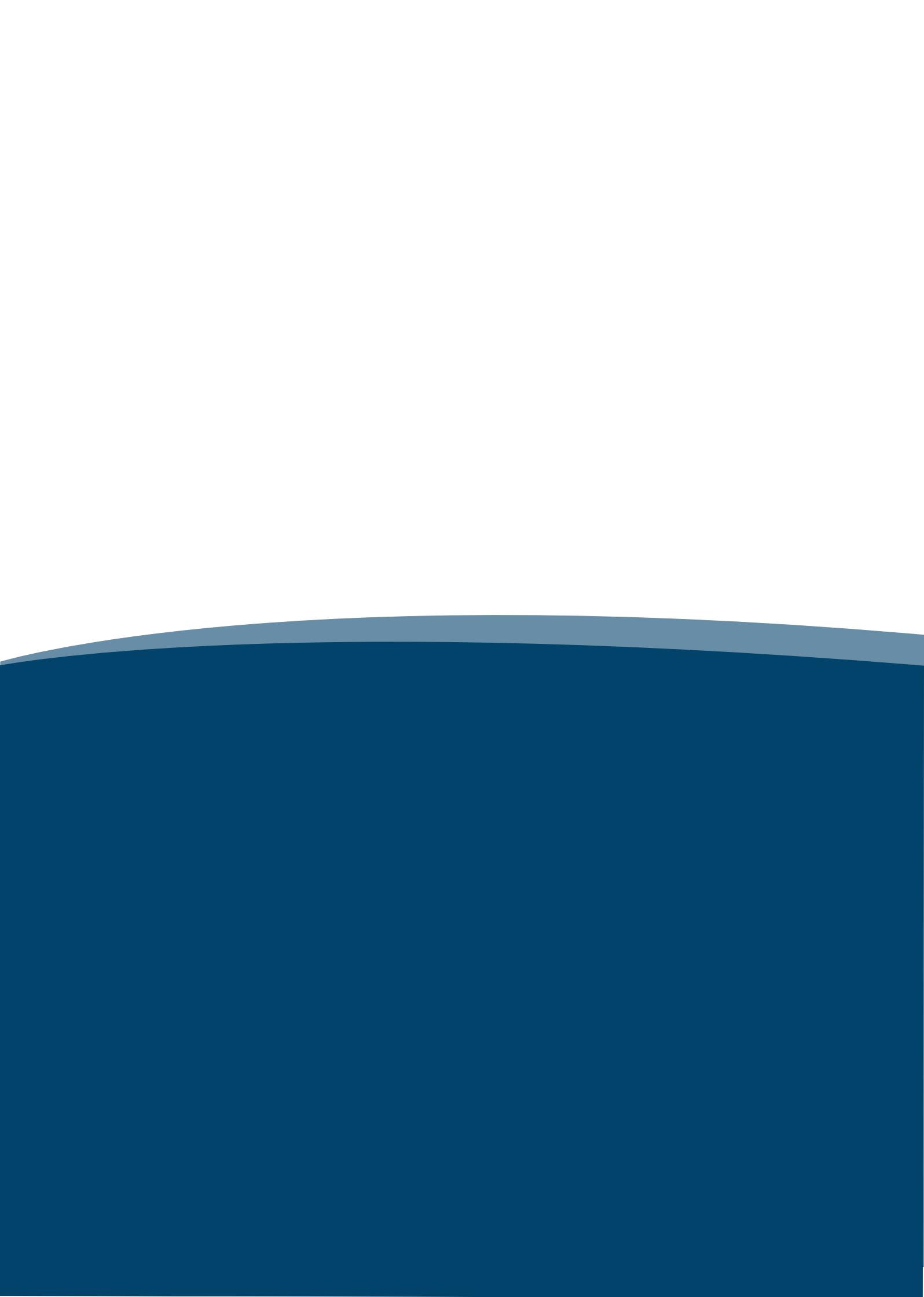


1. La capa epipelágica de dispersión acústica presente en la plataforma continental del Golfo de Vera y del Mar de Alborán durante la época estival se compuso de organismos mesozooplanctónicos, quedando descartada la detección acústica de la comunidad fitoplanctónica, siendo la termoclina el principal factor físico que marcó su distribución vertical en las horas diurnas.
2. La distribución espacial de la densidad acústica asociada a la capa epipelágica reveló cuatro zonas de alta productividad secundaria: Bahía de Almería, inmediaciones de Adra, desde Motril hasta la bahía de Málaga y desde Estepona a Punta Europa.
3. La comunidad zooplanctónica presente en el área de estudio presentó una composición heterogénea, constituida por organismos pertenecientes a diferentes niveles tróficos entre los que existieron relaciones del tipo predador-presa. Los organismos zooplanctónicos fueron agrupados en 9 grupos faunísticos acorde a su clasificación taxonómica: Crustáceos pequeños que englobó a cladóceros, diferentes estadios de copépodos de tamaño menor a 1.2 mm y ostrácodos, Crustáceos grandes que incluyó principalmente diferentes estadios de copépodos de tamaño mayor a 1.2 mm, larvas de decápodos y anfípodos, Apendicularias, Doliólidos, Sifonóforos, Que-tognatos, Heterópodos, Huevos y Larvas de peces.
4. Los grupos faunísticos más abundantes en las muestras biológicas recogidas por las mallas de 250 y 333 μm fueron los crustáceos pequeños, seguidos de los doliólidos y las apen-dicularias. La abundancia recogida por estas mallas reflejó un aumento interanual en la abundancia total, un gradiente Este-Oeste en las tallas de los crustáceos, siendo mayores los individuos capturados en las estaciones occidentales y un episodio de "bloom" de doliólidos en 2014.
5. El grupo faunístico más abundante en las muestras biológicas recogidas por la malla de 500 μm fueron los crustáceos grandes. Su abundancia mostró un aumento interanual y dos tipos de gradientes, uno Este-Oeste, presentando una mayor abundancia las estaciones situadas en la parte occidental del área de estudio y otro costero-oceánico, apareciendo individuos más pequeños en las estaciones más costeras. Además, se detectó un gradiente costero-oceánico en los componentes ictioplanctónicos, presumiblemente debido a la deriva de las larvas hacia aguas más profundas por efecto del viento.
6. El grupo faunístico más abundante recogido por la malla de 2000 μm presentó una variación interanual, en 2013 fueron los sifonóforos y en 2014 los crustáceos grandes. Esta malla capturó el menor número de organismos y la composición de su captura no pudo considerarse como representativa de la comunidad zooplanctónica, aunque resultó muy útil para

detectar organismos de gran tamaño poco abundantes en la columna de agua.

7. En base a la respuesta acústica multifrecuencia se distinguieron tres comunidades que se alternaron a lo largo de la plataforma continental, desde costa hasta el inicio del talud continental:
 - a. En la zona costera, hasta 40 m de fondo, la mayor respuesta acústica se detectó en la frecuencia de 70 kHz, y en ausencia de ésta en la frecuencia de 120 kHz, y se asoció a la presencia de crustáceos pequeños, principalmente copépodos y cladóceros.
 - b. En las zonas intermedias y profundas, de 40 a 200 m de fondo, la mayor respuesta acústica se detectó en la frecuencia de 38 kHz y se debió a la presencia de una comunidad zooplanctónica mixta compuesta por diferentes proporciones de los nueve grupos faunísticos considerados.
 - c. Al final de la plataforma, se detectó una capa mesopelágica cuya máxima respuesta acústica se registró en la frecuencia de 18 kHz y se asoció con larvas de peces mesopelágicos, mayoritariamente de la especie *Maurolicus muelleri*.
8. Los grupos faunísticos que cumplieron con el principio de linealidad fueron:
 - a. Las apendicularias capturadas por la malla de 333 μm en las frecuencias de 38 y 120 kHz.
 - b. Las larvas de peces capturadas con la malla de 500 μm a las frecuencias de 18 y 38 kHz.
 - c. Los crustáceos grandes capturados con la malla de 500 μm a la frecuencia de 200 kHz.
9. Las larvas de peces, aunque no contribuyeron en gran proporción a la abundancia total, dominaron la dispersión acústica en un amplio rango de frecuencias debido a su gran capacidad para dispersar sonido, dado que contienen aire en su vejiga natatoria. Por el contrario, organismos poco eficientes dispersando sonido, como crustáceos grandes, aunque fueron muy abundantes en las muestras, su contribución a la señal acústica sólo fue evidente a altas frecuencias y su señal acústica quedó enmascarada siempre que en el medio se hallaron larvas de peces.
10. La comparación entre los datos MVBS estimados, mediante la aplicación de modelos teóricos de dispersión construidos con las variables biológicas determinadas en las muestras recogidas, y los datos de MVBS reales, observados sobre los ecogramas correspondientes a las estaciones de muestreo, mostró una tendencia a la sobreestimación, resultando mayores los valores estimados debido a la contribución de las larvas de peces.

11. En base a los resultados obtenidos en esta tesis, se determinó que el sistema de muestreo más adecuado para la identificación biológica de los organismos detectados por la ecosonda científica a las frecuencias empleadas, que componen la capa epipelágica de dispersión acústica presente en el área de estudio, fue la red Bongo 90 provista de una malla de 500 μm .
12. La interacción de la capa zooplanctónica con la comunidad de peces pelágicos en la frecuencia de evaluación (38 kHz) fue detectada eficazmente mediante el índice de co-ocurrencia desarrollado en el marco de este estudio. Este índice reveló que la mayoría de los cardúmenes situados entre 50 y 75 m de profundidad (el 69% en 2013 y el 54% en 2014) se vieron enmascarados por la capa zooplanctónica.
13. La capa epipelágica fue eliminada de la frecuencia de evaluación empleando una máscara o ecograma virtual, debido a que la energía acústica que dispersó en la frecuencia de 38 kHz resultó ser una combinación lineal del resto de frecuencias.
14. La comunidad zooplanctónica y su respuesta acústica presentó diferencias interanuales en el área de estudio que se tradujeron en un algoritmo diferente para la construcción del ecograma virtual. Por esto, para optimizar el proceso de interpretación de ecogramas los algoritmos deben ser construidos en base a las características específicas de cada momento y lugar.



Bibliografía



A

Álvarez Colombo, G., Mianzan, H. and Madirolas, A. (2003). Acoustic characterization of gelatinous plankton aggregations: four case studies from the Argentine continental shelf. *ICES Journal of Marine Science*, 60: 650-657

Axenrot, T., Ogonowski, M., Sandstrom, A., and Didrikas, T. (2009). Multifrequency discrimination of fish and mysids. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 1106-1110

B

Ballón, M., Bertrand, A., Lebourges-Dhaussy, A., Gutiérrez, M., Ayón, P., Grados, D. and Gerlotto, F. (2011). Is there enough zooplankton to feed forage fish population off Peru? An acoustic (positive) answer. *Progress in Oceanography*, 90: 360-381

Begon, M., Harper, J.L. and Townsend, C.R. (1998). *Ecología. Individuos, poblaciones y comunidades* (3ª Ed.). Barcelona: Omega

Benoit-Bird, K.J. and McManus, M.A. (2014). A critical time window for organismal interactions in a pelagic ecosystem. *PLoS ONE* 9(5): e97763. doi: 10.1371/ journal.pone.0097763

Benoit-Bird, K.J., Moline, M.A., Waluk, C.M. and Robbins, I.C. (2010). Integrated measurements of acoustical and optical thin layers I: vertical scales of association. *Continental Shelf Research*, 30 (1): 17-28

Benoit-Bird, K.J., Shroyer, E.L. and McManus, M.A. (2013). A critical scale in plankton aggregations across coastal ecosystems. *Geophysical Research Letters*, 40: 3968-3974, doi:10.1002/ grl.50747

Berline, L., Siokou-Frangou, I., Marasović, I., Vidjak, O., Fernández de Puelles, M.L., Mazzocchi, M.G., Assimakopoulou, G., Zervoudaki, S., Umani, S.F., Conversi, A., Garcia-Comas, C., Ibanez, F., Gasparini, S., Stemmann, L. and Gorsky, G. (2012). Intercomparison of six Mediterranean zooplankton time series. *Progress in Oceanography*, 97-100C, 76-91

Bertrand, A., Josse, E., Bach, P. and Dagorn, L. (2003). Acoustics for ecosystem research: lessons and perspectives from a scientific programme focusing on tuna environment relationships. *Aquatic Living Resources*, 16: 197-203

Bertrand, A., Grados, D., Colas, F., Bertrand, S., Capet, X., Chaigneau, A., Vargas, G., Mousseigne, A. and Fablet, R. (2014). Broad impacts of fine-scale dynamics on seascape structure from zooplankton to seabirds. *Nature Communications*, 5: 5239

Boero, F., Bouillon, J., Gravili, C., Miglietta, M.P., Parsons, T. and Piraino, S. (2008). Gelatinous plankton: irregularities rule the world (sometimes). *Marine Ecology Progress Series*, 356: 299-310

- Calbet, A., Garrido, S., Saiz, E., Alcaraz, M. and Duarte, C.M. (2001). Annual zooplankton succession in coastal NW Mediterranean waters: the importance of the smaller size fractions. *Journal of plankton research*, 23(3): 319-331
- Camiñas, J.A. (1983). Datos preliminares sobre la biomasa zooplanctónica en el sector Suroccidental del mar de Alborán. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 1: 1-18
- Christensen, N.L., Bartuska, A.M., Brown, J.H., Carpenter, S. and others. (1996). The report of the Ecological Society of America committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, 6: 665-691
- Chu, D., Stanton, T.K. and Wiebe, P.H. (1992). Frequency dependence of sound backscattering from live individual zooplankton. *ICES Journal of Marine Science*, 49: 97-106
- Chu, D., Foote, K.G., and Stanton, T.K. (1993). Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 kHz and 120 kHz: Comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93: 2985-2988
- Chu, D. (2011). Technology evolution and advances in fisheries acoustics. *Journal of Marine Science and Technology*, 19(3): 245-252
- Chu, D., and Wiebe, P.H. (2005). Measurements of sound-speed and density contrasts of zooplankton in Antarctic waters. *ICES Journal of Marine Science*, 62: 818-831
- Clarke, K.R., Gorley, R.N. (2006). *PRIMER v6: User Manual/Tutorial*. PRIMER-E, Plymouth.
- Clay, C.S. and Medwin, H. (1977). *Acoustical Oceanography: Principles and applications* (1st Ed.). New York: John Wiley & Sons
- Cognetti, G., Sarà, M. and Magazzù, G. (1999). *Biología marina* (1ª Ed.). Bologna: Calderini editore
- Costalago, D., Navarro, J., Álvarez-Calleja, I. and Palomera, I. (2012). Ontogenetic and seasonal changes in the feeding habits and trophic levels of two small pelagic fish species. *Marine Ecology Progress Series*, 460: 169-181
- Costalago, D. and Palomera, I. (2014). Feeding of European pilchard (*Sardina pilchardus*) in the northwestern Mediterranean: from late larvae to adults. *Scientia Marina*, 78 (1): 41-54

D

De Robertis, A. and Higginbottom, I. (2007). A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise. *ICES Journal of Marine Science*, 64: 1282-1291

De Robertis, A., McKelvey, D.R. and Ressler, P.H. (2010). Development and application of an empirical multifrequency method for backscatter classification. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 67: 1459-1474

Deibel D. and Lowen, B. (2011). A review of the life cycles and life-history adaptations of pelagic tunicates to environmental conditions. *ICES Journal of Marine Science*, 69: 358-369

Demer, D.A. and Martin, L.V. (1995). Zooplankton target strength: Volumetric or areal dependence? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (2): 1111-1118

F

FAO (2008). *Fisheries Management 2. The Ecosystem Approach to Fisheries*. FAO Fisheries Technical Guidelines for Responsible Fisheries

Fernandes, P.G., Gerlotto, F., Holliday, D.V., Nakken, O., and Simmonds, E.J. (2002). Acoustic applications in fisheries science: the ICES contribution. *ICES Journal of Marine science*, 215: 483-492

Fernandes, P.G., Korneliussen, R.J., Lebourges-Dhaussy, A., Massé, J., Iglesias, M., Diner, N. and Ona, E. (2006). The SIMFAMI project: Species identification methods from acoustic multifrequency information. Final report to the EC. Q5RS-2001-02054

Fernandez de Puellas, M.L., Alemany, F. and Jansa, J. (2007). Zooplankton time-series in the Balearic Sea (western Mediterranean): variability during the decade 1994-2003. *Progress in Oceanography*, 74: 329-354

Foote, K.G. (1982). Energy in acoustic echoes from fish aggregations. *Fisheries Research*, 1: 129-40

Foote, K.G. (1983). Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73: 1932-1940

Foote, K.G., Knudsen, H.P., Vestnes, G., MacLennan, D.N. and Simmonds, E.J. (1987). Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. *ICES Coop. Res. Rep.* 144, 57 pp.

G

García-Lafuente, J. and Ruiz, J. (2007). The Gulf of Cádiz pelagic ecosystem: A review. *Progress in Oceanography*, 74: 228-251

García-Lafuente, J., García, A., Mazzola, S., Quintanilla, L., Delgado, J., Cuttita, A. and Patti, B. (2002). Hydrographic phenomena influencing early life stages of the Sicilian Channel anchovy. *Fisheries Oceanography*, 11(1): 31-44

García Perez, A. (2005). *Métodos avanzados en estadística aplicada: Métodos robustos y de remuestreo*. (1ª Ed.). Madrid: Universidad nacional de estudios a distancia, Aranzadi, S.A.

Godo, O.R., Handegard, N.O., Browman, H.I., Macaulay, G.J., Kaarvedt, S., Giske, J., Ona, E., Huse, G., and Johnsen, E. (2014). Marine ecosystem acoustics (MEA): quantifying processes in the sea at the spatio-temporal scales on which they occur. *ICES Journal of Marine Science*, 71: 2357-2369. doi:10.1093/icesjms/fsu116

Godo, O.R., Patel, R. and Pedersen, G. (2009). Diel migration and swimbladder resonance of small fish: some implications for analyses of multifrequency echo data. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 1143-1148

Gorsky, G., Ohman, M.D., Picheral, M., Gasparini, S., Stemmann, L., et al. (2010). Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *Journal of Plankton Research*, 32: 285-303

Graham, T.R., Harvey, J.T., Benson, S.R., Renfree, J.S., and Derner, D.A. (2010). The acoustic identification and enumeration of scyphozoan jellyfish, prey for leatherback sea turtles (*Dermochelys coriacea*), off central California. *ICES Journal of Marine Science*, 67: 1739-1748

Greenlaw, C.T. (1979). Acoustical estimation of zooplankton populations. *Limnology and oceanography*, 24(2): 226-242

Harris, R.P., Wiebe, P.H., Lenz, J., Skjoldal, H.R. and Huntley, M. (2000). *ICES Zooplankton Methodology Manual*. San Diego, CA: Academic Press

Holliday, D.V. (1977). The use of swimbladder resonance in the sizing of schooled pelagic fish. *Rapports et procès-verbaux des réunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer* 170, 130-35

Holliday, D. V., Pieper, R.E., and Kleppel, G.S. (1989). Determination of zooplankton size and distribution with multi-frequency acoustic technology. *Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 46: 52-61

H

J

Jech, J.M. and Michaels, W.L. (2006). A multifrequency method to classify and evaluate fisheries acoustics data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63: 2225-2235

K

Kang, M., Furusawa, M., and Miyashita, K. (2002). Effective and accurate use of difference in mean volume backscattering strength to identify fish and plankton. *ICES Journal of Marine Science*, 59: 794-804

Kimura, K. (1929). On the detection of fish-groups by an acoustic method. *Journal of the Imperial Fisheries Institute*, 24: 41-5

Kloser R.J., Ryan T., Sakov P., Williams A., Koslow J.A. (2002) Species identification in deep water using multiple acoustic frequencies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 1065-1077

Korneliussen, R.J. (2000). Measurement and removal of echo integration noise. *ICES Journal of Marine Science*, 57: 1204-1217

Korneliussen, R.J. (2002). Some methods for generation of combined-frequency echograms. *Fisken og Havet*, 10: 1-18

Korneliussen, R.J., and Ona, E. (2003). Synthetic echograms generated from the relative frequency response. *ICES Journal of Marine Science*, 60: 636-640

Korneliussen, R.J., Diner, N., Ona, E. and Fernandes, P.G. (2004). Recommendations for the collection of multi-frequency acoustic data. *ICES CM2004/R*: 36, 15 pp.

Korneliussen, R.J., Diner, N., Ona, E., Berger, L., and Fernandes, P.G. (2008). Proposals for the collection of multifrequency acoustic data. *ICES Journal of Marine Science*, 65: 982-994

Korneliussen, R.J., Heggelund, Y., Eliassen, I.K. and Johansen, G.O. (2009). Acoustic species identification of schooling fish. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 1111-1118

Koslow, J.A. (2009). The role of acoustics in ecosystem-based fishery management. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 966-973

L

Lavery, A.C., Wiebe, P.H., Stanton, T.K., Lawson, G.L., Benfield, M.C. and Copley, N.J. (2007). Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122: 3304-3326

Lebourges-Dhaussy, A., Coetzee, J., Hutchings, L., Roudaut, G., and Nieuwenhuys, C. (2009). Zooplankton spatial distribution along the South African coast studied by multifrequency acoustics, and its relationships with environmental parameters and anchovy distribution. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 1055-1062

Lebourges-Dhaussy, A., Huggett, J., Ockhuis, S., Roudaut, G., Josse, E. and Verheye, H. (2014). Zooplankton size and distribution within mesoscale structures in the Mozambique Channel: A comparative approach using the TAPS acoustic profiler, a multiple net sampler and ZooScan image analysis. *Deep Sea Research II*, 100: 136-152

Lee, R.F., Hagen, W. and Kattner, G. (2006). Lipid storage in marine zooplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 307: 273-306

Lezama-Ochoa, A., Irigoien, X., Chaigneau, A., Quiroz, Z., Lebourges-Dhaussy, A. and Bertrand, A. (2014). Acoustics reveals the presence of a macrozooplankton biocline in the bay of Biscay in response to hydrological conditions and predator-prey relationships. *PLoS ONE* 9(2): e88054. doi:10.1371/journal.pone.0088054

Logerwell, E.A. and Wilson, C.D. (2004). Species discrimination of fish using frequency dependent acoustic backscatter. *ICES Journal of Marine Science*, 61: 1004-1013

Madureira, L.S.P., Ward, P. and Atkinson, A. (1993). Differences in backscattering strength determined at 120 and 38 kHz for three species of Antarctic macroplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 93: 17-24

Mafalda Jr., P., Pérez de Rubín, J. y Sampaio de Souza, C. (2007). Composición y distribución del mesozoopláncton en relación a condiciones oceanográficas en el Golfo de Cádiz, España. *Revista UDO Agrícola*, 7 (1): 274-284

Mafalda Jr., P., Pérez de Rubín, J. y Sampaio de Souza, C. (2008). Relación entre las masas de agua y la composición y distribución de las larvas de peces en el mar de Alborán (Mediterráneo occidental) y estrecho de Gibraltar. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 43(1): 41-50

Mair A.M., Fernandes P.G., Lebourges-Dhaussy A. and Brierley A. (2005). An investigation into the zooplankton composition of a prominent 38-kHz scattering layer in the North Sea. *Journal of Plankton Research*, 27: 623-633

Margalef, R. (1974). *Ecología* (1ª Ed.). Barcelona: Omega



Margalef, R. (1985). *Key Environments: Western Mediterranean*. New York: Pergamon Press. 362 pp.

Martin, L.V., Stanton, T.K., Wiebe, P.H. and Lynch, J.F. (1996). Acoustic classification of zooplankton. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 217–224

Mauchline, J., Blaxter, J.H.S. and Tyler, P.A. (1998). *The Biology of calanoid copepods*. *Advances in Marine Biology*, Vol 33. San Diego, CA: Academic Press. 710 pp.

MacLennan, D.N., Fernandes, P.G., Dalen, J., (2002). A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics, *ICES Journal of Marine Science*, 59: 365–369.

Mercado J.M., Cortes, D., García, A. and Ramírez, T. (2007). Seasonal and inter-annual changes in the planktonic communities of the northwest Alboran Sea (Mediterranean Sea). *Progress in Oceanography*, 74: 273-293

Mercado, J.M., Cortés, D., Gómez, F., León, P., Putzeys, S., Sallés, S. and Yebra, L. (2013). A method based on satellite imagery to evaluate the eutrophication at msfd scale in the Alboran Sea. Paper presented at 40st CIESM Congress

Mitson R.B., Simard Y. and Goss, C. (1996). Use of a two-frequency algorithm to determine size and abundance of plankton in three widely spaced locations. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 209-215

Moline, M.A., Benoit-Bird, K.J., Robbins, I.C., Schroth-Miller, M., Waluk, C.M. and Zelenke, B. (2010). Integrated measurements of acoustical and optical thin layers II: horizontal length scales. *Continental Shelf Research*, 30 (1): 29-38

Mosteiro, A., Fernandes, P.G., Armstrong, F. and Greenstreet S.P.R. (2004). A dual frequency algorithm for the identification of sandeel school echotraces. *ICES CM2004/R*: 12, 13 pp.

Mutlu, E. (2003). Acoustical identification of the concentration layer of a copepod species *Calanus euxinus*. *Marine Biology*, 142: 517-523

Mutlu, E. (2005). A comparison of the contribution of zooplankton and nekton taxa to the near-surface acoustic structure of three Turkish seas. *Marine Ecology*, 26: 17-32

Mutlu, E. (2007). Acoustical scattering layers of two mesozooplanktons as a tool for hydrographic features of the Black Sea *Journal of Applied Biological Sciences* 1 (3): 01-08

Oguz, T., Macías, D., García-Lafuente, J., Pascual, A. and Tintoré, J. (2014). Fueling Plankton Production by a Meandering Frontal Jet: A Case Study for the Alboran Sea (Western Mediterranean). *PLoS ONE* 9(11): e111482. doi:10.1371/journal.pone.0111482

O

Olivar, M.P., Bernal, A., Mollá, B., Peña, M., Balbín, Castellón, A., Miquel, J. and Massutí, E. (2012). Vertical distribution diversity and assemblages of mesopelagic fishes in the Western Mediterranean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*: 53–69

Parrilla, G. y Kinder, T.H. (1987). Oceanografía física del Mar de Alboran. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 4, 133-165

P

Peña, M., Olivar, M.P., Balbín, R., López-Jurado, J.L., Iglesias, M., Miquel, J. and Jech, J.M. (2014). Acoustic detection of mesopelagic fishes in scattering layers of the Balearic Sea (western Mediterranean). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71: 1-12

Pearre Jr., S. (1980). Feeding by Chaetognatha: The relation of prey size to predator size in several species. *Marine Ecology Progress Series*, 3: 125-134

Peterson, W.T. and Ausubel, S.J. (1984). Diets and selective feeding by larvae of Atlantic mackerel *Scomber scombrus* on zooplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 17: 65-75

Picheral M., Guidi L., Stemmann L., Karl D.M., Iddaoud G. and Gorsky G. (2010). The Underwater Vision Profiler 5: An advanced instrument for high spatial resolution studies of particle size spectra and zooplankton. *Limnology And Oceanography-methods*, 8: 462-473.

Purcell, J.E. (1981). Dietary composition and diel feeding patterns of epipelagic siphonophores. *Marine biology*, 65: 83-90

Renault, L., Oguz, T., Pascual, A., Vizoso, G. and Tintore, J. (2012). Surface circulation in the Alborán Sea (western Mediterranean) inferred from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*. 117, C08009, doi: 10.1029/2011JC007659

R

S

Sabatés, A., Olivar, M.P., Salat, J., Palomera, I. and Alemany, F. (2007). Physical and biological processes controlling the distribution of fish larvae in the NW Mediterranean. *Progress in Oceanography*, 74: 355-376

Saito, H. and Koirboe T. (2001). Feeding rates in the chaetognath *Sagitta elegans*: effects of prey size, swimming behavior and small-scale turbulence. *Journal of plankton research*, 23: 1385-1398

Sampaio de Souza, C., Mafalda Jr., P., Sallés, S., Ramirez, T., Cortés, D., Garcia, A., Mercado, J. y Vargas-Yañez, M. (2005). Tendencias estacionales y espaciales en la comunidad mesozooplancónica en una serie temporal plurianual en el noroeste del Mar de Alborán, España. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 40(1): 45-54

Sánchez-Velasco, L. (1998). Diet composition and feeding habits of fish larvae of two co-occurring species (Pisces: Callionymidae and Bothidae) in the North-western Mediterranean. *ICES Journal of Marine Science*, 55: 299-308

Santic M., Rada, B. and Pallaoro, A. (2013). Diet of juveniles Mediterranean horse mackerel, *Trachurus mediterraneus* and horse mackerel, *Trachurus trachurus* (Carangidae), from the eastern central Adriatic. *Cahiers de Biologie Marine*, 54: 41-48

Sarhan, T., García-Lafuente, J., Vargas, M., Vargas, J.M. and Plaza, F. (2000). Upwelling mechanisms in the northwestern Alboran Sea. *Journal of Marine Systems*, 23: 317-331

Sato, M., Horne, J.K., Parker-Stetter, S.L. and Keister, J.E. (2015). Acoustic classification of coexisting taxa in a coastal ecosystem. *Fisheries Research*, 172: 130-136

Selivanovsky, D.A., Stunzhas, P.A., and Didenkulov, I.N. (1996). Acoustical investigation of phytoplankton. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 313-316

Sieburth, J.McN., Smetacek, V. and Lenz, J. (1978). Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography*, 23(6): 1256-1263

Simmonds, E.J., and MacLennan, D.N. (2005). *Fisheries acoustics*. (2nd Ed.). Oxford: Blackwell Science Ltd.

Skjoldal, H.R., Wiebe, P.H., Postel, L., Knutsen, T., Kaartvedt, S. and Sameoto, D.D. (2013). Intercomparison of zooplankton (net) sampling systems: Results from the ICES/GLOBEC seagoing workshop. *Progress in Oceanography*, 108: 1-42

Smith, J.N., Ressler, P.H. and Warren, J.D. (2010). Material properties of Bering Sea zooplankton. *Journal of the Acoustical Society of America*, 128(5): 2664-2680

Stanton, T.K., Chu, D., and Wiebe, P.H. (1996). Acoustic scattering characteristics of several zooplankton groups. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 289-295

Stanton T.K., Chu D. and Wiebe P.H. (1989). Sound scattering by several zooplankton groups. II. Scattering models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103: 236-253

Stanton, T.K. and Chu, D. (2000). Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods. *ICES Journal of Marine Science*, 57: 793-807

Stanton, T.K., Nash, R.D.M., Eastwood, R.L., and Nero, R.W. (1987). A field examination of acoustical scattering from marine organisms at 70 kHz. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 12 (2): 339-348

Terbiyik Kurt, T. and Polat, S. (2015). Zooplankton abundance, biomass, and size structure in the coastal waters of the northeastern Mediterranean Sea. *Turkish Journal of Zoology* 39: 378-387

Trenkel, V.M. and Berger, L. (2013). A fisheries acoustic multi-frequency indicator to inform on large scale spatial patterns of aquatic pelagic ecosystems. *Ecological Indicators*, 30: 72-79

Trenkel, V.M., Ressler, P.H., Jech, M., Giannoulaki, M. and Taylor, C. (2011). Underwater acoustics for ecosystem-based management: state of the science and proposals for ecosystem indicators *Marine Ecology Progress Series*, 442: 285-301

Urlick, R.J. (1983). *Principles of Underwater Sound* (3rd Ed.). New York: McGraw-Hill

Valdés, L., López-Urrutia A., Cabal, J., Alvarez-Ossorio, M., Bode, A., Miranda, A., Cabanas, M., Huskin, I., Anadón, R., Alvarez-Marqués, F., Llope, M. and Rodríguez, N. (2007). A decade of sampling in the Bay of Biscay: What are the zooplankton time series telling us? *Progress in Oceanography*, 74: 98-114

Vargas Yañez, M., Plaza, F., García Lafuente, J., Sarhan, T., Vargas, J.M. and Vélez Belchi, P. (2002). About the seasonal variability of the Alboran Sea circulation. *Journal of Marine Systems*, 35: 229-248

T

U

V

Vargas-Yáñez, M., García-Martínez, M.C., Moya-Ruiz, F., Tel, E., Parrilla, G., Plaza, F., Lavín, A., Garcia, M.J., Salat, J., Pascual, J., García-Lafuente, J., Gomis, D., Álvarez, E., García-Sotillo, M., González-Pola, C., Polvorinos, F. y Fraile-Nuez, F. (2007). Cambio climático en el Mediterráneo Español. *Temas de Oceanografía 1*. Madrid: Instituto Español de Oceanografía. 171 pp.

W

Warren, J.D. and Wiebe, P.H. (2008). Accounting for biological and physical sources of acoustic backscatter improves estimates of zooplankton biomass. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 65: 1321-1333

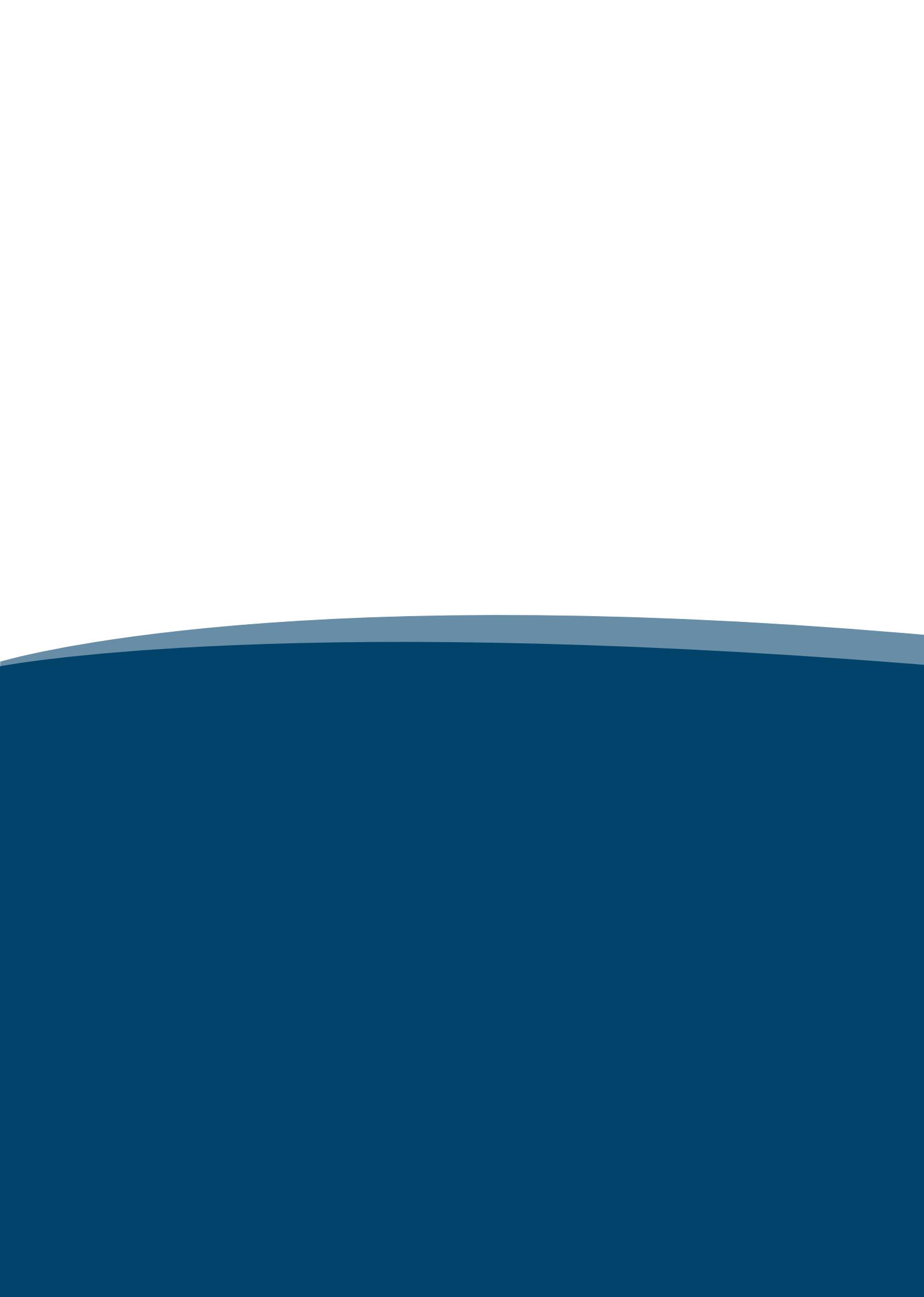
Watkins, J.L. and Brierley, A.S. (1996). A post-processing technique to remove background noise from echo integration data. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 339-344

Wuillez, M., Ressler, P.H., Wilson, C.D. and Horne, J.K. (2012). Multifrequency species classification of acoustic-trawl survey data using semi-supervised learning with class discovery *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131: 184-190

Woodd-Walker, R.S., Watkins, J.L., and Brierley, A.S. (2003). Identification of Southern Ocean acoustic targets using aggregation backscatter and shape characteristics. *ICES Journal of Marine Science*, 60: 641-649

Z

Zarubin, M., Farstey, V., Wold, A., Falk-Petersen, S. and Genin, A. (2014). Intraspecific differences in lipid content of calanoid copepods across fine-scale depth ranges within the photic layer. *PLoS ONE* 9(3): e92935. doi:10.1371/journal.pone.0092935



Anexo 1



Determinación del espesor vertical de la celda de integración

La dimensión vertical de la celda de integración acústica para el cálculo de los valores de MVBS en cada estación, se determinó en base a la aplicación de un test estadístico ANOVA a los datos almacenados durante 2013. La comparación entre los valores de MVBS calculados para dimensiones verticales crecientes, mostró que la varianza de los datos se mantuvo invariable al aumentar el volumen muestreado, denotando la homogeneidad de la capa epipelágica en la profundidad de muestreo (**Tablas 1 y 2**).

Para la **red bongo_40**, los espesores comparados fueron de 0.5, 1 y 2.5 m. Para las cinco frecuencias, los valores del estadístico F fueron menores que el valor crítico de F, no pudiendo rechazar la hipótesis nula de igualdad de varianzas (**Tabla 1**). El aumento de espesor no tuvo una influencia significativa sobre el valor del MVBS. En base a lo anterior, se determinó un espesor vertical de 0.5 m para el cálculo del valor de MVBS en los muestreos realizados con la red bongo_40.

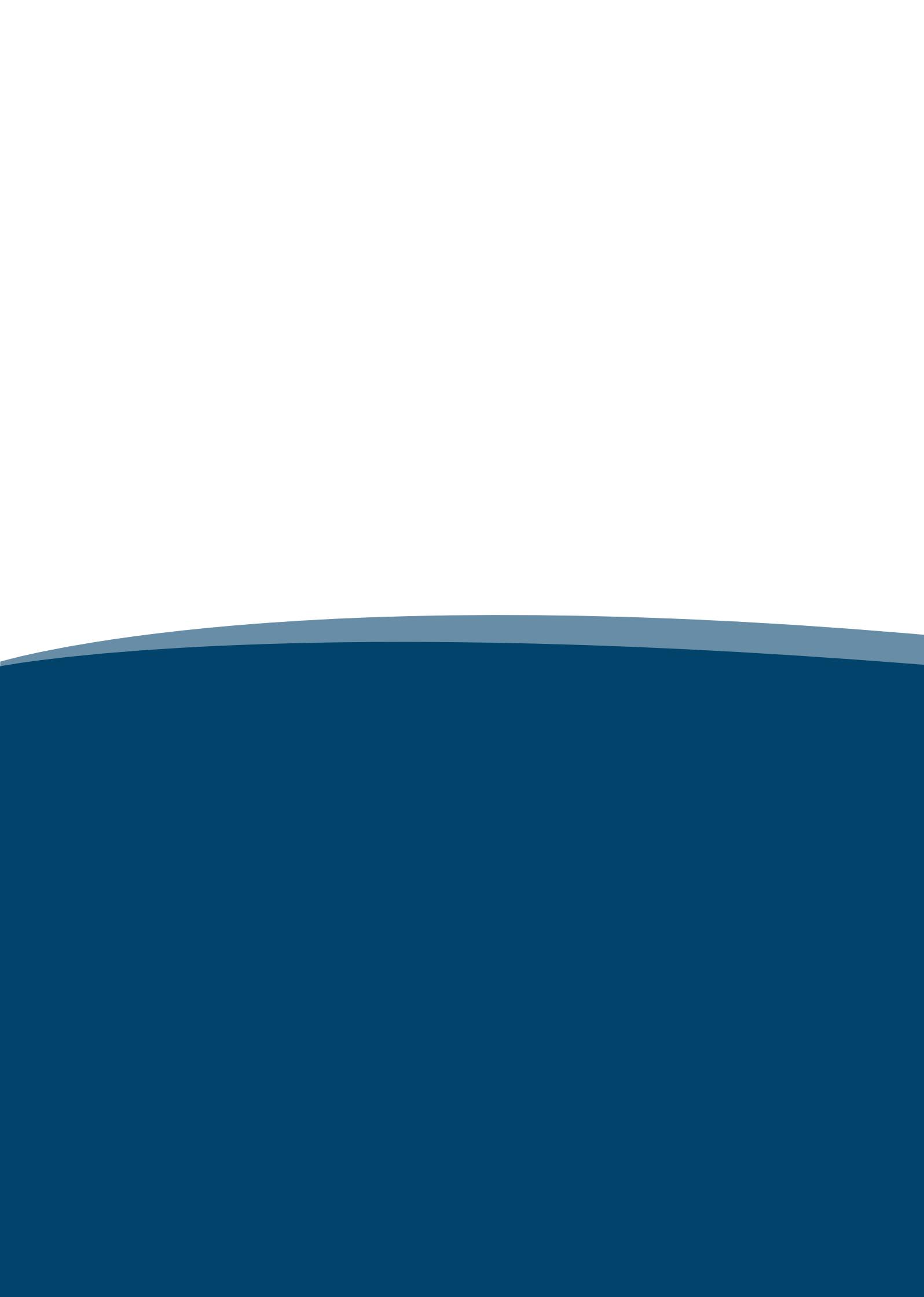
Tabla 1: Resultados del test ANOVA para las estaciones realizadas en 2013 con Bongo_40.

Frecuencia	Origen variaciones	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
18 kHz	Entre grupos	3.08E-15	2	1.54E-15	0.007	0.992	3.354
	Dentro de los grupos	5.76E-12	27	2.13E-13			
	Total	5.76E-12	29				
38 kHz	Entre grupos	4.79E-15	2	2.39E-15	0.007	0.992	3.354
	Dentro de los grupos	8.39E-12	27	3.10E-13			
	Total	8.39E-12	29				
70 kHz	Entre grupos	1.61E-14	2	8.05E-15	0.135	0.873	3.354
	Dentro de los grupos	1.60E-12	27	5.92E-14			
	Total	1.61E-12	29				
120 kHz	Entre grupos	3.29E-15	2	1.64E-15	0.171	0.842	3.354
	Dentro de los grupos	2.59E-13	27	9.59E-15			
	Total	2.62E-13	29				
200 kHz	Entre grupos	9.77E-15	2	4.88E-15	0.521	0.599	3.369
	Dentro de los grupos	2.43E-13	26	9.37E-15			
	Total	2.53588E-13	28				

Para la **red bongo_90**, los espesores comparados fueron de 1, 2.5 y 5 m. Para las cinco frecuencias, los valores del estadístico F fueron menores que el valor crítico de F, no pudiendo rechazar la hipótesis nula de igualdad de varianzas (**Tabla 2**). Las diferencias entre los valores de MVBS no resultaron significativas para los espesores analizados, por lo que se determinó un espesor vertical igual a 1 m para los muestreos realizados con la red bongo_90.

Tabla 2: Resultados del test ANOVA para las estaciones realizadas en 2013 con Bongo_90.

Frecuencia	Origen variaciones	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
18 kHz	Entre grupos	1.08E-15	2	5.4E-16	0.002	0.997	3.315
	Dentro de los grupos	8.00E-12	30	2.66E-13			
	Total	8.00E-12	32				
38 kHz	Entre grupos	2.81E-14	2	1.40E-14	0.044	0.957	3.315
	Dentro de los grupos	9.58E-12	30	3.19E-13			
	Total	9.61E-12	32				
70 kHz	Entre grupos	3.20E-15	2	1.60E-15	0.038	0.962	3.315
	Dentro de los grupos	1.26E-12	30	4.20E-14			
	Total	1.26E-12	32				
120 kHz	Entre grupos	2.67E-16	2	1.33E-16	0.017	0.982	3.315
	Dentro de los grupos	2.25E-13	30	7.5E-15			
	Total	2.25E-13	32				
200 kHz	Entre grupos	9.13E-16	2	4.56E-16	0.092	0.911	3.340
	Dentro de los grupos	1.38E-13	28	4.93E-15			
	Total	1.39E-13	30				



Anexo 2



Determinación del volumen de la alícuota

Debido a que el muestreo biológico se llevó a cabo posicionando las redes de plancton en la zona de mayor densidad acústica de la capa epipelágica de dispersión acústica, que se corresponde con la mayor densidad biológica, los diferentes muestreadores capturaron una elevada densidad de organismos, lo que hizo inviable el análisis de la totalidad de las muestras y se procedió analizando una parte o alícuota.

La determinación del volumen mínimo a analizar, se llevó a cabo analizando volúmenes crecientes de la muestra más densa (línea de color azul oscuro en las figuras) y menos densa (línea de color azul claro en las figuras) recogida con cada una de las redes empleadas (250, 333, 500 y 2000 μm). Debido a que el tiempo de arrastre fue diferente para los dos años analizados, siete minutos en 2013 y seis minutos en 2014, el volumen de la alícuota se calculó para cada año. Específicamente, el proceso de determinación del volumen de la alícuota consistió en definir el número de grupos faunísticos contenidos en 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 y 12.5 ml de dos muestras cada año (la de mayor y menor densidad). Finalmente, el volumen de la alícuota se fijó como el más restrictivo (mayor volumen, círculo azul en las figuras), que en la mayoría de los casos, salvo en para la malla de 333 μm en 2014, coincidió con el volumen marcado por la muestra más densa.

En 2013, para las mallas de 250 y 333 μm el volumen más restrictivo que contuvo todos los grupos faunísticos presentes en las muestras fue de 7.5 ml y para las mallas de 500 y 2000 μm fue de 10.0 ml (Figura 1).

En 2014, para todas las mallas el volumen más restrictivo que contuvo todos los grupos faunísticos presentes en las muestras fue de 10.0 ml (Figura 2).

En base a los resultados obtenidos y con el fin de estandarizar el proceso de análisis de las muestras, se determinó como volumen de la alícuota 10.0 ml para todos los tamaños de malla y para los dos años.

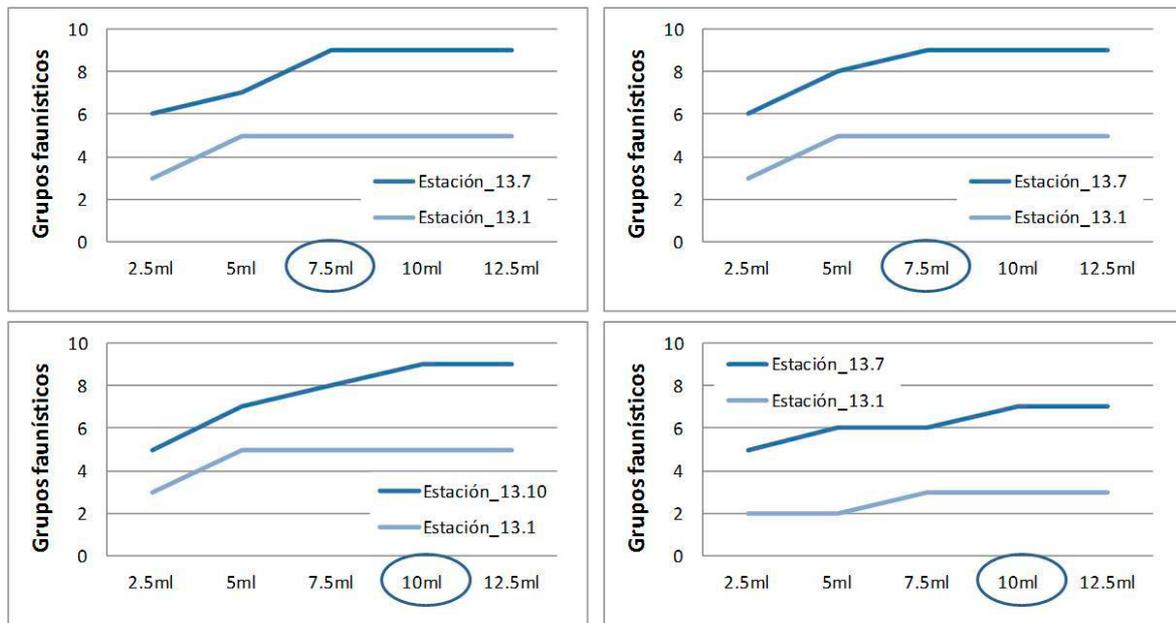


Figura 1: Número de grupos faunísticos presentes en los volúmenes analizados en 2013. **A:** 250 µm. **B:** 333 µm. **C:** 500 µm. **D:** 2000 µm. La línea azul oscuro se corresponde con la estación más densa. La línea azul claro se corresponde con la estación menos densa. El círculo indica el volumen de la alícuota.

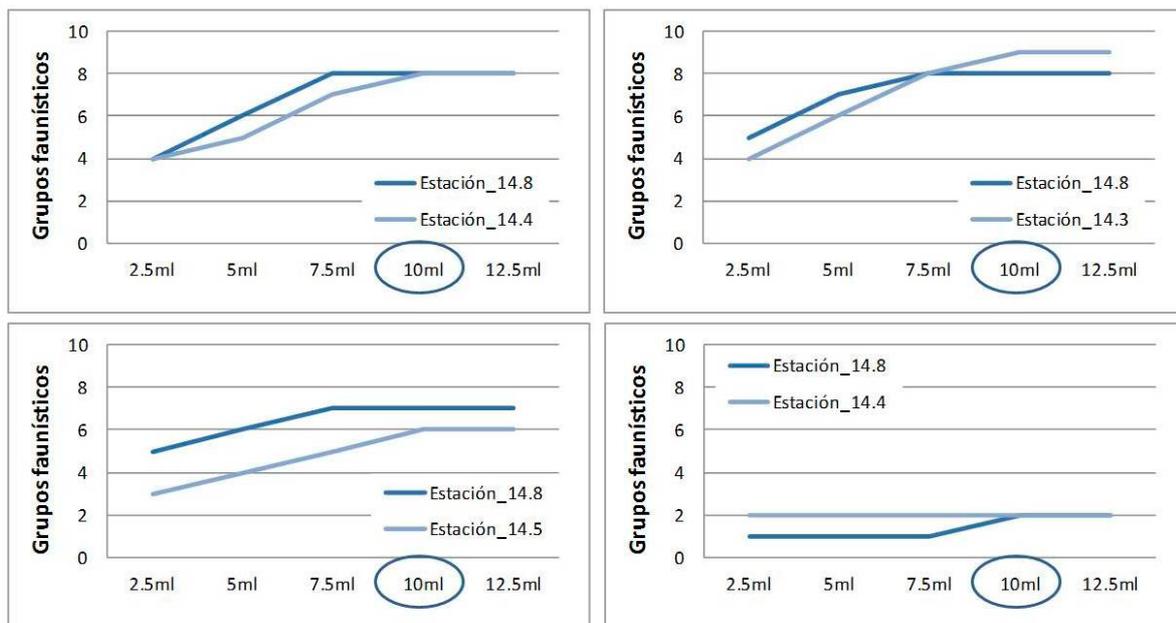
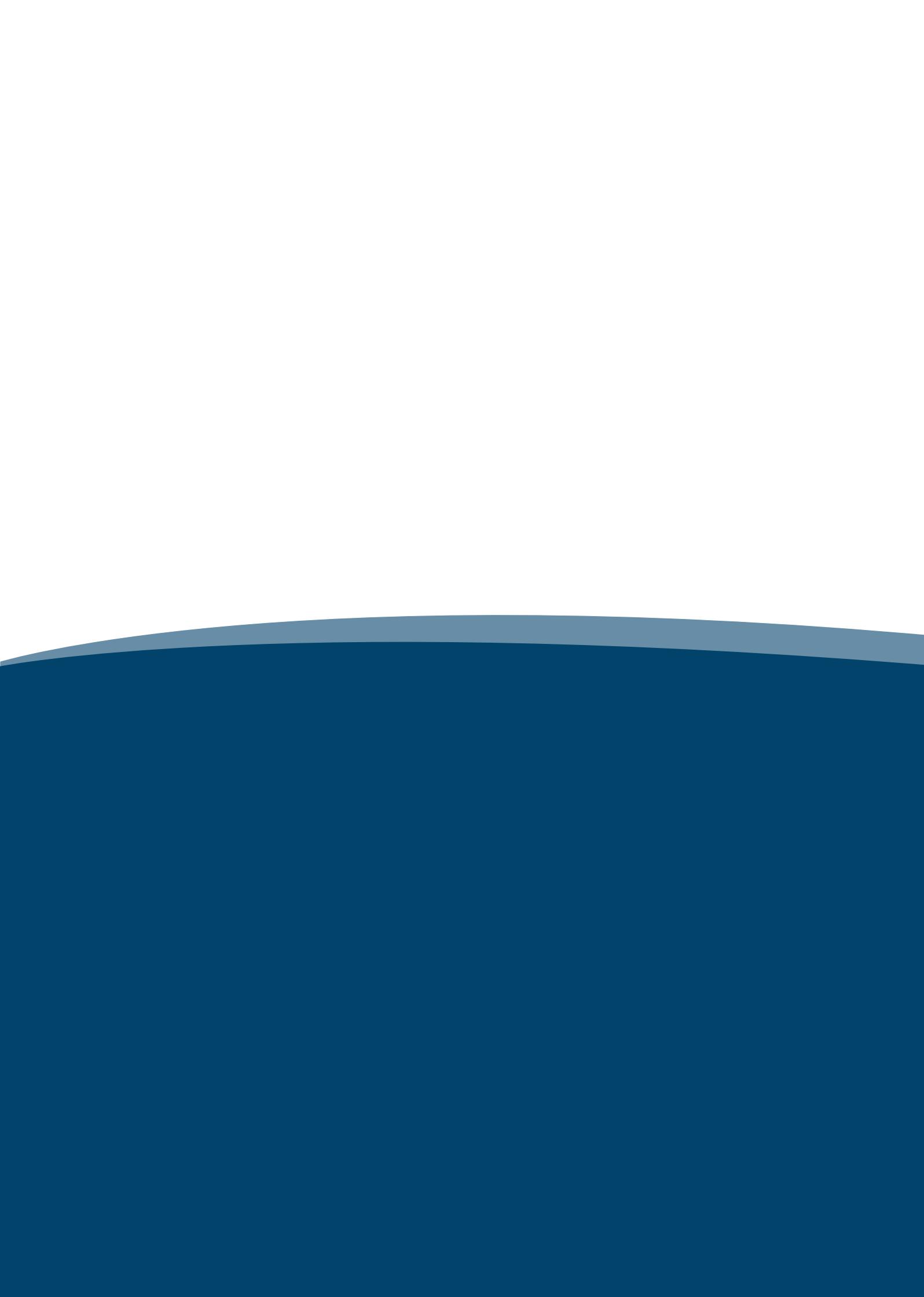


Figura 2: Número de grupos faunísticos presentes en los volúmenes analizados en 2014. **A:** 250 µm. **B:** 333 µm. **C:** 500 µm. **D:** 2000 µm. La línea azul oscuro se corresponde con la estación más densa. La línea azul claro se corresponde con la estación menos densa. El círculo indica el volumen de la alícuota.



Anexo 3



Resultados de la calibración de la ecosonda científica

La calibración de las frecuencias de trabajo se llevó a cabo al principio de la campaña y para su realización se siguió la metodología propuesta por Foote et al., 1987. La frecuencia de 18 kHz fue calibrada con una esfera de cobre electrolítico de 63 mm de diámetro y el resto de frecuencias con una esfera de tungsteno de 38.1 mm de diámetro. Los resultados de la calibración para cada año y frecuencia se detallan a continuación.

Date: 30/06/2013]

Comments:
cal_18kHz_Cu

Reference Target:			
TS	-37.90 dB	Min. Distance	13.50 m
TS Deviation	5.0 dB	Max. Distance	16.50 m

Transducer:	ES18-11	Serial No.	18	
Frequency	18000 Hz	Beamtype	Split	
Gain	22.40 dB	Two Way Beam Angle	-17.0 dB	
Athw. Angle Sens.	13.90	Along. Angle Sens.	13.90	
Athw. Beam Angle	11.00 deg	Along. Beam Angle	11.00 deg	
Athw. Offset Angle	0.00 deg	Along. Offset Angle	0.00 deg	
SaCorrection	0.00 dB	Depth	0.00 m	

Transceiver:	GPT 18 kHz 009072059705 1	ES18-11	
Pulse Duration	1.024 ms	Sample Interval	0.196 m
Power	2000 W	Receiver Bandwidth	1.57 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

TS Detection:			
Min. Value	-55.0 dB	Min. Spacing	100 %
Max. Beam Comp.	6.0 dB	Min. Echolength	80 %
Max. Phase Dev.	8.0	Max. Echolength	180 %

Environment:			
Absorption Coeff.	2.0 dB/km	sound velocity	1533.2 m/s

Beam Model results:			
Transducer Gain	= 20.80 dB	SaCorrection	= -0.83 dB
Athw. Beam Angle	=10.78 deg	Along. Beam Angle	=10.63 deg
Athw. Offset Angle	=-0.03 deg	Along. Offset Angle	=-0.09 deg

Data deviation from beam model:				
RMS =	0.15 dB			
Max =	0.38 dB	No. =	74	Athw. = -5.5 deg
Min =	-0.53 dB	No. =	384	Athw. = -1.8 deg
				Along = 3.7 deg
				Along = -7.0 deg

Data deviation from polynomial model:				
RMS =	0.10 dB			
Max =	0.23 dB	No. =	29	Athw. = -5.4 deg
Min =	-0.34 dB	No. =	384	Athw. = -1.8 deg
				Along = 6.1 deg
				Along = -7.0 deg

Date: 30/06/2013

Comments:
calibracion 38 khz tugs.

Reference Target:
TS -42.30 dB Min. Distance 13.50 m
TS Deviation 5.0 dB Max. Distance 16.50 m

Transducer: ES38B Serial No. 38
Frequency 38000 Hz Beamtype Split
Gain 26.50 dB Two way Beam Angle -20.6 dB
Athw. Angle Sens. 21.90 Along. Angle Sens. 21.90
Athw. Beam Angle 7.10 deg Along. Beam Angle 7.10 deg
Athw. Offset Angle 0.00 deg Along. Offset Angle 0.00 deg
SaCorrection 0.00 dB Depth 0.00 m

Transceiver: GPT 38 kHz 0090720596f6 2 ES38B
Pulse Duration 1.024 ms Sample Interval 0.196 m
Power 2000 W Receiver Bandwidth 2.43 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

TS Detection:
Min. Value -55.0 dB Min. Spacing 100 %
Max. Beam Comp. 6.0 dB Min. Echolength 80 %
Max. Phase Dev. 8.0 Max. Echolength 180 %

Environment:
Absorption Coeff. 7.9 dB/km Sound Velocity 1533.2 m/s

Beam Model results:
Transducer Gain = 24.78 dB SaCorrection = -0.52 dB
Athw. Beam Angle = 6.89 deg Along. Beam Angle = 6.81 deg
Athw. Offset Angle = 0.10 deg Along. Offset Angle = -0.06 deg

Data deviation from beam model:
RMS = 0.13 dB
Max = 0.36 dB No. = 288 Athw. = 3.8 deg Along = -1.3 deg
Min = -0.39 dB No. = 46 Athw. = 4.1 deg Along = 2.9 deg

Data deviation from polynomial model:
RMS = 0.06 dB
Max = 0.28 dB No. = 135 Athw. = 3.7 deg Along = 3.4 deg
Min = -0.24 dB No. = 137 Athw. = 4.3 deg Along = 2.0 deg

Date: 30/06/2013

Comments:
calib 70 khz tungsteno

Reference Target:
TS -41.50 dB Min. Distance 16.50 m
TS Deviation 5.0 dB Max. Distance 19.50 m

Transducer: ES70-7C Serial No. 70
Frequency 70000 Hz Beamtype Split
Gain 27.00 dB Two way Beam Angle -21.0 dB
Athw. Angle Sens. 23.00 Along. Angle Sens. 23.00
Athw. Beam Angle 7.00 deg Along. Beam Angle 7.00 deg
Athw. Offset Angle 0.00 deg Along. Offset Angle 0.00 deg
SaCorrection 0.00 dB Depth 5.00 m

Transceiver: GPT 70 kHz 009072059718 3 ES70-7C
Pulse Duration 1.024 ms Sample Interval 0.196 m
Power 600 W Receiver Bandwidth 2.86 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

TS Detection:
Min. Value -55.0 dB Min. Spacing 100 %
Max. Beam Comp. 6.0 dB Min. Echolength 80 %
Max. Phase Dev. 8.0 Max. Echolength 180 %

Environment:
Absorption Coeff. 23.0 dB/km Sound Velocity 1533.2 m/s

Beam Model results:
Transducer Gain = 27.08 dB SaCorrection = -0.42 dB
Athw. Beam Angle = 6.33 deg Along. Beam Angle = 6.36 deg
Athw. Offset Angle = -0.05 deg Along. Offset Angle = 0.00 deg

Data deviation from beam model:
RMS = 0.19 dB
Max = 0.41 dB No. = 17 Athw. = -0.7 deg Along = 4.8 deg
Min = -1.03 dB No. = 11 Athw. = -2.6 deg Along = 3.5 deg

Data deviation from polynomial model:
RMS = 0.15 dB
Max = 0.52 dB No. = 17 Athw. = -0.7 deg Along = 4.8 deg
Min = -0.93 dB No. = 11 Athw. = -2.6 deg Along = 3.5 deg

Date: 30/06/2013

Comments:
120 khz tungs calibracion

Reference Target:
TS -39.60 dB Min. Distance 16.00 m
TS Deviation 5.0 dB Max. Distance 19.00 m

Transducer: ES120-7C Serial No. 120
Frequency 120000 Hz Beamtype Split
Gain 27.00 dB Two way Beam Angle -21.0 dB
Athw. Angle Sens. 23.00 Along. Angle Sens. 23.00
Athw. Beam Angle 7.00 deg Along. Beam Angle 7.00 deg
Athw. Offset Angle 0.00 deg Along. Offset Angle 0.00 deg
SaCorrection 0.00 dB Depth 5.00 m

Transceiver: GPT 120 kHz 009072059717 4 ES120-7C
Pulse Duration 1.024 ms Sample Interval 0.196 m
Power 200 W Receiver Bandwidth 3.03 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

TS Detection:
Min. Value -55.0 dB Min. Spacing 100 %
Max. Beam Comp. 6.0 dB Min. Echolength 80 %
Max. Phase Dev. 8.0 Max. Echolength 180 %

Environment:
Absorption Coeff. 49.8 dB/km Sound Velocity 1533.2 m/s

Beam Model results:
Transducer Gain = 27.21 dB SaCorrection = -0.35 dB
Athw. Beam Angle = 6.26 deg Along. Beam Angle = 6.20 deg
Athw. Offset Angle = -0.27 deg Along. Offset Angle = -0.11 deg

Data deviation from beam model:
RMS = 0.42 dB
Max = 0.85 dB No. = 256 Athw. = 2.6 deg Along = -2.4 deg
Min = -1.17 dB No. = 236 Athw. = -3.7 deg Along = -3.4 deg

Data deviation from polynomial model:
RMS = 0.39 dB
Max = 0.82 dB No. = 138 Athw. = 2.9 deg Along = 0.4 deg
Min = -0.94 dB No. = 68 Athw. = -0.9 deg Along = 2.1 deg

Date: 30/06/2013

Comments:
calib 200 khz tung

Reference Target:
TS -38.90 dB Min. Distance 16.00 m
TS Deviation 5.0 dB Max. Distance 19.00 m

Transducer: ES200-7C Serial No. 200
Frequency 200000 Hz Beamtype Split
Gain 27.00 dB Two way Beam Angle -20.7 dB
Athw. Angle Sens. 23.00 Along. Angle Sens. 23.00
Athw. Beam Angle 7.00 deg Along. Beam Angle 7.00 deg
Athw. Offset Angle 0.00 deg Along. Offset Angle 0.00 deg
SaCorrection 0.00 dB Depth 5.00 m

Transceiver: GPT 200 kHz 00907205971c 5 ES200-7C
Pulse Duration 1.024 ms Sample Interval 0.196 m
Power 90 W Receiver Bandwidth 3.09 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

TS Detection:
Min. Value -55.0 dB Min. Spacing 100 %
Max. Beam Comp. 6.0 dB Min. Echolength 80 %
Max. Phase Dev. 8.0 Max. Echolength 180 %

Environment:
Absorption Coeff. 83.1 dB/km Sound Velocity 1533.2 m/s

Beam Model results:
Transducer Gain = 26.91 dB SaCorrection = -0.46 dB
Athw. Beam Angle = 6.18 deg Along. Beam Angle = 6.16 deg
Athw. Offset Angle = -0.26 deg Along. Offset Angle = -0.16 deg

Data deviation from beam model:
RMS = 0.85 dB
Max = 1.61 dB No. = 165 Athw. = -2.9 deg Along = -3.1 deg
Min = -2.18 dB No. = 114 Athw. = -0.4 deg Along = -0.9 deg

Data deviation from polynomial model:
RMS = 0.82 dB
Max = 1.60 dB No. = 210 Athw. = 0.4 deg Along = -4.0 deg
Min = -2.22 dB No. = 114 Athw. = -0.4 deg Along = -0.9 deg

Date: 22.06.2014

Comments:
cal_18kHz_Cu

Reference Target:
TS -34.60 dB Min. Distance 16.80 m
TS Deviation 5.0 dB Max. Distance 19.80 m

Transducer: ES18-11 Serial No. 18
Frequency 18000 HZ Beamtype Split
Gain 23.13 dB Two Way Beam Angle -17.0 dB
Athw. Angle Sens. 13.90 Along. Angle Sens. 13.90
Athw. Beam Angle 10.73 deg Along. Beam Angle 10.65 deg
Athw. Offset Angle -0.02 deg Along. Offset Angle 0.07 deg
SaCorrection -0.83 dB Depth 0.00 m

Transceiver: GPT 18 kHz 009072059704 1 ES18-11
Pulse Duration 1.024 ms Sample Interval 0.197 m
Power 2000 W Receiver Bandwidth 1.57 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

TS Detection:
Min. Value -50.0 dB Min. Spacing 100 %
Max. Beam Comp. 6.0 dB Min. Echolength 80 %
Max. Phase Dev. 8.0 Max. Echolength 180 %

Environment:
Absorption Coeff. 1.9 dB/km Sound velocity 1537.8 m/s

Beam Model results:
Transducer Gain = 22.82 dB SaCorrection = -0.80 dB
Athw. Beam Angle = 10.97 deg Along. Beam Angle = 10.94 deg
Athw. Offset Angle = 0.03 deg Along. Offset Angle = 0.09 deg

Data deviation from beam model:
RMS = 0.18 dB
Max = 0.51 dB No. = 66 Athw. = -4.6 deg Along = 5.9 deg
Min = -1.20 dB No. = 70 Athw. = -6.2 deg Along = 5.0 deg

Data deviation from polynomial model:
RMS = 0.15 dB
Max = 0.66 dB No. = 4 Athw. = -0.3 deg Along = 0.8 deg
Min = -1.04 dB No. = 70 Athw. = -6.2 deg Along = 5.0 deg

Date: 21.06.2014

Comments:
Calibracion 38kHz_tg

Reference Target:
TS -42.30 dB Min. Distance 16.80 m
TS Deviation 5.0 dB Max. Distance 19.80 m

Transducer: ES38B Serial No. 38
Frequency 38000 Hz Beamtype Split
Gain 24.74 dB Two Way Beam Angle -20.6 dB
Athw. Angle Sens. 21.90 Along. Angle Sens. 21.90
Athw. Beam Angle 6.95 deg Along. Beam Angle 7.12 deg
Athw. Offset Angle 0.05 deg Along. Offset Angle -0.17 deg
SaCorrection -0.58 dB Depth 0.00 m

Transceiver: GPT 38 kHz 0090720596ec 2 ES38B
Pulse Duration 1.024 ms Sample Interval 0.197 m
Power 2000 W Receiver Bandwidth 2.43 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

TS Detection:
Min. Value -50.0 dB Min. Spacing 100 %
Max. Beam Comp. 6.0 dB Min. Echolength 80 %
Max. Phase Dev. 8.0 Max. Echolength 180 %

Environment:
Absorption Coeff. 7.5 dB/km Sound velocity 1537.8 m/s

Beam Model results:
Transducer Gain = 24.23 dB SaCorrection = -0.57 dB
Athw. Beam Angle = 6.93 deg Along. Beam Angle = 6.97 deg
Athw. Offset Angle = 0.06 deg Along. Offset Angle = -0.06 deg

Data deviation from beam model:
RMS = 0.21 dB
Max = 1.44 dB No. = 99 Athw. = 3.8 deg Along = 3.4 deg
Min = -1.03 dB No. = 435 Athw. = -0.6 deg Along = -5.0 deg

Data deviation from polynomial model:
RMS = 0.19 dB
Max = 1.34 dB No. = 99 Athw. = 3.8 deg Along = 3.4 deg
Min = -0.77 dB No. = 435 Athw. = -0.6 deg Along = -5.0 deg

Date: 21.06.2014

Comments:
calibracion 120kHz tg

Reference Target:
TS -39.60 dB Min. Distance 16.80 m
TS Deviation 5.0 dB Max. Distance 19.80 m

Transducer: ES120-7C Serial No. 120
Frequency 120000 Hz Beamtype Split
Gain 26.73 dB Two way Beam Angle -21.0 dB
Athw. Angle Sens. 23.00 Along. Angle Sens. 23.00
Athw. Beam Angle 6.38 deg Along. Beam Angle 6.51 deg
Athw. Offset Angle -0.05 deg Along. Offset Angle -0.01 deg
SaCorrection -0.37 dB Depth 0.00 m

Transceiver: GPT 120 kHz 0090720596ed 3 ES120-7C
Pulse Duration 1.024 ms Sample Interval 0.197 m
Power 200 W Receiver Bandwidth 3.03 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

TS Detection:
Min. Value -50.0 dB Min. Spacing 100 %
Max. Beam Comp. 6.0 dB Min. Echolength 80 %
Max. Phase Dev. 8.0 Max. Echolength 180 %

Environment:
Absorption Coeff. 50.0 dB/km Sound velocity 1537.8 m/s

Beam Model results:
Transducer Gain = 26.51 dB SaCorrection = -0.21 dB
Athw. Beam Angle = 6.38 deg Along. Beam Angle = 6.43 deg
Athw. Offset Angle = -0.02 deg Along. Offset Angle = 0.00 deg

Data deviation from beam model:
RMS = 0.43 dB
Max = 1.19 dB No. = 137 Athw. = -3.3 deg Along = 1.7 deg
Min = -2.02 dB No. = 375 Athw. = -3.7 deg Along = -2.4 deg

Data deviation from polynomial model:
RMS = 0.40 dB
Max = 0.95 dB No. = 137 Athw. = -3.3 deg Along = 1.7 deg
Min = -1.79 dB No. = 375 Athw. = -3.7 deg Along = -2.4 deg

Date: 21.06.2014

Comments:
calibracion 200kHz tg

Reference Target:
TS -38.90 dB Min. Distance 16.80 m
TS Deviation 5.0 dB Max. Distance 19.80 m

Transducer: ES200-7C Serial No. 200
Frequency 200000 Hz Beamtype Split
Gain 26.03 dB Two way Beam Angle -20.7 dB
Athw. Angle Sens. 23.00 Along. Angle Sens. 23.00
Athw. Beam Angle 6.57 deg Along. Beam Angle 6.53 deg
Athw. Offset Angle -0.29 deg Along. Offset Angle -0.09 deg
SaCorrection -0.27 dB Depth 0.00 m

Transceiver: GPT 200 kHz 00907205971b 4 ES200-7C
Pulse Duration 1.024 ms Sample Interval 0.197 m
Power 90 W Receiver Bandwidth 3.09 kHz

Sounder Type:
EK60 Version 2.1.2

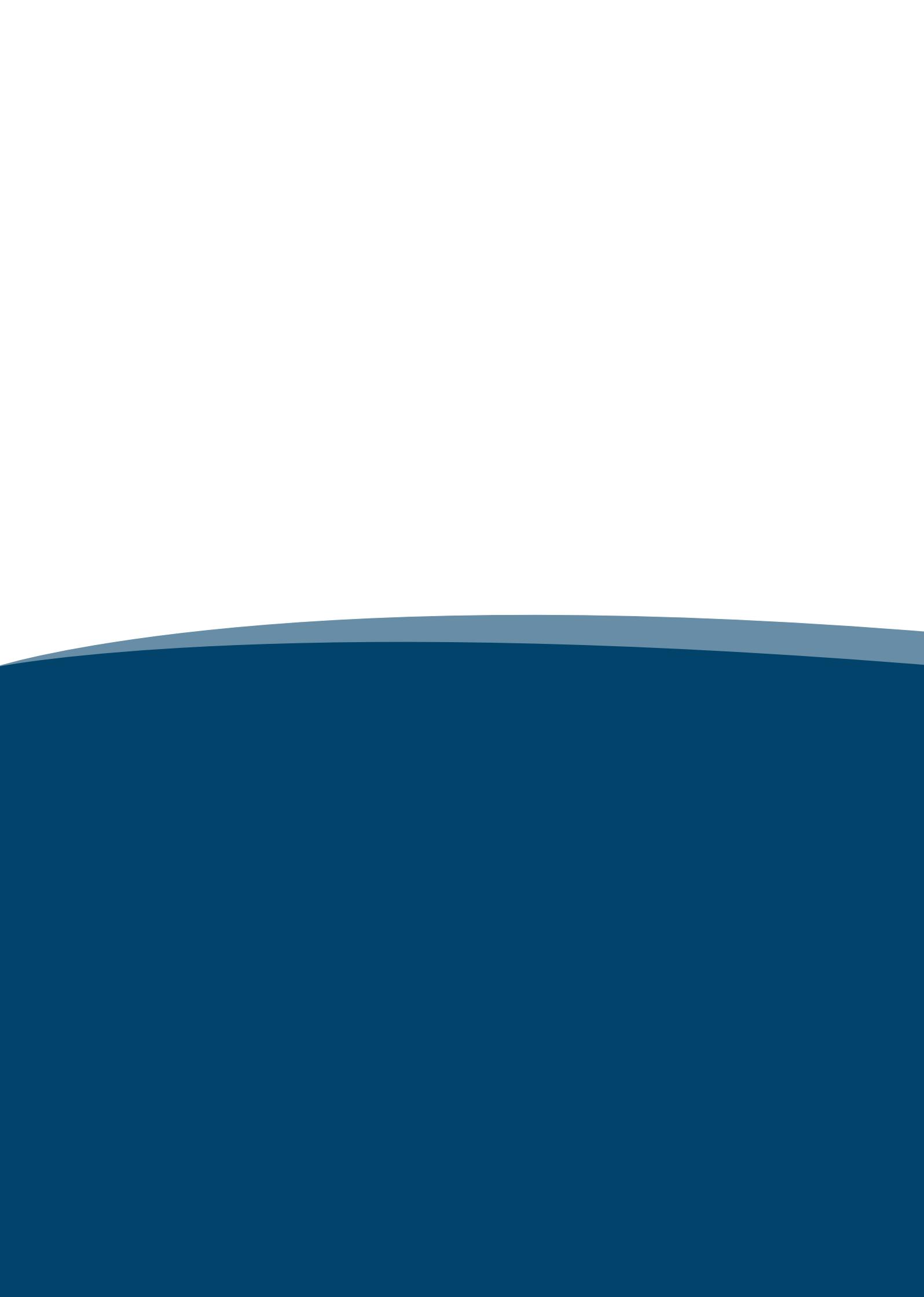
TS Detection:
Min. Value -50.0 dB Min. Spacing 100 %
Max. Beam Comp. 6.0 dB Min. Echolength 80 %
Max. Phase Dev. 8.0 Max. Echolength 180 %

Environment:
Absorption Coeff. 86.8 dB/km Sound velocity 1537.8 m/s

Beam Model results:
Transducer Gain = 25.63 dB SaCorrection = -0.19 dB
Athw. Beam Angle = 6.45 deg Along. Beam Angle = 6.55 deg
Athw. Offset Angle = -0.15 deg Along. Offset Angle = 0.06 deg

Data deviation from beam model:
RMS = 0.62 dB
Max = 1.72 dB No. = 48 Athw. = -2.2 deg Along = 2.9 deg
Min = -1.50 dB No. = 19 Athw. = -3.0 deg Along = 3.4 deg

Data deviation from polynomial model:
RMS = 0.61 dB
Max = 1.80 dB No. = 48 Athw. = -2.2 deg Along = 2.9 deg
Min = -1.22 dB No. = 215 Athw. = -2.3 deg Along = -0.2 deg



Anexo 4



Desarrollo y aplicación de ecogramas virtuales

La siguiente figura (**Figura 1**) muestra el diagrama de flujo que se derivó de las ecuaciones generadas combinando las diferentes frecuencias en 2013. La elección este año se debe a que se contó con un número mayor de frecuencias y presentó una mayor complejidad. Por otra parte el fundamento, los conceptos y las relaciones son extrapolables tanto a 2014 como a otros años, épocas o áreas.

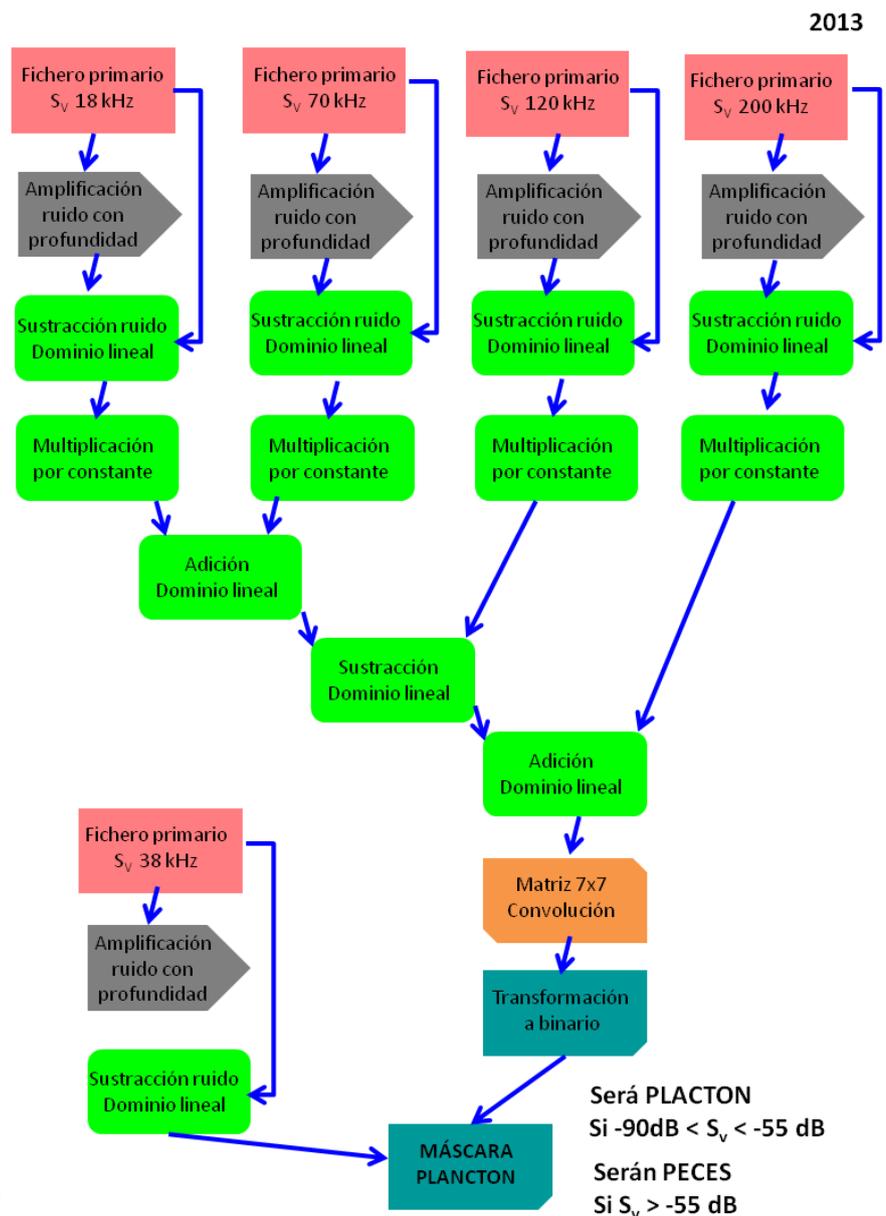


Figura 1: Generación del ecograma virtual aplicado en el área de estudio en 2013.

El primer paso consistió en calcular el valor de ruido que existe a una determinada profundidad. Para ello, se introdujo el valor de ruido constante a un metro del transductor, determinado en modo pasivo durante la calibración, en el operador "data generator" del programa Echoview. Este operador amplifica el valor del ruido generado por los componentes eléctricos y la hidrodinámica del barco, calculando las pérdidas por absorción y geométricas que se producen cuando la onda se aleja del transductor ("Amplificación ruido con profundidad" en la **Figura 1**). Una vez amplificado el ruido, éste fue sustraído en el dominio lineal ("Sustracción ruido Dominio lineal" en la **Figura 1**) de los ecogramas primarios ("Fichero primario $S_v(f)$ " en la **Figura 1**). Este paso se realizó para todas las frecuencias.

En el segundo paso se aplicó el valor de los coeficientes de regresión, calculados previamente por medio de un análisis de regresión múltiple. Para ello, se empleó el operador "constant multiply". El coeficiente de regresión es una constante que destaca los registros detectados en una frecuencia cuando es mayor que uno y los atenúa cuando es menor que uno ("Multiplicación por constante" en la **Figura 1**). Este coeficiente multiplicativo puede ser ajustado posteriormente, modificando el parámetro en el programa Echoview, aunque en el caso que nos ocupa no fue necesario.

En los siguientes tres pasos se añadió el signo del coeficiente de regresión. Cuando el coeficiente resultó positivo para una frecuencia, ésta se sumó a la siguiente ("Adición Dominio lineal" en la **Figura 1**) y cuando resultó negativo para una frecuencia, ésta se sustrajo del resto ("Sustracción Dominio lineal" en la **Figura 1**). Dado que una de las propiedades de las operaciones matemáticas suma y resta es la conmutativa, el orden en que se sumen o resten las frecuencias no influirá en el resultado final. La realización de este proceso en pasos múltiples fue debido a que los operadores ("linear minus" y "linear plus") sólo aceptan dos factores. En versiones más avanzadas del programa Echoview es posible realizar este proceso en un único paso por medio del operador "fórmula".

En el siguiente paso se procedió a la homogeneización de los datos mediante un suavizado, aplicando una matriz de convolución de 7x7 donde todos los valores son unos ("Matriz 7x7 Convolución" en la **Figura 1**). Para ello, se empleó el operador "7x7 convolution". La matriz de convolución representa un filtro que examina cada "pixel" del ecograma, y para cada uno de ellos ("pixel inicial") multiplica el valor del "pixel" y los valores de los 48 "píxeles" circundantes por el valor correspondiente de la matriz de convolución, entonces el "pixel inicial" toma el valor resultante final.

El último paso consistió en aplicar una transformación a binario de los valores del ecograma ("Transformación a binario" en la **Figura 1**), pasando de valores numéricos a valores verdadero/falso. Para ello, se aplicó el operador "data range bitmap". La diferencia entre los valores verdaderos y falsos se indicó mediante la imposición de una condición al operador, basada en unos rangos

de valores. En este caso, se consideró que un "pixel" perteneció a la "categoría plancton" cuando el valor de S_v resultó mayor que -90 dB y menor que -55 dB. Por lo tanto la "categoría peces" quedó definida por los valores de S_v mayores que -55 dB.

Finalmente el ecograma binario para la "categoría plancton" se superpuso al ecograma de la frecuencia de evaluación 38 kHz visualizándose solo los registros correspondientes a la comunidad planctónica (**Figura 2**). Para ello se empleó el operador "mask".

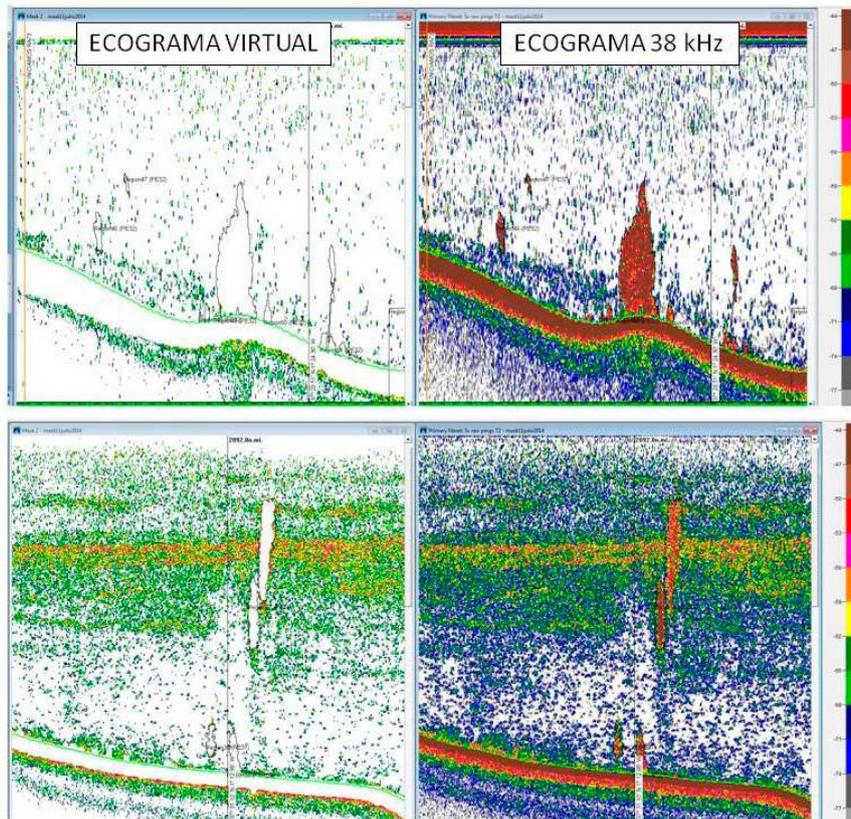


Figura 2: Resultado de la aplicación del ecograma virtual para la categoría plancton.

El objetivo último de esta tesis es aplicar el conocimiento adquirido sobre la respuesta acústica de la comunidad planctónica, en base a sus características biológicas, para optimizar el proceso de interpretación de ecogramas, y así contribuir a la mejora de la evaluación de pequeños pelágicos costeros por métodos acústicos.

Para los análisis relativos a la capa de plancton, los valores de energía acústica reflejada fueron calculados una vez la comunidad planctónica fue aislada, empleándose para ello los ecogramas correspondientes a la categoría "plancton".

En la discusión (apartado 5.2), se presenta el resultado inverso de la máscara, es decir la categoría "peces", y se argumenta la eficacia de la máscara en relación al proceso de evaluación de la comunidad de peces pelágicos.

*El mar. La mar.
El mar. ¡Sólo la mar!*

*¿Por qué me trajiste, padre,
a la ciudad?*

*¿Por qué me desenterraste
del mar?*

*En sueños la marejada
me tira del corazón;
se lo quisiera llevar.*

*Padre, ¿por qué me trajiste
acá?*

*Gimiendo por ver el mar,
un marinerito en tierra
iza al aire este lamento:
¡Ay mi blusa marinera;
siempre me la inflaba el viento
al divisar la escollera!*

(Rafael Alberti)