

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE PSICOLOGÍA

Departamento de Psicobiología



TESIS DOCTORAL

**PATRÓN MIGRATORIO, IDENTIDAD POBLACIONAL E
IMPACTO DEL RUIDO EN LA COMUNICACIÓN DEL
RORCUAL COMÚN (*Balaenoptera physalus* L. 1758) EN
EL MAR MEDITERRÁNEO OCCIDENTAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Manuel Castellote

Bajo la dirección de los doctores:

Fernando Colmenares y Christopher W. Clark

Madrid, 2010

ISBN: 978-84-693-2402-8

PATRÓN MIGRATORIO, IDENTIDAD POBLACIONAL E
IMPACTO DEL RUIDO EN LA COMUNICACIÓN DEL
RORCUAL COMÚN (*Balaenoptera physalus* L. 1758) EN EL
MAR MEDITERRÁNEO OCCIDENTAL



Tesis doctoral presentada por Manuel Castellote

Directores:

Prof. Fernando Colmenares

Dpto. Psicobiología, Facultad de Psicología, Universidad Complutense de Madrid.

Prof. Christopher W. Clark

Bioacoustics Research Program, Cornell Lab of Ornithology, Cornell University,
EEUU.



Dpto. de Psicobiología
Facultad de Psicología
Universidad Complutense de Madrid

Diciembre 2009

Índice

Agradecimientos	1
-----------------	---

Capítulo I: Introducción general

1. El rorcual común en el mar Mediterráneo	5
1.1 Morfología del rorcual común	5
1.2 Conocimientos sobre la población mediterránea	6
1.3 Ecología del rorcual común en el mar Mediterráneo	8
1.4 Comportamiento acústico	11
1.5 Estatus de protección	12
2. Conservación del rorcual común en el mar Mediterráneo	12
2.1 Principales amenazas	12
2.2 Retos de su conservación	14

Capítulo II: Patrón estacional y movimiento migratorio del rorcual común en el Mediterráneo Occidental

1. Introducción	17
2. Objetivos	18
3. Material y métodos	18
3.1 Áreas de estudio	18
3.2 Registro de sonido	25
3.2.1 Marine Autonomous Recording Unit	25
3.2.2 Ecologic Acoustic Recorder	26
3.3 Diseño de la línea de fondeo	27
3.3.1 Fondeo de MARU	27
3.3.2 Fondeo de EAR	28
3.3.3 Instrumentación de línea de fondeo con EAR	29
3.4 Preparación de datos para detección	29
3.5 Protocolo de análisis detección con XBAT	30
3.5.1 Detección automática	31
3.5.2 Validación manual	33
3.5.3 Registros NUM y ANG	33
3.6 Análisis registros NUM y ANG	34
3.7 Análisis de desplazamientos en el Estrecho de Gibraltar	35
4. Resultados	36
4.1 Fondeos completados/fallidos	36
4.2 Tipo de señales detectadas	36
4.3 Patrón presencia estacional por área	37
4.4 Dirección movimiento	44
4.4.1 Ángulo de recepción	44

4.4.2	Desplazamientos en el Estrecho de Gibraltar	50
5.	Discusión	54
6.	Conclusiones	63

Capítulo III:

Identidad poblacional del rorcual común en el Mediterráneo Occidental

1.	Introducción	66
2.	Objetivos	74
3.	Material y métodos	74
3.1	Áreas de estudio	74
3.2	Grabación de sonido	81
3.2.1	Marine Autonomous Recording Unit	81
3.2.2	Ecologic Acoustic Recorder	82
3.3	Diseño de la línea de fondeo	83
3.3.1	Fondeo de MARU	83
3.3.2	Fondeo de EAR	84
3.3.3	Instrumentación de líneas de fondeo con EAR	85
3.3.4	Instrumentación de plataforma oceanográfica	86
3.4	Preparación de datos para detección	87
3.5	Protocolo de análisis detección con XBAT	88
3.5.1	Detección automática	88
3.5.2	Validación manual	90
3.5.3	Registros PA e IPI	91
3.5.4	Análisis registros PA, IPI	91
4.	Resultados	95
4.1	Fondeos completados/fallidos	95
4.2	Tipo de señales detectadas	96
4.3	Descripción de los parámetros acústicos medidos por área	96
4.4	Resultados comparativos de los parámetros acústicos entre áreas	97
4.4.1	Casos de breves detecciones	107
5.	Discusión	108
6.	Conclusiones	119

Capítulo IV:

Efecto del ruido como contaminante en el comportamiento del rorcual común

1.	Introducción	122
2.	Objetivos	125
3.	Material y métodos	126

3.1	Áreas de estudio	126
3.2	Grabación de sonido	132
3.2.1	Marine Autonomous Recording Unit	132
3.2.2	Ecologic Acoustic Recorder	133
3.3	Diseño de la línea de fondeo	134
3.3.1	Fondeo de MARU	134
3.3.2	Fondeo de EAR	135
3.3.3	Instrumentación de líneas de fondeo con EAR	136
3.3.4	Instrumentación de plataforma oceanográfica	136
3.4	Preparación de datos para detección	137
3.5	Protocolo de análisis detección con XBAT	138
3.5.1	Detección automática	139
3.5.2	Validación manual	141
3.5.3	Registros PA e IPI	141
3.5.4	Análisis registros PA, IPI	142
3.6	Análisis del nivel de ruido ambiente	144
3.6.1	Grabaciones con EAR	145
3.6.2	Grabaciones con MARU	145
3.7	Análisis del efecto crónico del ruido ambiente generado por tráfico marítimo	146
3.8	Análisis del efecto agudo del ruido ambiente generado por una campaña geofísica marina	147
4.	Resultados	149
4.1	Fondeos completados/fallidos	149
4.2	Descripción de los parámetros acústicos medidos por área	149
4.3	Descripción de los niveles de ruido obtenidos en cada área	150
4.4	Análisis del efecto del tráfico marítimo en el comportamiento acústico del rorcual común	155
4.4.1	Efecto entre áreas de estudio	155
4.4.2	Efecto en el estrecho de Gibraltar	158
4.5	Análisis del efecto de una campaña geofísica marina	162
4.5.1	Efecto sobre el ruido ambiente del área	162
4.5.2	Efecto en el comportamiento acústico del rorcual común	170
4.5.3	Efecto en el desplazamiento de los rorcuales comunes por el área de estudio	174
5.	Discusión	182
6.	Conclusiones	204

**Capítulo V:
Discusión y conclusiones generales**

1.	Discusión general	209
1.1	Sobre la presencia estacional y movimiento migratorio del rorcual común en el mar Mediterráneo occidental	209
1.2	Sobre la identidad poblacional y movimiento migratorio del rorcual común en el mar Mediterráneo occidental	210
1.3	Sobre el efecto del ruido en el comportamiento del rorcual común	213

1.4 Sobre la gestión y regulación del ruido como contaminante	214
2. Conclusiones generales	217
Referencias bibliográficas	220

1. Agradecimientos especiales

A Carolina por su infinita paciencia y su apoyo y a Dario por todas las horas de juego que le debo.

A Fernando Colmenares por haber aceptado adoptar mi expósito proyecto de tesis doctoral sin dudarlo en el mismo momento en el que se lo propuse.

A Chris Clark por haberme ofrecido el acceso a su extraordinaria infraestructura contagiándome su pasión por los misticetos.

2. Agradecimientos generales

Este trabajo ha recibido el apoyo de muchas personas e instituciones tanto durante su diseño como durante su realización. Quiero agradecer muy sinceramente a todas estas personas e instituciones y remarcar que su apoyo ha sido imprescindible para la obtención de los resultados aquí descritos.

2.1 Financiación:

Este trabajo ha podido ser realizado gracias a la financiación de:

La Ciudad de las Artes y las Ciencias S.A., Generalitat Valenciana y Parques Reunidos Valencia S.A. como operador de gestión de L'Oceanogràfic de la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia que han financiado la parte mayoritaria de este proyecto y sustentado el coste del personal responsable de su ejecución como parte de la actividad investigadora del Área de Investigación de L'Oceanogràfic.

El Centro de Recuperación de Animales Marinos (CRAM) que financió el alquiler de dos unidades EAR y los gastos de desplazamiento por mar y trabajo de campo en el área del cabo de Begur.

El Consorcio del Santuario Pelagos (Francia, Italia, Mónaco) que financió el alquiler de una unidad EAR y los gastos de trabajo de campo del fondeo en la cuenca Provenzal.

El Centro de Investigaciones Marinas, Departamento de Oceanografía y Pesca de la Universidad de las Islas Azores que financió el alquiler de una unidad EAR y los gastos de trabajo de campo del fondeo en las islas Azores.

La financiación aportada por los patrocinadores Iberdrola Renovables y Ánimo TV permitió cubrir parte de los gastos de desplazamientos por tierra de este trabajo.

La Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Valenciana que financió los gastos de desplazamiento por mar y trabajo de campo en el área de la reserva marina de las islas Columbretes y canal de Ibiza.

La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía que financió los gastos de desplazamiento por mar y trabajo de campo en el área de la reserva marina de la isla de Alborán y áreas del Estrecho de Gibraltar y cabo Espartel en Marruecos.

2.2 Apoyo personal:

El apoyo recibido por las siguientes personas y la participación de sus instituciones han sido fundamentales:

Dra. Lucia di Iorio, compañera de un recíproco y testarudo esfuerzo por estudiar ballenas, amablemente cedió varios módulos de Matlab y fotografías que decoran este trabajo.

Dra. Mónica Cordeiro, miembro del Centro de Investigaciones Marinas, Departamento de Oceanografía y Pesca de la Universidad de las Islas Azores, coordinó y realizó el trabajo de campo en las islas Azores.

Dra. Sophie Laran, responsable del “Centre de Recherche sur les Cétacés”, Marineland Antibes, coordinó y realizó el trabajo de campo en la cuenca Provenzal.

Sr. Ferran Alegre, director del Centro de Recuperación de Animales Marinos (CRAM), apoyó la realización de este trabajo desde su origen.

Dr. José María Cortés, director de SIDMAR Estudios y Servicios Oceanográficos, facilitó material para construir las líneas de fondeo y asesoró en el diseño de las mismas.

Profesor Miguel Bruno Mejías, Responsable del Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Cádiz, asesoró en la selección de los puntos de fondeo en el Estrecho de Gibraltar y Cabo Espartel y calculó la dirección y velocidad de corriente en el Estrecho de Gibraltar con el modelo numérico del Sistema de Oceanografía Operacional en el Estrecho de Gibraltar desarrollado por el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Cádiz y la Sección de Oceanografía del Instituto Hidrográfico de la Marina, para el estudio del uso del Estrecho por los rorcuales comunes.

Profesor Jesús García-Lafuente, Responsable del Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, asesoró en la selección de los puntos de fondeo en el Estrecho de Gibraltar y Cabo Espartel.

Capitán José Manuel Quijano, jefe de la Sección de Oceanografía del Instituto Hidrográfico de la Marina, asesoró en la selección de los puntos de fondeo en el Estrecho de Gibraltar y Cabo Espartel.

Sr. José Antonio Esteban, Departamento de Investigación de L’Oceanogràfic de la Ciudad de las Artes y las Ciencias por su inestimable ayuda en el servicio de los instrumentos, trabajo de campo y primera fase del análisis de datos.

Sr. Juan Eymar, técnico de la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Valenciana y responsable del Área de Recuperación y Conservación de Animales del Mar de L'Océanogràfic, por su inestimable ayuda en el trabajo de campo.

Profesor José Díaz, Departamento de Zoología de la Facultad de Biología de la Universidad Complutense de Madrid por su asesoramiento en los análisis estadísticos.

Profesora María Victoria Hernández, Departamento de Metodología de las Ciencias del Comportamiento de la Facultad de Psicología de la Universidad Complutense de Madrid por su asesoramiento en los análisis estadísticos.

2.3 Permisos institucionales

Puertos del Estado, Ministerio de Fomento concedió el permiso para utilizar las líneas de fondeo de las boyas meteorológicas de la Red de Alerta y Observación del cabo de Begur y sur de Mahón para instalar unidades EAR.

“Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer” de la red de “Centre National de la Recherche Scientifique”, concedió el permiso para instalar un EAR sobre la estructura de la boya de instrumentación oceanográfica “Bousolle” en la cuenca Provenzal.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación concedió los permisos para realizar fondeos de instrumentos en las reservas marinas de las Islas Columbretes e isla de Alborán.

CAPÍTULO I:
Introducción general



1. El rorcual común en el mar Mediterráneo

El rorcual común (*Balaenoptera physalus* L. 1758) es el único misticeto comúnmente observado en el mar Mediterráneo. Actualmente se considera como una subpoblación aislada del resto de poblaciones del Atlántico norte que abarca toda la cuenca Mediterránea aunque es más abundante en la región noroccidental (IWC, 1992; 2007 y 2009; Cañadas *et al.*, 2005; Reeves y Notarbartolo di Sciara, 2006). Su límite de distribución en el área de conexión con el océano Atlántico no está clara, pero actualmente se asume que el estrecho de Gibraltar podría no ser una barrera geográfica y podrían encontrarse rorcuales comunes mediterráneos al sur de Portugal, en las aguas adyacentes al estrecho de Gibraltar. Por tanto, su límite de distribución está actualmente definido de manera arbitraria entre el suroeste de Portugal y el noroeste de Marruecos (Cañadas *et al.*, 2005; IWC, 2007). Debido a sus costumbres pelágicas tanto para su alimentación como su reproducción, se desconocen gran parte de sus características biológicas y ecológicas.

1.1 Morfología del rorcual común

En tamaño, este animal es el segundo más grande existente en el planeta, solo superado por la ballena azul (*Balaenoptera musculus*). Existe un dimorfismo sexual bien marcado en tamaño para todas las poblaciones estudiadas, las hembras son mayores que los machos. El tamaño medio para la población mediterránea es de entre 13 metros para los machos y 15 metros para las hembras, aunque pueden llegar a alcanzar 26 metros (Notarbartolo di sicara *et al.*, 2003). Su peso puede alcanzar hasta 63.500 kg. (Aguilar, 2008; Stewart *et al.*, 2002).

Como todos los miembros de la familia Balaenopteridae (ballena azul, ballena de Bryde *B. edeni*, yubarta *B. novaeangliae*, rorcual aliblanco *B. acutorostrata*, rorcual austral *B. bonaerensis*, ballena de Sei *B. borealis*), a pesar de su gran tamaño, el rorcual común presenta una línea estilizada, de cuerpo hidrodinámico. Su rostro es picudo y presenta una cresta que se prolonga hacia delante desde los espiráculos, que son dobles como en todos los misticetos. Estos espiráculos están protegidos por unas estructuras a modo de adiposidades, que en el caso del rorcual común, son prominentes. Las finas aletas pectorales son pequeñas en proporción con el tamaño del cuerpo, mientras que la aleta dorsal, aunque pequeña como en el resto de los miembros de esta familia, es relativamente alta (hasta 60 cm.), falciforme y dirigida hacia atrás, se sitúa en el último tercio posterior del cuerpo del animal. La aleta caudal es ancha, con forma ligeramente triangular, y tiene un borde posterior ligeramente cóncavo, con una profunda escotadura que separa ambos lóbulos. En la parte ventral del cuerpo presenta de 50 a 100 largos surcos (*cavum ventrale*) iniciándose en la mandíbula inferior, entre las aletas pectorales que llegan hasta el ombligo. La hiperextensión de estos surcos permite alojar un volumen enorme de agua en la boca para capturar krill (Stewart *et al.*, 2002).

La pigmentación del rorcual común en su región dorsal es color azulado oscuro a gris pardo. La región ventral es blanca o gris claro. Presenta dos características únicas, una corresponde a dos marcas en forma de V invertida de color claro denominadas “chevron” que se distribuyen entre los espiráculos y las aletas pectorales. La otra

corresponde a la asimetría de pigmentación en el rostro, siendo la mandíbula superior e inferior derecha de color blanco o gris claro y la izquierda color azulado oscuro a gris pardo, como la región dorsal. Esta asimetría ocurre en todas las poblaciones estudiadas y es más marcada en la población mediterránea y en las del océano Atlántico norte (Agler *et al.*, 1990).

La morfología general del rorcual común queda representada en la figura 1.



Figura 1: Representación artística del rorcual común, donde puede observarse su rostro picudo, aleta dorsal retrasada, aletas pectorales finas y la característica pigmentación formando el chevron.

1.2 Conocimientos sobre la población mediterránea

Tras una extensa actividad ballenera durante el siglo XX, la Comisión Ballenera Internacional definió su moratoria a nivel global en 1966, empezando por las poblaciones del océano Pacífico. Actualmente todas las poblaciones se encuentran dentro de esta moratoria. La población mundial se estima en unas 40.000 ballenas para el hemisferio norte y entre 15.000 y 20.000 en el hemisferio sur (Aguilar, 2008).

La primera explicación acerca de la presencia de este mysticeto en el mar Mediterráneo fue planteada por Richiardi (1874), quien propuso que estos eran animales de origen Atlántico que aprovechaban la productividad estival de la cuenca mediterránea para alimentarse. Posteriormente otros autores han seguido apoyando la hipótesis de la entrada de rorcuales comunes atlánticos al mar Mediterráneo (Jonsgård, 1966; Viale 1977 y 1985), o una combinación entre rorcuales residentes en el mar Mediterráneo y rorcuales atlánticos que visitan la cuenca estacionalmente (Duguy y Vallon, 1976). Más de un siglo después se continúa debatiendo si los rorcuales comunes observados en el mar Mediterráneo han de considerarse como una población aislada o no. Actualmente, la Comisión Ballenera Internacional considera a los rorcuales del mar Mediterráneo como una subpoblación con un alto grado de aislamiento de la población del Atlántico noreste (IWC, 2009).

El tamaño de la población de rorcuales comunes del mar Mediterráneo no está bien definido aunque se han realizado varios censos, principalmente en la cuenca occidental, obteniendo valores entre 2000 a 8500 individuos (Forcada *et al.*, 1993), 901 individuos (C.I. 95% = 591-1374) (Forcada *et al.*, 1995) y 3583 individuos (C.I. 95% = 2130-6027) (Forcada *et al.*, 1996). La falta de datos sobre su distribución y dinámica poblacional impiden obtener una cifra más precisa. Esta población incluye menos de 10.000 animales adultos expuestos a constantes amenazas que posiblemente son causa de su

declive, pero no hay suficientes datos sobre su abundancia ni su tendencia para poder confirmarlo (Reeves y Notarbartolo di Sciara, 2006).

La definición de las diferentes poblaciones de rorcual común actualmente aceptadas se ha basado principalmente en la distribución de áreas de alimentación, donde estos animales se concentran (Mizroch et al., 1984; Agler et al., 1990; Bérubé et al., 1998). En esta y en otras especies de mysticetos, también se han aplicado técnicas genéticas, de marcaje, foto-identificación, diferencias en los parásitos o en las cargas de contaminantes así como valores demográficos y morfológicos de individuos capturados (Taylor, 1999; Dizon *et al.*, 1992). Diferencias en los resultados de estas técnicas de seguimiento de poblaciones sugieren que la fidelidad geográfica de los mysticetos varía espacial y temporalmente en función de ciclos interanuales (Payne *et al.*, 1990) y/o ciclos oceanográficos (Greene y Pershing, 2000). Además, se desconoce hasta qué punto las poblaciones atribuidas a diferentes áreas de alimentación se entremezclan para reproducirse. Por tanto, la definición de poblaciones de esta especie continúa hoy siendo revisada y modificada a partir de nuevos estudios con técnicas alternativas.

La propuesta de que existe un stock de rorcuales comunes en el mar Mediterráneo que es independiente de los del océano Atlántico se apoya en tres datos; su presencia permanente en aguas del mar Mediterráneo, la presencia de crías y las diferencias genéticas que presentan en relación a las poblaciones del Atlántico noreste (Notarbartolo di Sicara, *et al.*, 2003). Estudios comparativos entre las características genéticas de las poblaciones Mediterránea y de la región norte del océano Atlántico sugieren un aislamiento genético a nivel de ADN mitocondrial tanto con la población del Atlántico noroeste como con la del noreste. Sin embargo a nivel del ADN nuclear sólo se encontraron diferencias significativas con la población del Atlántico noroeste (Bérubé et al. 1998). Los autores proponen que la población Mediterránea se encuentra genéticamente aislada de las Atlánticas y que a pesar de la cercanía física entre ellas, incluso explotando las mismas áreas de alimentación, existe una subestructura bien definida entre estas que impide el flujo genético. Posteriormente, estos resultados han sido revisados, aplicando métodos más precisos que permitieron demostrar que existe relación genética entre la población mediterránea y la del atlántico noreste, basada en un flujo genético periódico aunque reducido entre ambas poblaciones (Palsbøll *et al.*, 2004). A pesar de los resultados genéticos, la relación entre la población mediterránea y la del Atlántico noreste no está clara y continúa siendo motivo de controversia. La fructífera industria ballenera en esta región durante el siglo pasado (Sanpera y Aguilar, 1992), la presencia de rorcuales comunes de manera esporádica utilizando el estrecho de Gibraltar (Raga y Pantoja, 2004) y las observaciones descritas en las aguas adyacentes tanto por el lado Mediterráneo como por el Atlántico (Salazar-Sierra *et al.*, 2004) contribuyen a mantener activo este debate.

Las técnicas genéticas son útiles ya que reflejan el grado de aislamiento reproductivo que generalmente es consecuencia de aislamiento demográfico. Sin embargo se ha demostrado que esta técnica por sí sola no puede identificar discontinuidades recientes en las poblaciones ya que aún no se reflejan en la historia evolutiva de los genes o bien cambios poblacionales que suceden en periodos de tiempo relativamente cortos (ej. decenios) (Hatch y Clark, 2004; McDonald *et al.*, 2006).

Una de las técnicas recientemente más recomendadas para mejorar la información sobre la estructura poblacional de los cetáceos cuando los marcadores tradicionales (ej.

caracteres genéticos o morfológicos) no permiten resolver la identidad de las poblaciones es la acústica (Mellinger y Barlow, 2003; McDonald *et al.*, 2006). El seguimiento acústico como marcador poblacional presenta varias ventajas frente a otras técnicas alternativas: Las vocalizaciones son descriptores actualizados de la población puesto que son señales sociales que representan los movimientos y asociaciones del presente. Además, puesto que las vocalizaciones pueden evolucionar más rápidamente que los marcadores tradicionales, el seguimiento acústico puede permitir detectar y describir poblaciones crípticas o relaciones particularmente complejas. El seguimiento acústico es eficaz en proporcionar muestras suficientemente grandes para aplicar análisis de las estructuras de las poblaciones y es un método que permite obtener datos de forma relativamente rápida y remota en áreas de difícil trabajo (McDonald *et al.*, 2006).

Según Taylor (1999), para definir unidades de gestión biológicamente precisas o stocks, en especies amenazadas, como el rorcual común, cuya subestructura de poblaciones se conoce tan sólo vagamente, es fundamental poder evaluar si las características de su comportamiento acústico pueden ofrecer información acerca de su dinámica poblacional (Hatch y Clark, 2004).

El rorcual común es uno de los misticetos cuya descripción de su repertorio acústico es más completa, en parte por ser uno de los más sencillos comparado con las demás especies (Bass y Clark, 2003). En el mar Mediterráneo se ha descrito el comportamiento acústico del rorcual común en el mar de Liguria, su principal área de alimentación en la cuenca noroccidental (Clark *et al.*, 2002), pero hasta la fecha no se ha utilizado esta técnica para explorar la identidad poblacional ni sus patrones de distribución.

1.3 Ecología del rorcual común en el mar Mediterráneo

El rorcual común es de hábitos pelágicos, tanto para su alimentación como para su reproducción, lo que hace de este animal uno de los cetáceos menos conocidos del mar Mediterráneo, a pesar de su residencia anual y de su tamaño. La mayoría de la información disponible sobre las características biológicas del rorcual común en el mar Mediterráneo se centra en la cuenca noroccidental en los meses de primavera y verano, siendo muy escasa y fragmentaria la información sobre el resto de la cuenca Mediterránea y sobre todo fuera del periodo estival.

El efecto de las características oceanográficas en la distribución y dispersión local de los rorcuales comunes en la cuenca noroccidental del mar Mediterráneo ha sido bien documentado (Forcada *et al.*, 1996; Mouillot y Viale, 2001; Littaye *et al.*, 2004; Laran y Drouot-Dulau, 2007; Laran y Gannier, 2008; Azzelino *et al.*, 2008; Moulins *et al.*, 2008; Panigada *et al.*, 2008, Cotté *et al.*, 2009). Los resultados de estos trabajos demuestran que son muy sensibles a las características físiográficas del medio que habitan, presentando una clara preferencia por áreas pelágicas con elevados gradientes de batimetría y temperatura del agua, con mayor salinidad y concentración de clorofila.

La presencia de neonatos se reparte a lo largo de todo el año aunque la ocurrencia de encuentros es más elevada entre septiembre y enero, con un pico en noviembre (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2003). El pico reproductivo hacia el final del otoño o invierno es coincidente con el patrón descrito en otras regiones oceánicas para esta

especie (Gambell, 1985), pero la extensión del periodo reproductivo a lo largo de todo el año es particular.

La concentración de animales en la cuenca noroccidental en los meses de primavera y verano coincide con la época de máxima productividad de la cuenca debido a afloramientos de aguas frías vinculados al frente Liguro-Provenzal (Jaques, 1990; Le Vourch *et al.*, 1992), provocando blooms de comunidades de zooplancton, especialmente el eufásido *Meganictifanes norvegica*, que ha sido descrito como su principal dieta en el mar Mediterráneo (Relini *et al.*, 1994) y en el océano Atlántico (Jonsgård, 1966). Su presencia aquí se centra claramente en la alimentación. Estos resultados han permitido definir la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal como el 1^{er} área de alimentación conocida para el rorcual común en el mar Mediterráneo (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2003). No obstante, existen descripciones de comportamientos de alimentación en superficie en las inmediaciones de la isla de Lampedusa, al sur de Sicilia, durante los meses de invierno (Marini, *et al.*, 1996a; Canese *et al.*, 2006). Las comunidades de zooplancton en esta área son diferentes a las del mar de Liguria, predominando el eufásido *Nyctiphanes couchi*. Canese *et al.* (2006) sugieren que estas observaciones implican que el rorcual común en el Mar Mediterráneo presenta más estrategias de alimentación que las descritas en el mar de Liguria y que probablemente se trate de una especie más generalista en su dieta y oportunista en los recursos que explota sin seguir el patrón típico descrito en los rorcuales donde el invierno es el periodo dedicado a la reproducción.

De momento no se han descrito áreas de reproducción para el rorcual común en el mar Mediterráneo. Marini *et al.* (1992) sugirieron que los rorcuales migran en invierno a zonas del sur del mar Mediterráneo para reproducirse y más tarde se describió la presencia de hembras con crías en los alrededores de la isla de Lampedusa al sur de Sicilia (Marini *et al.*, 1996a). No obstante, la amplia distribución geográfica de los encuentros con rorcuales neonatos a lo largo de todo el mar Mediterráneo contradice cualquier precisión acerca de un área de reproducción concreta.

Los movimientos migratorios del rorcual común en el mar Mediterráneo son actualmente objeto de considerable especulación. La falta de datos fuera del periodo estival y la escasa información sobre su presencia y hábitos fuera de la cuenca noroccidental solo permiten plantear diferentes hipótesis acerca de los posibles patrones migratorios. La información disponible impide confirmar si sus movimientos estacionales son análogos a los descritos en el océano Atlántico y Océano Pacífico, donde estos se concentran en áreas de alimentación en altas latitudes durante el verano y en áreas de reproducción en bajas latitudes durante el invierno (Lockyer y Brown, 1981; Evans, 1987; Bowen y Siniff, 1999). Este modelo migratorio clásico de los misticetos ha sido cuestionado por los resultados obtenidos con técnicas acústicas (ej. Clark, 1995; Watkins *et al.*, 2000), los cuales han puesto de relieve que los movimientos entre áreas de altas y bajas latitudes no son tan homogéneos como se pensaba para poblaciones atlánticas y pacíficas.

Hacia el final del verano y principio del otoño, la concentración de rorcuales en la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal se reduce progresivamente, iniciándose una dispersión hacia el sur. Estudios en el margen sur de la cuenca Provenzal y margen sur de la cuenca Tirrena demuestran que la presencia de rorcuales en esta zona sigue un patrón bimodal, con picos en abril-mayo y septiembre-octubre, coincidiendo con la llegada de

los rorcuales a la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal y posterior dispersión al final del verano (Marini *et al.* 1996b; Laran y Drouot-Dulau, 2007). Más al sur, en el canal de Messina, existen estudios que han demostrado la presencia de rorcuales al finalizar el periodo de alta productividad de la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal (Puzzolo & Tringali 2001). Además, al final del invierno e inicio de la primavera, esta zona presenta concentraciones de krill similares a las descritas en el mar de Liguria en verano, lo que podría permitir a los rorcuales explotar este recurso antes o durante su desplazamiento hacia la cuenca noroccidental del mar Mediterráneo (Marini *et al.*, 1996b).

La presencia de rorcuales en la vertiente oeste de la cuenca occidental es conocida por la información disponible sobre varamientos de animales muertos tanto en las costas Españolas (Grau *et al.*, 1980; Borrell *et al.* 2000), como en las de Argelia (Boutiba *et al.* 1992). La única información disponible acerca de su distribución estacional es la obtenida por Raga y Pantoja (2004). Aunque el tamaño muestral de este estudio es limitado y la mayoría del esfuerzo se realizó en la época estival, sus autores sugieren que la presencia de rorcuales en la cuenca Balear (n = 13) sigue un patrón bimodal paralelo al descrito por colegas franceses, con picos en primavera y otoño. Sin embargo, la periodicidad de encuentros en el mar de Alborán y Estrecho de Gibraltar (n = 14) y su dirección de movimiento observada hace sugerir a los autores que los rorcuales comunes en esta zona migran hacia el océano Atlántico durante el verano y retornan al mar Mediterráneo en los meses de invierno. Siguiendo esta hipótesis, Salazar-Sierra *et al.* (2004) sugieren que el Estrecho actúa como corredor migratorio entre la cuenca occidental del mar de Alborán y el océano Atlántico, con un desplazamiento predominante hacia el este en otoño e invierno y hacia el oeste en primavera y verano.

Los resultados del único estudio de telemetría satélite y análisis de isótopos estables de biopsias (Guinet *et al.*, 2005) sugieren que al menos una parte de la población mediterránea migra al océano Atlántico estacionalmente. No obstante, esta conclusión está basada en un tamaño muestral muy pequeño.

La presencia de rorcuales concentrados en la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal en primavera y verano ha sido ampliamente descrita. Al menos una parte considerable de esta concentración de animales parece presentar un claro patrón de desplazamiento entre esta área de alimentación y zonas del sur de la cuenca Mediterránea al inicio de la primavera y al inicio del otoño. No obstante, a diferencia de lo que ocurre con los océanos, las particularidades oceanográficas del mar Mediterráneo podrían proporcionarles la oportunidad de extender el periodo de alimentación al invierno y el periodo de reproducción al verano. Por tanto, cabe esperar que los rorcuales en el mar Mediterráneo se hayan adaptado a un medio más permisivo modificando su ecología, comportamiento y la fisiología de su reproducción.

La gran cantidad de información recolectada por los barcos cazaballeneros en los siglos XIX y XX en otras regiones del planeta acerca de la distribución de las diferentes especies de ballena ha permitido analizar el hábitat del rorcual común. Sergeant (1977) indica como a diferencia con poblaciones de rorcuales principalmente ictiófagos cuya distribución es fácil de predecir en el océano Atlántico, los rorcuales que se alimentan principalmente de krill presentan una enorme variación anual en su distribución. El hábitat del rorcual común parece estar caracterizado principalmente por la distribución de altas concentraciones de su principal presa y las características físicas que facilitan su concentración (Sergeant, 1977; Woodley y Gaskin, 1996). Aparte de los estudios

realizados en el mar de Liguria en la época estival, no hay más información acerca de la presencia del rorcual común y las características oceanográficas en la cuenca Mediterránea. La dificultad por identificar un patrón migratorio claro y cíclico en la cuenca Mediterránea podría deberse en parte a sus hábitos de alimentación y a la falta de información acerca de la dinámica del zooplancton Mediterráneo.

1.4 Comportamiento acústico

El rorcual común es uno de los misticetos cuya descripción de su repertorio acústico es más completa, en parte por ser uno de los más sencillos comparado con las demás especies (Clark *et al.*, 2002). Su repertorio se caracteriza por siete tipos de señales de baja frecuencia, en su mayoría dentro de la banda 15-25 Hz, que pueden ordenarse en un conjunto de cuatro señales producidas en secuencias repetitivas y otro conjunto de tres señales más raras y de carácter individual (Watkins *et al.*, 1987). Una descripción detallada de estas señales puede encontrarse en el capítulo III.

Los sonidos producidos por el rorcual común ocurren en secuencias, rara vez de forma individual. La producción de secuencias varía estacionalmente, siendo cortas y de carácter irregular a lo largo de todo el año y bajo diferentes contextos de comportamiento (Watkins, 1981; Watkins *et al.*, 1987) y en muchas regiones oceánicas durante los meses de invierno se observan secuencias más intensas, largas y ordenadas que pueden llegar a durar hasta varios días (Thompson y Friedl, 1982; Watkins *et al.*, 1987; Thompson *et al.*, 1992; Moore *et al.* 1998; Watkins *et al.* 2000; Stafford *et al.*, 2007). Estas secuencias bien estructuradas y largas que ocurren durante el invierno coinciden con la época de reproducción por lo que se han denominado canciones (Watkins *et al.*, 1987; Clark, 1990), ya que su función comunicativa se asocia al comportamiento sexual (Watkins, 1987; Moore *et al.*; 1998). Además, se ha descrito que sólo los machos de esta especie producen estos sonidos (Croll *et al.*, 2002), lo cual apoya la hipótesis de una función sexual. No obstante, este comportamiento también ha sido descrito fuera de la época de reproducción y en áreas de alimentación por lo que su función probablemente es más compleja de lo descrito (Clark, 1995; Clark y Fristrup, 1997; Croll *et al.*, 2001).

El trabajo de Thompson *et al.* (1992), comparando grabaciones de rorcual común entre el océano Pacífico y el océano Atlántico, permitió a los autores proponer que determinados caracteres acústicos del display sexual de los rorcuales comunes podría actuar como descriptor de las diferentes poblaciones, en particular el intervalo entre pulsos en las secuencias y el incremento en frecuencia de los pulsos, que es una medida indirecta del ancho de banda del pulso. Estudios posteriores han demostrado la utilidad del seguimiento acústico como método de identificación de la estructura poblacional del rorcual común (ej. Hatch y Clark, 2004; Clark y Gagnon, 2004; Delarue *et al.*, 2009; Gedamke, 2009). El tipo de señales incluidas en las secuencias, el intervalo entre pulsos en las secuencias y en menor grado el ancho de banda, frecuencia media y duración de los pulsos han sido los parámetros acústicos que mejor expresan la identidad de las poblaciones.

Algunos autores han criticado el seguimiento del comportamiento acústico como método de identificación de la estructura poblacional de las especies puesto que este comportamiento es demasiado susceptible al efecto de factores ambientales o sociales

para ser estable y fiable como descriptor de poblaciones (Harvey y Pagel, 1991). Pero esta variación intraespecífica es valiosa para definir una gestión de conservación eficaz y además suele ser demasiado reciente para verse reflejada en el genoma (Hatch y Clark, 2004; Clapham *et al.*, 2008).

1.5 Estatus de protección

La población de rorcuales comunes del mar Mediterráneo está protegida por múltiples acuerdos internacionales. Se considera una especie amenazada y de alta prioridad según la Unión Internacional de la Conservación de la Naturaleza, está incluida en el anexo I de la Convención de Bonn sobre especies migratorias, el anexo I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres, el anexo II de la Convención de Berna sobre la conservación de vida silvestre europea, anexo II de la Convención de Barcelona sobre la protección de especies mediterráneas y también está incluida dentro del Acuerdo para la Conservación de los Cetáceos del Mediterráneo, Mar Negro y Atlántico Contiguo. Además, su principal área de alimentación en el mar de Liguria ha sido declarada santuario marino internacional en 1999, siendo la primera área marina protegida internacional dedicada a los cetáceos. En 2002, esta área fue incluida como Zona Especialmente Protegida de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM).

2. Conservación del rorcual común en el mar Mediterráneo

2.1 Principales amenazas

Las amenazas y las causas de mortalidad del rorcual común en el mar Mediterráneo han ido evolucionando en paralelo al progreso de las actividades humanas en el litoral y en el medio marino. La caza ballenera, por ejemplo, no parece haber sido un problema grave para el rorcual común hasta que la propulsión de los buques se modernizó durante la revolución industrial, permitiendo alcanzar a estas veloces ballenas (Roman y Palumbi, 2003; Gregor *et al.*, 2000). A pesar de ello, la caza ballenera no parece haber sido una actividad muy fructífera en la cuenca mediterránea, salvo en la región del estrecho de Gibraltar (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2003; Sanpera y Aguilar, 1992; Aguilar y Borrel, 2007).

Numerosas sustancias químicas, como las dioxinas, PCBs, plaguicidas, ftalatos, alquifenoles y el bisfenol-A, alteran la fecundidad y supervivencia del rorcual común en el mar Mediterráneo (Fossi *et al.*, 2006). Los contaminantes xenobióticos derivados de actividades humanas, especialmente los disruptores endocrinos son una amenaza grave para todos los depredadores del ecosistema marino. En la actualidad no se conoce cuál es el impacto de este tipo de contaminantes en el rorcual común, pero se ha especulado que pueda ser importante debido al elevado nivel presión antrópica sobre el mar Mediterráneo (Marsili, 2000; Fossi *et al.*, 2003).

La interacción con artes de pesca no parece ser un problema evidente en esta especie para el mar Mediterráneo (Notarbartolo di Sciara, 1990), aunque ha habido evidencia de enmalle en redes de deriva (DiNatale y Mangano, 1983; Duguay, 1983; Podestà y Magnaghi, 1989), pero su incidencia es muy baja.

El calentamiento global tiene un efecto directo sobre el medio marino y sobre el ecosistema en el cual se incluyen los cetáceos (Würsig *et al.*, 2002). Este genera cambios en las propiedades bioquímicas y físicas del mar Mediterráneo, que posiblemente alteren la biodiversidad marina y la productividad primaria, potenciando desequilibrios en la red trófica, enfermedades, blooms tóxicos y propagación de especies termofílicas (Gambaiani *et al.*, 2009). Tanto la distribución como la abundancia del eufásido *Meganctifanes norvegica*, principal dieta del rorcual común en esa cuenca marina, están correlacionadas con parámetros hidrobiológicos específicos incluyendo la temperatura del agua, la salinidad y los patrones de corrientes marinas. En el mar Mediterráneo esta especie se encuentra en el límite norte de su tolerancia ecológica, haciéndola muy vulnerable al cambio climático (IWC, 1997; Learmonth *et al.*, 2006). Por esta razón, el calentamiento global es una amenaza directa sobre la supervivencia del rorcual común, no sólo en el mar Mediterráneo, sino en muchas otras regiones marinas (Simmonds y Isaac, 2007; Gambaiani *et al.*, 2009).

Las colisiones entre buques comerciales y rorcuales comunes se han descrito como una de las principales amenazas para la supervivencia de esta especie en el mar Mediterráneo (Panigada *et al.*, 2006). Colisiones de este tipo han sido documentadas desde al menos el siglo XIX y su frecuencia se ve reflejada en las patologías de las colecciones óseas (Notarbartolo di Sciarra *et al.*, 2003). De las once especies de cetáceos más comúnmente relacionadas con colisiones, el rorcual común es la especie más afectada de todas y en todas las cuencas marinas (Laist *et al.*, 2001). En algunas regiones marinas, más de un tercio de los rorcuales varados muertos se han relacionado con la colisión de buques. En el mar Mediterráneo, el 16 % de los varamientos documentados son causa de una colisión mortal y el número de colisiones entre buques comerciales y rorcuales comunes en la cuenca Mediterránea se ha duplicado en un periodo de 20 años (Panigada *et al.*, 2006). Los estudios realizados sobre este tipo de impacto demuestran que cualquier tipo de buque y de cualquier eslora puede colisionar con este cetáceo, pero los buques de más de 80 m de eslora y que navegan a más de 14 nudos son los principales causantes de traumatismos severos o mortales (Laist *et al.*, 2001).

Por último, la posibilidad de que el ruido en el medio marino generado por las diferentes actividades humanas pudiera interferir con las funciones biológicas de los mamíferos marinos constituye una preocupación prioritaria debido a su carácter global y creciente y a la ausencia de cualquier tipo de control. Además, es uno de los aspectos del efecto provocado por la presión antrópica en la biodiversidad marina más sensibles y controvertidos, aunque también uno de los menos conocidos (NRC, 2005). El hombre realiza muchas actividades que producen ruido bajo el agua en el medio marino, de forma intencionada, como por ejemplo: la exploración geofísica, la defensa nacional por medio de sonar, sistemas acústicos de disuasión (pingers) en artes de pesca o infraestructuras de piscicultura y estudios científicos de oceanografía mediante sonido (ej. ATOC, boyas SOFAR, etc.) e hidrografía (ej. sondas batimétricas y perfiladores). Pero también por medio de actividades que radian ruido al medio marino de forma no intencionada, como por ejemplo: el tráfico marítimo comercial y recreativo, la pesca, la construcción litoral (ej. construcción de puertos, diques, puentes), las actividades industriales marinas (ej. campos eólicos, explotación de hidrocarburos) o las actividades relacionadas con la defensa nacional (ej. pruebas de explosivos, artillería, pruebas de resistencia de infraestructuras). La mayoría de los estudios se han centrado en

identificar el impacto fisiológico de perturbaciones acústicas breves, locales y de alta intensidad (ej. sonar). Pero se sabe que la exposición continuada de perturbaciones moderadas (ej. tráfico marítimo) o perturbaciones agudas y recurrentes (ej. exploración geofísica marina) puede estar teniendo un efecto negativo aun más grave en las poblaciones afectadas, aunque su significado biológico y sus consecuencias ecológicas son cuestiones difíciles de definir (Payne y Webb, 1971; NRC, 2000; 2003; Southall, 2005; McDonald *et al.*, 2006; Nowacek *et al.*, 2007; Weilgart, 2007; Hatch *et al.*, 2008; Clark *et al.*, en prensa). La comunicación a larga distancia del grupo de los misticetos es la función más propensa al impacto del ruido producido por las actividades humanas en el medio marino (Payne y Webb, 1971; Richardson *et al.*, 1995). Este grupo de cetáceos se ha especializado en la comunicación a bajas frecuencias en un hábitat cuyo ruido ambiente estaba dominado por el oleaje y no por el tráfico marítimo (NRC, 2003). Por estas razones, las especies de este suborden tienen máxima prioridad en el análisis del significado ecológico de los efectos del ruido marino en los mamíferos marinos (NRC, 2003; 2005; Southall *et al.*, 2009). En este sentido, el rorcual común en el mar Mediterráneo se encuentra comprometido puesto que se ha demostrado que el ruido en esta cuenca marina presenta niveles de los más elevados respecto a otras cuencas marinas (Ross, 2005; Abdulla y Linden, 2008).

2.2 Retos de su conservación

La falta de resultados concluyentes sobre la dinámica poblacional del rorcual común en el mar Mediterráneo hace inviable una evaluación precisa del estatus de conservación de esta especie. No obstante, existe sobrada evidencia acerca del impacto ecológico producido por diferentes tipos de amenazas que sufre el rorcual común y su ecosistema mediterráneo. El significado biológico y las consecuencias ecológicas de estos impactos están aún por cuantificar, pero no hay duda que su efecto no es positivo. Resulta pues, de capital importancia conocer qué movimientos anuales realizan estos animales y en particular qué distribución toman en invierno, con el fin de poder aplicar medidas de conservación integrales, que no sólo protejan las áreas de alimentación, como el caso de la cuenca liguro-tirreno-provenzal, sino también las áreas de reproducción e invernada así como los corredores de unión entre estas regiones. La identidad de la población del rorcual común Mediterráneo y su posible relación con las poblaciones atlánticas no ha podido establecerse con marcadores tradicionales y sus delimitaciones geográficas siguen sin estar claras (Notarbartolo di Sciara *et al.* 2003, NAMMCO 2003). Esta información es fundamental para poder gestionar de forma efectiva la conservación de una especie cuyo rango de distribución abarca múltiples países.

Por otro lado, los diferentes tipos de amenazas identificadas deberían estar reguladas para reducir su presencia y su impacto en la medida de lo posible en áreas donde la presencia del rorcual común es evidente. Pero no todas las amenazas están reguladas o al menos controladas en un mismo nivel. El esfuerzo realizado para controlar y regular los contaminantes xenobióticos en el medio marino no es comparable con el realizado para reducir las colisiones entre buques comerciales y rorcuales comunes o para reducir y controlar el ruido introducido en el hábitat de esta especie. Por ejemplo, la máxima abundancia de rorcuales comunes en la cuenca tirreno-liguro-provenzal ocurre durante el verano, coincidiendo con el mayor número de ferries y mayor número de trayectos por día realizados por las diferentes compañías (Panigada, *et al.*, 2006). La mayoría, si no todas, las rutas de estos ferries atraviesan el santuario marino dedicado a la

conservación de los cetáceos y en particular al rorcual común. Sería lógico que el tránsito de estos ferries estuviera regulado, limitándose la velocidad y aumentando la vigilancia en áreas de conocida presencia del rorcual común, como se ha realizado con éxito en otras regiones oceánicas para diferentes especies (Bettridge y Silber, 2009).

En España, las únicas regulaciones que se han realizado en este contexto son una recomendación de reducción de velocidad en el área de mayor densidad de cachalotes en el estrecho de Gibraltar (IHM, 2007) y el reposicionamiento del dispositivo de separación de tráfico marítimo de cabo de Gata para evitar el tráfico marítimo comercial dentro del lugar de interés comunitario (LIC) propuesto para el delfín mular (*Tursiops truncatus*) en el marco de la Directiva Hábitats de la Unión Europea (IHM, 2006). Ninguna de estas dos regulaciones se ha centrado en la reducción de las colisiones entre buques y rorcuales, aunque la recomendación en el estrecho de Gibraltar puede intervenir de manera indirecta si esta recomendación se cumple por los navegantes.

Sobre el ruido ambiente como contaminante, la situación española acerca de su regulación y control todavía se encuentra en una fase embrionaria. En junio de 2008 se estableció un marco de acción comunitaria para la política del medio marino mediante la trasposición de la Directiva de Estrategia Marina de la Unión Europea (Directiva 2008/56/CE de 17 de junio de 2008), incluyendo el ruido como contaminante a regular y controlar. Este marco de acción obliga en 6 años a elaborar y aplicar un programa de supervisión para la evaluación permanente y la actualización periódica de los objetivos y obliga a haber establecido en 2016 un paquete de medidas para alcanzar un buen estado ecológico de las regiones marinas que debería iniciarse en 2018. Aparte de esta regulación, en diciembre de 2007 se ratificó el Real Decreto de Conservación de Cetáceos en el que se prohíbe producir ruidos o sonidos estridentes en un radio de 500 metros de la zona de presencia de cetáceos aunque actualmente sólo la comunidad autónoma de las islas Canarias implementa esta medida.

Una de las principales características del ruido marino en la cuenca Mediterránea es su elevado nivel, principalmente debido a la densidad de tráfico marítimo comercial y la exploración geofísica (Ross, 2005; Abdulla y Linden, 2008). Habiéndose identificado estas dos fuentes como las más problemáticas y siendo el rorcual común mediterráneo una especie de alta prioridad para su conservación y evaluación del impacto del ruido en su supervivencia, sería lógico que estas estuviesen reguladas y controladas. Sin embargo, la situación actual está lejos de una regulación de estos contaminantes.

Puede concluirse que actualmente en España, tanto el impacto provocado por dos de las principales causas de ruido como la problemática de las colisiones con buques, no presentan ningún tipo control, ni regulación. Esta situación puede explicarse en gran parte de por la falta de información disponible sobre de la ecología de la especie, sobre el mecanismo de impacto de las principales amenazas y sobre la falta de control de la fuente de estas amenazas. Por estas razones resulta prioritario abordar el problema por tres vías. La primera, reforzando la investigación sobre el rorcual común mediterráneo para definir su identidad poblacional y sus movimientos estacionales y así obtener más información que permita dirigir las acciones de conservación a sus áreas y periodos estacionales críticos. La segunda, reforzando la investigación sobre las consecuencias ecológicas del impacto de los contaminantes a regular que ayude a diseñar una gestión efectiva. Y la tercera, analizando la situación actual acerca de la producción de ruido

por el tráfico comercial y las actividades de exploración geofísica marina en las áreas críticas para el rorcual común.

Los resultados de los trabajos incluidos en esta tesis doctoral proporcionan información clave sobre la identidad poblacional del rorcual común en el mar Mediterráneo, sus movimientos migratorios en la cuenca occidental y sobre el impacto del ruido como contaminante en el comportamiento de esta especie. Toda esta información contribuye a aumentar de manera considerable la base de datos necesaria para poder aplicar una efectiva gestión de conservación integral del rorcual común en el mar Mediterráneo occidental.

CAPÍTULO II:

Patrón estacional y movimiento migratorio del rorcual común en el Mediterráneo Occidental



1. Introducción

La mayoría de la información disponible acerca de la presencia estacional y movimientos migratorios del rorcual común en el mar Mediterráneo se ha obtenido de estudios realizados en la región noroccidental durante el verano, en particular en la cuenca Liguro-Tirreno-Provenzal. Fuera de esta región y de esta época la información disponible es reducida y muy segregada, lo que impide definir un posible patrón de desplazamiento estacional.

La cuenca Liguro-Tirreno-Provenzal ha sido descrita como la principal área de alimentación de la población mediterránea, presentando altas concentraciones del Eufásido *Meganyctiphanes norvegica* desde el final de la primavera hasta el final del verano (Aguilar 1985, Zanardelli *et al.* 1992, Relini *et al.* 1992, Jahoda y Notarbartolo di Sciara 1993, Notarbartolo di Sciara *et al.* 1993, Forcada *et al.* 1995, Gannier 1997, Mussi *et al.* 1997, 1998 & 1999). Los rorcuales en esta zona aprovechan los afloramientos del sistema frontal permanente de Liguria (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2008). Estudios realizados en el margen sur de la cuenca Provenzal y margen sur de la cuenca Tirrena demuestran que la presencia de rorcuales en estas áreas es bimodal, con picos de presencia en abril-mayo y septiembre-octubre, coincidiendo con la llegada de los rorcuales a la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal y posterior dispersión al final del verano (Marini *et al.* 1996a; Marini *et al.* 1996b; Laran y Drouot-Dulau, 2007). Este mismo patrón ha sido descrito en otras dos regiones mediterráneas, el canal de Messina, con una tendencia de desplazamiento hacia el noreste en primavera/verano y hacia el sur en otoño (Puzzolo & Tringali, 2001), aunque también ha sido descrito como posible área de alimentación en primavera y canal migratorio en otoño (Aïssi *et al.*, 2008). Todos estos resultados sugieren que los rorcuales comunes observados en la región noroccidental del mar Mediterráneo presentan un patrón estacional bien marcado, con un desplazamiento desde el sur hacia la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal, donde permanecen en verano alimentándose y un posterior desplazamiento hacia regiones de baja latitud donde invernan.

Los conocimientos acerca de la presencia estacional en la región mediterránea española son muy limitados. La única información disponible acerca de su distribución estacional es la obtenida por Raga y Pantoja (2004). Aunque el tamaño muestral de este estudio es limitado y la mayoría del esfuerzo se realizó en la época estival, sus autores sugieren que la presencia de rorcuales en la cuenca Balear (n = 13) sigue un patrón bimodal paralelo al descrito por colegas franceses, con picos en primavera y otoño. Estas observaciones concuerdan con el modelo migratorio clásico de los misticetos entre áreas de alimentación en altas latitudes en verano y áreas de reproducción en bajas latitudes en invierno (Lockyer y Brown, 1981), reduciendo sus dimensiones migratorias a las de la cuenca mediterránea.

Sin embargo, los resultados de algunos trabajos no coinciden con esta hipótesis. Por ejemplo, la presencia de rorcuales comunes alimentándose durante el invierno en zonas de concentración de otro eufásido, *Nyctiphanes couchii*, en los alrededores de la isla de Lampedusa, al sur de Sicilia (Canese *et al.*, 2006) sugiere que el rorcual común en el Mar Mediterráneo presenta más estrategias de alimentación que las descritas en el mar de Liguria y que probablemente sea más generalista en su dieta y oportunista en los

recursos que explota sin seguir el patrón típico descrito en los rorcuales oceánicos. Por otro lado, la presencia de neonatos se reparte a lo largo de todo el año aunque con un pico en noviembre (Notarbartolo di Sciarra *et al.*, 2003). El pico reproductivo hacia el final del otoño o invierno es coincidente con el patrón descrito en otras regiones oceánicas para esta especie (Gambell, 1985), pero la extensión del periodo reproductivo a lo largo de todo el año es particular. Además, a amplia distribución geográfica de los encuentros con rorcuales neonatos a lo largo de todo el mar Mediterráneo contradice cualquier precisión acerca de un área de reproducción concreta. Estas características sugieren que el hábitat mediterráneo para el rorcual común presenta características oceanográficas que podrían proporcionarle la oportunidad de extender el periodo de alimentación al invierno y el periodo de reproducción al verano. Los rorcuales en el mar Mediterráneo podrían haberse adaptado a un medio más permisivo modificando su ecología, comportamiento y fisiología de su reproducción (Marini *et al.*, 1996c; Notarbartolo di Sciarra *et al.*, 2003; Canese *et al.*, 2006).

Analizando de forma conjunta todos los diferentes fragmentos de información disponible acerca de la presencia estacional del rorcual común en el mar Mediterráneo, pueden plantearse 3 hipótesis diferentes:

La primera, acorde con Marini *et al.* (1996a), implica que tras finalizar el periodo de alta productividad estival en la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal y cuando las condiciones ambientales son adversas (temperatura del agua y escasez de recursos alimenticios), los rorcuales migran hacia regiones del sur de la cuenca Mediterránea junto a la costa africana a principios del otoño, donde pasan el invierno. Desde aquí en primavera, la población de rorcuales se dispersa hacia otras regiones de la cuenca oriental y occidental del mar Mediterráneo, incluyendo la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal, aprovechando condiciones locales de alta productividad.

La segunda hipótesis, acorde con Notarbartolo di Sciarra *et al.* (2003), implica que los rorcuales se concentran en áreas de alta productividad, la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal entre otras, durante el umbral de su periodo de alimentación para dispersarse por toda la cuenca Mediterránea en los periodos del año en que la alimentación deja de ser su actividad principal.

La tercera hipótesis, acorde con Canese *et al.* (2006), implica que la población de rorcuales comunes del mar Mediterráneo no presenta un patrón migratorio definido a nivel de población global, sino que más bien se trata de un complejo conjunto de movimientos estacionales aplicables a pequeñas porciones de la población. Esto implica que la población mediterránea tiene un carácter generalista en su dieta y adapta su comportamiento de alimentación al tipo de recurso que se encuentre en la zona que ocupa.

La abundante presencia de rorcuales comunes cerca del estrecho de Gibraltar, descrita por los cazaballeneros que operaron en el océano Atlántico norte (Sanpera y Aguilar, 1992; Aguilar y Borrel, 2007) permitió cuestionar si estos se adentraban al mar Mediterráneo explicando su presencia en esta cuenca de reducidas dimensiones comparado con los océanos (Richiardi, 1874). Sin embargo todavía hoy se desconoce si hay una entrada de rorcuales comunes de origen atlántico al mar Mediterráneo. Aunque para algunos autores esta intensiva caza extirpó la población de rorcuales comunes de esta región (Notarbartolo di Sciarra *et al.*, 2003; Capham *et al.*, 1999; Palsbøll *et al.*,

2004) e incluso se ha propuesto que debido a esta circunstancia la existencia de este hábitat se perdió en la memoria cultural de la especie (Clapham y Hatch, 2000; Clapham *et al.*, 2008).

Los conocimientos acerca del patrón estacional y movimientos migratorios del rorcual común continúan siendo insuficientes para poder definir su dinámica en la cuenca mediterránea. Esta situación hace que no sea viable la evaluación del estatus de conservación de esta especie. Es importante identificar que movimientos anuales realiza esta población y en particular que distribución toma en invierno con el fin de poder aplicar medidas de conservación integrales, que no sólo protejan las áreas de alimentación, como el caso de Liguria, sino las áreas de reproducción e invernada así como los corredores de unión entre estas regiones. La identidad del stock del rorcual común Mediterráneo y su relación con los del Atlántico noreste no es clara y sus delimitaciones geográficas siguen sin estar definidas (IWC, 2009). Esta información es fundamental para poder gestionar de forma correcta la conservación de una especie cuyo rango de distribución abarca múltiples países y cuyo ecosistema se encuentra en una cuenca marina de limitadas dimensiones parcialmente aislada.

2. Objetivos

Primero: Patrón de presencia estacional:

El primer objetivo del trabajo tiene como fin describir el patrón de presencia estacional del rorcual común en las diferentes áreas de estudio a lo largo de la región occidental del mar Mediterráneo. La determinación de los meses de mayor y menor presencia de las ballenas en cada área de estudio permite contrastar si existe un patrón de presencia estacional en la región occidental del mar Mediterráneo

Segundo: Movimiento migratorio del rorcual común en el Mediterráneo occidental:

El segundo objetivo del trabajo tiene como fin confirmar y describir la presencia de un patrón migratorio estacional en la población del rorcual común en el Mediterráneo occidental. La comparación de los diferentes patrones de presencia estacional a lo largo de la región Mediterránea de la Península Ibérica permite contrastar si la población de rorcual común del mar Mediterráneo se desplaza hacia el norte en primavera y hacia el sur en otoño o si por el contrario no presenta un patrón migratorio estacional definido.

3. Material y métodos

3.1 Áreas de estudio

Se seleccionaron siete áreas de estudio en el mar Mediterráneo occidental rodeando la península Ibérica (Cataluña, Comunidad Valenciana, Baleares, Andalucía y Marruecos). La figura II-1 muestra las diferentes áreas seleccionadas.

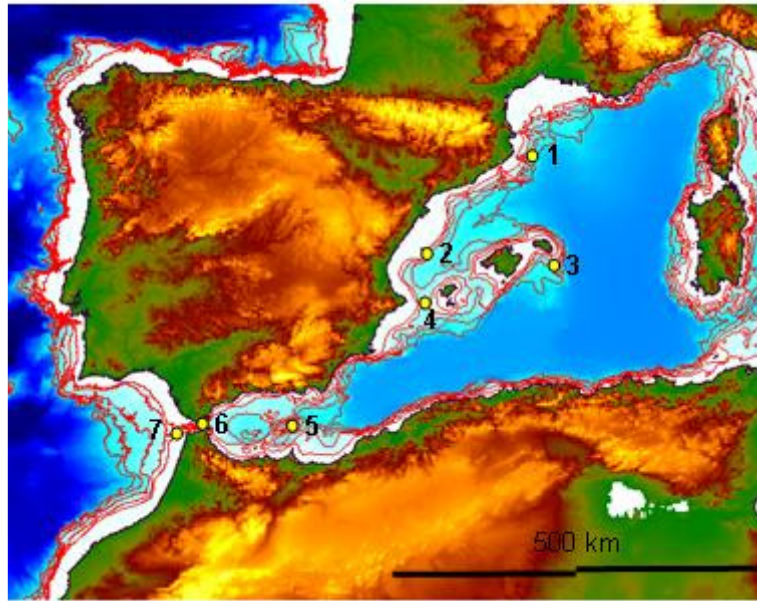


Figura II-1: Mapa de la cuenca Mediterránea occidental y aguas Atlánticas adyacentes con isóbatas de 200 a 1000 m. Las diferentes áreas de estudio se marcan en amarillo: 1- Cabo de Begur, 2-Islas Columbretes, 3-Menorca, 4-Canal de Ibiza, 5-isla de Alborán, 6-estrecho de Gibraltar y 7-Cabo Espartel.

Los muestreos en cada área se realizaron en diferentes periodos del año, con mayor frecuencia en el otoño e invierno, entre agosto de 2006 y enero de 2009. La tabla II-1 muestra los periodos de muestreo para cada área.

Área	Instrumentos	Periodo de muestreo
Cabo de Begur (Cataluña)	1 EAR	Agosto 2007 - perdido
Islas Columbretes (C. Valenciana)	2 MARU	Agosto – Octubre 2006
Canal de Ibiza (C. Valenciana)	2 MARU	Junio – Julio 2007
Menorca (Balears)	1 EAR	Agosto – Diciembre 2007
Isla de Alborán (Andalucía)	2 MARU	Noviembre 2006 – Enero 2007
Estrecho de Gibraltar (Andalucía)	2 EAR	Agosto – Septiembre 2007
Cabo Espartel (Marruecos)	2 EAR	Octubre 2008 – Enero 2009
Total muestreo obtenido		19 meses

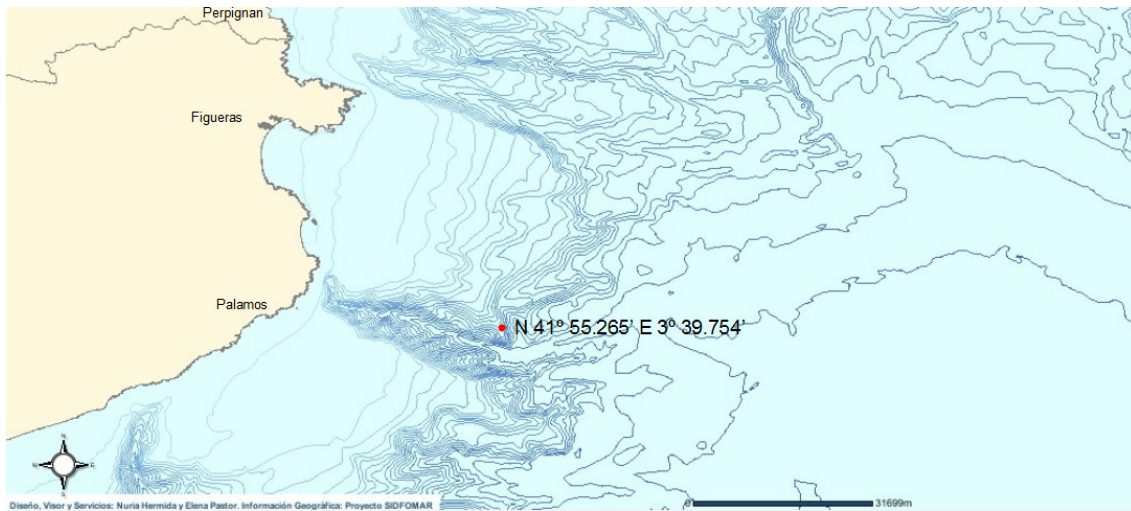
Tabla II-1: Áreas de estudio, instrumentos utilizados y periodos de muestreo.

Las diferentes áreas de estudio se seleccionaron en función de tres criterios que, en orden descendente de importancia, son: 1- interés geográfico para los objetivos del trabajo, 2- seguridad de los instrumentos y 3- facilidad logística para la realización del trabajo de campo.

Siguiendo estos criterios se describen las razones principales para la selección de las nueve áreas de estudio:

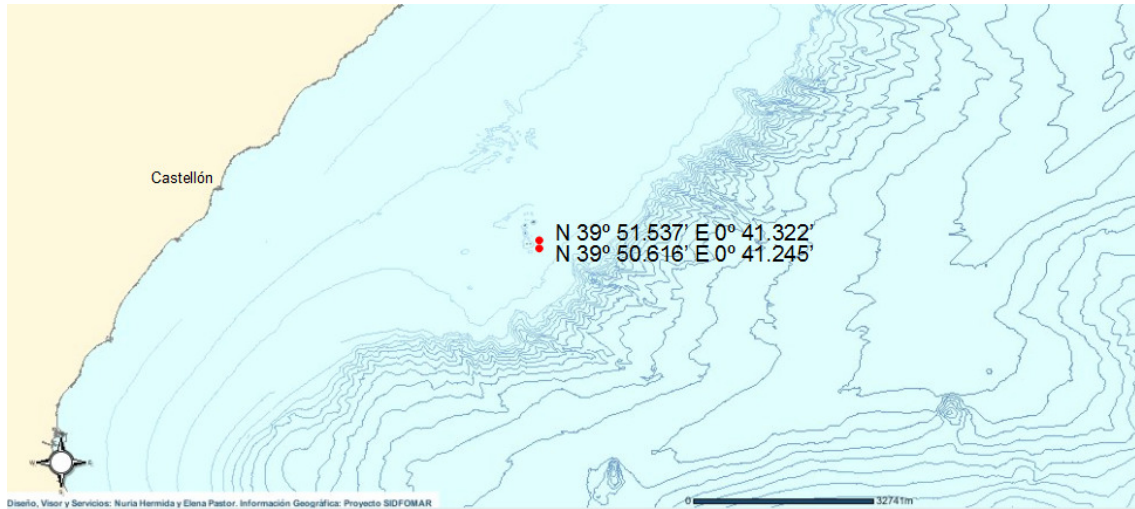
1- Cabo de Begur:

El cabo hace frontera geográfica con Francia y la plataforma continental es muy reducida alcanzándose profundidades superiores a los 2000 m a menos de 20 millas náuticas de la costa. La detección de rorcuales en esta zona permite confirmar si estos utilizan el talud continental como guía para realizar movimientos estacionales de norte a sur en la cuenca Mediterránea. Una boya meteorológica (Puertos del Estado) se encuentra fondeada a 1000 m de profundidad siendo una plataforma idónea para la instalación de un grabador en la línea de fondeo.



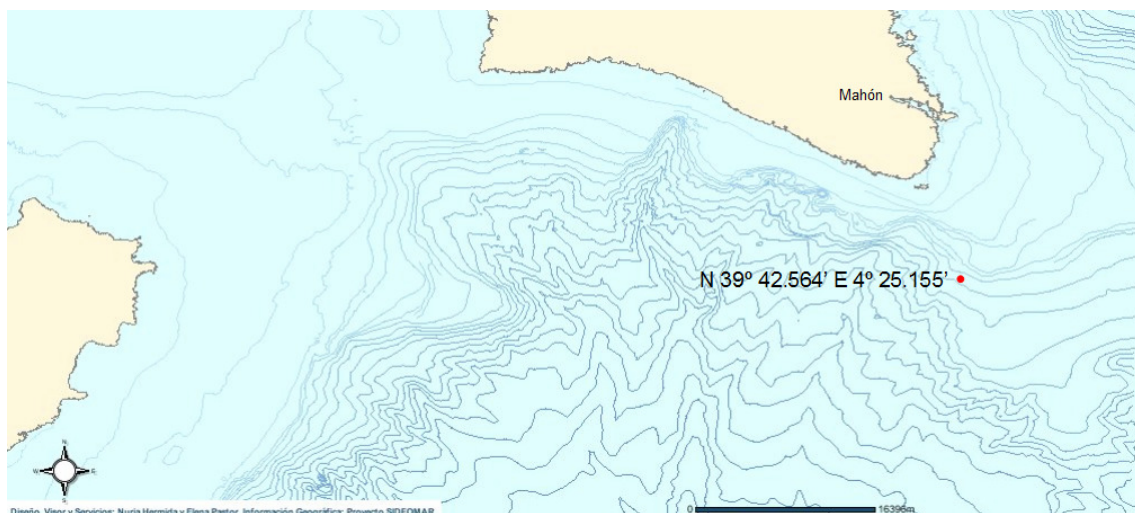
2- Islas Columbretes:

El archipiélago de las islas Columbretes se encuentra a 30 millas náuticas al este de Castellón al borde del talud continental. Al tratarse de una reserva marina, los fondos están protegidos de la actividad pesquera, facilitando la seguridad del fondeo de grabadores. La detección de rorcuales en esta zona permite identificar si estos utilizan el talud continental de la península Ibérica para realizar sus desplazamientos estacionales o si por el contrario divergen hacia las islas Baleares. El fondeo se diseñó con el fin de optimizar el estudio de la dirección de movimiento de los rorcuales. Las Islas Columbretes se encuentran a 5 millas náuticas al oeste del talud continental. Las isóbatas se disponen de norte a sur por tanto cabe esperar que el desplazamiento de los rorcuales sea paralelo a las isóbatas. Para optimizar el cálculo del ángulo de recepción de las señales en esta área, los instrumentos se fondearon en un eje norte-sur paralelo a las isóbatas, como muestra el mapa inferior, dejando las islas y áreas someras a un lado del eje. La presencia de las islas reduce el área de detección ya que provocan una sombra acústica en el área de detección, pero facilita el cálculo del ángulo de recepción, como se especifica en el apartado 3.4.



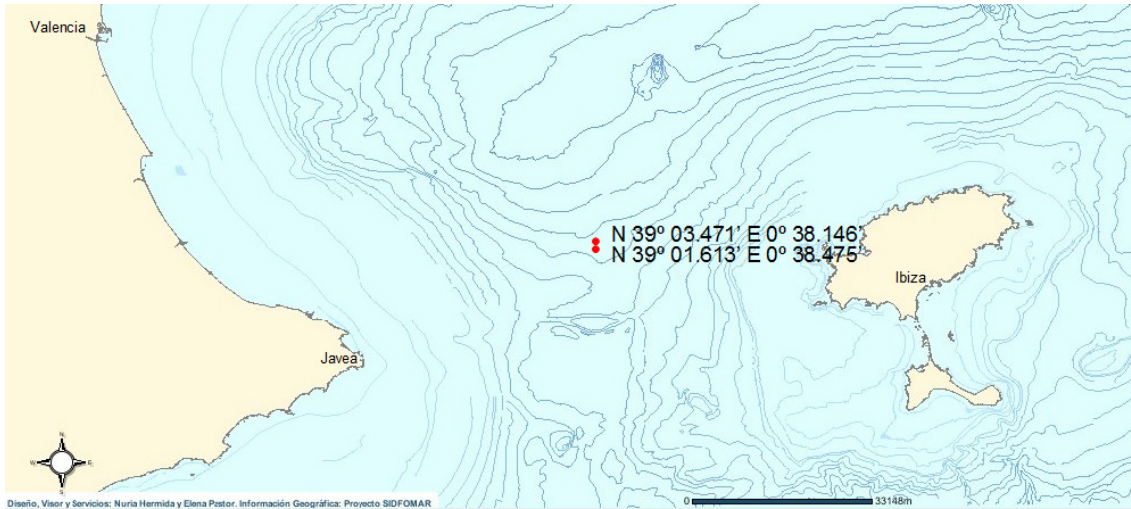
3- Menorca:

Si los rorcuales rodean las Islas Baleares en sus desplazamientos estacionales, estos deberían ser detectados al este de Menorca. A 14 millas náuticas al sureste de Mahón se encuentra fondeada una boya meteorológica (Puertos del Estado) a 900 m de profundidad siendo una plataforma idónea para la instalación de un grabador en la línea de fondeo.



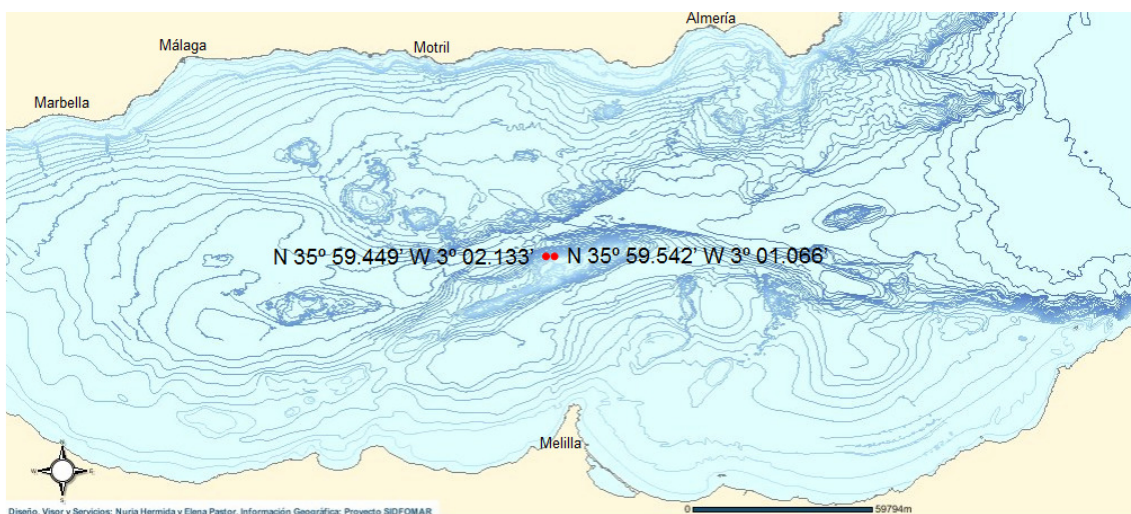
4- Canal de Ibiza:

El canal de Ibiza es un estrangulamiento natural del paso entre la península y las islas Baleares. Si los rorcuales utilizan el talud continental de la península durante sus desplazamientos estacionales y no rodean las islas Baleares deberán pasar forzosamente por el canal de Ibiza. La detección de rorcuales en esta zona permite confirmarlo.



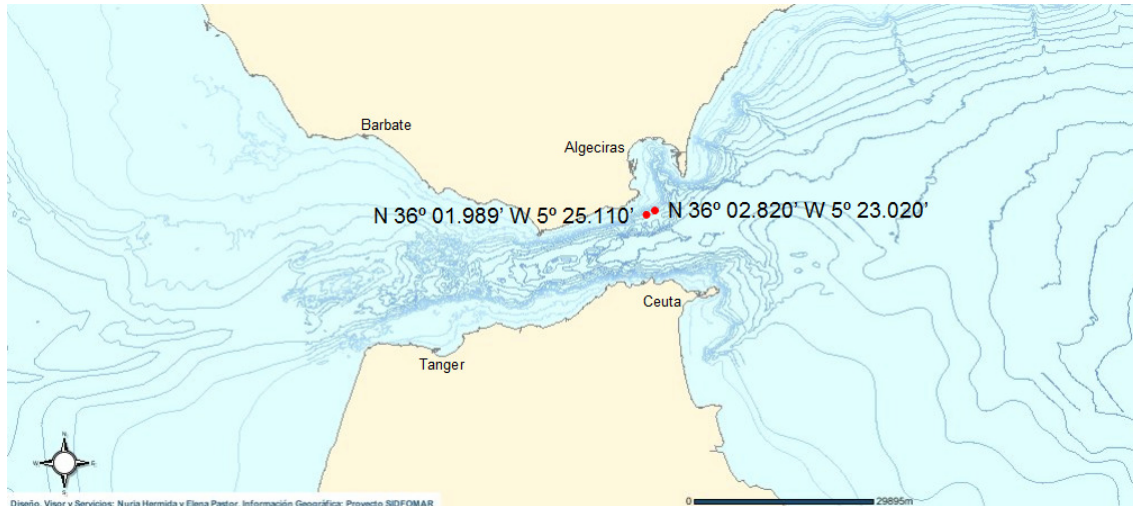
5- Isla de Alborán:

La isla de Alborán se encuentra ubicada en el centro del mar de Alborán, a 30 millas náuticas de Marruecos y 50 millas náuticas de la península Ibérica. Al tratarse de una reserva marina, los fondos están protegidos de la actividad pesquera, facilitando la seguridad del fondeo de grabadores. El mar de Alborán es la zona de mayor producción primaria del mar Mediterráneo (Perkins *et al.*, 1990) presentando características idóneas para ser utilizado como potencial zona de invernada por el rorcual común mediterráneo. La detección de rorcuales en esta zona, especialmente en los meses de invierno podría confirmar esta hipótesis. La Isla de Alborán corresponde con la cumbre de una elevación submarina de origen volcánico que asciende desde más de 1000 m de profundidad hasta la superficie del mar, ubicada en el centro del mar de Alborán. Esta elevación presenta una configuración extendida en dirección noreste-suroeste y por tanto la batimetría sigue esta tendencia. Al igual que en el área de las islas Columbretes, el fondeo se diseñó con el fin de optimizar el estudio de la dirección de movimiento de los rorcuales. Los instrumentos se fondearon en un eje noreste-suroeste paralelo a las isóbatas, como muestra el mapa inferior, dejando la isla y áreas someras a un lado del eje para facilitar el cálculo del ángulo de recepción, al igual que en el área de las islas Columbretes y como se detalla en el apartado 3.4.



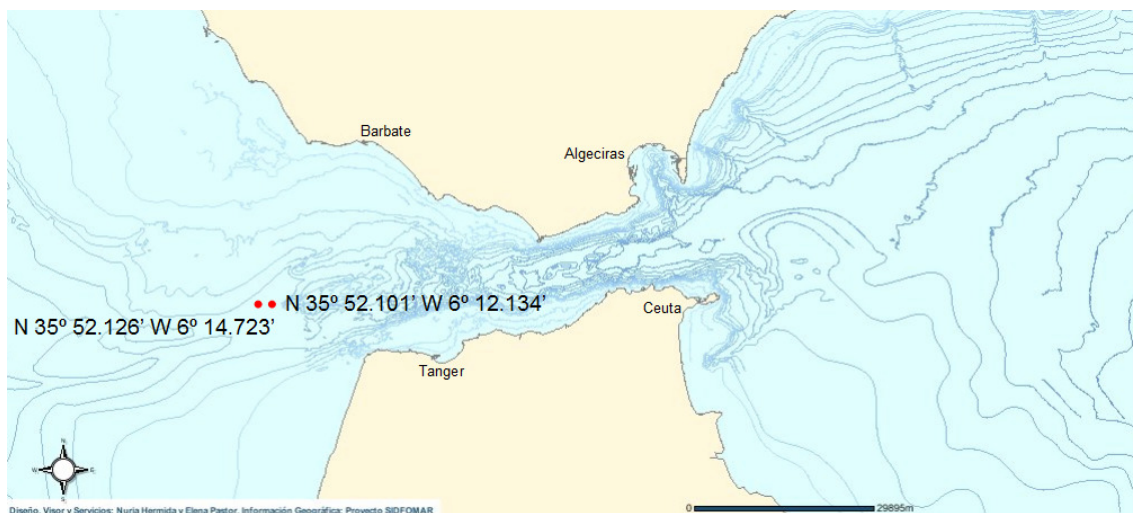
6- Estrecho de Gibraltar:

El Estrecho de Gibraltar es la única conexión entre el mar Mediterráneo y el Océano Atlántico. Si existe alguna relación entre la población de rorcuales del Mediterráneo y del Atlántico noreste, esta debe realizarse obligadamente a través de este paso. Se seleccionaron dos puntos de fondeo protegidos de las fuertes corrientes típicas del Estrecho y de la actividad pesquera.



7- Cabo Espartel:

El fondeo en esta área Atlántica permite definir si los animales que utilizan el Estrecho de Gibraltar lo hacen de manera local o si por el contrario lo utilizan como paso de una cuenca a otra. A su vez, este fondeo, realizado de manera simultánea al del Estrecho de Gibraltar permite estudiar el sentido del movimiento de los rorcuales durante el paso. Al igual que en el Estrecho, se seleccionaron dos puntos de fondeo protegidos de las fuertes corrientes y de la actividad pesquera.



3.2 Registro de sonido

En este trabajo se han utilizado dos tipos de instrumentos que se describen a continuación:

3.2.1 Marine Autonomous Recording Unit

El Marine Autonomous Recording Unit (MARU) <http://www.birds.cornell.edu/brp/hardware/pop-ups> desarrollado por el Programa de Investigaciones Bioacústicas de la Universidad de Cornell en Nueva York, EEUU, (BRP-Cornell) es un instrumento de 26 kg de peso con forma esférica, de 60 cm de diámetro, protegido por una armadura plástica para reducir los posibles impactos durante las maniobras de fondeo y recuperación. Una esfera, formada por dos piezas de un polímero de sílice y unidas por medio de vacío, mantiene la electrónica y baterías de alimentación en su interior de forma estanca. El instrumento consta de varios módulos para la adquisición de la señal recibida desde un hidrófono externo fijado a la armadura: un convertidor analógico digital, un amplificador- acondicionador de señal, un relé conmutador que controla un liberador químico (una señal acústica emitida por el usuario desde la superficie del mar activa el mecanismo de liberación del muerto de fondeo) y un disco duro de 160 Gb y componentes de control de actividad del disco. Además, el instrumento contiene dos elementos que facilitan su recuperación cuando este sale a flote, una luz estroboscópica y un emisor de radio que permiten localizarlo. Este instrumento puede programarse para grabar de manera continua durante las 24 horas o siguiendo un ciclo de grabación con un periodo en pausa. La programación del grabador se hace desde un ordenador portátil conectado por puerto USB al grabador antes de su cierre estanco. La comunicación con el grabador una vez cerrado para confirmar la presión interna y activar o desactivar la grabación así como el dispositivo de liberación se hace a través de un transductor sumergible conectado a un amplificador. Las señales de comunicación pueden reproducirse desde un ordenador portátil o un reproductor mp3 conectado al amplificador.

La distancia de detección de rorcuales comunes mediante el fondeo de grabadores autónomos se ha calculado en varias regiones oceánicas, pero nunca en el mar Mediterráneo. Las detecciones estimadas rondan entre 56 km (Širović *et al.*, 2007) y 185 km (Cummings y Thompson, 1971). Aunque algunos estudios han demostrado la posibilidad de detectar estas señales a muchos cientos de kilómetros (ej. Clark y Gagnon, 2004). Teniendo en cuenta que la propagación de la señal depende de la intensidad a la que es emitida y la pérdida por transmisión y que ninguna de estas dos variables pueden ser estimadas en el contexto de este trabajo, el rango de detección ha de asumirse que oscila entre los valores calculados en estudios previos.

La figura II-2 muestra el instrumento abierto y cerrado. Se utilizaron dos unidades MARU durante los fondeos realizados en 2006 y 2007 en las áreas de estudio de Islas Columbretes, canal de Ibiza e Isla de Alborán. Estos instrumentos se programaron para grabar de manera continua para todos los fondeos, a una velocidad de muestreo de 2 kHz, obteniendo un ancho de banda funcional de 0 a 1000 Hz suficiente para poder grabar todos los tipos de señal descritos para el rorcual común.

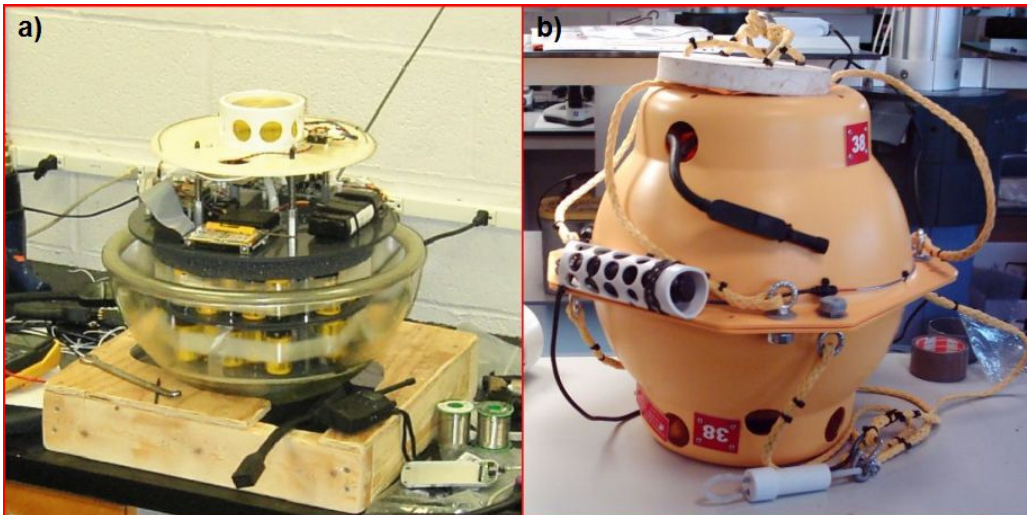


Figura II-2: Marine Autonomous Recording Unit (MARU) (a) abierto durante la preparación para el fondeo y (b) cerrado listo para el fondeo.

3.2.2 Ecologic Acoustic Recorder

En 2007 se comercializó un nuevo grabador autónomo de fondeo más compacto y ligero facilitando la operación de fondeo y recuperación y mucho más económico. Se decidió cambiar a este nuevo instrumento para los siguientes fondeos. El Ecologic Acoustic Recorder (EAR) <http://oceanwidescience.org/docs/EAR.htm> desarrollado por Oceanwide Science Institute en Hawaii, EEUU, es un instrumento de 8 kg de peso con forma cilíndrica, de 60 cm de longitud y 20 cm de diámetro. El contenedor, de aluminio, está rodeado de un disco de flotación y presenta un extremo de polímero plástico extraíble donde se ubica un hidrófono y un interruptor magnético para la activación y desactivación del instrumento. La electrónica interior es muy similar a la de la unidad MARU excepto que no puede ser programado para grabar de manera continua (impidiendo la sincronización entre unidades fondeadas simultáneamente) y no incluye ningún mecanismo de liberación, por lo que en caso de fondearse, es necesario añadir un liberador a la línea de fondeo. La programación del grabador se hace desde un ordenador portátil conectado por puerto USB al grabador antes de su cierre estanco. La figura II-3 muestra el instrumento abierto y cerrado. Se utilizaron cuatro unidades EAR durante los fondeos realizados en el periodo 2007-2009 en las áreas de estudio de cabo de Begur, Menorca, Estrecho de Gibraltar y Cabo Espartel. Al igual que las unidades MARU, la velocidad de muestreo a la que se programaron fue de 2 kHz para todos los fondeos pero en un ciclo de grabación de 5 minutos cada 10 minutos.

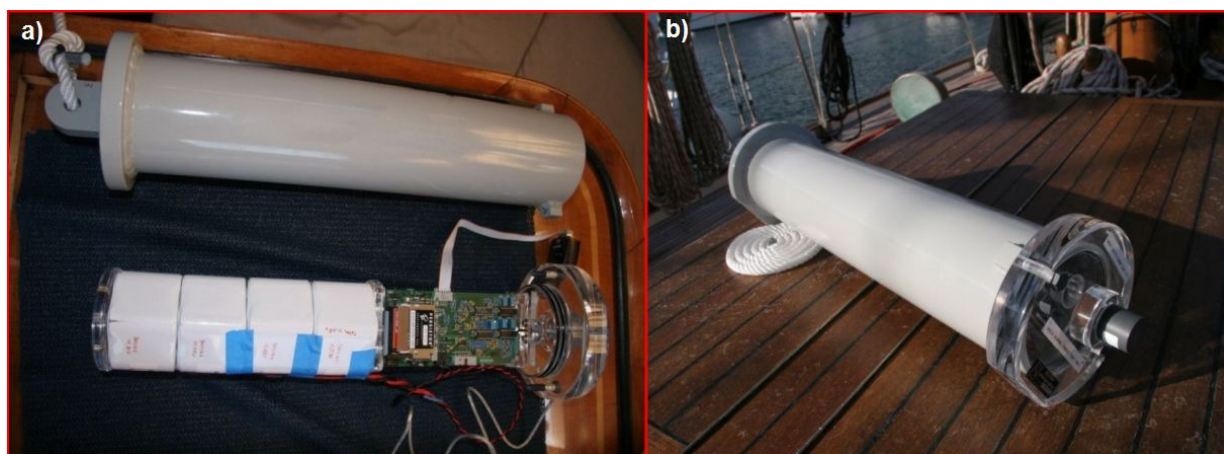


Figura II-3: Ecologic Acoustic Recorder (EAR) (a) abierto durante la preparación para el fondeo y (b) cerrado listo para el fondeo.

3.3 Diseño de la línea de fondeo

Se utilizaron tres tipos de fondeo con el fin de adaptar la instalación submarina de los grabadores a los diferentes contextos en los que se trabajó. Se describen a continuación:

3.3.1 Fondeo de MARU

Las unidades MARU se fondearon en las Islas Columbretes, canal de Ibiza e Isla de Alborán. Se fondearon simultáneamente dos unidades en cada área de estudio por dos razones: La primera porque la detección simultánea de señales emitidas por un rorcual en dos grabadores permite calcular el ángulo de recepción de la señal. Esta información es de gran utilidad para describir la dirección de movimiento de los animales detectados cuando se desplazan dentro del radio de alcance de ambos grabadores. Y la segunda porque fondeando dos grabadores se amplía el radio de alcance y se reduce el riesgo de no obtener datos si uno de los dos fallase o se perdiera. La distancia de separación entre las dos unidades fue de dos millas náuticas para todos los fondeos. Esta distancia se calculó a partir de resultados obtenidos por estudios previos con los mismos instrumentos (Clark & Gagnon, 2004; Hatch & Clark, 2004).

La línea de fondeo para las unidades MARU consistió en un lastre de 80 kg unido al liberador que se encuentra incorporado en el instrumento. El lastre para todos los fondeos realizados consistió en 5 sacos de gravilla de 16 kg cada uno. La operación de fondeo es sencilla, una vez posicionada la embarcación en el punto de fondeo, el lastre y el grabador se descuelgan por la borda hasta quedar sumergidos. Tras confirmar que el instrumento está activo se libera del cabo de amarre y se deja caer por gravedad hasta el fondo. La armadura del MARU presenta un arnés donde se fija el liberador químico, que consiste en un cable de aluminio trenzado conectado a un circuito de 28 V. Cuando el dispositivo es activado, el circuito eléctrico se cierra y energiza el cable provocando una reacción de electrólisis con el contacto del agua marina que disuelve el cable en pocos minutos liberando el grabador del muerto y ascendiendo hasta la superficie por flotación positiva. Para la recuperación del grabador una vez posicionada la embarcación en el punto donde se fondeó, se envía una señal acústica mediante el transductor sumergible que activa el liberador químico. La figura II-4 muestra imágenes de la operación de fondeo de los grabadores MARU en el canal de Ibiza.



Figura II-4: Imágenes de la operación de fondeo de los grabadores MARU en el canal de Ibiza.

3.3.2 Fondeo de EAR

Las unidades EAR se fondearon en el Estrecho de Gibraltar y cabo de Espartel (Marruecos). Al igual que con las unidades MARU, éstas se fondearon en pareja, con una separación de dos millas náuticas.

El diseño de la línea de fondeo para las unidades EAR fue más robusto debido a las fuertes corrientes que pueden encontrarse en el fondo del Estrecho de Gibraltar. Consistió en un lastre de 200 kg unido por 2 m de cadena y 2 m de cabo a un liberador acústico marca ORE (Offshore Research, EEUU) modelo Port. El liberador se une al grabador por 2 m de cabo al que se le incorporó un flotador de 8 kg para reducir el peso de liberador en el agua. El lastre para los fondeos consistió en dos discos de hormigón de 100 kg cada uno. La operación de fondeo y recuperación es igual a la descrita para las unidades MARU. El liberador acústico se activa al recibir una señal enviada desde el módulo de superficie, que consta de un transductor sumergible y un amplificador. A diferencia del liberador químico de las unidades MARU, estos activan un dispositivo mecánico desenroscando el grillete que mantiene le liberador fijado al lastre. La figura II-5 muestra la configuración de la línea de fondeo.



Figura II-5: Configuración de la línea de fondeo que incluye un liberador ORE Port, un flotador de 8kg y un grabador EAR.

3.3.3 Instrumentación de línea de fondeo con EAR

Además de fondear las unidades EAR, estos grabadores se utilizaron en Cabo de Begur y Menorca fijándolos a líneas de fondeo de boyas ubicadas en estas zonas con el permiso de la institución propietaria Puertos del Estado. Se realizaron inmersiones para instrumentar la línea de fondeo y para la posterior recogida. La metodología de instrumentación fue similar en todos los casos. Durante la inmersión se fijaron piezas de tubo de manguera para proteger la línea de fondeo del rozamiento con el grabador y para reducir la reacción de electrólisis en los casos en los que la línea de fondeo fuera de cable o de cadena. El grabador se fijó sobre la protección de manguera mediante bridas de 20 mm de grosor y cabo de seguridad a una profundidad de entre 20 y 30 m. La figura II-6 muestra imágenes de la instrumentación de las boyas.

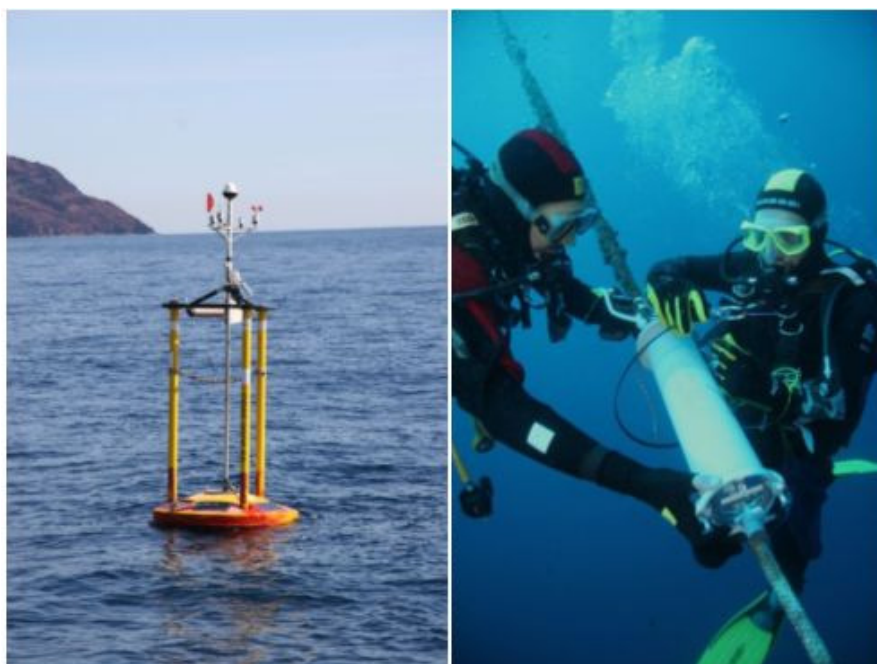


Figura II-6: Imágenes de la boya de Puertos del Estado en el cabo de Begur. La imagen submarina muestra la instrumentación de la línea de fondeo.

3.4 Preparación de datos para detección

Tanto las unidades MARU como los EAR graban el sonido en formato binario (.bin). Los archivos se extraen del disco duro del grabador y se duplican para guardar una copia de seguridad en un disco duro externo. Los archivos binarios de la copia de trabajo se procesan con el código BEAST desarrollado por BRP-Cornell para la plataforma Matlab (Mathworks Inc., EEUU), que permite asignar la fecha y hora local del inicio y fin de grabación. En caso de haber realizado un fondeo de 2 unidades simultáneas (como el caso de las Islas Columbretes, canal de Ibiza e Isla de Alborán) BEAST permite sincronizar ambas grabaciones mediante la contracción o la expansión lineal de los archivos binarios para que la hora de inicio y fin de ambas grabaciones coincidan con exactitud. Esta operación es de suma importancia para el correcto cálculo de los ángulos de recepción de sonidos, como se trata en el apartado 3.4.

Posteriormente a este proceso, los archivos binarios sincronizados son convertidos en múltiples archivos consecutivos de 30 minutos de duración y su formato binario es transformado al de archivo de sonido no comprimido aiff (Audio Interchange File Format, Apple Inc). Una vez convertidos a este nuevo formato, los varios miles de archivos de sonido obtenidos de cada fondeo se organizan en carpetas siguiendo una estructura cronológica, con una carpeta para cada correspondiente intervalo de 24 horas de todo el periodo de muestreo. La figura II-7 representa un esquema del protocolo seguido para la preparación de las grabaciones para detección.

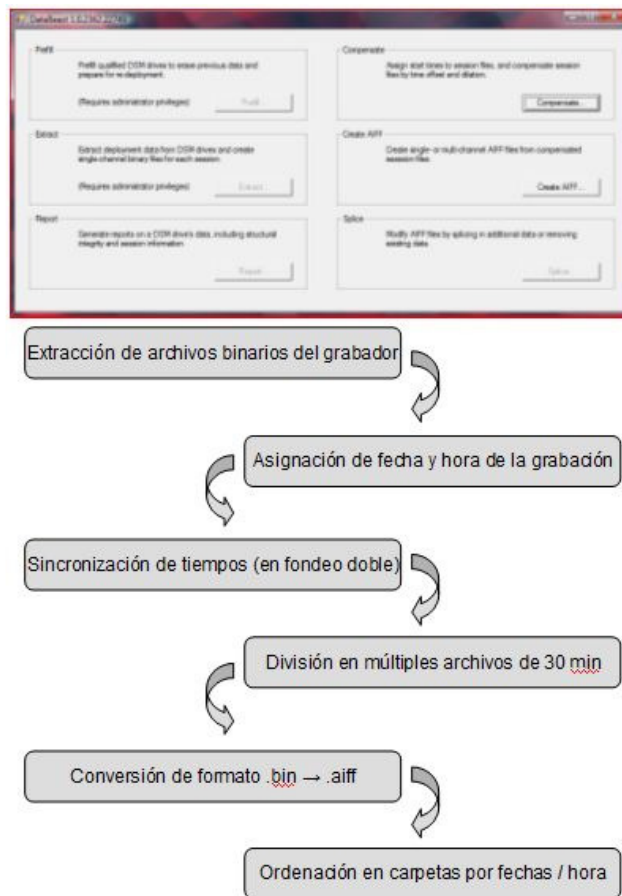


Figura II-7: Interfaz del código BEAST y esquema del protocolo seguido para la preparación de las grabaciones para detección, transformando los archivos binarios brutos obtenidos del grabador en archivos de sonido aiff de duración estándar de 30 minutos y clasificados por fecha y hora local para cada periodo de muestreo.

3.5 Protocolo de análisis detección con XBAT

Los archivos de sonido fueron analizados para detectar señales de rorcual común con el programa Extensible Bioacoustic Tool (XBAT) versión 6 desarrollado por BRP-Cornell para la plataforma Matlab. El análisis incluye tres pasos, el proceso automático de detección de las señales de rorcual común, la validación manual de las detecciones obtenidas para eliminar aquellas que sean falsas y modificar las que sean incorrectas y la selección de señales para incluir en registros con los que realizar las medidas del ángulo de recepción. Cada registro incluye la información temporal y espectral para

localizar las señales seleccionadas en cada archivo de sonido. Se definen a continuación los tres pasos del análisis:

3.5.1 Detección automática

El pulso de 20 Hz es con diferencia la señal más utilizada por el rorcual común (Watkins *et al.*, 1987) y la producida con más energía (Charif *et al.*, 2002) de su repertorio por lo que puede ser detectada con más facilidad y a mayor distancia que el resto de señales. Además, se trata de la señal de más energía y menor frecuencia, lo que facilita su propagación en el medio marino con mínima atenuación (Clark y Ellison, 2004). Por estas razones la detección de esta señal es más eficiente y por tanto la metodología de detección automática utilizada en este trabajo se centró solo en este tipo de señal. Otra ventaja de centrar la detección automática en el pulso de 20 Hz es que todas las demás señales de su repertorio se producen en acompañamiento de esta y nunca de manera aislada (Clark, *pers. com.*), por esta razón la detección de los pulsos de 20 Hz permite localizar al resto de los tipos de señales durante la validación manual de las detecciones automáticas.

La detección automática de pulsos de 20 Hz de rorcual común se realizó construyendo un conjunto de ejemplos de estas señales para incorporar a la función de detección con el detector por muestras (“template detector”) del programa XBAT. Para ello, se utilizó el programa Audition 3.0 (Adobe Systems Inc., EEUU) para inspeccionar manualmente archivos de sonido hasta localizar ejemplos de señales de rorcual común con las que construir el conjunto. Se seleccionaron pulsos de 20 Hz de diferentes calidades teniendo en cuenta, la relación señal/ruido, la presencia de ecos y la atenuación por propagación. Para realizar pruebas preliminares de detección con diferentes combinaciones del conjunto de ejemplos, se preparó un archivo de sonido de prueba consistente en secciones de 30 minutos de duración de diferentes días del periodo de muestreo en los que se incluyese la presencia de señales de rorcual común de diferentes calidades y con diferentes niveles de ruido ambiente, así como secciones con ausencia de rorcuales pero con ruidos dentro de la banda de 20 Hz. La figura II-8 representa un ejemplo de la variedad de contextos incluidos en el archivo de sonido de prueba de detección automática.

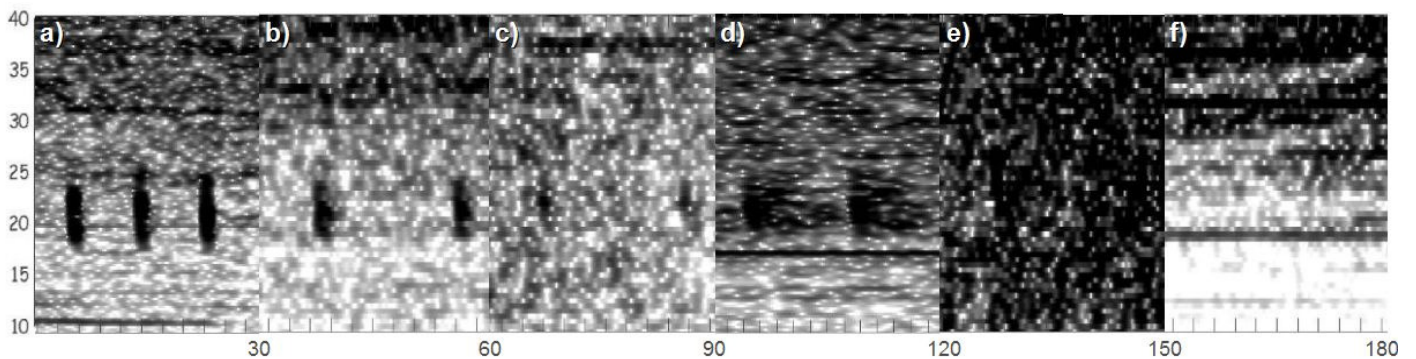


Figura II-8: Espectrogramas (10-40 Hz, 30 s, 512 bandas) representando la variedad de contextos incluidos en el archivo de sonido de prueba de detección automática: a) pulsos de 20 Hz de alta calidad registrados cuando un rorcual se encontraba muy cercano al grabador, b) pulsos de 20 Hz de calidad media debido a la atenuación por propagación registrados cuando un rorcual se encontraba a una distancia media del

grabador, c) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la fuerte atenuación por propagación registrados cuando un rorcual se encontraba a mucha distancia del grabador, d) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la presencia de eco facilitado por las características de propagación del medio, e) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la baja relación señal/ruido y f) ejemplo de ruido tonal en la banda de 20 Hz generado por el motor de un buque.

Se realizaron varias pruebas de detección con diferentes conjuntos de ejemplos hasta encontrar una combinación que obtuviese un número de detecciones de balance preferente por señales no detectadas frente a falsas detecciones. Puesto que las detecciones son revisadas manualmente, se dio preferencia a un conjunto sensible a señales en la banda de 20 Hz a pesar de obtener falsas detecciones, con el fin de evitar que algunas señales no fueran detectadas (reduciendo el error tipo I).

En total se seleccionaron 5 señales para el conjunto de ejemplos del detector. El detector por muestras permite seleccionar una función para cada ejemplo del conjunto, por lo que determinados ejemplos pueden ser utilizados para identificar las señales de interés y otros ejemplos pueden ser utilizados para rechazar señales que durante la búsqueda podrían confundir al detector. Por tanto, de las 5 señales utilizadas para construir el conjunto de ejemplos del detector, tres correspondieron a pulsos de 20 Hz de rorcual común de diferentes calidades y 2 a ruidos comunes en la banda de 20 Hz para ser rechazados. La figura II-9 muestra los 5 ejemplos del conjunto construido para la detección automática.

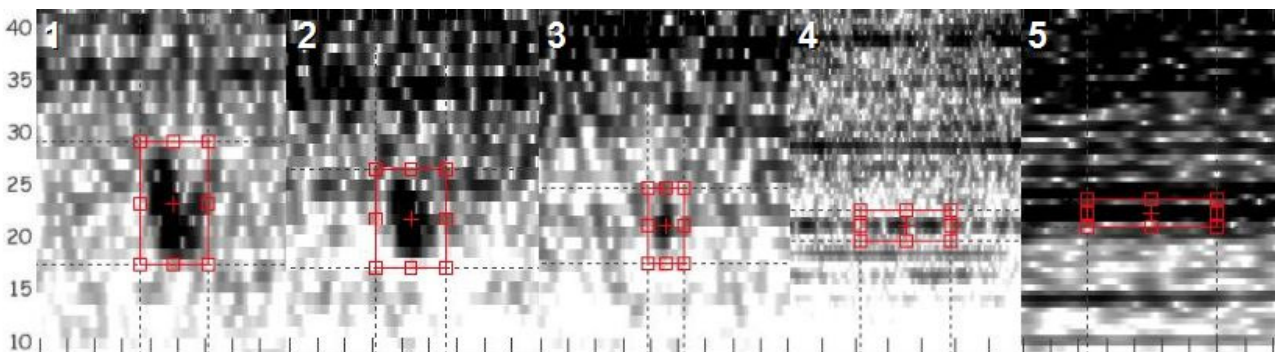


Figura II-9: Espectrogramas (10-40 Hz, 15 s, 512 bandas) de los 5 ejemplos del conjunto construido para la detección automática. Los ejemplos 1 a 3 corresponden a pulsos de 20 Hz de rorcual de mejor a peor calidad, el ejemplo 4 corresponde a ruido de cavitación de hélice de buque y el ejemplo 5 corresponde a ruido tonal generado por los ejes de las hélices de buques. El detector por muestras se configuró de manera que los ejemplos 1 a 3 fueran aceptados y los ejemplos 4 y 5 rechazados.

Una vez seleccionados los ejemplos y construido el conjunto para el detector por muestras, se ejecutó la detección automática en todos los archivos de sonido obtenidos en este trabajo. El programa XBAT crea un archivo con los resultados de la detección en cada carpeta donde se encuentran los archivos de sonido analizados. Este archivo incluye la información de todas las selecciones realizadas en el archivo de sonido. Estas selecciones pueden ser representadas gráficamente sobre el espectrograma del sonido para su validación.

3.5.2 Validación manual

Las selecciones de cada archivo de sonido obtenidas mediante la detección automática son el resultado bruto del proceso de detección. Este resultado fue refinado mediante la validación de cada una de las selecciones de forma manual, eliminando las selecciones de falsas detecciones y corrigiendo aquellas que sean parcialmente incorrectas (Ej. doble selección de una señal y su eco). La validación manual se realizó con el programa XBAT mediante la representación espectrográfica de los archivos de sonido superponiendo las selecciones resultantes de la detección automática. El criterio de clasificación de las selecciones como correctas o incorrectas es en parte subjetivo puesto que se basa en la experiencia del observador para identificar si una señal concreta corresponde a un pulso de un rorcual común. Por ello, se aplicó un protocolo que facilitó la decisión con el fin de minimizar la subjetividad en la decisión en caso de duda. Empleando características visuales (representación espectrográfica) y acústicas (reproducción del sonido), los pulsos de rorcuales deberían presentar todos los siguientes rasgos:

- Máxima energía acústica concentrada en la banda de 19-21 Hz
- Señal constante de duración inferior a 1,5 segundos
- Señal incluida en una secuencia cuyo intervalo entre pulsos debe coincidir en 12 a 14 segundos
- Carácter descendente en su modulación al reproducir el sonido acelerado 10 veces.

Si uno de estos 4 rasgos no pudo confirmarse en la señal, esta se descartó del análisis. Las selecciones de todos los archivos de sonido obtenidos en el análisis fueron validados manualmente.

3.5.3 Registros NUM y ANG

El programa XBAT permite guardar las selecciones manualmente validadas en registros asociados a cada archivo de sonido. Se crearon dos tipos de registros:

- 1) NUM: Para obtener el número total de detecciones por archivo en todos los archivos donde se detectaron señales de rorcual común.
- 2) ANG: Para calcular el ángulo de recepción de las señales exclusivamente en los archivos de los fondeos donde se utilizaron 2 MARU (Islas Columbretes, y Mar de Alborán) ya que es necesario que la grabación sea continua para poder ser sincronizada con precisión. Para este tipo de registros sólo fueron seleccionados los pulsos de 20 Hz de rorcual común que se detectaron simultáneamente en los dos canales puesto que el cálculo del ángulo de recepción requiere haber obtenido la misma señal en dos receptores diferentes, como se detalla en el apartado 2.6.

La figura II-10 presenta espectrogramas de los dos canales sincronizados del fondeo de la isla de Alborán en 2006 con ejemplos de selecciones de ambos registros.

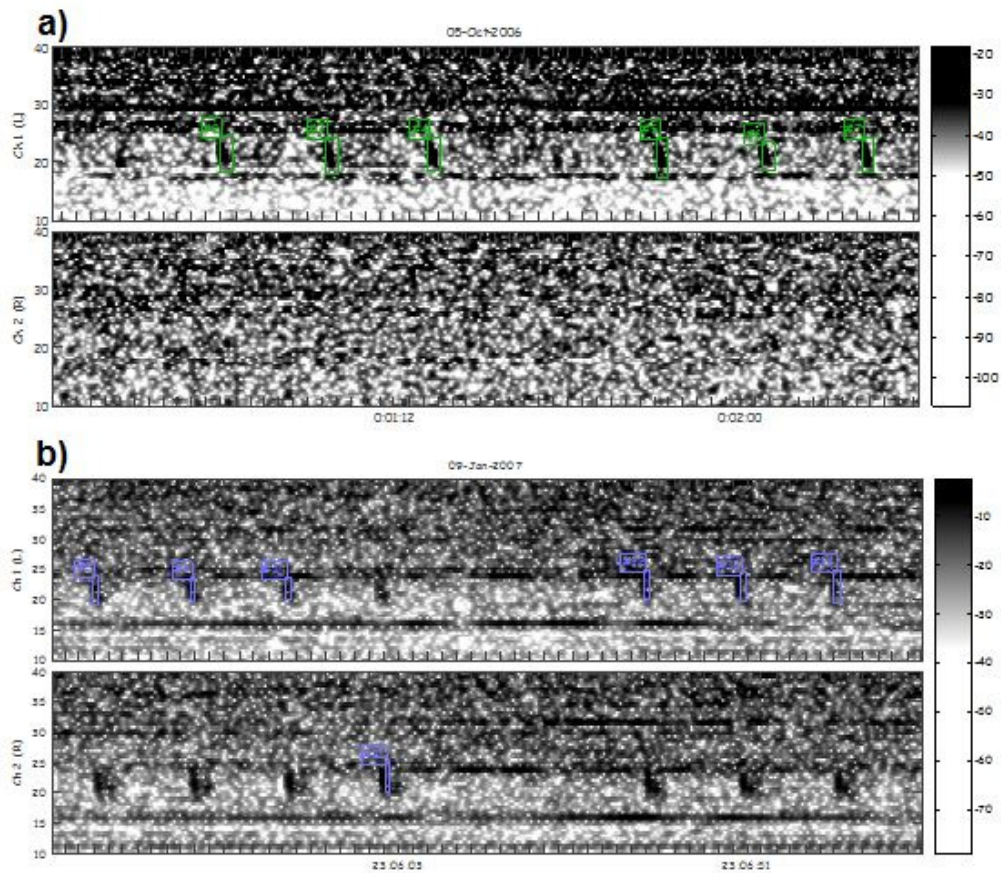


Figura II-10 Espectrogramas (10-40 Hz, 120 s, 512 bandas) de los dos canales sincronizados del fondeo de la isla de Alborán en 2006. a) Selecciones en verde corresponden al registro NUM y b) selecciones en violeta corresponden al registro ANG.

3.6 Análisis registros NUM y ANG

Los registros NUM obtenidos para cada día de todo el periodo de muestreo de cada uno de los fondeos realizados en las cinco áreas de estudio fueron exportados a formato de hoja de cálculo del programa Excel versión 2003 (del paquete Office 2003 SP3, Microsoft Corporation, EEUU) para realizar dos tipos de análisis:

- 1- Patrón de presencia estacional: Se calculó el número total de pulsos de 20 Hz detectados cada día de todo el periodo de muestreo así como el número total de horas con detecciones por día (horas positivas). Los valores resultantes se ordenaron por fecha cronológica para la totalidad del periodo de fondeo de cada área de estudio y se representaron gráficamente en un diagrama de líneas y barras (número total de pulsos por día y horas positivas por día) que representa el patrón de presencia estacional del rorcual común para cada área de estudio.
- 2- Patrón de presencia diario: Se calculó el número total de horas positivas. Los valores resultantes se ordenaron en función de la hora local para todo el periodo de muestreo y se representaron gráficamente en un diagrama de líneas con el número total de horas en el periodo de 24 horas representando el patrón de presencia diario del rorcual común para cada área de estudio. Con el fin de poder comparar los patrones de cada área de estudio, el número total de horas positivas fue convertido en porcentaje respecto al total de cada área y representado

gráficamente en un diagrama de líneas, siendo una línea para cada área de estudio.

Los registros ANG fueron analizados con el código ISRAT_LT (“Ildar's Statistical Recognition and Analysis Tool Location and Tracking”), desarrollado por BRP-Cornell para la plataforma Matlab. Este código analiza la diferencia del tiempo de recepción de una misma señal en dos canales de sonido (correspondiente a cada grabador simultáneamente fondeado en una misma zona) para obtener el ángulo definido entre el eje que incluye los dos grabadores (antena de recepción) y la dirección de la fuente de la señal. La ecuación necesita incorporar la posición de ambos grabadores para calcular la geometría de la antena de recepción. Puesto que el ángulo se calcula en base a dos receptores, no es posible triangular la posición (sería necesario un tercer receptor) y por tanto no es posible resolver la ambigüedad de lado. El resultado corresponde con un ángulo en valor absoluto, pudiendo ser positivo o negativo, es decir correspondiendo a un ángulo x de la semicircunferencia 0° a $+180^\circ$ o a un ángulo $-x$ de la semicircunferencia opuesta 0° a -180° . Pero, en los fondeos de este trabajo, la ambigüedad de lado fue resuelta por las características de la batimetría de las áreas de estudio, como se detalla en el apartado 4.4.1. Los ángulos obtenidos de los registros de cada carpeta de 24 horas de grabación se guardaron en formato de hoja de cálculo del programa Excel versión 2003 para agruparlos por días. Los valores de cada agrupación se representaron gráficamente con el programa Statistica 6.0 (Statsoft Inc., EEUU) en forma de histograma polar para describir la tendencia de la dirección de movimiento en cada área de estudio.

3.7 Análisis de desplazamientos en el Estrecho de Gibraltar

El fondeo realizado en el Estrecho de Gibraltar fue de especial interés para estudiar el tipo de desplazamiento realizado por los rorcuales en esta zona. Se identificaron todos los periodos de la grabación en los que aparecieron pulsos de 20 Hz de rorcual común. Los periodos de presencia de rorcuales se contrastaron entre las grabaciones de las dos unidades fondeadas simultáneamente para calcular la diferencia entre los tiempos iniciales y finales de las secuencias de pulsos de 20 Hz de las canciones detectadas. Las diferencias temporales permitieron identificar el sentido de desplazamiento de los animales que fueron detectados consecutivamente en las dos posiciones de fondeo, así como la duración del intervalo entre detecciones en ambas posiciones. Tanto las duraciones como el sentido del desplazamiento fueron contrastados con el horario de mareas y el patrón de corrientes con el fin de identificar posibles correlaciones entre las corrientes del Estrecho y los desplazamientos de los rorcuales detectados. Los valores de corriente en el área de fondeo del Estrecho de Gibraltar se obtuvieron mediante el modelo numérico del Sistema de Oceanografía Operacional en el Estrecho de Gibraltar desarrollado por el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Cádiz y la Sección de Oceanografía del Instituto Hidrográfico de la Marina. Se aplicó el modelo para las fechas y horas de las detecciones acústicas obteniendo las velocidades y direcciones de corriente del área de estudio. A su vez, los periodos de presencia de rorcuales se contrastaron entre las grabaciones del Estrecho de Gibraltar y del cabo de Espartel. Ambas áreas se encuentran a una distancia de 39,4 millas náuticas a cada lado del Estrecho. Se estudió la posible correlación entre la presencia de rorcuales en ambas áreas de estudio para explorar el uso del Estrecho de Gibraltar.

4. Resultados

4.1 Fondeos completados/fallidos

En total, se realizaron 9 fondeos de 3,4 meses de duración media en un periodo de 2 años y 5 meses, desde agosto de 2006 hasta enero de 2009. Se obtuvieron un total de 23.560 horas de grabación. No en todos los fondeos se obtuvieron grabaciones debido a fallos en los grabadores, pérdida de estanqueidad o pérdida del instrumento. La tabla II-2 enumera y describe los fondeos fallidos.

Área de estudio	Instrumento	Problema identificado
Cabo de Begur	EAR	Pérdida del instrumento debido a fuertes tormentas durante el periodo de muestreo (olas > 7 m).
Menorca	EAR	Error en el programa de control de la grabación. No se obtuvieron archivos binarios.
Cabo Espartel	EAR	Fallo de estanqueidad en el primer día de fondeo destruyendo la electrónica del instrumento.

Tabla II-2: Descripción de los fondeos fallidos, área y problema identificado.

El tamaño muestral obtenido en cada área de estudio fue diferente y se define en la tabla II-3.

Área de estudio	Horas de grabación de sonido	Tamaño muestral
I. Columbretes	4296 h	91.327 pulsos 20 Hz
Canal de Ibiza	2856 h	23 pulsos 20 Hz
I. de Alborán	2006: 4271 h 2007: 3572 h	2.202 pulsos 20 Hz 41 pulsos 20 Hz
E. de Gibraltar	5718 h	4.137 pulsos 20 Hz
Cabo Espartel	2847 h	4.089 pulsos 20 Hz
Total	23.560 h	101.126 pulsos Hz

Tabla II-3: Tamaño muestral (nº de pulsos de 20 Hz de rorcual común) y número de horas de grabación obtenidos en cada área de estudio.

4.2 Tipo de señales detectadas

El análisis de las grabaciones obtenidas en este trabajo permitió detectar los 4 tipos de señales descritas para el rorcual común (Watkins *et al.*, 1987; Edds, 1988; Thomposn *et al.*, 1992), el pulso de 20 Hz, el “back-beat” (pre-pulso), el pulso de 135-140 Hz (o “upswEEP”) y el “downswEEP” (modulado descendente). El pulso de 20 Hz fue el utilizado en mayor proporción por los rorcuales detectados en todas las áreas de estudio, seguido en menor proporción del “back-beat” (pre-pulso) y en raras ocasiones se detectaron pulsos de 135-140 Hz (o “upswEEP”) y “downswEEP” (modulado descendente). La figura II-11 muestra ejemplos de los diferentes tipos de señales detectados.

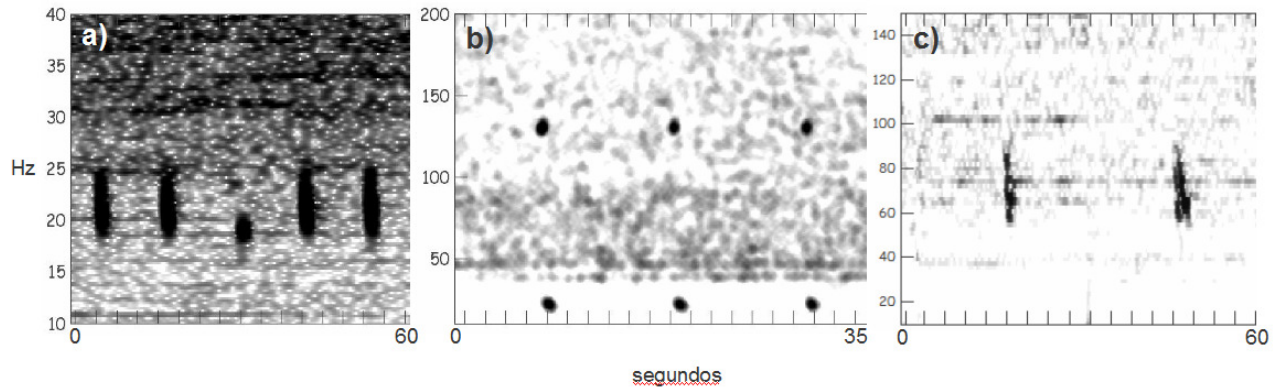


Figura II-11: Espectrogramas con ejemplos de las señales descritas para el rorcual común. a) “back-beat” (pre-pulso) (10-40 Hz, 60 s, 256 bandas) detectados en todas las áreas de estudio, b) pulsos de 135-140 Hz (o “upsweep”) (10-200 Hz, 35 s, 1024 bandas) detectados en el Cabo de Espartel, Estrecho de Gibraltar e isla de Alborán y c) “downsweep” (modulado descendente) (10-150 Hz, 60 s, 512 bandas) detectados en las islas Columbretes. Nota: la escala de frecuencia es diferente para cada caso.

4.3 Patrón presencia estacional por área

Como se indica en el apartado 3.1, los instrumentos fondeados en las áreas Cabo de Begur y Menorca no permitieron obtener grabaciones por lo que no se han podido calcular los patrones de presencia estacional y presencia diario en estas áreas. A su vez, el escaso número de detecciones obtenidas en el canal de Ibiza y en la isla de Alborán en 2007 tampoco permitió calcular el patrón de presencia diario en estas áreas. Se presentan los resultados ordenados por área de estudio de norte a sur:

Cabo de Begur:

Sin datos.

Menorca:

Sin datos.

Islas Columbretes:

Se detectaron 91.327 pulsos 20 Hz entre el 23 de agosto y el 23 de octubre de 2006. El reparto de detecciones se representa en la figura II-12 para el patrón estacional y en la figura II-13 para el patrón diario.

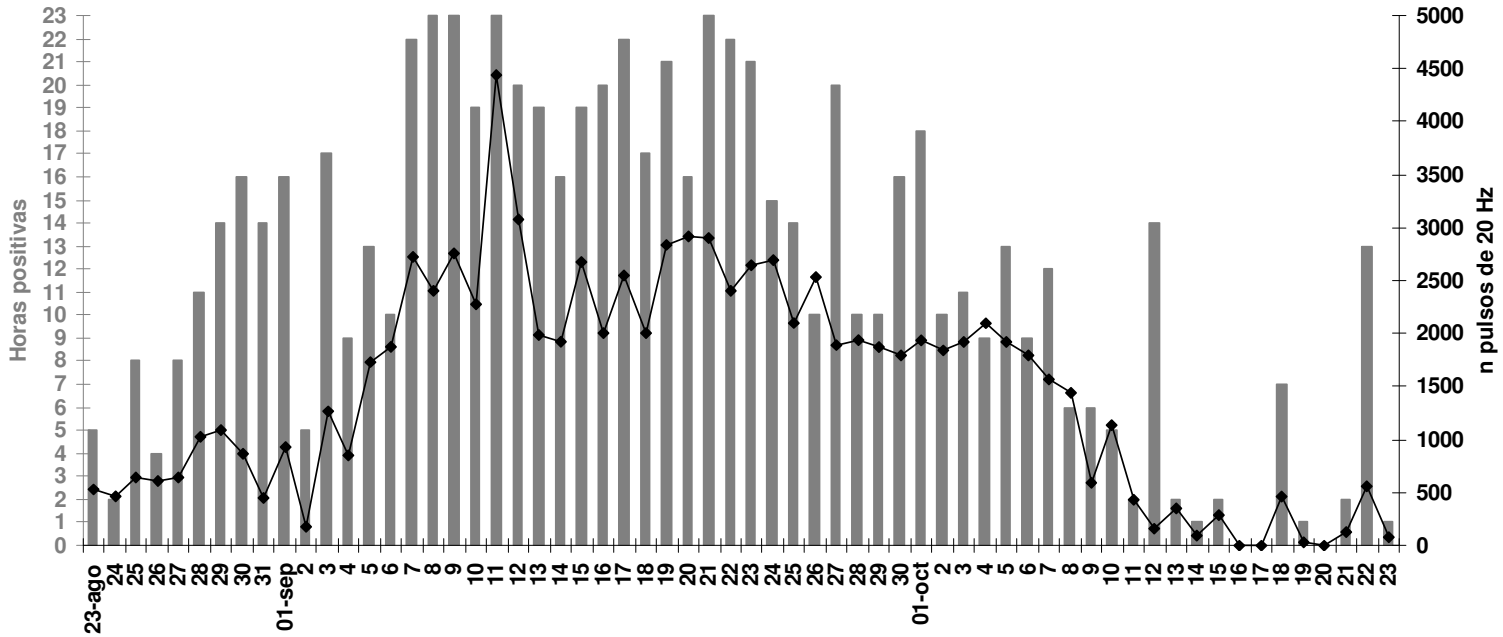


Figura II-12: Patrón de presencia estacional del rorcual común en el área de estudio de las I. Columbretes. La línea negra corresponde al n° de detecciones de pulsos de 20 Hz por día y las barras grises con el n° de horas positivas por día.

Se observa una presencia de pulsos de 20 Hz constante y muy elevada durante todo el periodo de muestreo, con una tendencia ascendente durante el final del mes de agosto e inicio de septiembre, con un máximo el 11 de septiembre seguido de un descenso gradual hasta finales de octubre.

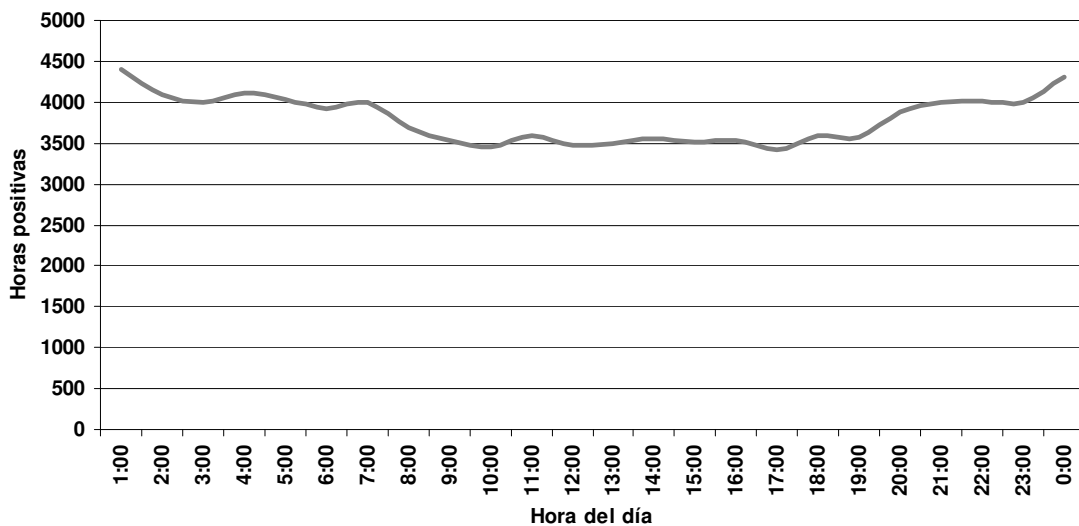


Figura II-13: Patrón de presencia diario del rorcual común en el área de estudio de las I. Columbretes. La línea gris representa el n° total de horas positivas obtenido en el periodo de muestreo para cada hora del día.

Los pulsos de 20 Hz de rorcual común son detectados a lo largo de las 24 horas del día de manera continua. Se observa un ligero descenso del número de horas positivas entre las 8 y las 19 horas.

Canal de Ibiza:

Se detectaron 23 pulsos de 20 Hz entre el 4 de junio y el 29 de julio de 2006. El reparto de detecciones se representa en la figura II-14 para el patrón estacional. No se calcula el patrón diario debido al insuficiente número de datos obtenidos en esta área de estudio.

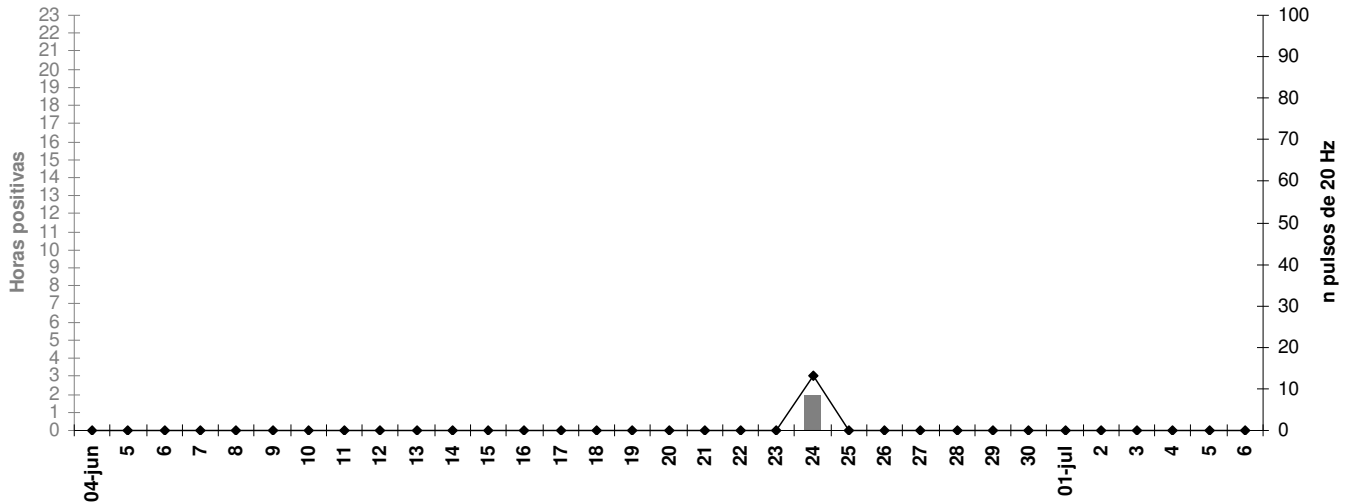


Figura II-14: Patrón de presencia estacional del rorcual común en el área de estudio del canal de Ibiza. La línea negra corresponde al nº de detecciones de pulsos de 20 Hz por día y las barras grises con el nº de horas positivas por día.

Isla de Alborán 2006:

Se detectaron 2.202 pulsos de 20 Hz entre el 28 de noviembre de 2006 y el 10 de enero de 2007. El reparto de detecciones se representa en la figura II-15 para el patrón estacional y en la figura II-16 para el patrón diario.

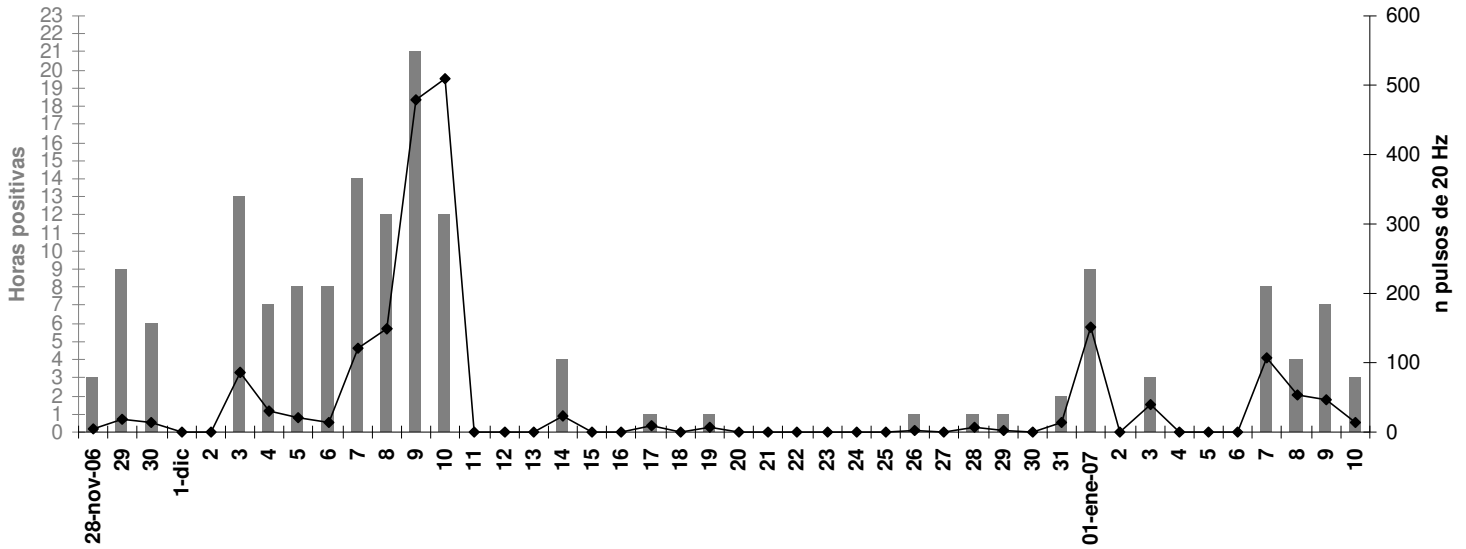


Figura II-15: Patrón de presencia estacional del rorcual común en el área de estudio de la I. de Alborán. La línea negra corresponde al nº de detecciones de pulsos de 20 Hz por día y las barras grises con el nº de horas positivas por día.

Se observa una presencia de pulsos de 20 Hz interrumpida con un periodo máximo de ausencia de 6 días. Durante la segunda semana de diciembre hay un aumento rápido y progresivo en las detecciones seguido de un periodo de ausencia o muy baja presencia, siempre inferior a 24 pulsos por día, durante un periodo de 21 días. Los primeros 10 días del mes de enero muestran una variabilidad similar a los últimos días de noviembre y primeros de diciembre.

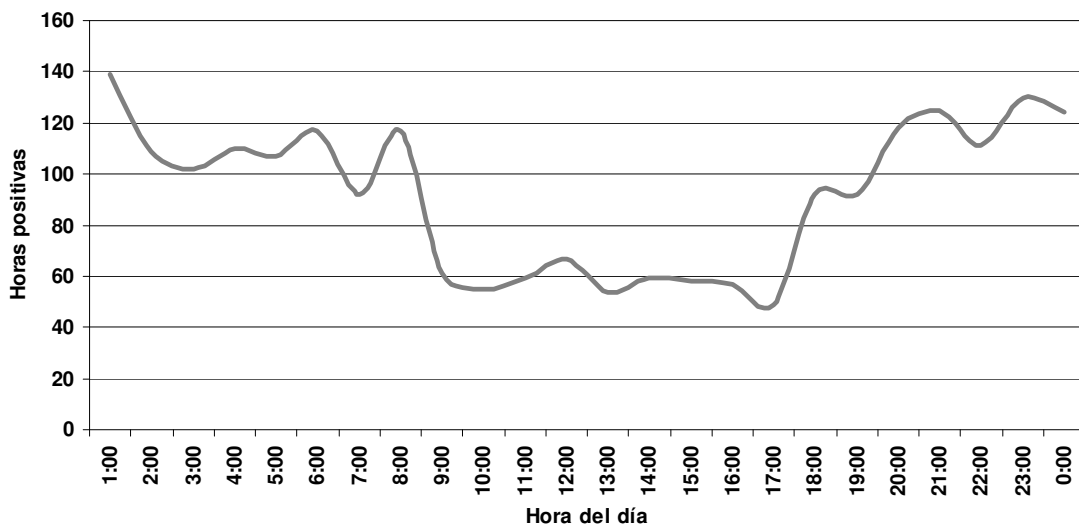


Figura II-16: Patrón de presencia diario del rorcual común en el área de estudio de la I. de Alborán. La línea gris representa el nº total de horas positivas obtenido en el periodo de muestreo para cada hora del día.

Los pulsos de 20 Hz de rorcual común son detectados a lo largo de las 24 horas del día de manera continua. Se observa un marcado descenso del número de horas positivas entre las 9 y las 17 horas.

Isla de Alborán 2007:

Se detectaron 41 pulsos de 20 Hz entre el 2 de agosto y el 25 de septiembre de 2007. El reparto de detecciones se representa en la figura II-17 para el patrón estacional. No se calcula el patrón diario debido al insuficiente número de datos obtenidos en esta área de estudio.

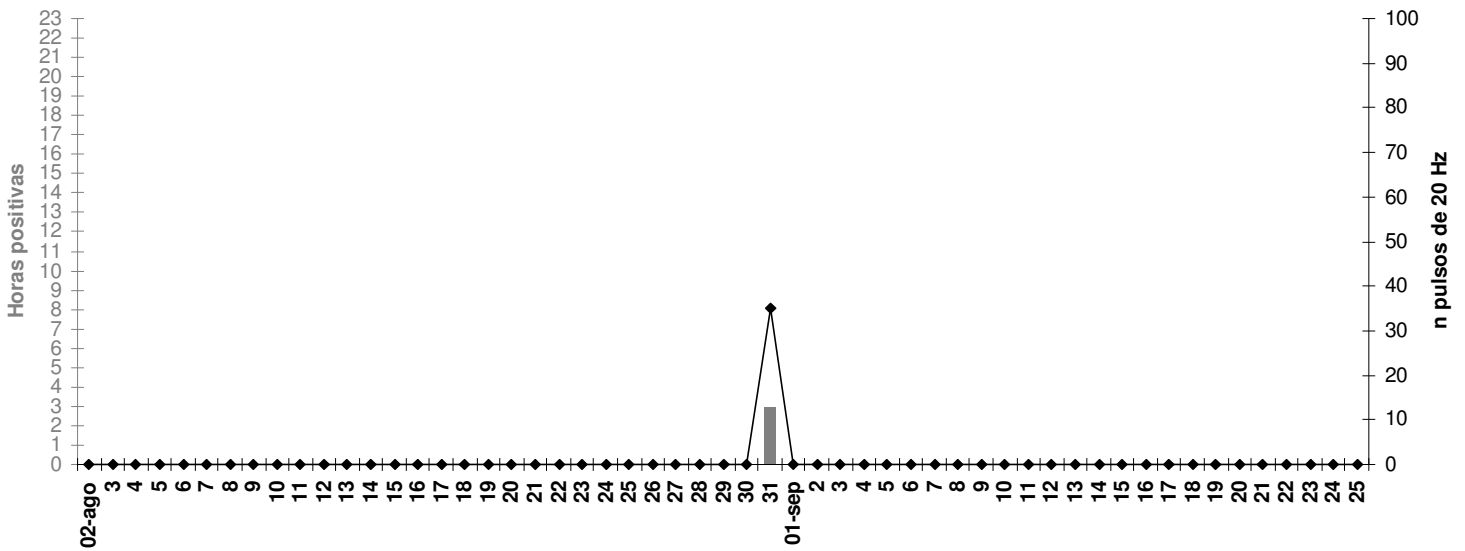


Figura II-17: Patrón de presencia estacional del rorcual común en el área de estudio de la I. de Alborán. La línea negra corresponde al nº de detecciones de pulsos de 20 Hz por día y las barras grises con el nº de horas positivas por día.

Estrecho de Gibraltar:

Se detectaron 4.137 pulsos de 20 Hz entre el 28 de octubre de 2008 y el 30 de enero de 2009. El reparto de detecciones se representa en la figura II-18 para el patrón estacional y en la figura II-19 para el patrón diario.

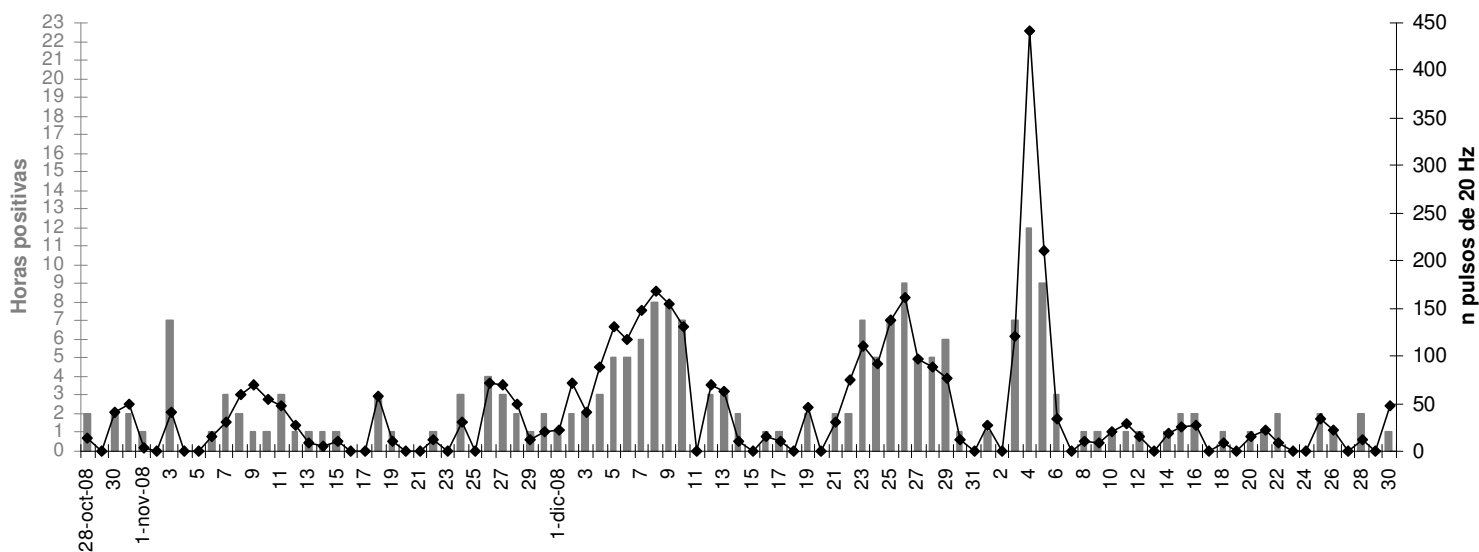


Figura II-18: Patrón de presencia estacional del rorcual común en el área de estudio del Estrecho de Gibraltar. La línea negra corresponde al nº de detecciones de pulsos de 20 Hz por día y las barras grises con el nº de horas positivas por día.

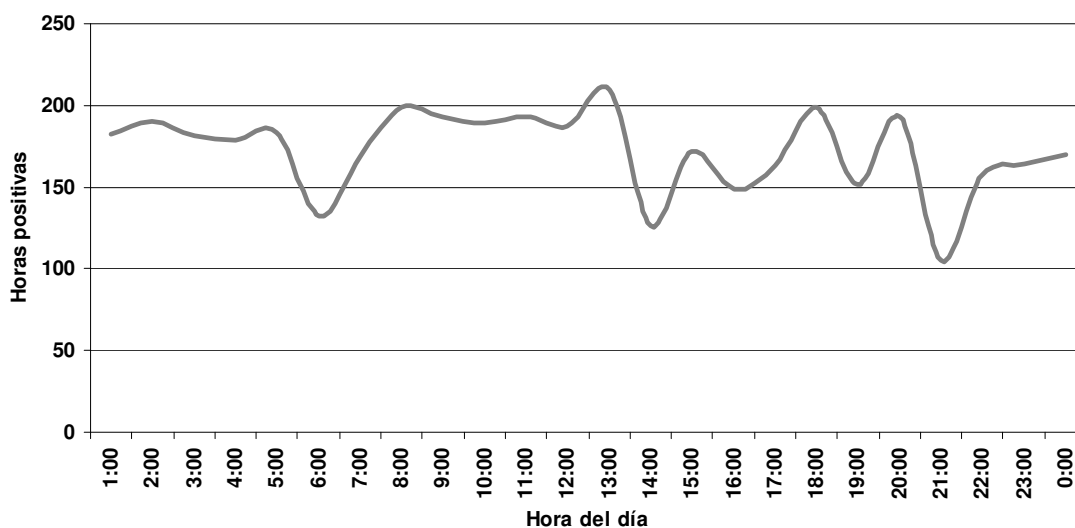


Figura II-19: Patrón de presencia diario del rorcual común en el área de estudio del Estrecho de Gibraltar. La línea gris representa el nº total de horas positivas obtenido en el periodo de muestreo para cada hora del día.

Los pulsos de 20 Hz de rorcual común son detectados a lo largo de las 24 horas del día de manera continua. La variabilidad observada no presenta ninguna tendencia.

Cabo de Espartel:

Se detectaron 4.089 pulsos de 20 Hz entre el 28 de octubre de 2008 y el 28 de enero de 2009. El reparto de detecciones se representa en la figura II-20 para el patrón estacional y en la figura II-21 para el patrón diario.

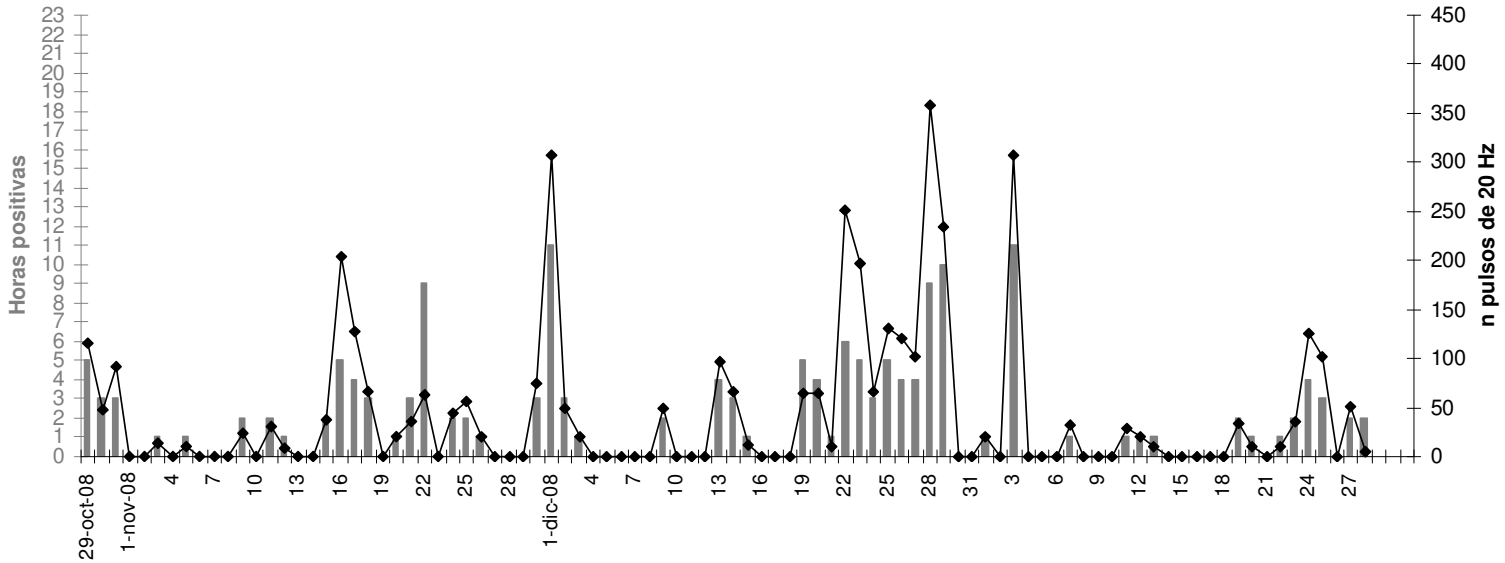


Figura II-20: Patrón de presencia estacional del rorcual común en el área de estudio del cabo de Espartel. La línea negra corresponde al n° de detecciones de pulsos de 20 Hz por día y las barras grises con el n° de horas positivas por día.

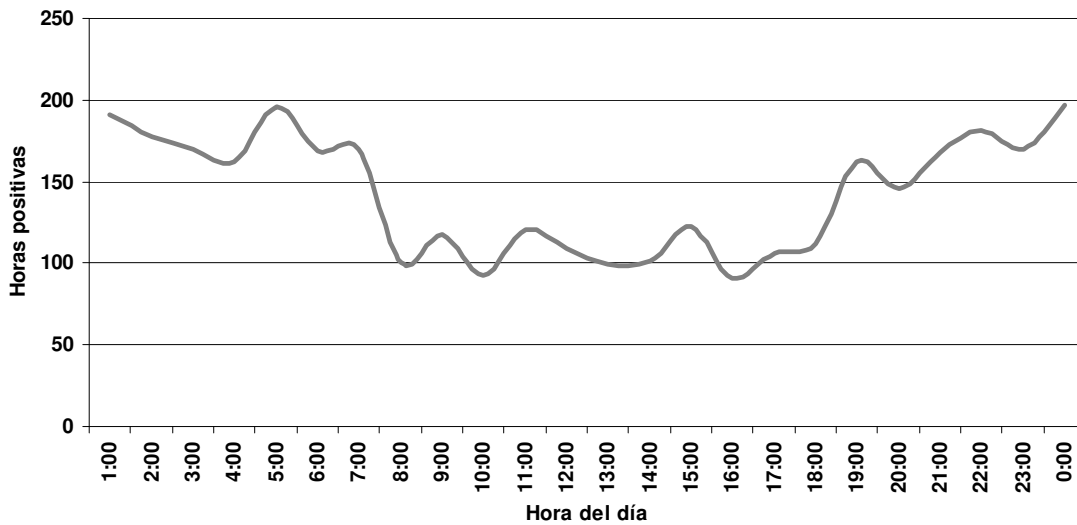


Figura II-21: Patrón de presencia diario del rorcual común en el área de estudio del cabo de Espartel. La línea gris representa el n° total de horas positivas obtenido en el periodo de muestreo para cada hora del día.

Los pulsos de 20 Hz de rorcual común son detectados a lo largo de las 24 horas del día de manera continua. Se observa un marcado descenso del número de horas positivas entre las 8 y las 18 horas.

4.4 Dirección movimiento

4.4.1 Ángulo de recepción

El cálculo del ángulo de recepción permitió estudiar la dirección de movimiento de los rorcuales detectados en dos áreas de estudio, las islas Columbretes y el fondeo de 2006 en la isla de Alborán. El código ISRAT_LT calcula la función de correlación de la señal para los dos canales y muestra el resultado en forma gráfica para la validación manual. Este método facilita confirmar si la señal es válida para el cálculo del ángulo de recepción. La figura II-22 muestra un ejemplo de la función de correlación calculada para un pulso de 20 Hz cuyo resultado de correlación es correcto y por tanto el ángulo de recepción obtenido es de $\pm 45,1^\circ$, aunque sin resolver la ambigüedad de lado. El panel izquierdo muestra el interfaz del código con la representación gráfica de la función de correlación, indicando en blanco sobre fondo negro todas las posibles posiciones de la fuente de sonido. Todas las posiciones coinciden en un ángulo de 45° respecto al eje de la antena de recepción, de valor positivo y negativo ya que la ambigüedad de lado no puede resolverse con menos de 3 canales. El panel derecho muestra el mismo interfaz representando el resultado de la función de correlación sobreimpuesta en la cartografía del área de estudio.

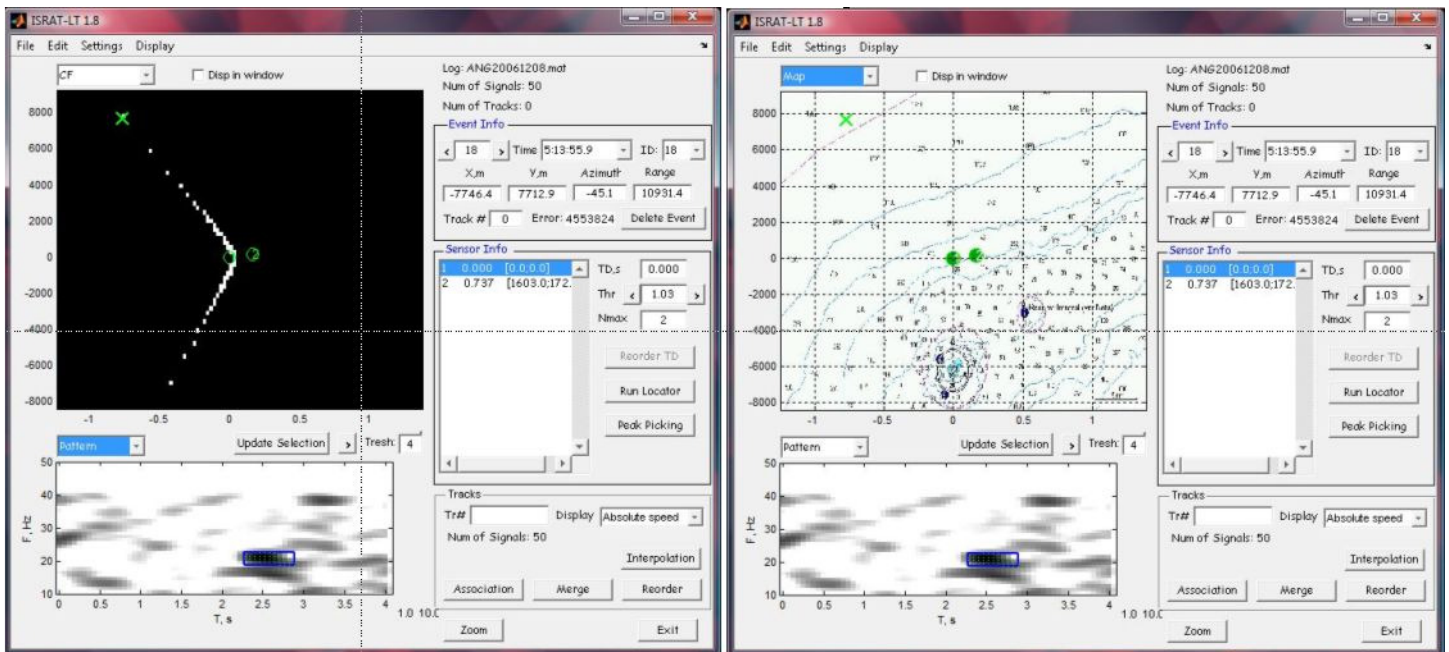


Figura II-22: Resultado de la función de correlación del código ISRAT_LT calculado para un pulso de 20 Hz obtenido en el área de la isla Alborán cuyo resultado de correlación es correcto y por tanto el ángulo de recepción queda definido en $\pm 45,1^\circ$, aunque sin resolver la ambigüedad de lado. El panel izquierdo muestra el interfaz del código con la representación gráfica de la función de correlación y el derecho con el resultado sobreimpuesto en la cartografía del área de estudio.

La figura II-23 muestra otro ejemplo de la función de correlación calculada para un pulso de 20 Hz cuyo resultado de correlación, debido al ruido en la banda de 20 Hz, es incorrecto e impide el cálculo del ángulo de recepción. Ambos ejemplos fueron obtenidos en el área de la isla de Alborán. El panel izquierdo muestra el interfaz del código con la representación gráfica de la función de correlación, indicando en blanco

sobre fondo negro todas las posibles posiciones de la fuente de sonido. Todas las posiciones presentan diferentes ángulos respecto al eje de la antena de recepción, impidiendo definir el ángulo de recepción de la señal. El panel derecho muestra un espectrograma de 16 segundos de duración de cada canal con la señal seleccionada en el registro ANG en rojo en el canal 1 (superior) y el resultado de la selección por la función de correlación, en verde en el canal 2 (inferior). Las figuras de la derecha representan los picos de correlación correspondientes al segmento de tiempo mostrado en el espectrograma. Puede apreciarse en el espectrograma inferior como la selección de la función de correlación cae erróneamente sobre ruido presente en la banda de 20 Hz en lugar de la señal que se observa 4 segundos más tarde. Del mismo modo, la figura inferior con los picos de correlación muestra dos picos, el primero correspondiente al ruido y el segundo a la señal.

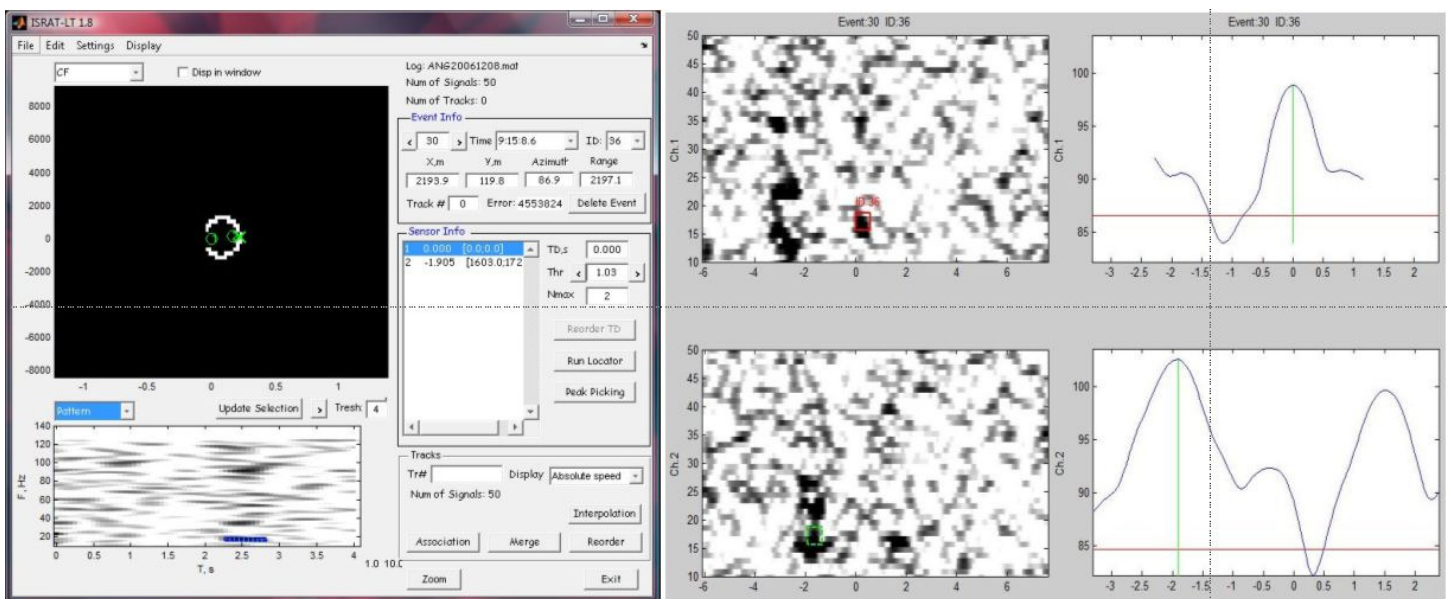


Figura II-23: Resultado de la función de correlación del código ISRAT_LT calculado para un pulso de 20 Hz obtenido en el área de la isla Alborán cuyo resultado, debido a ruido en la banda de 20 Hz, impide el cálculo correcto del ángulo de recepción. El panel izquierdo muestra el interfaz del código con la representación gráfica de la función de correlación y el derecho muestra los espectrogramas de ambos canales con la señal y sus respectivos picos de correlación.

En ambos áreas de estudio, la ambigüedad de lado fue resuelta gracias al diseño de los fondeos. Los instrumentos se fondearon en un eje paralelo a las isóbatas dejando las aguas someras y las islas a uno de los lados del eje de posición de los instrumentos, siendo a 3 millas náuticas del área de fondeo en Alborán y a 1 milla náutica del área de fondeo en el archipiélago de Columbretes. Las islas y zonas someras provocan una sombra acústica en el área de detección ya que las emisiones de los rorcuales que pudieran encontrarse detrás no pueden propagarse a través de las islas y su atenuación es muy elevada en aguas someras. La propagación del sonido en aguas someras sufre un mayor número de reflexiones en el fondo y superficie y una mayor absorción de energía durante la dispersión debido a la mayor temperatura del agua en las capas de más superficiales (Urlick, 1983). Además de las características físicas del medio, el

comportamiento de los rorcuales también fue útil para resolver la ambigüedad de lado, ya que estos animales tienen preferencia por aguas profundas mostrando afinidad por áreas con profundidades entorno a los 1000 m en el Mediterráneo occidental (Laran & Gannier, 2008) por lo que hace improbable encontrar rorcuales entre las islas y la posición de los fondeos. Por estas razones, los ángulos obtenidos en el área de las islas Columbretes se asignaron siempre a detecciones de rorcuales situados al este de la posición de los fondeos y los obtenidos en el área de la isla de Alborán se asignaron a rorcuales situados al norte de la posición de los fondeos. La figura II-24 muestra, en ambas áreas de estudio, el eje de posición de los instrumentos respecto a la situación de las islas y el dominio angular de las posibles detecciones de las señales emitidas por rorcuales.

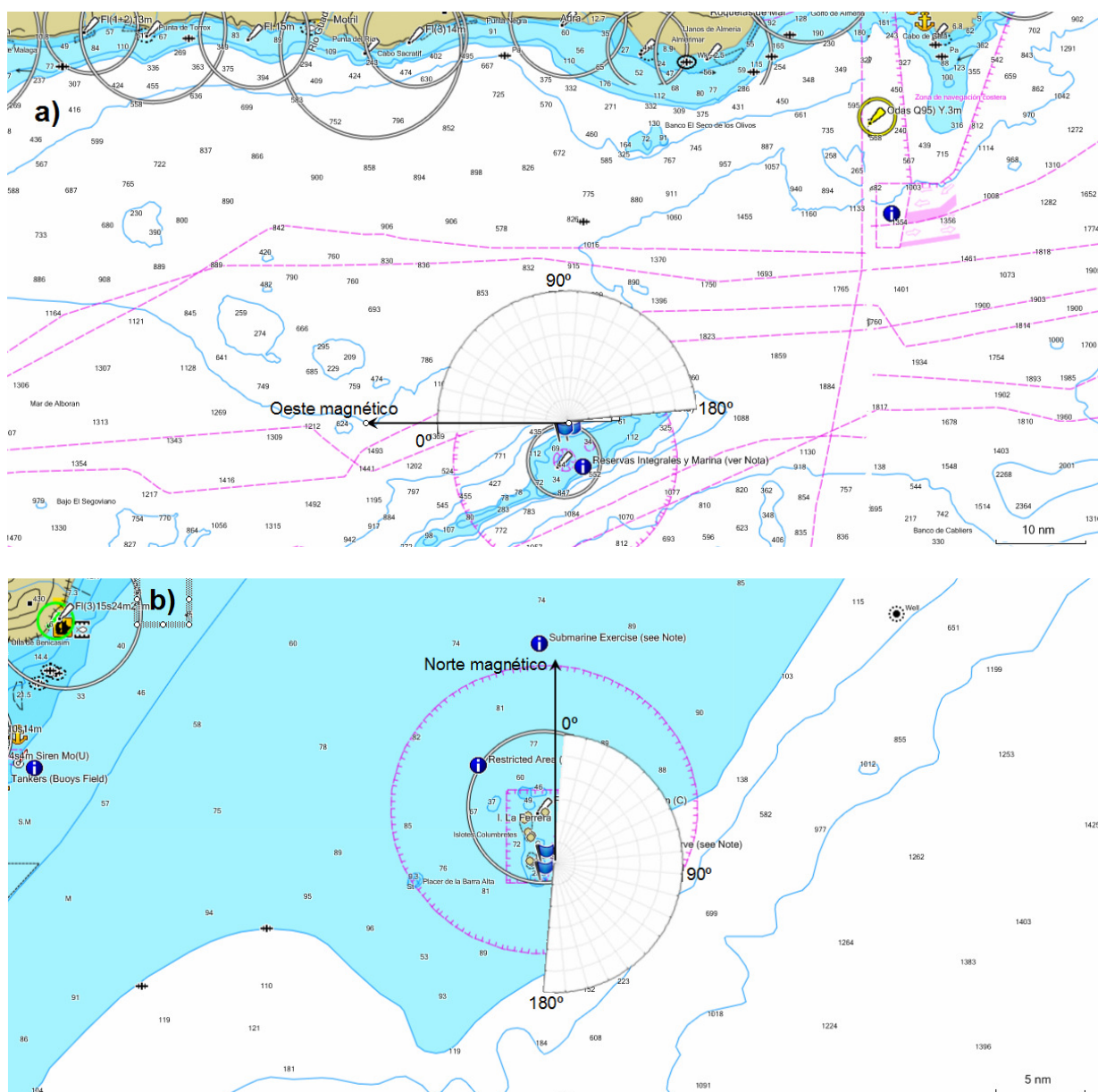


Figura II-24: muestra la posición de los grabadores fondeados respecto a la situación de las islas y el dominio angular correspondiente a los posibles ángulos de detección de las señales emitidas por rorcuales para a) Isla de Alborán y b) Islas Columbretes.

En total, se analizaron 2193 pulsos de 20 Hz, 1328 correspondientes a registros ANG de islas Columbretes y 865 a registros ANG de isla de Alborán.

Islas Columbretes:

Se obtuvieron un total de 1328 pulsos útiles para calcular el ángulo de recepción a lo largo de todo el periodo de fondeo. La representación gráfica utilizada para interpretar los valores angulares fue un histograma polar de 360° equivalente al dominio de detección de la antena de recepción formada por el eje norte-sur de posición de los 2 grabadores MARU. Por tanto, el ángulo 0° en el diagrama corresponde a la dirección norte del eje de posición de los grabadores que se desvía 4° del norte magnético, como puede observarse en la figura II-24. Los valores angulares se ordenaron en intervalos de 5° para facilitar su representación gráfica. Una primera inspección de los valores angulares agrupados por días demostró ser insuficiente para observar posibles patrones de movimiento. La figura II-25 muestra dos ejemplos de todos los ángulos obtenidos en dos días consecutivos, donde no puede definirse un patrón de movimiento debido a que los casos están distribuidos en todo el espectro angular de 180°.

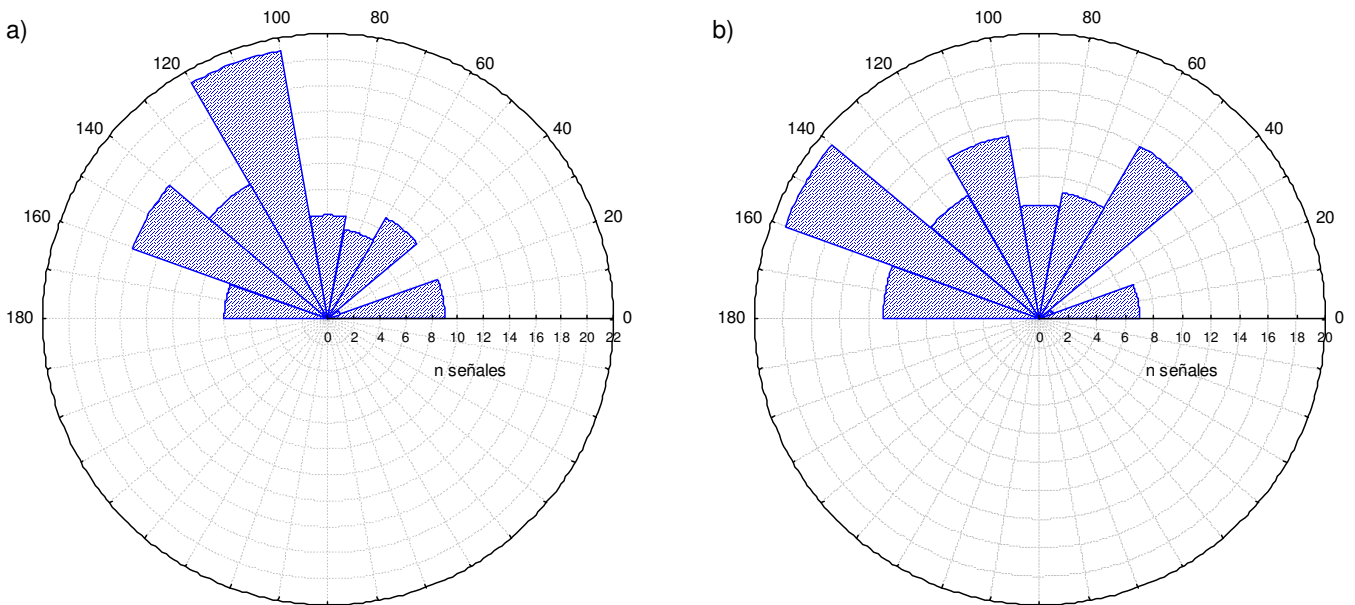


Figura II-25: Histograma polar representando el número de pulsos de 20 Hz detectados en cada ángulo de recepción respecto al eje norte-sur de la posición de los grabadores. a) Número total de ángulos obtenidos para el día 11 de septiembre y b) para el día 12 de septiembre de 2006.

Inspecciones posteriores permitieron describir un patrón de movimiento al aumentar la resolución temporal en la representación gráfica de los casos, especialmente cuando las canciones de pulsos de 20 Hz detectados en los dos canales tenían una duración superior a 60 minutos. Los valores angulares se agruparon por canción de origen, es decir que todos los pulsos de 20 Hz identificados en los dos canales provenientes de la misma secuencia o secuencias consecutivas se agruparon en un solo conjunto. Este conjunto se ordenó cronológicamente y se seleccionaron los pulsos iniciales y finales de canciones de duración superior a 60 minutos para su representación gráfica. Este procedimiento sólo pudo realizarse con el 71 % (n = 940) de todos los pulsos útiles para calcular el ángulo de recepción debido a que en muchos casos la canción de origen de

los valores angulares resultó ser inferior a 60 minutos. En total se seleccionaron los valores angulares de pulsos iniciales y finales correspondientes a 27 canciones diferentes.

Los valores angulares correspondientes a los pulsos iniciales de las 27 canciones se dividieron en dos conjuntos para facilitar la interpretación de su representación gráfica. El primer conjunto incluyó todos los pulsos cuyo valor angular fuera inferior a 90° y el segundo conjunto todos los superiores a 90° . La figura II-26 presenta los histogramas polares con los resultados de los valores angulares correspondientes a los pulsos iniciales y finales de ambos conjuntos.

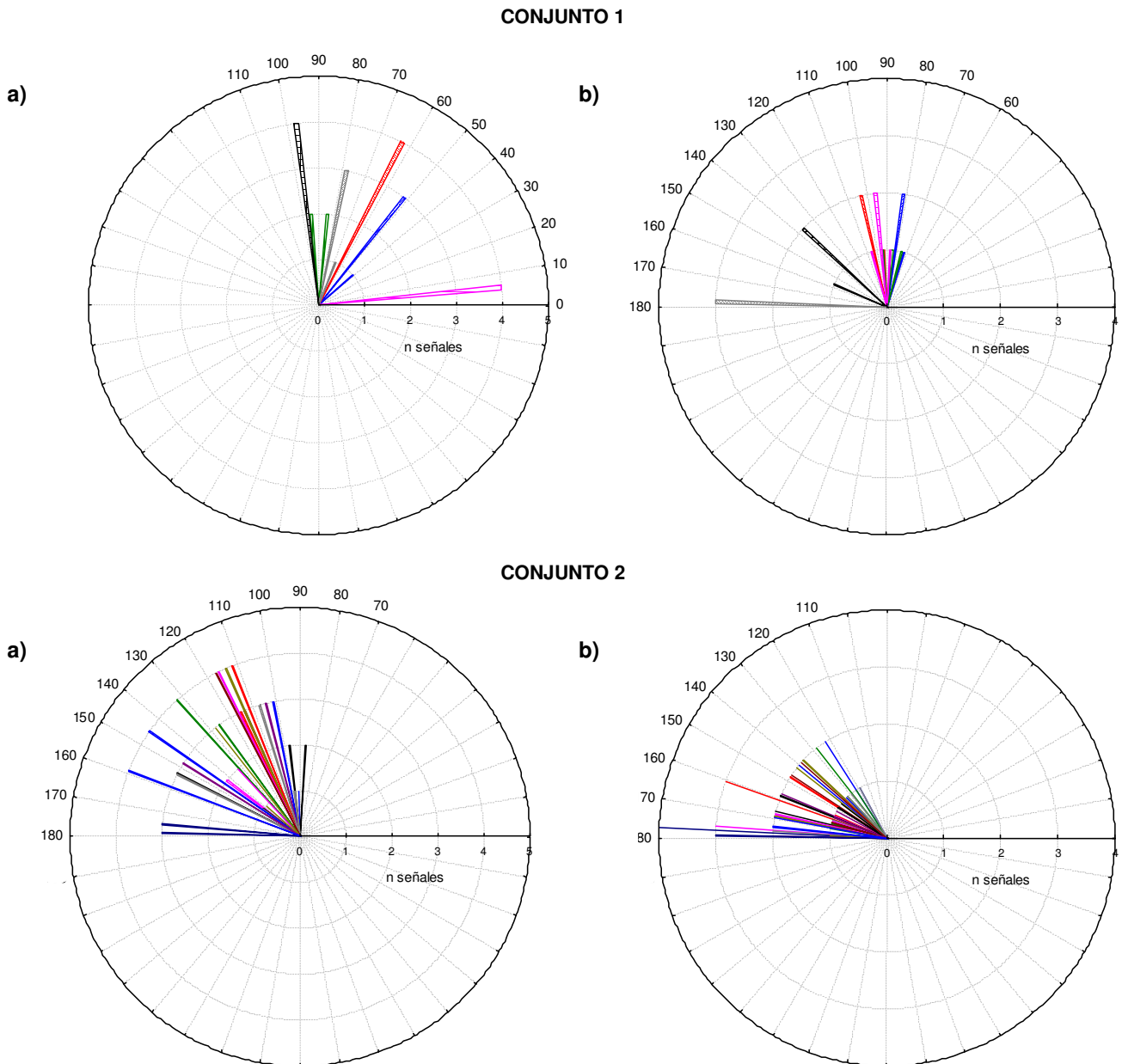


Figura II-26: Histogramas polares con los valores angulares correspondientes a a) pulsos de 20 Hz iniciales y b) finales de canciones agrupadas en dos conjuntos: El Conjunto 1 incluye todos los pulsos cuyo valor angular inicial es inferior a 90° y el conjunto 2 todos los pulsos cuyo valor angular inicial es superior a 90° . Todas las

cancines fueron obtenidas en las grabaciones realizadas en el área de estudio de las islas Columbretes.

Todas las canciones incluidas en el análisis presentaron un incremento positivo de los valores angulares, excepto una canción que mostró un incremento de -2° . El incremento medio fue de 36° (d.s.=22,7).

Isla de Alborán:

Se obtuvieron un total de 721 pulsos útiles para calcular el ángulo de recepción a lo largo de todo el periodo de fondeo. Al igual que el tratamiento de los datos del área de las islas Columbretes, la representación gráfica utilizada para interpretar los valores angulares fue un histograma polar de 360° equivalente al dominio de detección de la antena de recepción formada por el eje este-oeste de posición de los 2 grabadores MARU. Por tanto, el ángulo 0° en el diagrama corresponde a la dirección oeste del eje de posición de los grabadores que se desvía 4° del oeste magnético, como puede observarse en la figura II-24. Los valores angulares se ordenaron en intervalos de 5° para facilitar su representación gráfica. Al contrario que en el caso de las islas Columbretes, una primera inspección de los valores angulares agrupados por días demostró ser suficiente para observar patrones de movimiento. En total se obtuvieron 12 periodos de 24 horas con valores angulares para la representación gráfica. Con el fin de facilitar la interpretación, los valores de los 12 periodos se agruparon por similitud en 4 histogramas polares. La figura II-27 presenta los 4 histogramas polares con los resultados de los valores angulares correspondientes a cada periodo de 24 horas agrupados por similitud.

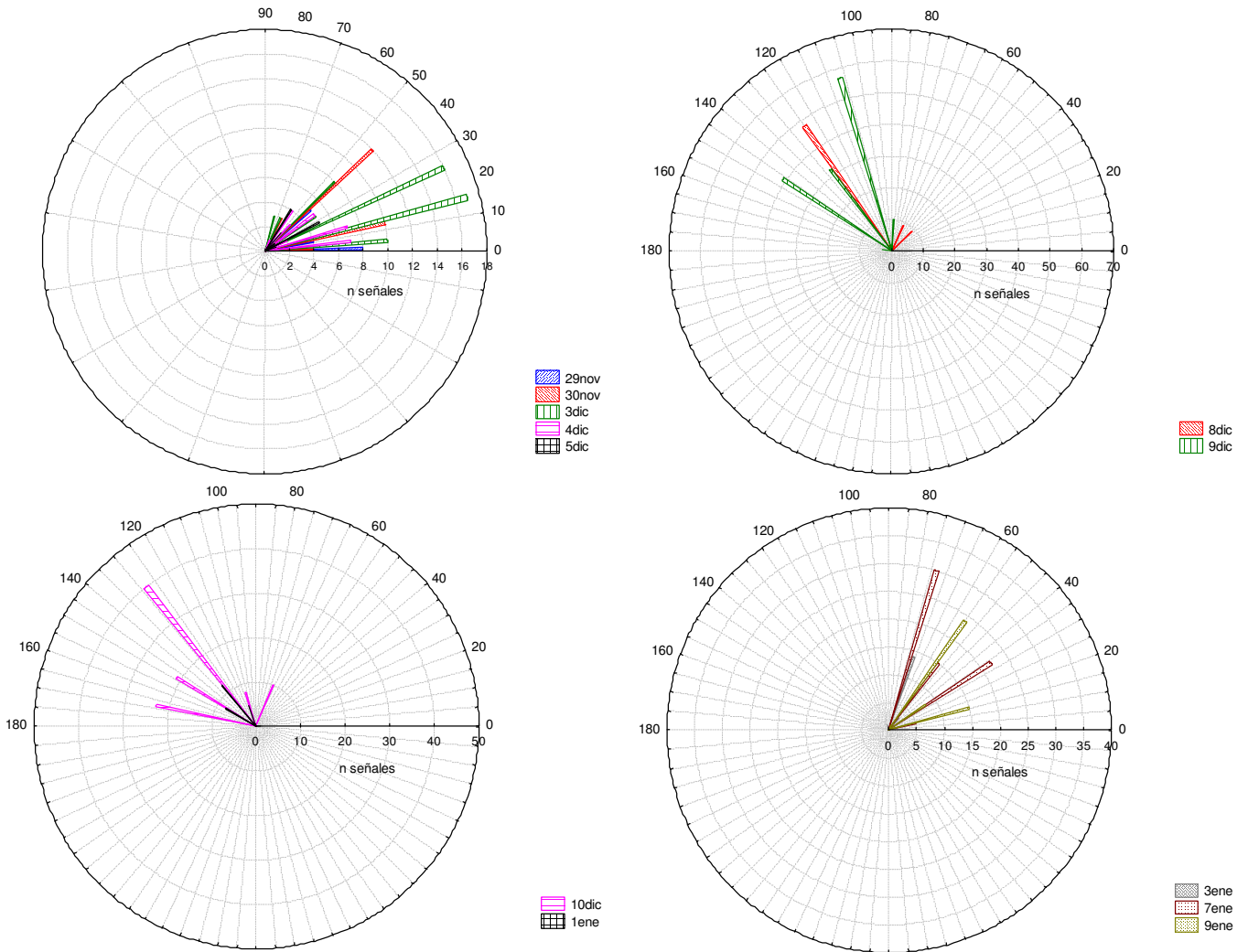


Figura II-27: Histogramas polares de los valores angulares correspondientes a los pulsos de 20 Hz detectados por periodo de 24 horas agrupados por similitud en el área de estudio de la isla de Alborán durante el fondeo de 2006.

Los valores angulares diarios presentaron una tendencia similar desde el inicio del periodo de muestreo (29 noviembre 2006) hasta el día 5 de diciembre, manteniendo una variabilidad comprendida entre 0° y 90° . Entre el 5 y el 8 de diciembre hubo un cambio en el ángulo de recepción general de los pulsos de 20 Hz ya que los valores angulares obtenidos en los días 8 y 9 de diciembre varían en su mayoría entre 90° y 180° . Los valores angulares obtenidos en los días 10 de diciembre y 1 de enero presentaron una tendencia similar a los días 8 y 9 de diciembre, con variabilidad comprendida entre 90° y 180° pero con mayor predominio de valores altos. Los valores correspondientes a los días 3, 7 y 9 de enero de 2007 volvieron a la tendencia observada al principio del periodo de muestreo, con variabilidad angular comprendida entre 0° y 90° .

4.4.2 Desplazamientos en el Estrecho de Gibraltar

La corriente mínima en el área de estudio dentro del periodo de muestreo fue de 1 nudo según el cálculo con la fórmula para corrientes indicado en la carta náutica n° 445 (IHM, 1983) para la zona de fondeo y los valores de marea de la tabla de mareas de Tarifa (IHM, 2008 y 2009) para el periodo de muestreo. El tiempo necesario para

recorrer la distancia entre los dos grabadores (2 millas náuticas), a la velocidad de 1 nudo equivale a 2 horas. Por tanto se estableció como límite un periodo de 2 horas para incluir detecciones consecutivas en el análisis de desplazamientos en el Estrecho de Gibraltar. Se identificaron 30 periodos en los que la presencia de pulsos de rorcual común fue consecutiva en ambas grabaciones dentro de un intervalo máximo de dos horas, repartidos en 11 días diferentes. La figura II-28 muestra los intervalos calculados para todos los casos.

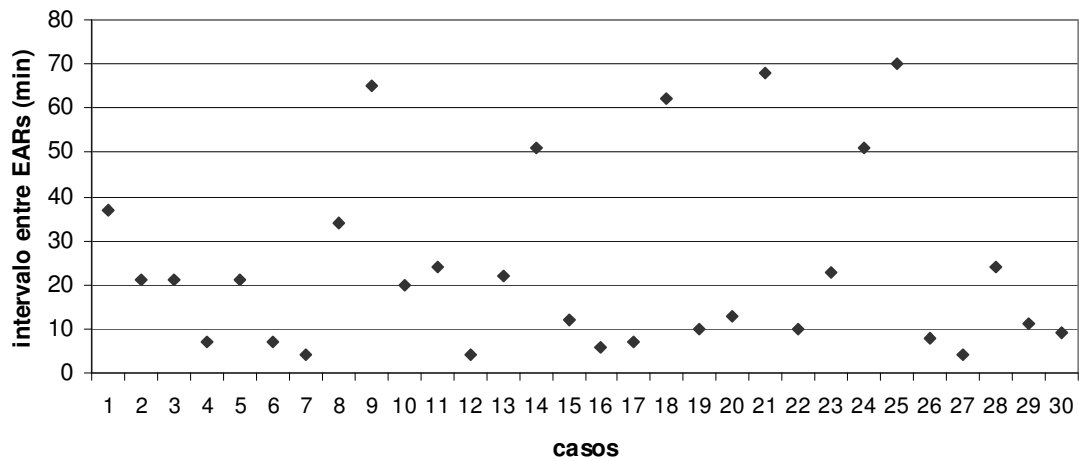


Figura II-28: intervalos de tiempo transcurridos entre detecciones de rorcuales en ambos EAR fondeados en el Estrecho de Gibraltar.

Los intervalos transcurridos entre detecciones en ambos grabadores presentaron una variabilidad de entre 4 y 70 minutos. La distribución de los intervalos no fue regular, presentando dos tendencias, una con duración inferior a 40 minutos y otra con duración entre 50 y 70 minutos. La figura II-29 muestra un histograma con la distribución de intervalos de tiempo.

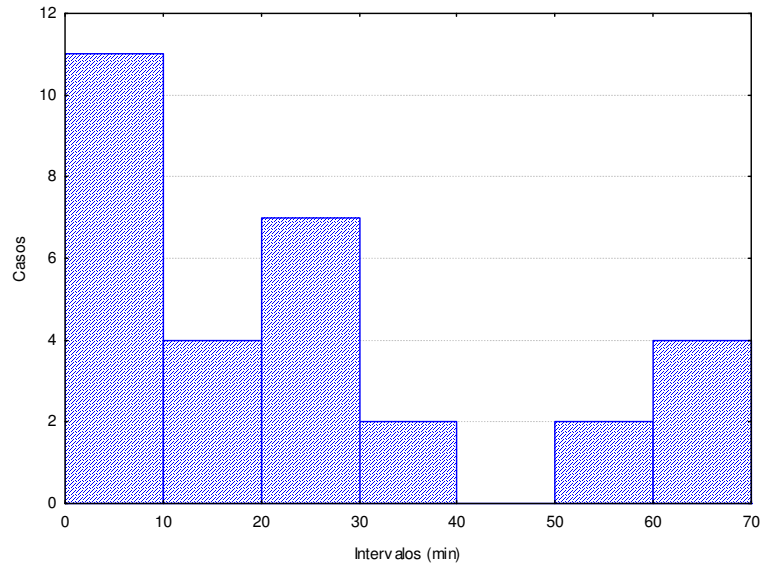


Figura II-29: Histograma de los intervalos de tiempo de las detecciones consecutivas en los grabadores fondeados en el Estrecho de Gibraltar.

Los desplazamientos se agruparon en dos direcciones, este-oeste (en dirección hacia el océano Atlántico) y oeste-este (hacia el mar Mediterráneo). Se obtuvieron 13 casos hacia el este y 17 hacia el oeste, siendo un 43,3 % en dirección hacia el mar Mediterráneo y 56,7 % hacia el océano Atlántico. Comparando la dirección de movimiento con la corriente en el área de estudio, el 60 % de los casos se desplazó en dirección favorable a la corriente, siendo el 76,9 % del total en dirección hacia el mar Mediterráneo. Además, todos los casos cuyo intervalo entre detecciones consecutivas fue inferior a 10 minutos corresponden con desplazamientos en dirección al mar Mediterráneo. Comparando las horas de las detecciones con el ciclo de mareas, el 46,7 % de los casos ocurrieron entorno a o durante la bajamar (± 1 hora), sin embargo los casos que ocurrieron entorno a o durante la pleamar (± 1 hora) fueron el 10 %.

Los resultados de presencia de rorcuales en el área del Estrecho de Gibraltar fueron comparados con los obtenidos en el área del cabo de Espartel, situado al oeste del Estrecho de Gibraltar. Se analizó la correlación entre detecciones de rorcuales en el Estrecho de Gibraltar y cabo de Espartel con el fin de identificar patrones de movimiento entre ambas áreas. Se comparó el número de pulsos de 20 Hz detectados por día así como el número de horas positivas en ambas áreas. La tabla II-4 muestra los resultados del análisis de correlación lineal simple. La figura II-30 muestra el ajuste de la curva de regresión para la correlación entre ambas variables.

	Pulsos 20 Hz Estrecho / Espartel	Horas + Estrecho / Espartel
Pearson r	0,1242	0,1982
p	0,238	0,058

Tabla II-4: Resultados del análisis de correlación lineal simple entre las detecciones de rorcuales comunes (nº de pulsos de 20 Hz por día así como nº de horas positivas por día) de las áreas del Estrecho de Gibraltar y cabo de Espartel.

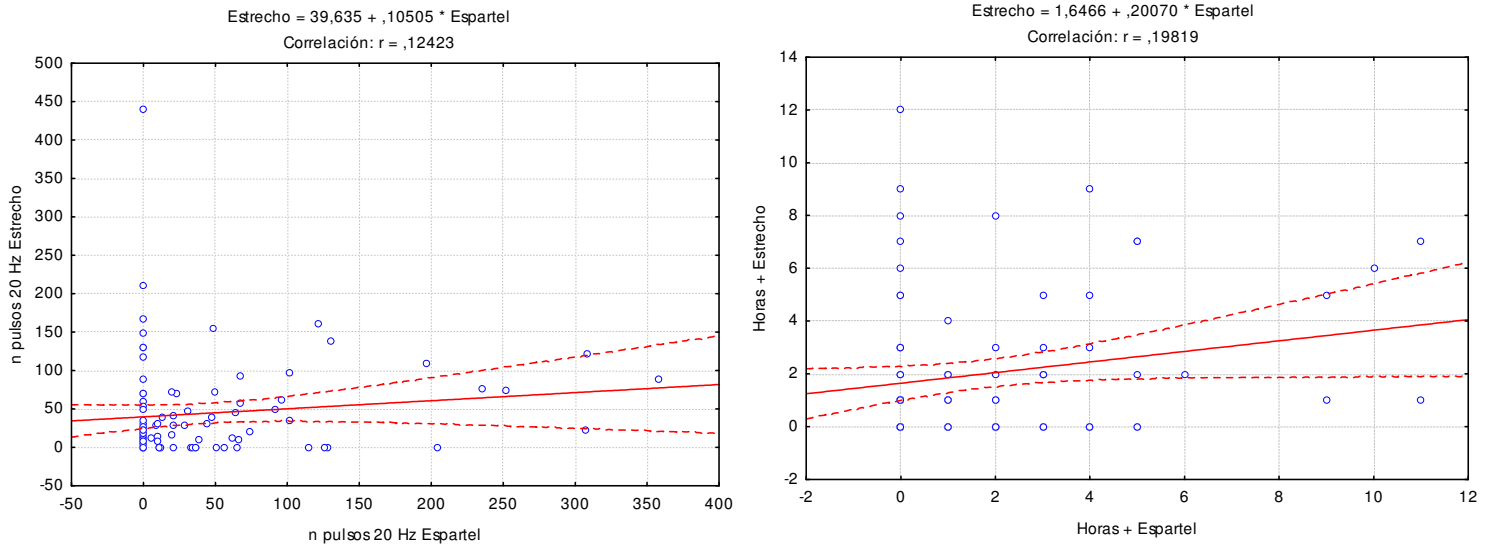


Figura II-30: Ajuste de las curvas de regresión con el intervalo de confianza del 95 % para la correlación entre las detecciones de pulsos de 20 Hz por día así como nº de horas positivas por día en las áreas del Estrecho de Gibraltar y cabo de Espartel.

5. Discusión

Los resultados del volumen de detecciones obtenido a lo largo de la cuenca Balear, mar de Alborán y Estrecho de Gibraltar en otoño e invierno confirman que la presencia del rorcual común es más habitual de lo anteriormente descrito en estas áreas (ej. Clapham *et al.*, 2008), especialmente para la región de las islas Columbretes. El valor medio de pulsos detectados por día obtenido en esta zona en otoño fue de 1.473 pulsos/día (stdv. = 1023). Las cifras obtenidas por Clark *et al.* (2002) en la misma época del año pero en el mar de Liguria oscilan entre 60 y 677 pulsos por día. Teniendo en cuenta que el mar de Liguria ha sido descrito como la zona de mayor concentración de rorcuales comunes del mar Mediterráneo (Forcada, 1996), la comparación de estas cifras pone de relieve la importancia de la presencia de rorcuales en la zona de las islas Columbretes, que supera el doble del máximo obtenido en Liguria.

El análisis del patrón diario de la actividad acústica en las diferentes áreas de estudio demuestra que la producción de señales por los rorcuales es constante a lo largo de las 24 horas, con independencia de la época del año y del área geográfica. Este hallazgo permite confirmar que los resultados cuantitativos han sufrido un sesgo mínimo por efecto de la hora del día y periodo estacional. A su vez, estos resultados dan más robustez a la interpretación de los patrones de presencia estacional y tendencias de desplazamientos puesto que el riesgo de no detectar rorcuales por encontrarse acústicamente pasivos es reducido.

Se observa una tendencia general en la variación diaria, reduciéndose la actividad acústica durante el periodo de luz. El descenso se produjo entre las 8 y las 9 horas y el ascenso entre las 17 y las 19 horas, coincidiendo con el horario solar en función de la época del año en la que se realizó el fondeo. Hay pocos estudios que hayan analizado el patrón de actividad acústica diaria en el rorcual común, pero parece que la tendencia a ser más activos durante la noche es común en todos los informes, especialmente un incremento positivo de la actividad tras el ocaso (ej. Clark y Gagnon, 2004; Watkins *et al.*, 1987) aunque cabe destacar que Clark *et al.* (2002) no observaron un patrón diario evidente en la región del mar de Liguria. Esta discrepancia quizá se deba a diferencias en el tamaño muestral, puesto que en este trabajo se han utilizado un volumen de datos superior en varios ordenes de magnitud respecto a los analizados por Clark *et al.* (2002).

La variabilidad diaria de actividad acústica observada en el área del Estrecho de Gibraltar no presenta ninguna tendencia evidente (figura II-19). El análisis detallado de las grabaciones en esta área para el estudio del ángulo de recepción de las señales demostró que el ruido ambiente en esta zona es extremadamente elevado interfiriendo con la detección de los pulsos de 20 Hz emitidos por los rorcuales. En muchas ocasiones se observó que ante la presencia de un rorcual acústicamente activo, el aumento progresivo del ruido ambiente por el acercamiento de un buque al área de fondeo enmascaró las señales producidas por el rorcual hasta imposibilitar su identificación durante largos periodos de tiempo. La imposibilidad de detectar rorcuales acústicamente activos durante periodos en los que estos se encuentran presentes podría tener un efecto en el análisis del patrón diario que impida identificar la tendencia descrita en las demás áreas de estudio, aunque no es posible confirmar esta hipótesis con los datos obtenidos en este trabajo. Otra posibilidad a tener en cuenta implica la

presencia de un cambio en el comportamiento acústico de los rorcuales ante un medio en el que los niveles de ruido ambiente son elevados. Esta hipótesis es investigada en el capítulo IV. Otro cambio de comportamiento podría deberse a diferencias importantes en el contexto donde se han realizado las grabaciones. El estrecho de Gibraltar es una de las pocas regiones marinas que presenta unas características oceanográficas más extremadamente heterogéneas (Garret, 1996) y obviamente diferentes al resto de áreas de estudio. Tratándose de un embudo natural en presencia de barreras físicas (líneas de costa) y acústicas (frentes termohalinos por presencia de masas de agua atlántica y mediterránea), cabe esperar que los rorcuales intensifiquen su comportamiento exploratorio y de orientación. Descripciones de estos comportamientos que permitan asociarse a un cambio en el patrón de actividad acústica son inexistentes en cualquier familia de misticetos, pero en el caso del rorcual común y la ballena azul, se ha propuesto que los ecos de los pulsos emitidos por estos animales podrían ser utilizados como ayuda en la navegación y orientación (Clark y Ellison, 2004). En este caso, sería lógico postular que la actividad acústica de los rorcuales comunes navegando por el estrecho de Gibraltar se intensifique y por tanto no presente una reducción durante las horas de luz.

El análisis detallado de las grabaciones del área de las islas Columbretes, en los periodos en los que hubo un elevado número de detecciones, demostró que se trata de muchos individuos vocalizando simultáneamente puesto que se observaron muchas canciones solapadas generando una gran variabilidad en las intensidades de las señales recibidas y en los intervalos entre las mismas. Sin embargo en los días en los que las detecciones fueron mínimas, las canciones se presentaban bien definidas y tanto la intensidad de las señales como los intervalos entre las mismas presentaron valores muy constantes, como es típico del comportamiento acústico del rorcual común. Estas observaciones confirman que el incremento en el número de pulsos de 20 Hz detectados diariamente en el área de las islas Columbretes es consecuencia de un incremento en el número de rorcuales vocalizando que pasaron por el área de detección de los grabadores en lugar de haberse producido por cambios en el comportamiento acústico de los mismos. Los resultados en este área demuestran que la presencia de rorcuales es máxima a mediados de septiembre con un incremento gradual durante las semanas previas y posteriores entre agosto y noviembre (figura II-12). Estos resultados coinciden con la periodicidad de las observaciones realizadas al sur de las cuencas Provenzal y Tirrena en otoño y apoyan la hipótesis de un desplazamiento estacional en dirección sur al finalizar los afloramientos de la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal. La reducción de detecciones acústicas desde mediados de septiembre con mínimos en noviembre en la zona de las islas Columbretes sugiere que los rorcuales que son detectados en esta región de la cuenca Balear no se detienen y continúan su desplazamiento hacia el sur, al menos durante el periodo muestreado. Esta observación amplía la hipótesis planteada por Raga y Pantoja (2004), quienes sugieren que todo el margen este del talud continental de la península Ibérica (desde el norte de Cataluña hasta Andalucía) actúa como corredor migratorio durante la primavera, permitiendo a los rorcuales desplazarse hacia su principal área de alimentación estival desde áreas de invernada del sur del mar Mediterráneo. Nuestros resultados demuestran que los rorcuales también utilizan este corredor durante su migración hacia el sur al final de su periodo de alimentación estival.

Los resultados de los fondeos realizados en el canal de Ibiza en verano, demuestran la ausencia de rorcuales en la cuenca Balear en este periodo del año (figura II-14). Estos

resultados junto con los descritos anteriormente permiten concluir que la presencia del rorcual común en la cuenca Balear está bien marcada por un patrón migratorio.

El estudio del ángulo de recepción de los pulsos de rorcual común en la zona de las islas Columbretes manifiesta una marcada tendencia de desplazamiento. Las 27 canciones incluidas en el análisis presentaron un incremento positivo de los valores angulares, excepto una canción que mostró un incremento de -2° (figura II-26). Estos resultados indican que todos los rorcuales detectados acústicamente cuyo ángulo de recepción de sus pulsos fue analizado se desplazaron hacia el sur, excepto uno que presentó un muy ligero desplazamiento hacia el norte en el intervalo de tiempo estudiado. El incremento medio fue de 36° . Teniendo en cuenta que la duración media de las canciones fue de 3 horas 26 minutos y que sólo aquellas con mejor relación señal-ruido fueron seleccionadas para el análisis (por tanto tratándose de rorcuales relativamente cerca de los grabadores), el ritmo de desplazamiento hacia el sur fue considerable en todos los casos. Una inspección minuciosa de las canciones seleccionadas para el análisis angular (observando el espectrograma y escuchando las secuencias a una velocidad de reproducción 8 veces superior a la natural), permitió observar que en la mayoría de los casos la intensidad de la señal recibida aumentó gradualmente hasta alcanzar un máximo a partir del cual la intensidad disminuyó gradualmente hasta igualar el nivel de ruido ambiente y perderse. Esta característica ya ha sido descrita anteriormente en grabaciones de secuencias de pulsos de rorcual común y ha sido asociada con un acercamiento y alejamiento consecutivo y continuo de los rorcuales a la zona de fondeo de los grabadores (Watkins *et al.* 2000, Clark *et al.* 2002). Por tanto, los resultados del estudio del ángulo de recepción en la zona de las islas Columbretes demuestran una tendencia de desplazamiento norte-sur y refuerzan la hipótesis propuesta sobre la existencia de un patrón migratorio bien definido en la cuenca Balear, correspondiendo el otoño con un periodo de migración hacia regiones del sur del mar Mediterráneo. Esta característica agudiza el actual problema de las colisiones entre buques y rorcuales comunes en el mar Mediterráneo. El análisis de los desplazamientos de los rorcuales comunes en el área de las islas Columbretes demuestra que la tendencia de movimiento de estos animales es perpendicular al del tráfico de los ferries que comunican las islas Baleares con la península, maximizando el riesgo de colisión, por lo que esta área debería considerarse como prioritaria para aplicar una regulación que reduzca el riesgo de colisiones en los periodos de máxima abundancia. Este problema se discute con más detalle en los capítulos IV y V.

Las detecciones obtenidas en el área de estudio de la isla de Alborán demuestran la presencia continua de rorcuales a lo largo del invierno (figura II-15) y la ausencia de estos a finales de verano y principios del otoño (figura II-17). Estos resultados confirman que el mar de Alborán es un área de invernada para el rorcual común y refuerzan, junto con la descripción de la presencia de rorcuales en las inmediaciones de la isla de Lampedusa durante el invierno (Canese *et al.*, 2006), la hipótesis de un patrón migratorio norte-sur, donde los rorcuales permanecerían en la época invernal en regiones del sur del mar Mediterráneo.

El valor medio de pulsos detectados por día obtenido en la zona de la isla de Alborán en invierno fue de 44 pulsos/día (stdv. = 107) y en el estrecho de Gibraltar fue de 43 pulsos/día (stdv. = 62). Estos valores son muy inferiores a los obtenidos en otoño en el área de las islas Columbretes, lo que sugiere que el flujo de animales que se desplaza por la cuenca Balear en otoño se dispersa al llegar a las regiones del sur del mar

Mediterráneo. Esta diferencia no parece deberse a cambios en el comportamiento acústico de los rorcuales puesto que la mayoría de las especies de rorcuales presentan picos en su actividad vocal desde el otoño hasta la primavera (Clark y Ellison, 2004), quedando ambos periodos de estudio dentro de la época de mayor actividad acústica.

La variación temporal del número de detecciones de pulsos de 20 Hz a lo largo del periodo de muestreo es más irregular que la observada en el área de las islas Columbretes. Como puede observarse en el patrón estacional representado en la figura II-12, el periodo de ausencia más largo fue de 6 días, aunque llegó a alcanzarse un periodo de 16 días con detecciones inferiores a 10 pulsos de 20 Hz por día. Los intervalos de ausencia y presencia obtenidos a lo largo de todo el periodo de muestreo sugieren que los movimientos realizados por los rorcuales en esta área no fueron marcados por un patrón constante, sino que más bien se trató de desplazamientos variados. No hubo ni un descenso, ni un ascenso gradual del número de detecciones por día a lo largo del periodo de muestreo sino más bien cambios bruscos en estos valores, lo que sugiere que los rorcuales entraron y salieron del área de detección de los grabadores en función de la dirección del desplazamiento. El número de detecciones por día varió entre 0 y 510, lo que indica que el número de rorcuales acústicamente activos se mantuvo relativamente constante a lo largo del periodo de muestreo, sin presentar incrementos tan grandes como los obtenidos en el área de las islas Columbretes.

El estudio del ángulo de recepción de los pulsos de rorcual común en la zona de la isla de Alborán indica que al contrario de lo observado en la cuenca Balear, no hubo una tendencia continua de desplazamiento. Los rorcuales detectados no parecieron seguir una dirección de movimiento constante sino que más bien presentaron preferencia por permanecer en un área durante un periodo de varios días hasta mostrar cambios aparentes en el ángulo de recepción de sus señales desplazándose hasta otra área en el que permanecieron varios días. El análisis realizado con valores angulares de 12 días diferentes demostró este comportamiento. La figura II-27 permite observar que los rorcuales detectados mostraron preferencia por determinadas áreas alrededor de los grabadores: La posición inicial de los animales se encontró repartida entre el oeste y el noroeste respecto a la posición de los grabadores durante un periodo de al menos 7 días, posteriormente entre el norte y el noroeste durante varios periodos de al menos 2 días y hacia el final del periodo de muestreo los rorcuales volvieron a ángulos similares a los del periodo inicial, hacia el oeste y el noroeste. Hay que destacar que los ángulos de recepción para cada día se mantuvieron en un espectro reducido, lo que sugiere que los rorcuales detectados se encontraron siempre en un área relativamente reducido. Además, los desplazamientos entre áreas parece que ocurrieron en grupo puesto que las variaciones de ángulos de recepción entre días fueron comunes para la mayoría de pulsos detectados en cada día. Los resultados del estudio del ángulo de recepción de los pulsos de rorcual común en la zona de la isla de Alborán sugieren que el comportamiento de los rorcuales en esta área durante el invierno tiende a permanecer en grupo y realizar desplazamientos dentro de un área limitada. Aunque los resultados acústicos obtenidos en el área de la isla de Alborán no permiten identificarlo y teniendo en cuenta que el mar de Alborán es la zona de mayor producción primaria del mar Mediterráneo (Perkins *et al.*, 1990), es oportuno especular acerca del significado de los movimientos descritos por el análisis del ángulo de recepción de los pulsos de rorcual común. Esta área presenta características idóneas para ser utilizado como zona de alimentación durante el invierno. La compleja dinámica oceanográfica de la zona que rodea la isla de Alborán incluye dos giros anticiclónicos, que potenciados por

condiciones meteorológicas y atmosféricas (Cheney y Doblar 1979), originan procesos de convergencia y divergencia de las masas de agua creando zonas de importante productividad (Tintoré *et al.*, 1988; Rubín *et al.*, 1992). En varias zonas de la cuenca occidental del mar Mediterráneo, incluyendo el mar de Alborán, hay evidencia de una relación directa entre la distribución parcheada de zooplancton y la presencia de rorcuales comunes (Viale y Frontier 1994). Siendo un ambiente de características físicas y biológicas marcadamente heterogéneas es lógico pensar que los rorcuales exploten los recursos alimentarios concentrados en zonas concretas del mar de Alborán. Este comportamiento podría explicar la permanencia durante días en un mismo ángulo respecto a la posición de los grabadores y la preferencia por permanecer en grupo. Sin embargo, dado que estas detecciones fueron realizadas en pleno invierno y en latitudes bajas del mar Mediterráneo, el comportamiento que correspondería, según fundamentos clásicos sobre la ecología de los balaenopteridos, sería el de la reproducción.

Las secuencias de pulsos de 20 Hz emitidas por el rorcual común macho han sido descritas como un display con función de reproducción, puesto que su ocurrencia en latitudes medias es mayoritariamente desde el otoño hasta la primavera, coincidiendo con la época de reproducción de la especie (Watkins *et al.*, 1987). Esta función ha sido también propuesta para las secuencias de señales emitidas por la ballena azul (*Balaenoptera musculus*) y el rorcual aliblanco (*Balaenoptera acutorostrata*), denominándose canciones (Clark y Ellison, 2004) a modo de símil con la función del canto en aves paseriformes para la selección por las hembras de congéneres con los que reproducirse. Pero la hipótesis acerca de la función de la actividad acústica en los rorcuales se encuentra en debate ya que no hay ninguna evidencia directa de la asociación del comportamiento acústico con el sexual en ninguna especie de balaenopterido. Además, la producción de sonidos en secuencias consecutivas durante largos periodos y estereotípicas en el caso de la ballena azul y el rorcual común, con una única función de display reproductivo no justifica que estas presenten este comportamiento fuera de su época de reproducción, en plena época de alimentación en áreas de altas latitudes, como ha sido descrito en sucesivas ocasiones (ej. Croll *et al.*, 2001; Ljungblad *et al.*, 1998). Varios autores han sugerido que el rorcual común presenta patrones estereotípicos, con canciones largas y bien definidas durante el invierno y por tanto asociadas a comportamientos de reproducción y patrones menos estereotípicos, con canciones más cortas y desorganizadas o secuencias aisladas durante el resto del año, asociadas a comportamientos sociales, de alimentación o durante desplazamientos (Watkins, 1981; McDonald *et al.* 1995; Moore *et al.*, 1998). Sin embargo, ambos tipos de canciones ocurren cuando los rorcuales se alimentan a finales de verano en la cuenca noreste del océano Atlántico y frente al sur de California en el océano Pacífico, o cuando se alimentan al final del invierno en el mar de Cortés en Baja California (Clark, 1995; Clark y Fristrup, 1997; Croll *et al.*, 2001). Todas estas observaciones sugieren que o bien la actividad sexual se mantiene fuera de la época de reproducción tradicional, o que el comportamiento sexual por si solo no cubre todas las funciones implícitas en la producción de largas canciones de sonidos estereotípicos o que hay una asociación funcional entre los recursos alimentarios y el display reproductivo de los machos. Esta última hipótesis es actualmente la más aceptada tanto para el rorcual común como para la ballena azul (Ljungblad *et al.*, 1998; McCauley *et al.*, 2001; Moore *et al.*, 2002) y sugiere que la estrategia reproductiva en estas especies es más dependiente de la distribución de zooplancton que de regiones de menor latitud, generalmente más cálidas, como ocurre en el caso de la yubarta (*Megaptera novaengliae*) o la ballena franca (*Eubalaena glacialis*) (Clark y Gagnon, 2004).

La presencia de canciones largas y bien definidas en el área de la isla de Alborán durante el invierno sugiere que los rorcuales en esta zona desarrollan comportamientos de reproducción. Puesto que no existen descripciones del comportamiento sexual en el rorcual común, ni de ningún otro balaenopterido, no es posible asociar características de los desplazamientos identificados mediante el estudio del ángulo de recepción de los pulsos con este tipo de comportamiento. Pero como se ha descrito anteriormente, este comportamiento acústico no parece ser exclusivo de un contexto de reproducción y en esta área se han descrito zonas de alta productividad incluyendo concentraciones elevadas de zooplancton. Todo ello apunta a que los rorcuales comunes en esta área podrían desarrollar conjuntamente actividades de alimentación y de reproducción, por lo tanto la hipótesis de una asociación funcional entre los recursos alimentarios y el display reproductivo de los machos podría explicar los resultados obtenidos en este trabajo.

Las detecciones identificadas en el estrecho de Gibraltar y cabo Espartel en invierno demuestran la presencia de rorcuales que sorprendentemente utilizan el Estrecho para entrar y salir del mar Mediterráneo. El valor medio de pulsos detectados por día obtenido en el estrecho de Gibraltar fue de 43 pulsos/día, que comparado con el valor obtenido en la zona de la isla de Alborán de 44 pulsos/día sugiere que la presencia de rorcuales comunes en ambas áreas es muy similar. Sin embargo, el nivel de ruido ambiente en el área del Estrecho fue extraordinariamente elevado comparado con todas las demás áreas de estudio, lo que muy probablemente provocó que el área de detección de los grabadores se redujera considerablemente. Esta característica no es de extrañar si se considera que el estrecho de Gibraltar es la segunda ruta marítima más congestionada del planeta tras el canal de la Mancha (REMPEC, 2002). Por tanto, los valores cuantitativos de presencia de rorcuales en esta área muy probablemente infravaloren la situación real. El patrón de presencia estacional en el Estrecho de Gibraltar (figura II-18) permite observar que la ausencia más prolongada de pulsos de 20 Hz en el periodo de muestreo nunca superó las 48 horas, lo que sugiere una presencia continua a lo largo del invierno. La variación temporal del número de detecciones de pulsos de 20 Hz a lo largo del periodo de muestreo es bastante regular, manteniéndose entorno al valor medio de 43 pulsos/día, lo que indica que el número de rorcuales acústicamente activos se mantuvo relativamente constante a lo largo del periodo de muestreo, sin presentar incrementos tan grandes como los obtenidos en el área de las islas Columbretes, excepto en tres periodos de 4 a 7 días de duración en los que se alcanzaron valores de entre 100 y 440 pulsos/día. Estos resultados sugieren que en algunos periodos o bien el número de rorcuales que utilizaron esta área ascendió o aquellos rorcuales acústicamente activos que se encontraban dentro del área de detección permanecieron en él durante más tiempo que en otros periodos. El elevado nivel de ruido ambiente del área no permitió identificar si las canciones registradas en los tres periodos de mayor número de detecciones se atribuyeron a un mayor número de rorcuales en la zona o a canciones más largas que el resto de los días. Sin embargo, el análisis de periodos de detecciones de pulsos de 20 Hz consecutivas en ambos grabadores fondeados en el estrecho de Gibraltar demostró que los rorcuales utilizan el área activamente para cruzarla en ambas direcciones, lo que sugiere que los 3 periodos de mayor número de detecciones de pulsos por día se debieron a un mayor flujo de rorcuales por el Estrecho.

El 57 % de los rorcuales detectados en el estrecho de Gibraltar cruzó el área de detección en menos de 2 horas, aunque el elevado ruido ambiente en el área muy probablemente impidió la detección de rorcuales en uno de los dos grabadores reduciendo considerablemente este porcentaje. De todos los rorcuales que cruzaron el área, el 56,7 % lo hicieron en dirección oeste y el 43,3 % en dirección este por lo que no parece que haya una dirección de desplazamiento predominante en este periodo del invierno. El 76,9 % de los rorcuales que cruzaron en dirección este lo hicieron en horario de corriente favorable y fueron en todos los casos más rápidos que los rorcuales que cruzaron en dirección oeste. La corriente predominante en el estrecho de Gibraltar es en dirección este y puede alcanzar velocidades máximas de 1,4 m/s (Perkins *et al.*, 1990), por lo que no es de extrañar que los rorcuales aprovechen las peculiaridades físicas del medio, aunque esta es la primera vez que se describe este comportamiento.

La correlación de las detecciones de rorcuales identificadas entre el área del Estrecho de Gibraltar y cabo de Espartel demostró no ser estadísticamente significativa para ninguna de las dos variables estudiadas como puede observarse en la tabla II-4, aunque alcanzó un valor de $p = 0,058$ para el caso de las horas positivas por día. Los valores del estadístico r (Pearson) para el número de pulsos detectados y número de horas positivas por día fueron positivos, indicando que el incremento en detecciones por día fue paralelo en ambas áreas, como se aprecia en la figura II-30. Estos resultados sugieren que el desplazamiento de los rorcuales comunes entre estas dos áreas no es directo aunque mantiene una relación moderada. Es posible que la falta de significatividad de estos resultados se deba, al menos en parte, a la intensa presencia de buques comerciales y ferries en el área de estudio que por el ruido producido enmascaran las detecciones de los sonidos de los rorcuales afectando negativamente al análisis de correlación. De hecho, el elevado número de valores nulos tanto para el número de pulsos como para el número de horas positivas en la figura II-30 podría ser producto del enmascaramiento por ruido.

El hecho de encontrar abundantes detecciones de rorcual común, de manera continuada a lo largo de todo el periodo de muestreo es sorprendente ya que muchos autores han coincidido en que la presencia de esta especie en el Estrecho de Gibraltar es actualmente anecdótica. Estos autores sugieren que la intensa actividad ballenera ocurrida entre 1921 y 1955 acabó con la población de esta zona (Bayed & Beaubrun, 1987; Hashmi & Adloff, 1991; Walmsley, 1996; Cañadas *et al.*, 1999; Sanpera y Aguilar, 1992, Palsbøll *et al.*, 2004) y proponen que la desaparición de rorcuales en esta zona pudo haberse producido por la pérdida de la existencia de este hábitat en la memoria cultural de la población de rorcuales (Clapham y Hatch 2000; Clapham *et al.*, 2008).

Es importante indicar que al igual que la región oeste de la cuenca Balear, el estrecho de Gibraltar debería considerarse como área prioritaria para aplicar una regulación que reduzca el riesgo de colisiones con rorcuales comunes en los periodos de máxima abundancia. Este problema se discute con más detalle en los capítulos IV y V.

Estudios que hayan aplicado técnicas acústicas para la detección de cetáceos son prácticamente inexistentes en el mar Mediterráneo a pesar de haber sido demostrada su utilidad en muchas otras regiones del planeta y haber sido propuestas como herramienta clave para mejorar los conocimientos de la ecología de los cetáceos en el mar Mediterráneo y mejorar su estatus de conservación (Notarbartolo di Sciara y Gordon,

1997). De hecho hasta la fecha actual, tan sólo Clark *et al.* (2002) han aplicado técnicas acústicas para estudiar el rorcual común en el mar Mediterráneo. La utilización de técnicas de grabación submarina se ha convertido en un método crítico para la caracterización de la distribución de especies cuyos destinos migratorios y modos de vida solitarios y pelágicos hacen muy difícil el estudio de su dinámica de comportamiento (Clark 1995; Moore *et al.* 1998; Stafford *et al.* 1999; Charif *et al.* 2001; Clark *et al.* 2002). Estas características facilitan que los resultados obtenidos en este trabajo sean novedosos e incluso cuestionen algunas de las creencias tradicionales sobre la ecología del rorcual común en el mar Mediterráneo.

La síntesis de los resultados obtenidos en este trabajo permite plantear tres interpretaciones diferentes acerca de la presencia de rorcuales en las áreas de la isla de Alborán y estrecho de Gibraltar: La primera es que se trata de la población mediterránea tras su desplazamiento a latitudes bajas la que extiende su distribución fuera del mar Mediterráneo durante el periodo de invierno. La segunda sería que se trata de rorcuales de una población atlántica cuya distribución abarca el estrecho de Gibraltar y mar de Alborán durante el periodo invernal. Y la tercera sería que se trata de una combinación de las dos hipótesis anteriores, ocurriendo un solapamiento de distribución de la población mediterránea y de otra atlántica en la región del estrecho de Gibraltar y áreas circundantes durante el invierno.

Las diferentes piezas de conocimiento sobre la ecología del rorcual común en el mar Mediterráneo permiten discutir acerca de la validez de estas tres hipótesis.

Estudios comparativos entre las características genéticas de las poblaciones de rorcuales comunes del mar Mediterráneo y de la región norte del océano Atlántico sugieren un aislamiento genético a nivel de ADN mitocondrial tanto con la población del Atlántico noroeste como con la del noreste. Sin embargo a nivel del ADN nuclear sólo se encontraron diferencias con la población del Atlántico noroeste (Bérubé *et al.* 1998). Posteriormente se demostró que la relación genética entre la población mediterránea y la del atlántico noreste se basa en un flujo genético periódico aunque reducido entre ambas poblaciones (Palsbøll *et al.*, 2004). Estas características son coherentes con las tres hipótesis puesto que el intercambio genético entre rorcuales del Atlántico noreste y del Mediterráneo podría ocurrir durante el invierno dentro del mar Mediterráneo si alguna población atlántica incluyese esta cuenca en su distribución, o bien en el océano Atlántico si la población mediterránea incluyese áreas del Atlántico noreste en su distribución.

El mar de Alborán es la única región Mediterránea adyacente al océano Atlántico y sus características oceanográficas, tanto físicas, como químicas y biológicas son más cercanas a las del océano Atlántico que a las del mar Mediterráneo (Rubín *et al.*, 1992). Las condiciones oceanográficas hacen favorable la entrada potencial de rorcuales Atlánticos en el mar Mediterráneo. La posible presencia de rorcuales comunes de origen Atlántico en el mar Mediterráneo es una cuestión sin resolver, debatida desde hace varios siglos (ej. Richiardi, 1874). La información recolectada por la actividad ballenera durante el siglo XX sobre la importante abundancia de rorcuales en la región del Estrecho de Gibraltar y aguas adyacentes ha potenciado todavía más este debate.

Por otro lado, la presencia de rorcuales comunes en el sur de la cuenca oriental (Canese *et al.*, 2006) y en el mar de Alborán durante el invierno sugiere que la población

mediterránea no necesariamente migra hacia el océano Atlántico al inicio del invierno, como había sido propuesto anteriormente (Jonsgård, 1966; Viale, 1985), lo que permitiría un ahorro considerable de energía en sus movimientos migratorios. Esta hipótesis es apoyada por la presencia de neonatos en el mar de Liguria (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 1999) y en otras regiones del Mediterráneo repartida a lo largo de todo el año (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2003). Además, un estudio sobre la concentración de contaminantes organoclorados persistentes acumulados en la grasa del rorcual común sugiere que la población mediterránea es residente todo el año puesto que las concentraciones son mucho más elevadas aquí que en muestras de rorcuales varados en Galicia (Marsili y Forcadi, 1996).

Los únicos conocimientos acerca de la presencia del rorcual común en el mar de Alborán y el estrecho de Gibraltar también apoyan la hipótesis de la entrada de rorcuales atlánticos en el mar de Alborán. Observaciones realizadas en la vertiente norte del mar de Alborán y del estrecho de Gibraltar durante el periodo estival permitieron describir una tendencia de desplazamiento general hacia el oeste, sugiriendo que la población de rorcuales observada en esta área presenta un patrón opuesto al resto de los rorcuales del mar Mediterráneo (Raga y Pantoja, 2004). Posteriormente, Salazar-Sierra *et al.* (2004) sugirieron que los rorcuales comunes avistados entre el golfo de Cádiz y el este del mar de Alborán presentan una tendencia de desplazamiento en primavera-verano en dirección oeste y en otoño-invierno en dirección este. La propuesta de Raga y Pantoja (2004), posteriormente apoyada por Salazar-Sierra *et al.* (2004), es coherente con la hipótesis de la posible entrada de rorcuales atlánticos en el mar de Alborán.

Sin embargo, todos estos resultados coherentes con la entrada de rorcuales de origen atlántico al mar de Alborán donde se produciría el intercambio genético entre poblaciones se contradicen con los obtenidos por los únicos estudios de telemetría satélite e isótopos estables realizados en rorcuales comunes del mar Mediterráneo. Resultados de telemetría demostraron que 1 de los 8 ejemplares marcados con un transmisor en la cuenca Provenzal en agosto de 2002 se desplazó al inicio del otoño por la cuenca Balear y mar de Alborán hasta cruzar el estrecho de Gibraltar, los restantes 7 animales permanecieron por la cuenca Liguro-Provenzal hasta el fin de su transmisión en octubre de 2002 (Guinet *et al.* 2005). El análisis de isótopos estables en tejidos de 11 rorcuales comunes varados en el mar Mediterráneo permitió concluir que 3 de ellos presentaron variaciones correspondientes a periodos de alimentación en el océano Atlántico. Guinet *et al.* (2005) concluyeron que parte de la población de rorcuales mediterráneos migra estacionalmente a un área de invernada en el océano Atlántico donde se alimentan. Los resultados de estos estudios apoyan la hipótesis de un intercambio genético entre la población mediterránea y atlántica fuera del mar Mediterráneo y no implican la entrada de rorcuales de origen atlántico en el mar Mediterráneo.

Por tanto, los pocos y fragmentados conocimientos acerca de la ecología del rorcual común en el mar Mediterráneo no permiten descartar ninguna de las tres hipótesis planteadas en este trabajo. Los rorcuales comunes detectados en invierno en las áreas de la isla de Alborán, estrecho de Gibraltar y cabo de Espartel podrían ser parte de una población atlántica que expande su área de distribución al mar Mediterráneo durante esta época del año, o bien a una parte de la población mediterránea que utiliza el océano Atlántico para alimentarse y reproducirse durante el invierno. Tampoco puede

descartarse una combinación de ambas posibilidades, con un solapamiento de distribución de las poblaciones mediterránea y atlántica en regiones cercanas al estrecho de Gibraltar durante el invierno.

En cualquier caso, resulta inevitable plantearse cuales pueden haber sido las razones ecológicas que han llevado a una de las dos poblaciones, o a ambas, a cruzar el estrecho de Gibraltar y hasta dónde llegan sus áreas de distribución al otro lado del Estrecho.

La productividad primaria invernal del golfo de Cádiz es muy inferior a la del mar de Alborán y ocurre en aguas someras sobre la plataforma continental cercanas a costa debido a una combinación del efecto de la persistencia de los vientos de componente norte y el aporte fluvial (Rubín, 1997). Estas áreas parecen inadecuadas como hábitat para el rorcual común por su carácter somero y costero. Aunque es interesante indicar que las aguas atlánticas adyacentes al estrecho de Gibraltar fueron una importante zona de caza ballenera, explotada en diversas expediciones balleneras de buques extranjeros a lo largo del siglo XIX (Aguilar y Borrel, 2007) y por tres estaciones de proceso en tierra, en Huelva, Getares (Algeciras) y Benzou (Marruecos) durante el siglo XX (Sanpera y Aguilar, 1992). Por esta razón no hay que descartar que esta zona marina presente características ecológicas de interés para el rorcual común. La costa noroeste africana ha sido poco estudiada y no hay descripciones de sus características oceanográficas que permitan identificar áreas de posible interés para el rorcual común, aunque hay descripciones de varamientos de esta especie (Boutiba, 1992).

Sin embargo, el mar de Alborán en el periodo de invierno podría ser un buen escenario para que las concentraciones de zooplancton descritas en este área sean explotadas por rorcuales comunes ampliando su periodo de alimentación. Al mismo tiempo, podría ser utilizado para reproducirse, puesto que la asociación entre la presencia de alimento, la producción de secuencias consecutivas largas y estereotípicas de pulsos de 20 Hz y el comportamiento sexual ya ha sido sugerida en otras regiones oceánicas y es actualmente la hipótesis que mejor explica la función del comportamiento acústico del rorcual común. En este caso, y habiéndose demostrado que existe un flujo genético recurrente entre la población mediterránea y la atlántica noreste, el mar de Alborán parece ser el mejor candidato como área de intercambio genético entre ambas poblaciones, implicando que sea una población atlántica y no la mediterránea la que cruce el Estrecho.

6. Conclusiones

La utilización de técnicas acústicas en el mar Mediterráneo ha permitido obtener resultados novedosos e incluso contradictorios con algunas de las creencias tradicionales sobre la ecología del rorcual común en el mar Mediterráneo, como es la presencia y permanencia de esta especie en el estrecho de Gibraltar durante el invierno. Este trabajo ha demostrado la utilidad de estas técnicas en la caracterización del patrón migratorio del rorcual común en el mar Mediterráneo.

El trabajo engloba datos de dos tipos, por un lado presencia y ausencia de rorcuales que permite describir el patrón de presencia estacional en las diferentes áreas de estudio y por otro lado la tendencia de movimiento de los animales detectados acústicamente en estas áreas. La combinación de ambos tipos de resultados facilita la identificación de un

claro patrón migratorio a lo largo de la cuenca occidental del mar Mediterráneo. Este patrón sigue la tendencia clásica y bien documentada en poblaciones de rorcual común en el océano Atlántico y océano Pacífico. Los animales se concentran en áreas de alimentación en altas latitudes durante el verano y en áreas de reproducción en bajas latitudes durante el invierno, definiendo un corredor migratorio entre ambas áreas. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con los océanos, las peculiaridades oceanográficas del mar Mediterráneo podrían proporcionarles la oportunidad de extender el periodo de alimentación al invierno en sinergia con la reproducción. Esta circunstancia podría darse al menos en el mar de Alborán y sugiere el paso de rorcuales comunes de origen atlántico por el estrecho de Gibraltar favoreciendo el intercambio genético entre ambas poblaciones.

CAPÍTULO III:

Identidad poblacional del rorcual común en el Mediterráneo Occidental



1. Introducción

El rorcual común (*Balaenoptera physalus* L. 1758) es el único mysticeto comúnmente observado en el mar Mediterráneo. Actualmente se considera como una subpoblación aislada del resto de poblaciones del Atlántico norte (IWC, 1992; 2007 y 2009; Cañadas *et al.*, 2005; Reeves y Notarbartolo di Sciara, 2006). Debido a sus costumbres pelágicas tanto para su alimentación como su reproducción, se desconocen gran parte de sus características biológicas y ecológicas.

El tamaño de esta población no está bien definido aunque se han realizado varios censos, principalmente en la cuenca occidental, obteniendo valores entre 2000 a 8500 individuos (Forcada *et al.*, 1993), 901 individuos (C.I. 95% = 591-1374) (Forcada *et al.*, 1995) y 3583 individuos (C.I. 95% = 2130-6027) (Forcada *et al.*, 1996). La falta de información sobre su distribución y dinámica poblacional impiden obtener una estima más precisa. Esta población incluye menos de 10.000 animales adultos expuestos a constantes amenazas que posiblemente son causa de su declive, pero no hay suficientes datos sobre su abundancia ni su tendencia para poder confirmarlo (Reeves y Notarbartolo di Sciara, 2006).

Su distribución esta bien estudiada durante los meses de verano en la cuenca noroccidental. Fuera de esta región y de esta época la información disponible es reducida y muy fragmentaria. La cuenca Liguro-Tirreno-Provenzal ha sido descrita como la principal área de alimentación de la población mediterránea, presentando altas concentraciones del Eufásido *Meganyctiphanes norvegica* desde el final de la primavera hasta el final del verano (Aguilar 1985, Zanardelli *et al.* 1992, Relini *et al.* 1992, Jahoda y Notarbartolo di Sciara 1993, Notarbartolo di Sciara *et al.* 1993, Forcada *et al.* 1995, Gannier 1997, Mussi *et al.* 1997, 1998 & 1999). Los rorcuales en esta zona aprovechan los afloramientos del sistema frontal permanente de Liguria (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2008). Estudios realizados en el margen sur de la cuenca Provenzal y margen sur de la cuenca Tirrena demuestran que la presencia de rorcuales en estas áreas es bimodal, con picos de presencia en abril-mayo y septiembre-octubre, coincidiendo con la llegada de los rorcuales a la cuenca Tirreno-Liguro-Provenzal y posterior dispersión al final del verano (Marini *et al.* 1996a; Marini *et al.* 1996b; Laran y Drouot-Dulau, 2007). Este mismo patrón ha sido descrito en otras dos regiones mediterráneas, el canal de Messina, con una tendencia de desplazamiento hacia el noreste en primavera/verano y hacia el sur en otoño (Puzzolo & Tringali, 2001), aunque éste también ha sido descrito como posible área de alimentación en primavera y canal migratorio en otoño (Aïssi *et al.*, 2008), y el este de la península Ibérica (Raga y Pantoja, 2004) definiendo un corredor migratorio paralelo al talud continental entre la península y las islas Baleares. Todos estos hallazgos sugieren un patrón migratorio norte-sur bien marcado durante la primavera y el otoño.

Sin embargo, se ha descrito la presencia de rorcuales comunes alimentándose durante el invierno en zonas de concentración de otro eufásido, *Nyctiphanes couchii*, en los alrededores de la isla de Lampedusa, al sur de Sicilia (Canese *et al.*, 2006). Estas observaciones no concuerdan con el modelo migratorio clásico de los mysticetos entre áreas de alimentación en altas latitudes en verano y áreas de reproducción en bajas

latitudes en invierno (Lockyer y Brown, 1981) y apoyan la hipótesis de un patrón de alimentación y reproducción menos definido y principalmente regido por las diversas oportunidades tróficas que el mar Mediterráneo presenta a diferencia de las grandes cuencas oceánicas (Marini *et al.*, 1996c; Notarbartolo di Sicara *et al.*, 2003; Canese *et al.*, 2006).

El estudio coordinado por Raga y Pantoja, (2004) reúne todos los datos acerca de la presencia de rorcuales comunes en el Mediterráneo español. En la región sur, la periodicidad de encuentros en el mar de Alborán y Estrecho de Gibraltar y su dirección de movimiento observada hace sugerir a los autores que los rorcuales siguen un patrón de desplazamiento distinto al observado en la región noroccidental del mar Mediterráneo. Los rorcuales aquí se desplazan hacia el noreste en otoño e invierno y hacia el suroeste en primavera y verano. Posteriormente Salazar-Sierra *et al.* (2004) sugieren que el Estrecho actúa como corredor migratorio entre la cuenca occidental del mar de Alborán y el océano Atlántico.

El único estudio de telemetría satélite realizado en rorcuales comunes del mar Mediterráneo, demostró que 1 de los 8 ejemplares marcados en la cuenca Provenzal en agosto de 2003 se desplazó al inicio del otoño por la cuenca Balear y mar de Alborán hasta cruzar el Estrecho de Gibraltar, los restantes 7 animales permanecieron por la cuenca noroccidental hasta el final de su transmisión, en abril de 2004 (Guinet *et al.*, 2005). Los mismos autores estudiaron la relación de isótopos estables de C^{13} / C^{14} en barbas de 13 rorcuales comunes varados en las costas francesas y españolas. Comparando los patrones isotópicos entre las barbas y el krill del mar Mediterráneo y océano Atlántico, los autores advirtieron que la mayoría presentó un patrón típico de una dieta a base de krill Mediterráneo sugiriendo que estas ballenas son residentes, mientras que en 3 casos el patrón sugiere que estas migraron regularmente al océano Atlántico para alimentarse. Los autores concluyen que la población de rorcuales comunes mediterráneos presenta dos patrones migratorios, uno que los mantiene residentes en la cuenca noroccidental del mar Mediterráneo y otro que los hace desplazarse regularmente hasta el océano Atlántico para alimentarse. La permanencia de rorcuales comunes en la cuenca noroccidental del mar Mediterráneo a lo largo de todo el año ya había sido propuesta previamente por varios autores (Gannier y Gannier, 1993; Relini *et al.*, 1994, Notarbartolo di Sciarra *et al.*, 2003). Se ha sugerido que la fidelidad espacial de esta población se debe a la continuada y fácilmente predecible presencia de altas concentraciones de krill *Meganyctiphanes norvegica* siguiendo una íntima relación con su distribución espacial y temporal que se rige por fenómenos oceanográficos (Cotté *et al.*, 2009). La migración desde la región noroccidental del mar Mediterráneo hasta el océano Atlántico, sugerida por los datos de telemetría de un rorcual común y la relación de isótopos C^{13} / C^{14} en barbas de otros 3 ejemplares confirma que al menos una proporción de los rorcuales observados dentro del mar Mediterráneo están relacionados trófica o demográficamente con el océano Atlántico.

La entrada o salida de rorcuales comunes de la cuenca mediterránea es una hipótesis pendiente de confirmación desde hace más de dos siglos (Notarbartolo di Sciarra *et al.*, 2003). Richiardi, en 1874, planteó que los rorcuales observados en el mar Mediterráneo pertenecen a una población atlántica que cruza estacionalmente el Estrecho de Gibraltar. La información recolectada por la actividad ballenera sobre la importante abundancia de rorcuales en la región del Estrecho de Gibraltar y aguas adyacentes durante el siglo XX promovió que otros autores también apoyasen esta idea (Borri, 1927; Paulus, 1966;

Jonsgård, 1966; Cagnolaro 1977). Jonsgård (1966), en particular, describió como el contenido en iodo del aceite de rorcual común cazado en las islas Hébridias, al oeste de Escocia, era superior al de otras regiones del océano Atlántico. Este autor propuso que estos animales debían alimentarse en verano en el área del Estrecho de Gibraltar o incluso en el mar Mediterráneo ya que en esta región el contenido en iodo del krill es superior al del océano Atlántico. Posteriormente estas hipótesis dieron pie a dos versiones coetáneas propuestas por investigadores franceses. Una fue avanzada por Viale (1977, 1985), quien describió que la entrada de rorcuales atlánticos ocurría en dos periodos y por dos poblaciones diferentes, una al inicio del invierno para reproducirse desde áreas de alimentación al noroeste de Escocia y la otra al final de la primavera para alimentarse desde áreas de reproducción en Mauritania. La otra propuesta, por Duguy y Vallon (1976) y Duguy (1989), sostenía que parte de los rorcuales observados en el Mediterráneo eran residentes, siendo esta la primera propuesta de una población mediterránea cuyo área de distribución se solapaba estacionalmente con una población atlántica que se introducía en el mar Mediterráneo durante el invierno.

Los resultados del estudio de telemetría satélite y análisis de isótopos estables de biopsias (Guinet *et al.*, 2005) sugieren que al menos una parte de la población mediterránea migra al océano Atlántico. Recientemente, Gaufier *et al.* (2009) analizaron observaciones y fotografías de avistamientos oportunistas de rorcuales comunes de diferentes fuentes del área del estrecho de Gibraltar. Los autores sugieren que parte de la población mediterránea se desplaza hacia el océano Atlántico en verano y basándose en tres re-encuentros identificados por las fotografías interpretan que se trata de un patrón migratorio estacional en el que estos rorcuales probablemente vuelvan al mar Mediterráneo en invierno, a pesar de no haber sido observados en esta época. No obstante, otros resultados de observaciones de esta especie en el estrecho de Gibraltar y aguas circundantes apoyan la hipótesis de la existencia de entrada y salida de rorcuales Atlánticos al mar Mediterráneo (Raga y Pantoja, 2004; Salazar-Sierra *et al.*, 2004).

Estudios comparativos entre las características genéticas de las poblaciones de rorcuales comunes del mar Mediterráneo y de la región norte del océano Atlántico sugieren un aislamiento genético a nivel de ADN mitocondrial tanto con respecto a la población del Atlántico noroeste como con la del noroeste. Sin embargo a nivel del ADN nuclear sólo se encontraron diferencias significativas con la población del Atlántico noroeste (Bérubé *et al.* 1998). Los autores proponen que la población mediterránea se encuentra genéticamente aislada de las Atlánticas y que a pesar de la cercanía física entre poblaciones, incluso explotando las mismas áreas de alimentación, existe una subestructura bien definida entre estas que impide el flujo genético. Posteriormente estos resultados fueron revisados, aplicando métodos más precisos que permitieron demostrar que existe relación genética entre la población mediterránea y la del atlántico noreste, basada en un flujo genético periódico aunque reducido entre ambas poblaciones (Palsbøll *et al.*, 2004). Los autores indican que el flujo genético debe ser mediado por individuos macho y que al menos dos hembras por generación son fertilizadas por machos de población opuesta.

Los datos derivados de los estudios genéticos, de telemetría satélite y del análisis de isótopos estables permiten deducir que existe un contacto entre la población de rorcuales comunes mediterráneos y atlánticos. Sin embargo, ninguno de estos estudios ha permitido definir los procesos ecológicos que inducen este contacto. Comprender estos procesos es de importancia crítica para poder definir stocks adecuados a los que

aplicar una gestión de conservación correcta (Clapham *et al.*, 2008). En este contexto, es prioritario definir la estructura poblacional de los rorcuales que habitan el mar Mediterráneo, especialmente si se ha sugerido que puede tratarse de al menos dos poblaciones de diferencias demográficas y/o tróficas.

La estructura de una población y sus relaciones con otras pueden no verse reflejadas en los marcadores tradicionales (ej. caracteres genéticos o morfológicos) en una escala de tiempo relevante para la gestión de conservación de la especie (ej. decenios según Clapham *et al.* (2008)), puesto que estos evolucionan demasiado despacio y por tanto no representan los patrones actuales (McDonald *et al.*, 2006). Técnicas alternativas como, por ejemplo, el análisis de los isótopos estables, de contaminantes bio-acumulados o de firmas de ácidos grasos en tejidos pueden reflejar de forma eficaz el pasado reciente (Clapham *et al.*, 2008). Una de las técnicas recientemente más recomendadas para mejorar los conocimientos de la estructura poblacional de los cetáceos es la acústica (Mellinger y Barlow, 2003; McDonald *et al.*, 2006). El seguimiento acústico como marcador poblacional presenta varias ventajas frente a otras técnicas alternativas: Las vocalizaciones son descriptores actualizados de la población puesto que son señales sociales que representan los movimientos y asociaciones del presente. Además, puesto que las vocalizaciones pueden evolucionar más rápidamente que los marcadores tradicionales, el seguimiento acústico puede permitir detectar y describir poblaciones crípticas o relaciones particularmente complejas. El seguimiento acústico es eficaz para proporcionar muestras suficientemente grandes como para aplicar análisis de las estructuras de las poblaciones y constituye un método que permite obtener datos de forma relativamente rápida y remota en áreas de difícil trabajo (McDonald *et al.*, 2006).

En muchas otras especies, las vocalizaciones son el medio predominante por el cual los individuos se comunican; las variaciones a nivel de especie y de región están bien definidas y el canto puede ser un potente mecanismo de aislamiento entre taxones (Marler, 1957; West-Eberhard, 1983; Slabberkoom y Smith, 2002). Debido a los recientes avances en el campo de la bioacústica, la diferenciación vocal ha ganado importancia en la taxonomía de muchas especies terrestres y la estructura de las vocalizaciones se está convirtiendo en un carácter común en la descripción de poblaciones (McDonald *et al.*, 2006). En el caso de los misticetos existen varios ejemplos. El estudio realizado por Hatch y Clark (2004) con rorcuales comunes, el realizado por McDonald *et al.* (2006) con ballenas azules, el realizado por Delarue *et al.* (2009) con rorcuales comunes del Atlántico noroeste y el realizado por Gedamke (2009) con rorcuales comunes en el hemisferio sur, han demostrado que las diferencias geográficas en la estructura del canto de estas especies son útiles para definir las diferentes poblaciones y sus relaciones a nivel de cuencas oceánicas, incluyendo características no reflejadas por marcadores genéticos. Por tanto, esta técnica ha permitido identificar discontinuidades demográficas o reproductivas que son demasiado recientes para quedar reflejadas genéticamente, pero que son importantes de cara a la gestión de los stocks.

El rorcual común es uno de los misticetos cuya descripción de su repertorio acústico es más completa, en parte por ser uno de los más sencillos comparado con las demás especies (Clark *et al.*, 2002). Su repertorio se caracteriza por siete tipos de señales que pueden ordenarse en un conjunto de cuatro señales producidas en secuencias repetitivas y otro conjunto de tres señales más raras y de carácter individual. Las señales producidas en secuencias se encuentran en un rango de frecuencias muy bajo, entre 9 y

140 Hz, a menudo por debajo del límite audible por el oído humano. La más habitual es referida como pulso clásico o de 20 Hz, aunque en general su frecuencia central se encuentre por encima de este valor. Se trata de una señal pulsada de 0,5 a 1,5 segundos de duración y de carácter modulado descendente de aproximadamente 23 a 18 Hz. Cada pulso se caracteriza por una forma de onda casi sinusoidal de alrededor de 20 ciclos con un escaso o nulo contenido armónico (Watkins *et al.*, 1987). Es una señal intensa estimada entre 159 y 180 dB re 1 μ Pa a 1m (Charif *et al.*, 2002). La segunda señal común, aunque menos que el pulso de 20 Hz, es el pre-pulso (o “back-beat”) (Clark *et al.*, 2002). Se trata de otro pulso de 0,7 a 0,9 segundos de duración pero sin un carácter modulado y cuya frecuencia media oscila entre 15 y 19 Hz (Clark *et al.*, 2002; Hatch y Clark, 2004; Clark y Gagnon, 2004). La intensidad de los pre-pulsos es entorno a 6-7 dB por debajo de la de los pulsos de 20 Hz y siempre o casi siempre precede a un pulso de 20 Hz.

Los pulsos de 20 Hz y los pre-pulsos son producidos en secuencias, rara vez de forma individual. La producción de secuencias varía estacionalmente, cortas y de carácter irregular a lo largo de todo el año y bajo diferentes contextos de comportamiento (Watkins, 1981; Watkins *et al.*, 1987), pero en muchas regiones oceánicas durante los meses de invierno se observan secuencias más intensas, largas y ordenadas que pueden llegar a durar hasta varios días (Thompson y Friedl, 1982; Watkins *et al.*, 1987; Thompson *et al.*, 1992; Moore *et al.* 1998; Watkins *et al.* 2000; Stafford *et al.*, 2007). Estas secuencias bien estructuradas y largas ocurren durante el invierno y coinciden con la época de reproducción por lo que se han denominado canciones (Watkins *et al.*, 1987; Clark, 1990) ya que su función comunicativa se asocia al comportamiento sexual (Watkins, 1987; Moore *et al.*, 1998). Además, se ha descrito que sólo los machos de esta especie producen estos sonidos (Croll *et al.*, 2002), lo cual apoya la hipótesis de una función sexual. Sin embargo este comportamiento también ha sido descrito fuera de la época de reproducción y en áreas de alimentación, por lo que su función probablemente es más compleja de lo descrito (Clark, 1995; Clark y Frstrup, 1997; Croll *et al.*, 2001). Las canciones del rorcual común se estructuran de forma muy sencilla comparadas con las de otros mysticetos. La definición arbitraria de Watkins *et al.* (1978) sigue siendo actualmente la más reconocida: La emisión de pulsos se organiza en secuencias de 3 a 20 minutos de duración, separadas por periodos de silencio de 1 a 5 minutos de duración, con un máximo de 20 minutos, que se corresponden con episodios de respiración en superficie, denominados descansos (“rest”). Si el periodo es superior a 20 minutos pero inferior a 2 horas hasta el reinicio de la emisión de pulsos, se considera un espacio en la canción (“gap”), pero las secuencias previas y posteriores al hueco pertenecen a la misma canción. Pero si el periodo de silencio es superior a 2 horas entonces la siguiente secuencia de pulsos se considera una canción nueva. Por tanto las canciones se separan por periodos de al menos 2 horas. Las canciones pueden durar muchas horas, Watkins *et al.* (1978) describió la más larga registrada con 32 horas. El canto del rorcual común, además de un patrón estacional presenta un patrón diario, aunque no muy marcado. La actividad acústica es mayor durante el ocaso y el alba y es ligeramente superior durante la noche que durante el día (Watkins, *et al.*, 1987; Clark y Ellison, 2004). Clark y Gagnon (2004) describen un marcado aumento de la actividad durante las dos a cuatro horas tras el ocaso.

Dentro de los tipos de señales producidas en secuencias existen dos que son raramente incorporadas. La primera se ha definido como modulación ascendente (“upsweep”) o pulso de 135-140 Hz y se caracteriza por emitirse en esta banda de frecuencias y

presentar una modulación ascendente. Este breve pulso se genera inmediatamente antes de un pulso de 20 Hz por lo que durante mucho tiempo se pensó que se trataba del 7° armónico del pulso de 20 Hz. Su intensidad es menor que la del pulso de 20 Hz y sólo se observa en grabaciones con buena relación señal/ruido (Clark y Gagnon, 2004). La otra señal es un pulso breve y débil centrado entre 9 y 12 Hz que apenas ha sido descrito. Esta señal parece producirse inmediatamente después del pulso de 20 Hz (Clark y Gagnon, 2004).

La proporción del uso de los pulsos de 20 Hz y los pre-pulsos en las secuencias difiere entre individuos pero no parece haber un patrón geográfico distinguible (Hatch y Clark, 2004). No obstante, estos mismos autores describieron un patrón estacional, en el que las canciones producidas al inicio del invierno incluyeron una mayor proporción de pre-pulsos que el resto del año. La emisión de pulsos de 135-140 Hz ha sido descrita exclusivamente en el repertorio de dos poblaciones de rorcual común, la del Atlántico noreste (Hatch y Clark, 2004) y con más precisión por Clark y Gagnon (2004) sólo por encima del paralelo 55° norte y la población del caribe (Atlántico noroeste tropical según Hatch y Clark (2004)). También se han descrito secuencias conteniendo exclusivamente pre-pulsos únicamente en las regiones de mayor latitud del océano Atlántico norte por Clark y Gagnon (2004) y en el golfo de California (Hatch y Clark, 2004). Los autores sugieren que estas características proporcionan identidad geográfica.

Los pulsos en las secuencias se estructuran de forma muy estereotípica, es decir, siguiendo intervalos de tiempo entre pulsos estables con una baja variabilidad. Los intervalos entre pulsos de 20 Hz son unimodales y con una varianza reducida en comparación con los intervalos entre pulsos de 20 Hz y pre-pulsos (Hatch y Clark, 2004). Se han caracterizado secuencias de pulsos agrupados en parejas (“doublets”) (Thompson *et al.*, 1992; Cummings *et al.*, 1986; Patterson y Hamilton, 1964; Edds, 1988). En estos casos el intervalo entre pulsos es lógicamente bimodal, con un intervalo corto correspondiente al tiempo entre los dos pulsos de cada pareja y un intervalo largo entre parejas.

Las señales que no aparecen en secuencias repetitivas y que son raras sólo han sido descritas en pocas ocasiones. La menos rara es una modulación descendente (“downsweep”) entre 118 y 14 Hz y de 0,5 a 1 segundo de duración (Watkins, 1981; Cummings, 1986; Edds, 1988), que aparece durante interacciones sociales, predominantemente en el verano (Watkins, 1981). La segunda en orden de infrecuencia es el rugido (“rumble”), entre 10 y 30 Hz, con importante contenido armónico y de larga duración, de 2 a 8 segundos según Watkins (1981) y de 25-30 segundos según Edds (1988). Se ha descrito durante interacciones sociales en contextos de agresividad o interacciones agonísticas generalmente cerca de la superficie y sólo se ha grabado a distancias muy cortas de los animales. Watkins (1981) también la interpreta como una reacción de sorpresa ante la presencia de la embarcación. La tercera, se describe como un sonido explosivo (“slam”), de amplio espectro, con energía hasta 1 kHz, inferior a 0,8 segundos de duración, que se emiten de manera individual (Edds, 1988; Watkins, 1981). Los autores indican que son producidos por un mecanismo diferente al del resto de los sonidos y están asociados a la apertura de la boca cuando el rorcual come en superficie, lo que podría ser indicativo de comportamientos de alimentación. Existen descripciones de cuatro sonidos más que no han sido descritos en ningún otro estudio. Estos sonidos se indican aquí a título anecdótico: Edds (1988) describe una señal modulada de frecuencia ascendente (“upsweep”) de 4 a 28 Hz con énfasis en la banda

de 20 Hz. Otra que se asemeja a la producción de aire bajo el agua (“belch”) y un pulso explosivo (“thud”) de amplio espectro y breve que se produce en serie. Por último, Watkins (1981) describe un pulso de amplio espectro (“ragged pulse”), pero de baja frecuencia, breve y sólo detectado a corta distancia de un grupo de rorcuales en superficie, que se emite generalmente antes o después de una secuencia de pulsos de 20 Hz con predominancia en invierno.

El trabajo de Thompson *et al.* (1992) comparando grabaciones de rorcual común entre el océano Pacífico y el océano Atlántico permitió a los autores proponer que determinados caracteres acústicos del display sexual de los rorcuales comunes podría actuar como descriptor de las diferentes poblaciones, en particular el intervalo entre pulsos en las secuencias y el incremento en frecuencia de los pulsos, que es una medida indirecta del ancho de banda del pulso. Estudios posteriores han demostrado la utilidad del seguimiento acústico como método de identificación de la estructura poblacional del rorcual común (ej. Hatch y Clark, 2004; Clark y Gagnon, 2004; Delarue *et al.*, 2009; Gedamke, 2009). El tipo de señales incluidas en las secuencias, el intervalo entre pulsos en las secuencias y, en menor grado, el ancho de banda, frecuencia media y duración de los pulsos han sido los parámetros acústicos que mejor expresan la identidad de las poblaciones.

Algunos autores han criticado el seguimiento del comportamiento acústico como método de identificación de la estructura poblacional de las especies, puesto que este comportamiento es demasiado susceptible al efecto de factores ambientales o sociales para ser estable y fiable como descriptor de poblaciones (Harvey y Pagel, 1991). Pero esta variación intraespecífica es valiosa para definir una gestión de conservación eficaz y, además, suele ser demasiado reciente para verse reflejada en el genoma (Hatch y Clark, 2004; Clapham *et al.*, 2008).

La estabilidad de los parámetros acústicos de los pulsos emitidos por el rorcual común ha sido evaluada en varios trabajos. Hay evidencia de cambios estacionales en la estructura de las secuencias de pulsos (duración y proporción de tipos de señales) y en algunos parámetros acústicos de los propios pulsos en una misma población (Watkins *et al.* 1987; Edds 1988; Thompson *et al.* 1992; Clark, 1995; Clark *et al.* 2002, Delarue *et al.*, 2009), sin embargo estos cambios no se han podido asociar en ningún caso a un efecto geográfico. Además, estas variaciones son de reducidas proporciones comparándolas con las observadas entre poblaciones diferentes (Hatch y Clark, 2004; Clark y Gagnon, 2004). Estudios realizados con las poblaciones del Atlántico noroeste describen una variación estacional con periodos más estables al final del otoño e inicio del invierno que en primavera (Hatch y Clark, 2004; Delarue *et al.*, 2009). Estos cambios estacionales implican que los caracteres que definen la identidad de una población son más marcados durante la época de reproducción. Hatch y Clark (2004) analizaron en paralelo diferencias genéticas y acústicas entre 5 muestras de poblaciones del océano Atlántico y océano Pacífico. Los autores identificaron una correlación negativa entre la distancia genética y la distancia acústica, concluyendo que los rorcuales comunes macho cuyas características genéticas son más similares presentan características acústicas más diferentes. Por tanto, el display vocal del sexo masculino es más propicio a diverger en áreas geográficas donde los machos son física o acústicamente simpátricos.

Teniendo en cuenta la marcada variación geográfica y la estabilidad del intervalo entre pulsos, especialmente en la época de reproducción, de las diferentes poblaciones estudiadas, cabe esperar que el comportamiento acústico de los machos mantenga los caracteres específicos de su población, especialmente entre poblaciones vecinas.

Un mecanismo evolutivo que favorece la honestidad en la comunicación a distancia entre sexos con fines reproductivos, especialmente entre poblaciones vecinas, es el desplazamiento de caracteres (Waage, 1979). Este modelo evolutivo implica que el patrón de variación de las señales de atracción de larga distancia está mediado por una fuerte presión selectiva que favorece la identidad de la población en situaciones en las que las señales podrían atraer a individuos de poblaciones diferentes. Cuando el sexo emisor es el macho, como ocurre en el caso del rorcual común, la presión selectiva depende de dos factores, el coste de sus gametos y la viabilidad de los híbridos entre poblaciones. Si el coste es elevado o los híbridos son inviables la honestidad en la comunicación será una ventaja adaptativa, sin embargo, si ninguno de estos dos factores se presenta entonces la honestidad no se verá favorecida.

Para que la honestidad no medie el patrón de variación de las señales de atracción de larga distancia es necesario que la presión selectiva favorezca la imitación del canto y que exista aprendizaje vocal durante el desarrollo de los rorcuales comunes. El éxito reproductivo por imitación en el canto tras la dispersión podría explicar los resultados obtenidos por Hatch y Clark (2004) en los que no se identificó una correlación positiva entre la variabilidad genética y las diferencias acústicas de las poblaciones de rorcuales del océano Atlántico y océano Pacífico. Estudios en diferentes especies de aves han demostrado este fenómeno que permite evitar que las poblaciones diverjan genéticamente mientras los dialectos locales se mantienen (Ellers y Slabbekoorn, 2003; Wright *et al.*, 2005). En este caso, la estrategia seguida por los rorcuales comunes macho podría ser la de adaptar su comportamiento acústico con el fin de atraer tanto a hembras de su población como de las de poblaciones vecinas, optimizando su éxito reproductivo. Esta estrategia dificultaría identificar acústicamente la identidad de las poblaciones e impediría detectar áreas de solapamiento y consecuente flujo genético entre poblaciones.

Mientras los datos acerca del comportamiento acústico del rorcual común no permitan definir su función y su rol en la selección sexual, será difícil concretar si la comunicación en esta especie es honesta y si existe o no aprendizaje vocal. La fiabilidad del seguimiento acústico como técnica de identificación de poblaciones y sus relaciones depende en gran medida del nivel de conocimiento del comportamiento acústico del rorcual común. El nivel de conocimiento actual permite confirmar que esta técnica es muy prometedora, especialmente en contextos en los que los marcadores tradicionales no llegan a establecer la estructura poblacional (Mellinger y Barlow, 2003; McDonald *et al.*, 2006; Clapham *et al.*, 2008).

La falta de resultados concluyentes sobre la dinámica poblacional del rorcual común en el Mediterráneo hace que no sea viable la evaluación del estatus de conservación de esta especie. Es importante identificar qué movimientos anuales realiza esta población y en particular qué distribución adopta en invierno con el fin de poder aplicar medidas de conservación integrales, que no sólo protejan las áreas de alimentación, como es el caso de la cuenca liguro-tirreno-provenzal, sino también las áreas de reproducción e invernada así como los corredores de unión entre estas regiones. La identidad de la

población del rorcual común Mediterráneo y su posible relación con las poblaciones atlánticas no han podido establecerse con marcadores tradicionales y sus delimitaciones geográficas siguen sin estar definidas (Notarbartolo di Sciara *et al.* 2003, NAMMCO 2003). Esta información es fundamental para poder gestionar de forma correcta la conservación de una especie cuyo rango de distribución abarca múltiples países.

Este trabajo permite obtener información detallada sobre la presencia del rorcual común en zonas clave de su migración, aumentando considerablemente los conocimientos sobre la dinámica poblacional y uso del hábitat de esta especie en aguas del mar Mediterráneo occidental. Los resultados de este trabajo ayudan a definir la identidad de las poblaciones de rorcuales comunes que utilizan el mar Mediterráneo occidental y su relación con las del Atlántico norte, información que refuerza los conocimientos necesarios para aplicar una gestión de conservación integral del rorcual común en el mar Mediterráneo.

2. Objetivos

Primero: Identidad poblacional del rorcual común en el mar Mediterráneo.

El primer objetivo de este trabajo es establecer la identidad de la población o poblaciones de rorcual común en el mar Mediterráneo occidental. La medición de características acústicas de los sonidos emitidos por las ballenas en las diferentes áreas de estudio y su comparación entre las mismas permiten determinar si los rorcuales comunes pertenecen a una misma población mediterránea, o si, por el contrario, se trata de varias poblaciones diferentes, lo que implica el acceso de rorcuales del océano Atlántico a la cuenca mediterránea.

Segundo: análisis de uso del Estrecho de Gibraltar por el rorcual común.

El segundo objetivo del trabajo asume que el Estrecho de Gibraltar es utilizado por el rorcual común y pretende identificar la población de origen de los rorcuales detectados en esta área de estudio. El análisis de uso y la medición de características acústicas de los sonidos emitidos por las ballenas permiten establecer si rorcuales de origen Mediterráneo utilizan el estrecho para acceder al Océano Atlántico, si rorcuales de origen Atlántico entran en el Mediterráneo, o si se producen ambas situaciones.

3. Material y métodos

3.1 Áreas de estudio

Se seleccionaron nueve áreas de estudio, siete en el mar Mediterráneo occidental rodeando la península Ibérica (Cataluña, Comunidad Valenciana, Baleares, Andalucía y Marruecos), una al noreste de la Península Ibérica (cuenca Provenzal), como referencia para la población de rorcual común del mar Mediterráneo y una en el Océano Atlántico (archipiélago de las islas Azores) como referencia de la población de rorcual común del océano Atlántico noreste. La figura III-1 muestra las diferentes áreas seleccionadas.

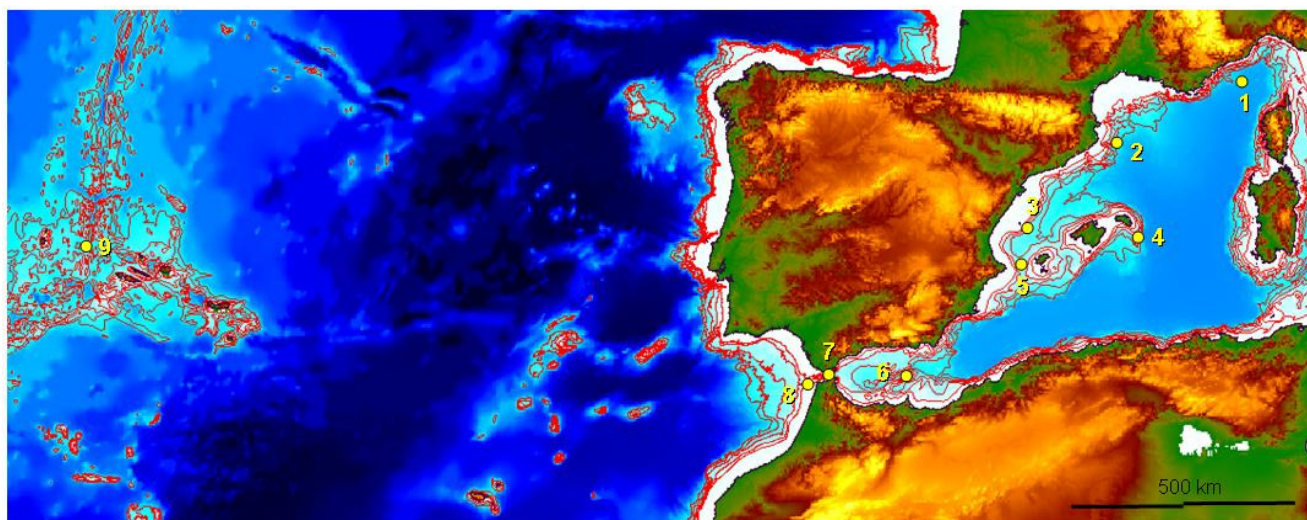


Figura III-1: Mapa de la cuenca Mediterránea occidental y aguas Atlánticas adyacentes con isóbatas de 200 a 1000 m. Las diferentes áreas de estudio se marcan en amarillo: 1- Cuenca Provenzal, 2-Cabo de Begur, 3-Islas Columbretes, 4-Canal de Ibiza, 5-Menorca, 6-isla de Alborán, 7-estrecho de Gibraltar y 8-Cabo Espartel y 9-islas Azores.

Los muestreos en cada área se realizaron en diferentes periodos del año, con mayor prioridad por el otoño e invierno, entre agosto de 2006 y enero de 2009. La tabla III-1 muestra los periodos de muestreo para cada área.

Área	Instrumentos	Periodo de muestreo
Cuenca Provenzal (Francia)	1 EAR	Octubre – Diciembre 2008
Cabo de Begur (Cataluña)	1 EAR	Agosto 2007 - perdido
Islas Columbretes (C. Valenciana)	2 MARU	Agosto – Octubre 2006
Canal de Ibiza (C. Valenciana)	2 MARU	Junio – Julio 2007
Menorca (Balears)	1 EAR	Agosto – Diciembre 2007
Isla de Alborán (Andalucía)	2 MARU	Noviembre 2006 – Enero 2007
Estrecho de Gibraltar (Andalucía)	2 EAR	Agosto – Octubre 2007
Cabo Espartel (Marruecos)	1+1 EAR	Octubre 2008 – Enero 2009
Azores (Portugal)	1 EAR	Septiembre – Noviembre 2007
Total muestreo obtenido		28 meses

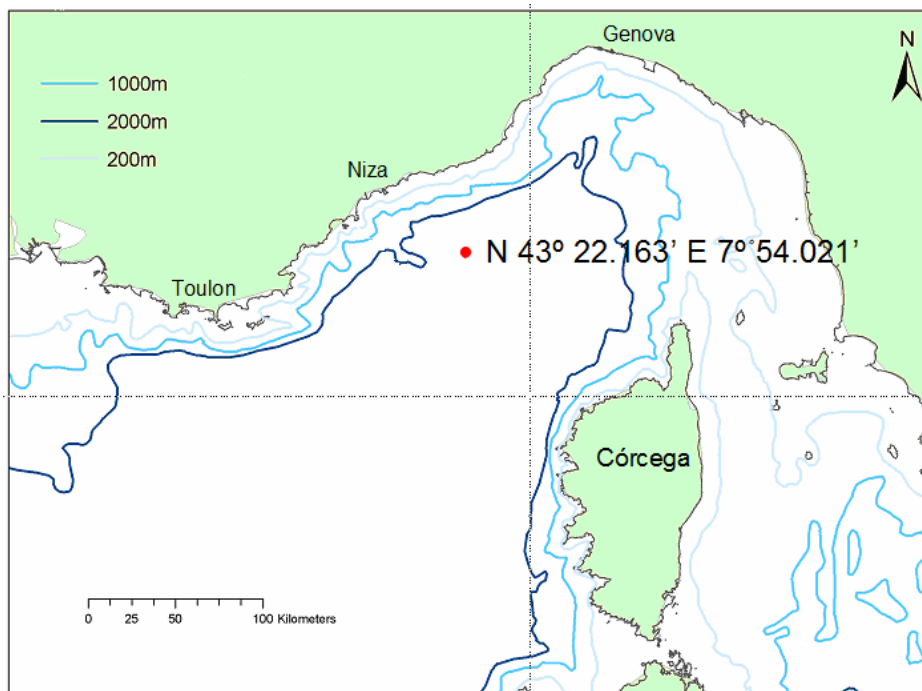
Tabla III-1: Áreas de estudio, instrumentos utilizados y periodos de muestreo. Las líneas en rojo indican instrumentos perdidos o que no grabaron correctamente.

Las diferentes áreas de estudio se seleccionaron a partir de tres criterios que, en orden descendente de importancia, son: 1- interés geográfico para los objetivos del trabajo, 2- seguridad de los instrumentos y 3- facilidad logística para la realización del trabajo de campo.

Siguiendo estos criterios se describen las razones principales para la selección de las nueve áreas de estudio:

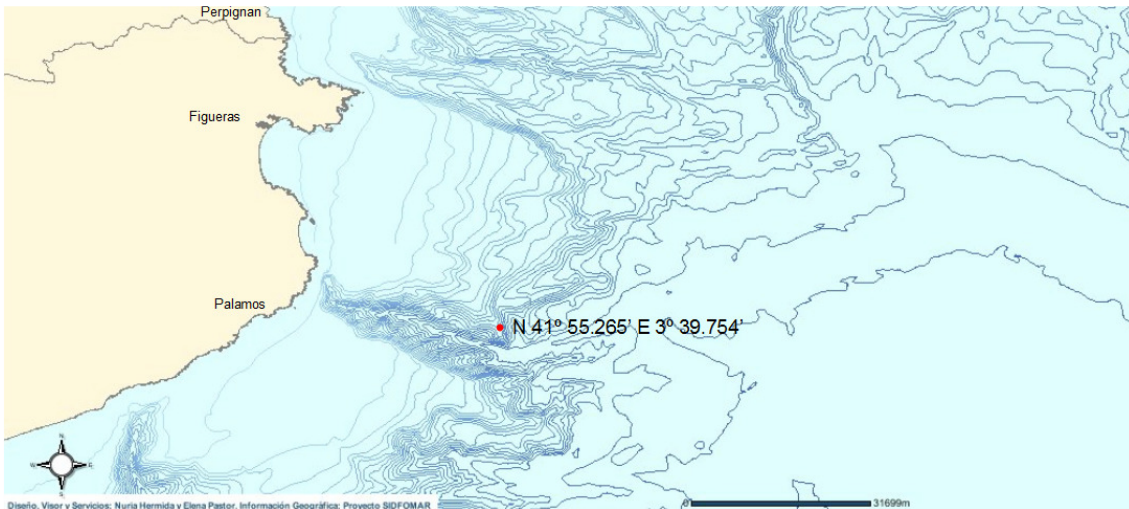
1- Cuenca Provenzal:

Esta área se encuentra geográficamente ubicada dentro de la cuenca tirreno-liguro-provenzal, habiéndose descrito como la principal zona de alimentación del rorqual común mediterráneo durante el periodo estival. Detecciones realizadas en esta área sirven de ejemplo del comportamiento acústico de la población de rorcales del mar Mediterráneo. Las características de las señales acústicas registradas aquí sirven como control para la identificación de un posible solapamiento del área de distribución entre la población mediterránea y la atlántica noreste en la zona del Estrecho de Gibraltar y aguas adyacentes. La batimetría del golfo es demasiado profunda para realizar un fondeo con este tipo de instrumentos, pero existe una boya de instrumentación oceanográfica (“Bouée pour l'acquisition d'une série optique à long terme, Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer”) fondeada a 2000 m de profundidad y a 30 millas náuticas al sureste de Niza, siendo una plataforma idónea para la instalación de un grabador en la línea de fondeo. La instalación de una unidad EAR en la línea de fondeo de la boya de instrumentación oceanográfica se realizó en colaboración con el “Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer” y con el “Centre de Recherche sur les Cétacés de Marineland Antibes”.



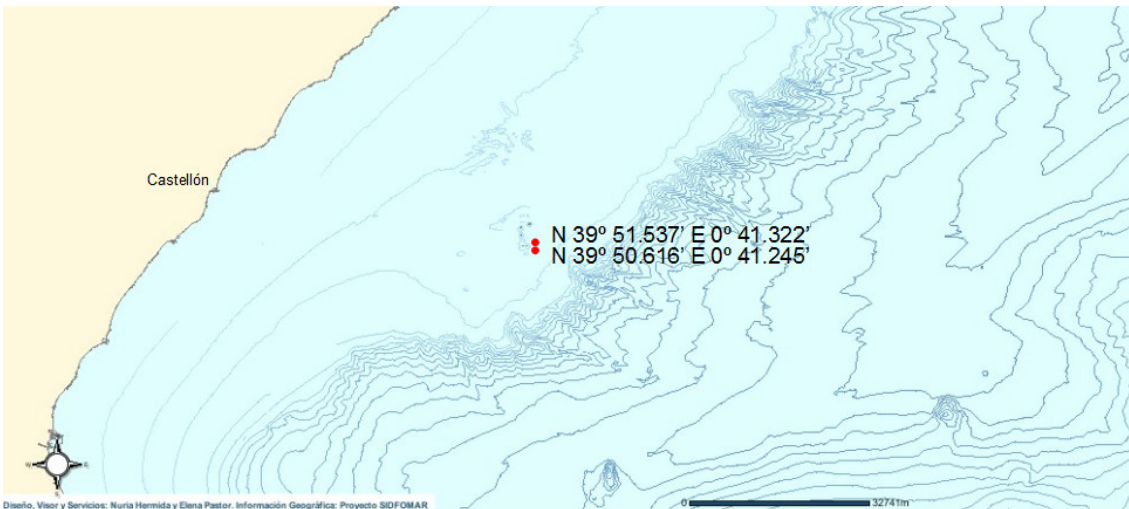
2- Cabo de Begur:

El cabo hace frontera geográfica con Francia y la plataforma continental es muy reducida alcanzándose profundidades superiores a los 2000 m a menos de 20 millas náuticas de la costa. La detección de rorcuales en esta zona permite confirmar si estos provienen de la población mediterránea que se concentra en la cuenca tirreno-liguro-provenzal en verano o si por el contrario se trata de rorcuales que han accedido al mar Mediterráneo por el Estrecho de Gibraltar y se dirigen hacia regiones del norte de la cuenca, perteneciendo a una población Atlántica. Una boya meteorológica (Puertos del Estado) se encuentra fondeada a 1000 m de profundidad junto al cañón de Palamós siendo una plataforma idónea para la instalación de un grabador en la línea de fondeo.



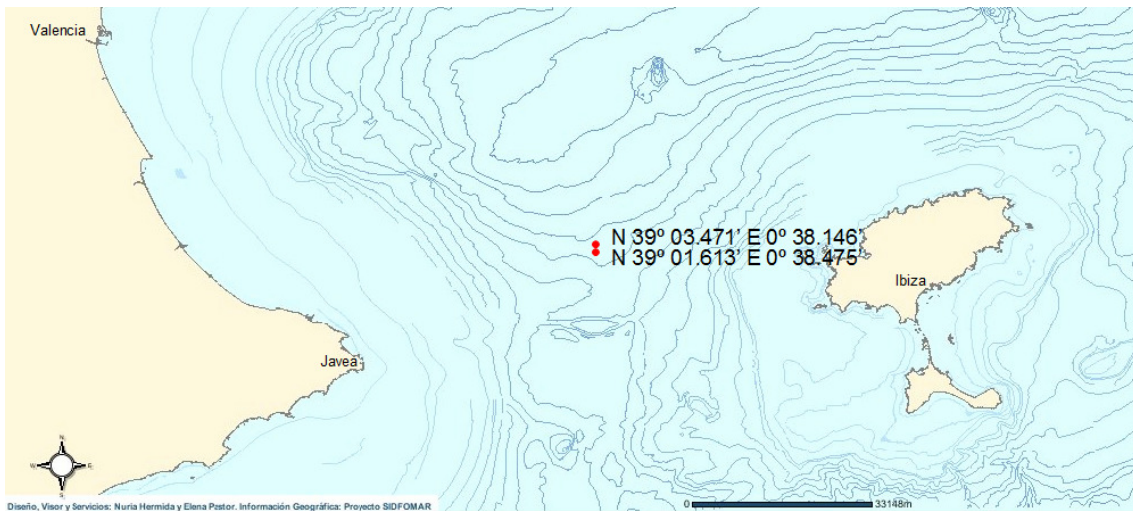
3- Islas Columbretes:

El archipiélago de las islas Columbretes se encuentra a 30 millas náuticas al este de Castellón al borde del talud continental. Al tratarse de una reserva marina, los fondos están protegidos de la actividad pesquera, facilitando la seguridad del fondeo de grabadores. La detección de rorcuales en esta área de estudio y la comparación con el área del cabo de Begur permite determinar si estos son de origen mediterráneo, proviniendo de la zona de concentración estival en la cuenca tirreno-liguro-provenzal o si por el contrario se trata de rorcuales Atlánticos que han accedido al mar Mediterráneo por el Estrecho de Gibraltar, ascendiendo a lo largo de la costa de la península Ibérica.



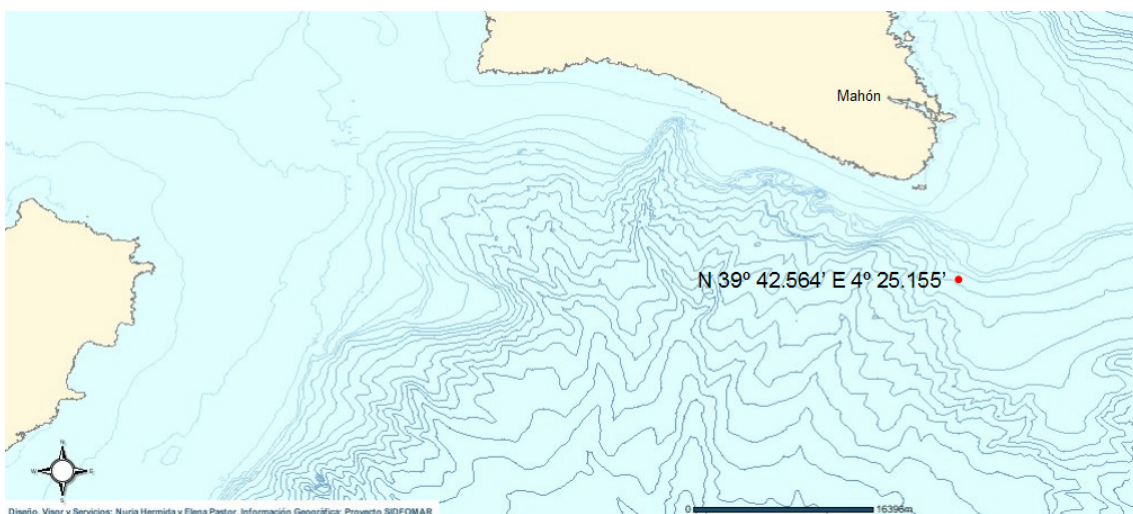
4- Canal de Ibiza:

El canal de Ibiza es un estrangulamiento natural del paso entre la península y las islas Baleares. Las detecciones de rorcuales en esta área permiten dilucidar si se trata de animales mediterráneos que no rodean las islas Baleares durante su migración estacional o si por el contrario se trata de rorcuales Atlánticos que han accedido al mar Mediterráneo por el Estrecho de Gibraltar ascendiendo a lo largo de la costa de la península Ibérica en dirección norte.



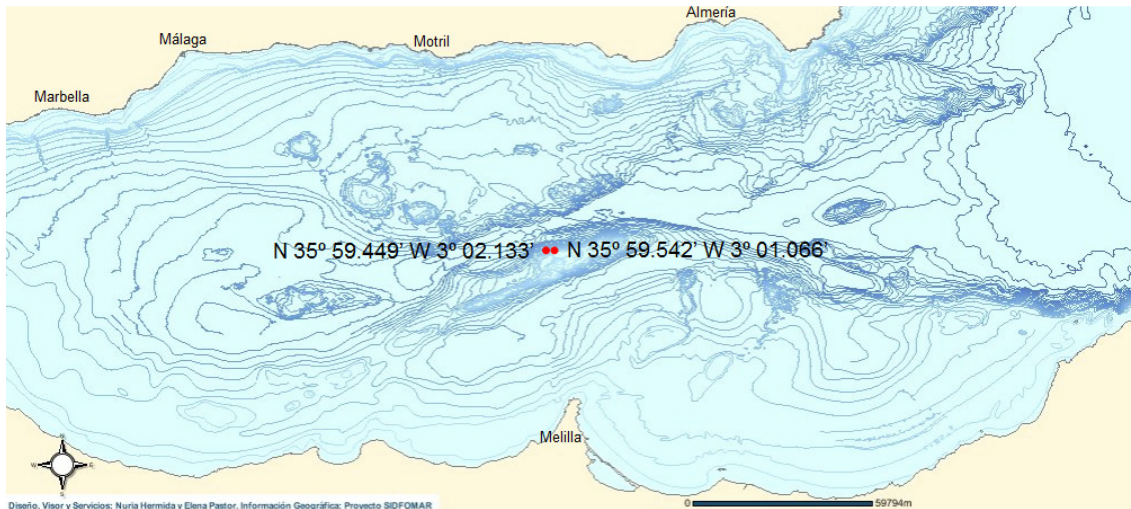
5- Menorca:

Por el contrario, si los rorcuales mediterráneos rodean las Islas Baleares en sus desplazamientos estacionales, o si los rorcuales que han accedido al mar Mediterráneo por el Estrecho de Gibraltar se dirigen hacia la cuenca central en lugar de desplazarse hacia el norte, estos deberían ser detectados al este de Menorca. A 14 millas náuticas al sureste de Mahón se encuentra fondeada una boya meteorológica (Puertos del Estado) a 900 m de profundidad siendo una plataforma idónea para la instalación de un grabador en la línea de fondeo.



6- Isla de Alborán:

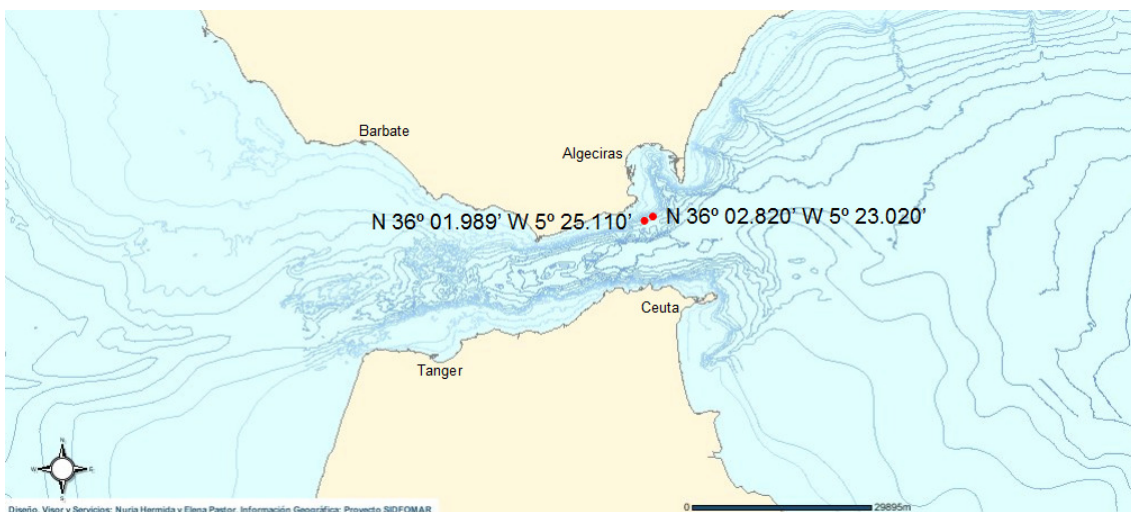
La isla de Alborán se encuentra ubicada en el centro del mar de Alborán, a 30 millas náuticas de Marruecos y 50 millas náuticas de la península Ibérica. Al tratarse de una reserva marina, los fondos están protegidos de la actividad pesquera, facilitando la seguridad del fondeo de grabadores. El mar de Alborán es la zona de mayor producción primaria del mar Mediterráneo (Perkins *et al.*, 1990) presentando características idóneas para ser utilizado como potencial zona de invernada por el rorcual común mediterráneo, el rorcual común de la población del océano Atlántico noreste o por ambas poblaciones. La detección de rorcuales en esta zona, especialmente en los meses de invierno podría definir qué población o poblaciones utilizan esta región mediterránea.



7- Estrecho de Gibraltar:

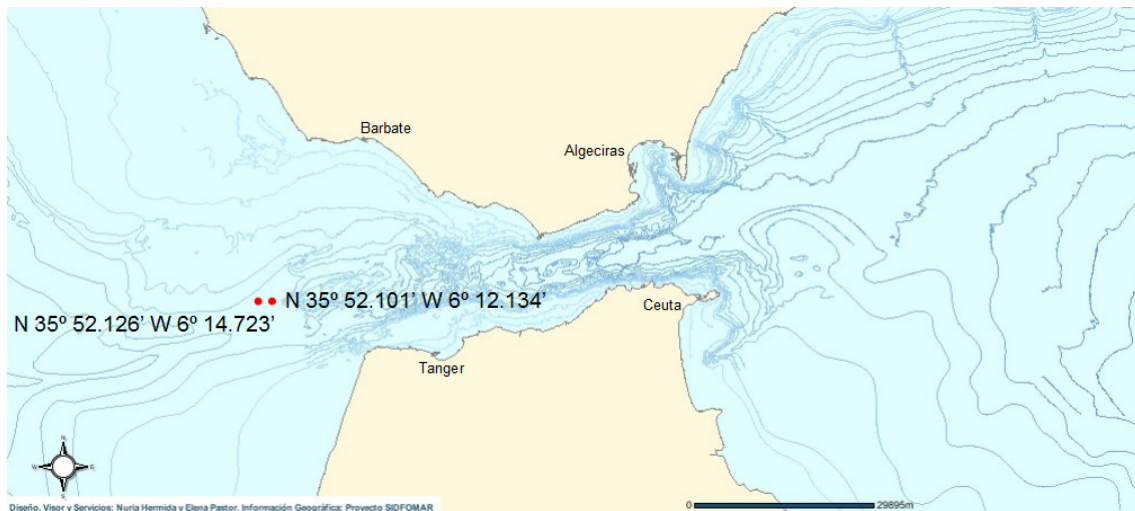
El Estrecho de Gibraltar es la única conexión entre el mar Mediterráneo y el Océano Atlántico. Si existe alguna relación entre la población de rorcuales del Mediterráneo y del Atlántico noreste, esta debe realizarse obligadamente a través de este paso. Se seleccionaron dos puntos de fondeo en base a los siguientes criterios:

- Batimetría no superior a 500 m
- Protección de corrientes extremas
- Actividad pesquera limitada o ausente
- Alejado de los puntos de máximo tráfico marítimo



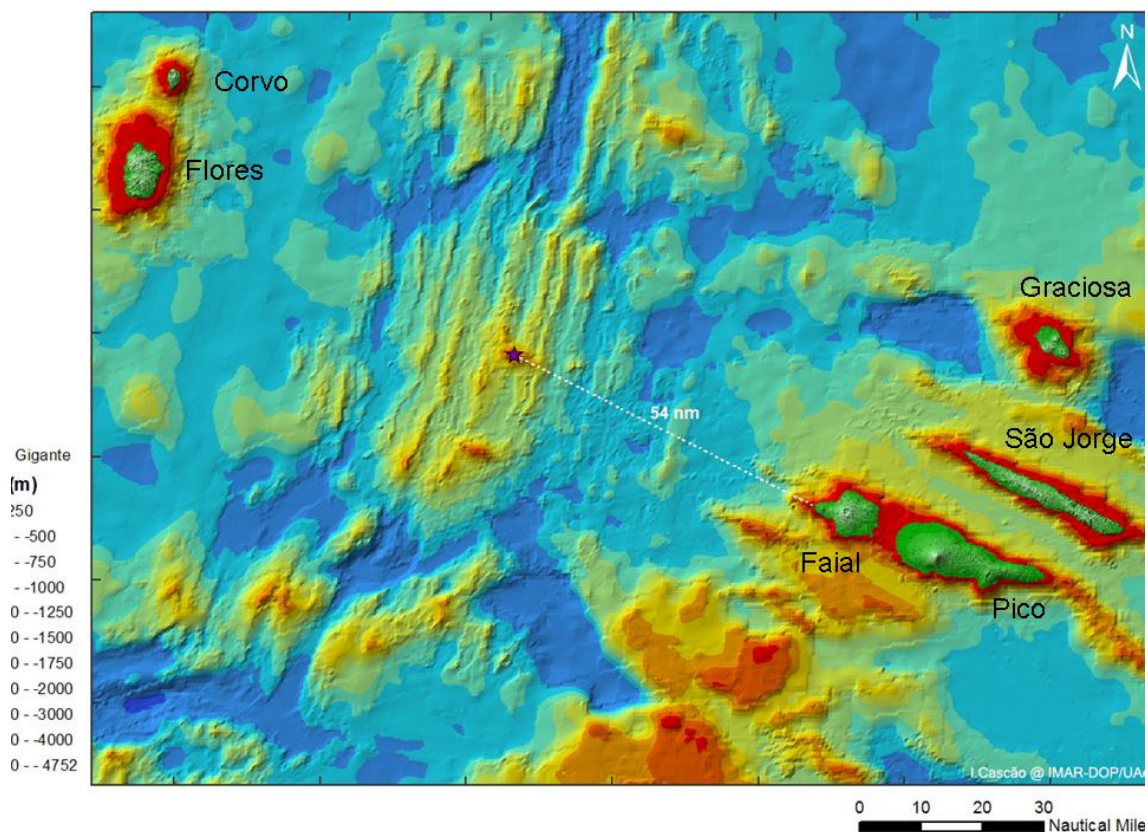
8- Cabo Espartel:

El fondeo en esta área Atlántica permite determinar si los animales que utilizan el estrecho de Gibraltar lo hacen de manera local o si, por el contrario, lo utilizan como paso de una cuenca a otra. A su vez, este fondeo, realizado de manera simultánea al del estrecho de Gibraltar, permite estudiar el sentido del movimiento de los rorcuales durante el paso. Al igual que en el Estrecho, se seleccionaron dos puntos de fondeo protegidos de las fuertes corrientes típicas del Estrecho, de la actividad pesquera y del tráfico marítimo.



9- Archipiélago de las islas Azores:

El archipiélago de las islas Azores se encuentra a 940 millas náuticas al oeste del Estrecho de Gibraltar. Su ubicación geográfica se encuentra en el área de distribución de la población de rorcuales del Atlántico noreste (Donovan, 1991). Detecciones realizadas en esta área sirven de ejemplo del comportamiento acústico de la población de rorcuales más próxima y contigua a la población Mediterránea. Las características de las señales acústicas registradas aquí sirven como control para la identificación de un posible solapamiento del área de distribución entre la población de rorcuales del mediterráneo y del Atlántico noreste en la zona del Estrecho de Gibraltar y aguas adyacentes. Los fondeos en esta zona se realizaron en colaboración con el Departamento de Oceanografía y Pesca de la Universidad de las islas Azores.



3.2 Grabación de sonido

En este trabajo se han utilizado dos tipos de instrumentos que se describen a continuación:

3.2.1 Marine Autonomous Recording Unit

El Marine Autonomous Recording Unit (MARU) <http://www.birds.cornell.edu/brp/hardware/pop-ups> desarrollado por el Programa de Investigaciones Bioacústicas de la Universidad de Cornell en Nueva York, EEUU, (BRP-Cornell) es un instrumento de 26 kg de peso con forma esférica, de 60 cm de diámetro, protegido por una armadura plástica para reducir los posibles impactos durante las maniobras de fondeo y recuperación. Una esfera, formada por dos piezas de un polímero de sílice y unidas por medio de vacío, mantiene la electrónica y baterías de alimentación en su interior de forma estanca. El instrumento consta de varios módulos para la adquisición de la señal recibida desde un hidrófono externo fijado a la armadura: un convertor analógico digital, un amplificador-acondicionador de señal, un relé conmutador que controla un liberador químico (una señal acústica emitida por el usuario desde la superficie del mar activa el mecanismo de liberación del muerto de fondeo) y un disco duro de 160 Gb y componentes de control de actividad del disco. Además, el instrumento contiene dos elementos que facilitan su recuperación cuando este sale a flote, una luz estroboscópica y un emisor de radio que permiten localizarlo. Este instrumento puede programarse para grabar de manera continua durante las 24 horas o siguiendo un ciclo de grabación con un periodo en pausa. La programación del grabador se hace desde un ordenador portátil conectado por puerto USB al grabador antes de su cierre estanco. La comunicación con el grabador una vez cerrado para confirmar la

presión interna y activar o desactivar la grabación así como el dispositivo de liberación se hace a través de un transductor sumergible conectado a un amplificador. Las señales de comunicación pueden reproducirse desde un ordenador portátil o un reproductor mp3 conectado al amplificador.

La distancia de detección de rorcuales comunes mediante el fondeo de grabadores autónomos se ha calculado en varias regiones oceánicas, pero nunca en el mar Mediterráneo. Las detecciones estimadas rondan entre 56 km (Širović *et al.*, 2007) y 185 km (Cummings y Thompson, 1971). Aunque algunos estudios han demostrado la posibilidad de detectar estas señales a muchos cientos de kilómetros (ej. Clark y Gagnon, 2004). Teniendo en cuenta que la propagación de la señal depende de la intensidad a la que es emitida y la pérdida por transmisión y que ninguna de estas dos variables pueden ser estimadas en el contexto de este trabajo, el rango de detección ha de asumirse que oscila entre los valores calculados en estudios previos.

La figura III-2 muestra el instrumento abierto y cerrado. Se utilizaron dos unidades MARU durante los fondeos realizados en 2006 y 2007 en las áreas de estudio de Islas Columbretes, canal de Ibiza e Isla de Alborán. Estos instrumentos se programaron para grabar de manera continua para todos los fondeos, a una velocidad de muestreo de 2 kHz, obteniendo un ancho de banda funcional de 0 a 1000 Hz suficiente para poder grabar todos los tipos de señal descritos para el rorcual común.

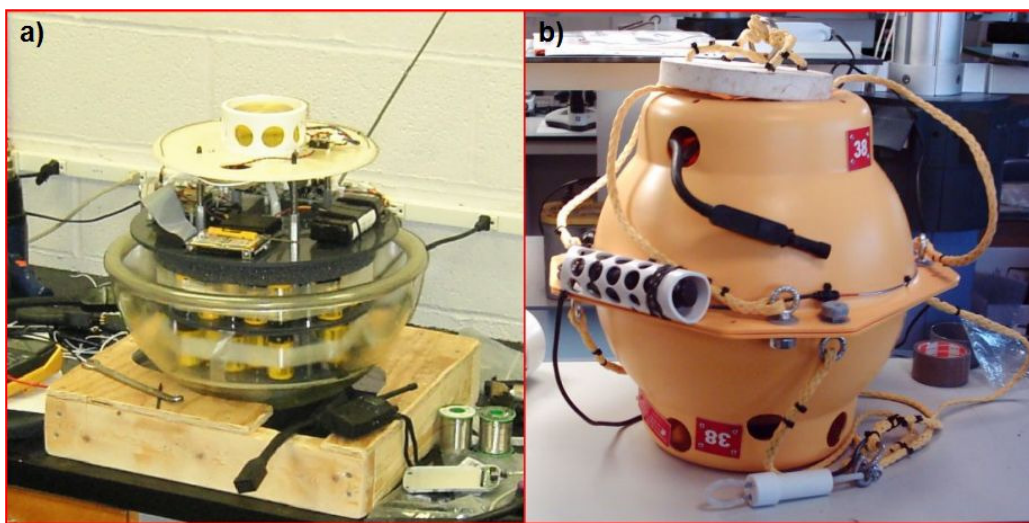


Figura III-2: Marine Autonomous Recording Unit (MARU) (a) abierto durante la preparación para el fondeo y (b) cerrado listo para el fondeo.

3.2.2 Ecologic Acoustic Recorder

En 2007 se comercializó un nuevo grabador autónomo de fondeo más compacto y ligero facilitando la operación de fondeo y recuperación y mucho más económico. Se decidió cambiar a este nuevo instrumento para los siguientes fondeos. El Ecologic Acoustic Recorder (EAR) <http://oceanwidescience.org/docs/EAR.htm> desarrollado por Oceanwide Science Institute en Hawaii, EEUU, es un instrumento de 8 kg de peso con forma cilíndrica, de 60 cm de longitud y 20 cm de diámetro. El contenedor, de aluminio, está rodeado de un disco de flotación y presenta un extremo de polímero plástico extraíble donde se ubica un hidrófono y un interruptor magnético para la activación y

desactivación del instrumento. La electrónica interior es muy similar a la de la unidad MARU, excepto que no puede ser programado para grabar de manera continua (impidiendo la sincronización entre unidades fondeadas simultáneamente) y no incluye ningún mecanismo de liberación, por lo que en caso de fondearse, es necesario añadir un liberador a la línea de fondeo. La programación del grabador se hace desde un ordenador portátil conectado por puerto USB al grabador antes de su cierre estanco. La figura III-3 muestra el instrumento abierto y cerrado. Se utilizaron cuatro unidades EAR durante los fondeos realizados en el periodo 2007-2009 en las áreas de estudio de cabo de Begur, Menorca, Estrecho de Gibraltar y Cabo Espartel. Al igual que las unidades MARU, la velocidad de muestreo a la que se programaron fue de 2 kHz para todos los fondeos pero en un ciclo de grabación de 5 minutos cada 10 minutos.

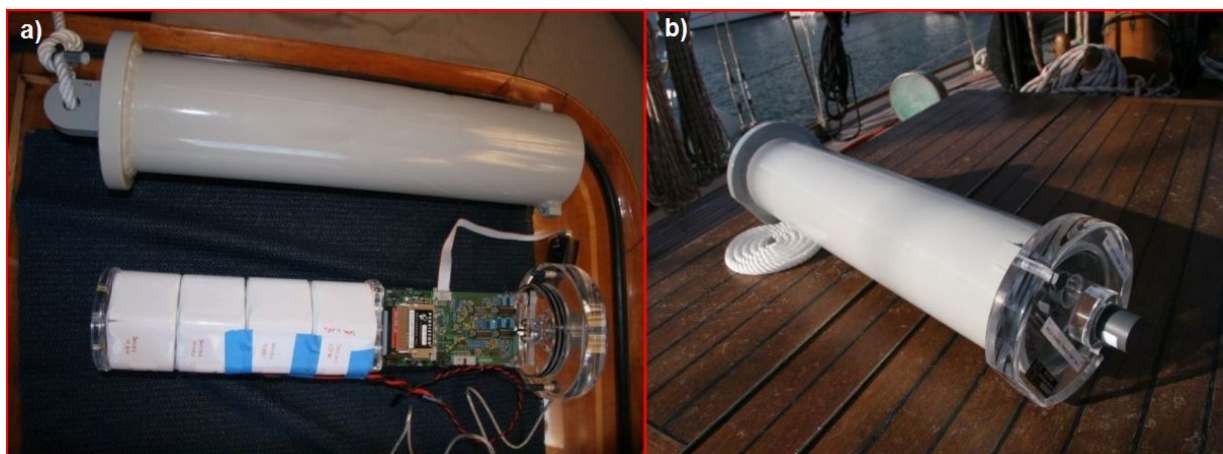


Figura III-3: Ecologic Acoustic Recorder (EAR) (a) abierto durante la preparación para el fondeo y (b) cerrado listo para el fondeo.

3.3 Diseño de la línea de fondeo

Se utilizaron tres tipos de fondeo con el fin de adaptar la instalación submarina de los grabadores a los diferentes contextos en los que se trabajó. Se describen a continuación:

3.3.1 Fondeo de MARU

Las unidades MARU se fondearon en las Islas Columbretes, canal de Ibiza e Isla de Alborán. Se fondearon simultáneamente dos unidades en cada área de estudio por dos razones: La primera porque la detección simultánea de señales emitidas por un rorqual en dos grabadores permite calcular el ángulo de recepción de la señal. Esta información es de gran utilidad para describir la dirección de movimiento de los animales detectados cuando se desplazan dentro del radio de alcance de ambos grabadores. Y la segunda porque fondeando dos grabadores se amplía el radio de alcance y se reduce el riesgo de no obtener datos si uno de los dos fallase o se perdiera. La distancia de separación entre las dos unidades fue de dos millas náuticas para todos los fondeos. El criterio para elegir esta distancia se apoyó en resultados obtenidos por estudios previos con los mismos instrumentos (Clark & Gagnon, 2004; Hatch & Clark, 2004).

La línea de fondeo para las unidades MARU consistió en un lastre de 80 kg unido al liberador que se encuentra incorporado en el instrumento. El lastre para todos los

fondeos realizados consistió en 5 sacos de gravilla de 16 kg cada uno. La operación de fondeo es sencilla, una vez posicionada la embarcación en el punto de fondeo, el lastre y el grabador se descuelgan por la borda hasta quedar sumergidos. Tras confirmar que el instrumento está activo se libera del cabo de amarre y se deja caer por gravedad hasta el fondo. La armadura del MARU presenta un arnés donde se fija el liberador químico, que consiste en un cable de aluminio trenzado conectado a un circuito de 28 V. Cuando el dispositivo es activado, el circuito eléctrico se cierra y energiza el cable provocando una reacción de electrólisis con el contacto del agua marina que disuelve el cable en pocos minutos liberando el grabador del muerto y ascendiendo hasta la superficie por flotación positiva. Para la recuperación del grabador una vez posicionada la embarcación en el punto donde se fondeó, se envía una señal acústica mediante el transductor sumergible que activa el liberador químico. La figura III-4 muestra imágenes de la operación de fondeo de los grabadores MARU en el canal de Ibiza.



Figura III-4: Imágenes de la operación de fondeo de los grabadores MARU en el canal de Ibiza.

3.3.2 Fondeo de EAR

Las unidades EAR se fondearon en el Estrecho de Gibraltar y cabo de Espartel (Marruecos). Al igual que con las unidades MARU, éstas se fondearon en pareja, con una separación de dos millas náuticas.

El diseño de la línea de fondeo para las unidades EAR fue más robusto debido a las fuertes corrientes que pueden encontrarse en el fondo del Estrecho de Gibraltar. Consistió en un lastre de 200 kg unido por 2 m de cadena y 2 m de cabo a un liberador acústico marca ORE (Offshore Research, EEUU) modelo Port. El liberador se une al grabador por 2 m de cabo al que se le incorporó un flotador de 8 kg para reducir el peso de liberador en el agua. El lastre para los fondeos consistió en dos discos de hormigón de 100 kg cada uno. La operación de fondeo y recuperación es igual a la descrita para las unidades MARU. El liberador acústico se activa al recibir una señal enviada desde el módulo de superficie, que consta de un transductor sumergible y un amplificador. A diferencia del liberador químico de las unidades MARU, estos activan un dispositivo mecánico desenroscando el grillete que mantiene le liberador fijado al lastre. La figura III-5 muestra la configuración de la línea de fondeo.



Figura III-5: Configuración de la línea de fondeo que incluye un liberador ORE Port, un flotador de 8kg y un grabador EAR.

3.3.3 Instrumentación de líneas de fondeo con EAR

Además de fondear las unidades EAR, estos grabadores se utilizaron en Cabo de Begur y Menorca fijándolos a líneas de fondeo de boyas ubicadas en estas zonas con el permiso de la institución propietaria Puertos del Estado. Se realizaron inmersiones para instrumentar la línea de fondeo y para la posterior recogida. La metodología de instrumentación fue similar en todos los casos. Durante la inmersión se fijaron piezas de tubo de manguera para proteger la línea de fondeo del rozamiento con el grabador y para reducir la reacción de electrólisis en los casos en los que la línea de fondeo fuera de cable o de cadena. El grabador se fijó sobre la protección de manguera mediante bridas de 20 mm de grosor y cabo de seguridad a una profundidad de entre 20 y 30 m. La figura III-6 muestra imágenes de la instrumentación de las boyas.

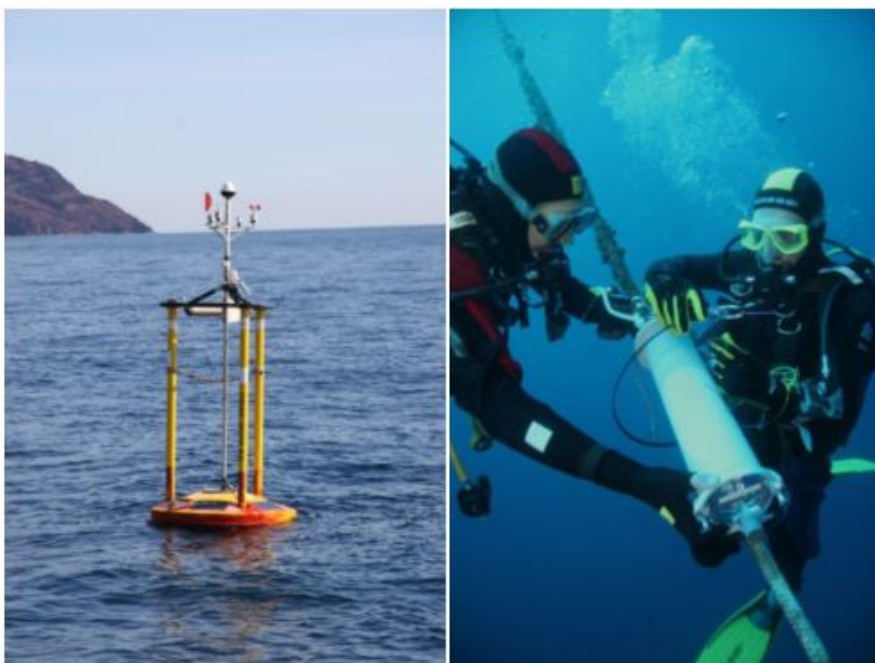


Figura III-6: Imágenes de la boya de Puertos del Estado en el cabo de Begur. La imagen submarina muestra la instrumentación de la línea de fondeo.

3.3.4 Instrumentación de plataforma oceanográfica

En la cuenca Provenzal, el grabador se instaló en la estructura que soporta instrumentos oceanográficos. El trabajo se realizó en colaboración con la institución propietaria de la plataforma (“Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer”) y con el “Centre de Recherche sur les Cétacés de Marineland Antibes”. Se realizaron inmersiones para instrumentar la plataforma y para la posterior recogida del grabador. Durante la inmersión se fijó una lámina de goma de 5mm de grosor sobre la barra de la plataforma donde se colocó el grabador para reducir la reacción de electrólisis entre la plataforma de acero inoxidable y la carcasa de aluminio del grabador. El grabador se fijó sobre la protección de goma mediante abrazaderas regulables de acero inoxidable de 10 mm de ancho y cabo de seguridad a una profundidad de 32 m. La figura III-7 muestra esquema de la plataforma y la posición del EAR e imágenes de la instrumentación de la plataforma.

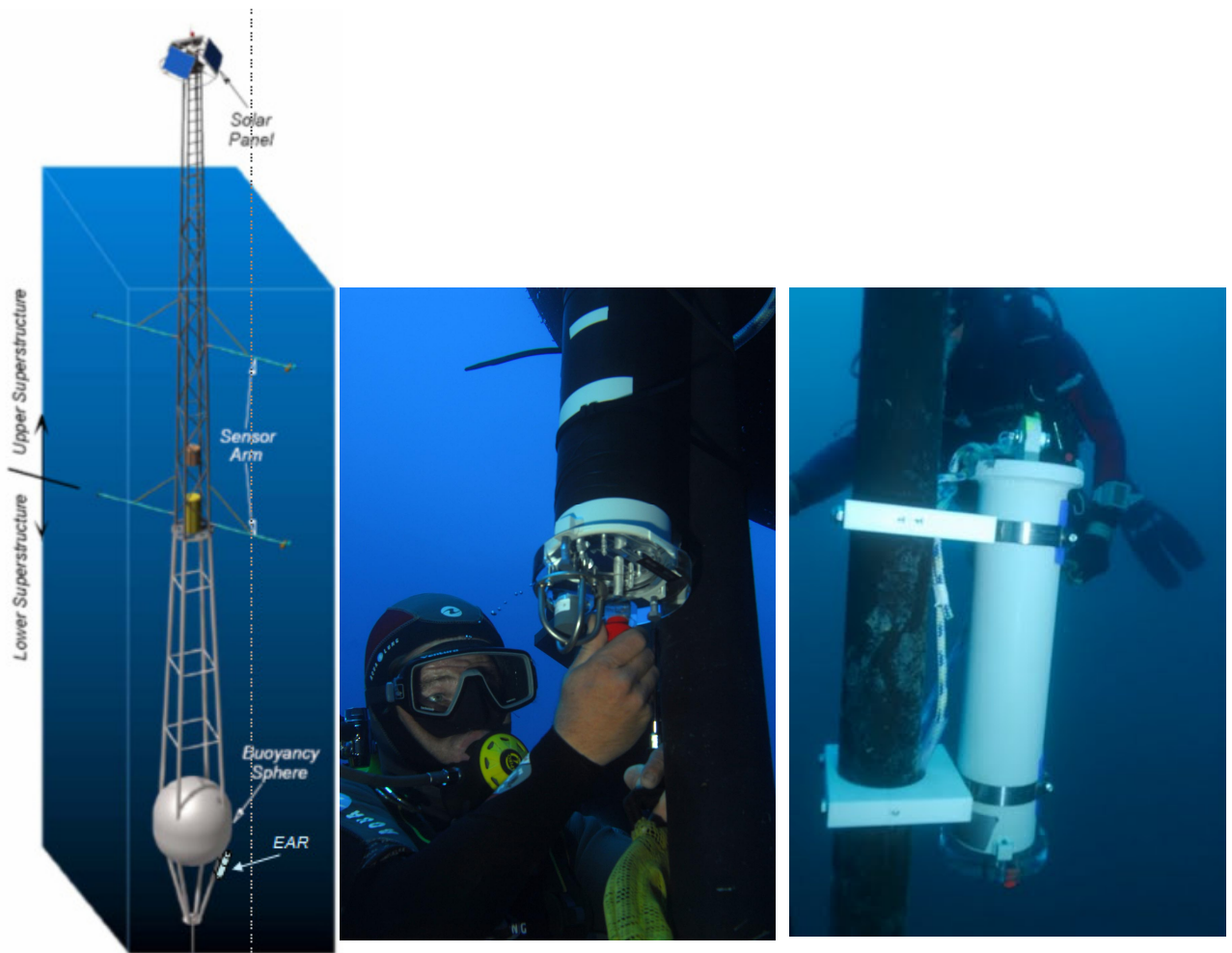


Figura III-7: Esquema de la plataforma de instrumentación oceanográfica en la cuenca Provenzal con el grabador instalado. Las imágenes submarinas muestran la instrumentación de la plataforma.

3.4 Preparación de datos para detección

Tanto las unidades MARU como los EAR graban el sonido en formato binario (.bin). Los archivos se extraen del disco duro del grabador y se duplican para guardar una copia de seguridad en un disco duro externo. Los archivos binarios de la copia de trabajo se procesan con el código BEAST desarrollado por BRP-Cornell para la plataforma Matlab (Mathworks Inc., EEUU), que permite asignar la fecha y hora local del inicio y fin de grabación. En caso de haber realizado un fondeo de 2 unidades simultáneas (como el caso de las Islas Columbretes, canal de Ibiza e Isla de Alborán) BEAST permite sincronizar ambas grabaciones mediante la contracción o la expansión lineal de los archivos binarios para que la hora de inicio y fin de ambas grabaciones coincidan con exactitud.

Posteriormente a este proceso, los archivos binarios sincronizados son convertidos en múltiples archivos consecutivos de 30 minutos de duración y su formato binario es transformado al de archivo de sonido no comprimido aiff (Audio Interchange File Format, Apple Inc). Una vez convertidos a este nuevo formato, los varios miles de archivos de sonido obtenidos de cada fondeo se organizan en carpetas siguiendo una estructura cronológica, con una carpeta para cada correspondiente intervalo de 24 horas de todo el periodo de muestreo. La figura III-8 representa un esquema del protocolo seguido para la preparación de las grabaciones para detección.

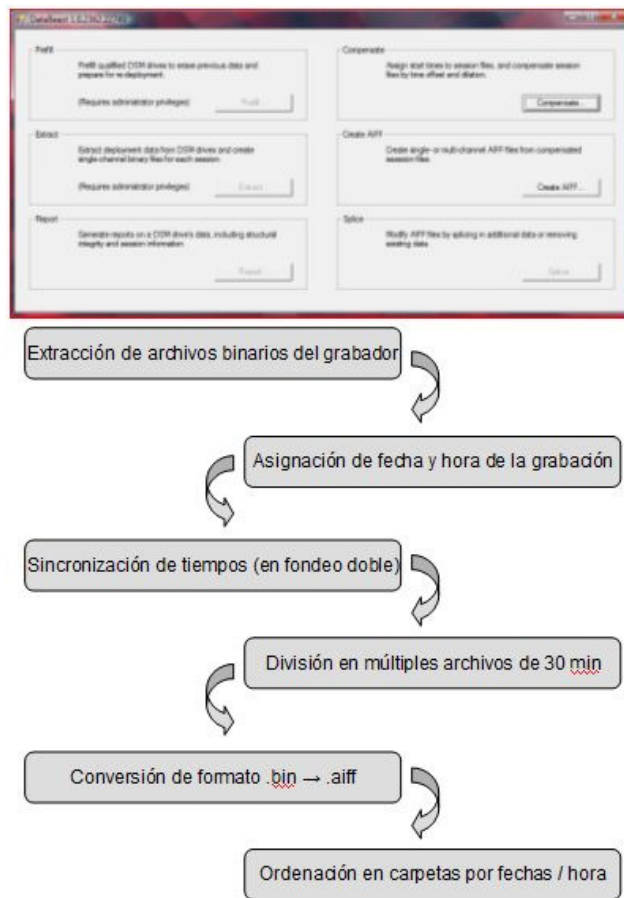


Figura III-8: Interfaz del código BEAST y esquema del protocolo seguido para la preparación de las grabaciones para detección, transformando los archivos binarios

brutos obtenidos del grabador en archivos de sonido aiff de duración estándar de 30 minutos y clasificados por fecha y hora local para cada periodo de muestreo.

3.5 Protocolo de análisis detección con XBAT

Los archivos de sonido fueron analizados para detectar señales de rorcual común con el programa Extensible Bioacoustic Tool (XBAT) versión 6 desarrollado por BRP-Cornell para la plataforma Matlab. El análisis incluye tres pasos, el proceso automático de detección de las señales de rorcual común, la validación manual de las detecciones obtenidas para eliminar aquellas que sean falsas y modificar las que sean incorrectas y la selección de señales para incluir en registros con los que realizar las medidas del ángulo de recepción. Cada registro incluye la información temporal y espectral para localizar las señales seleccionadas en cada archivo de sonido. Se definen a continuación los tres pasos del análisis:

3.5.1 Detección automática

El pulso de 20 Hz es, con diferencia, la señal más utilizada por el rorcual común (Watkins *et al.*, 1987) y la producida con más energía (Charif *et al.*, 2002) de su repertorio, por lo que puede ser detectada con más facilidad y a mayor distancia que el resto de señales. Además, se trata de la señal de más energía y menor frecuencia, lo que facilita su propagación en el medio marino con mínima pérdida por propagación (Clark y Ellison, 2004). Por estas razones, la detección de esta señal es más eficiente y por tanto la metodología de detección automática utilizada en este trabajo se centró solo en este tipo de señal. Otra ventaja de centrar la detección automática en el pulso de 20 Hz es que todas las demás señales de su repertorio se producen en acompañamiento de esta y nunca de manera aislada (Clark, *pers. com.*), por esta razón la detección de los pulsos de 20 Hz permite localizar al resto de los tipos de señales durante la validación manual de las detecciones automáticas.

La detección automática de pulsos de 20 Hz de rorcual común se realizó construyendo un conjunto de ejemplos de estas señales para incorporar a la función de detección con el detector por muestras (“template detector”) del programa XBAT. Para ello, se utilizó el programa Audition 3.0 (Adobe Systems Inc., EEUU) para inspeccionar manualmente archivos de sonido hasta localizar ejemplos de señales de rorcual común con las que construir el conjunto. Se seleccionaron pulsos de 20 Hz de diferentes calidades teniendo en cuenta, la relación señal/ruido, la presencia de ecos y la atenuación por propagación. Para realizar pruebas preliminares de detección con diferentes combinaciones del conjunto de ejemplos, se preparó un archivo de sonido de prueba consistente en secciones de 30 minutos de duración de diferentes días del periodo de muestreo en los que se incluyese la presencia de señales de rorcual común de diferentes calidades y con diferentes niveles de ruido ambiente, así como secciones con ausencia de rorcuales pero con ruidos dentro de la banda de 20 Hz. La figura III-9 representa un ejemplo de la variedad de contextos incluidos en el archivo de sonido de prueba de detección automática.

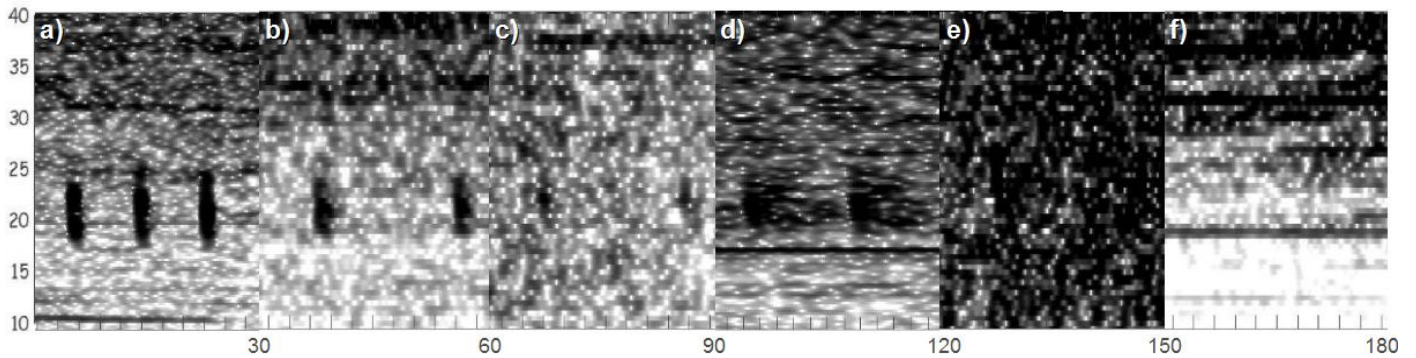


Figura III-9: Espectrogramas (10-40 Hz, 30 s, 512 bandas) representando la variedad de contextos incluidos en el archivo de sonido de prueba de detección automática: a) pulsos de 20 Hz de alta calidad registrados cuando un rorcual se encontraba muy cercano al grabador, b) pulsos de 20 Hz de calidad media debido a la atenuación por propagación registrados cuando un rorcual se encontraba a una distancia media del grabador, c) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la fuerte atenuación por propagación registrados cuando un rorcual se encontraba a mucha distancia del grabador, d) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la presencia de eco facilitado por las características de propagación del medio, e) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la baja relación señal/ruido y f) ejemplo de ruido tonal en la banda de 20 Hz generado por el motor de un buque.

Se realizaron varias pruebas de detección con diferentes conjuntos de ejemplos hasta encontrar una combinación que obtuviese un número de detecciones de balance preferente por señales no detectadas frente a falsas detecciones. Puesto que las detecciones son revisadas manualmente, se dio preferencia a un conjunto sensible a señales en la banda de 20 Hz a pesar de obtener falsas detecciones, con el fin de evitar que algunas señales no fueran detectadas (reduciendo el error tipo I).

En total se seleccionaron 5 señales para el conjunto de ejemplos del detector. El detector por muestras permite seleccionar una función para cada ejemplo del conjunto, por lo que determinados ejemplos pueden ser utilizados para identificar las señales de interés y otros ejemplos pueden ser utilizados para rechazar señales que durante la búsqueda podrían confundir al detector. Por tanto, de las 5 señales utilizadas para construir el conjunto de ejemplos del detector, tres correspondieron a pulsos de 20 Hz de rorcual común de diferentes calidades y 2 a ruidos comunes en la banda de 20 Hz para ser rechazados. La figura III-10 muestra los 5 ejemplos del conjunto construido para la detección automática.

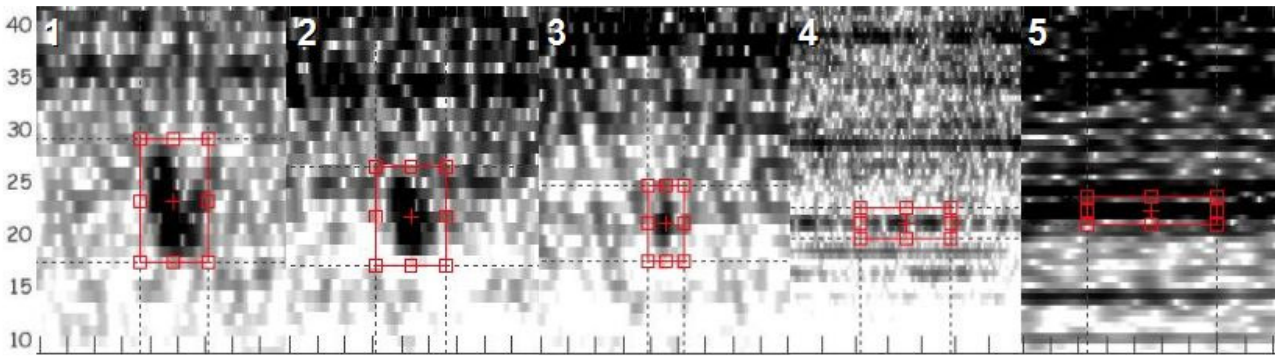


Figura III-10: Espectrogramas (10-40 Hz, 15 s, 512 bandas) de los 5 ejemplos del conjunto construido para la detección automática. Los ejemplos 1 a 3 corresponden con pulsos de 20 Hz de roscual de mejor a peor calidad, el ejemplo 4 corresponde a ruido de cavitación de hélice de buque y el ejemplo 5 corresponde a ruido tonal generado por los ejes de las hélices de buques. El detector por muestras se configuró de manera que los ejemplos 1 a 3 fueran aceptados y los ejemplos 4 y 5 rechazados.

Una vez seleccionados los ejemplos y construido el conjunto para el detector por muestras, se ejecutó la detección automática en todos los archivos de sonido obtenidos en este trabajo. El programa XBAT crea un archivo con los resultados de la detección en cada carpeta donde se encuentran los archivos de sonido analizados. Este archivo incluye la información de todas las selecciones realizadas en el archivo de sonido. Estas selecciones pueden ser representadas gráficamente sobre el espectrograma del sonido para su validación.

3.5.2 Validación manual

Las selecciones de cada archivo de sonido obtenidas mediante la detección automática son el resultado bruto del proceso de detección. Este resultado fue refinado mediante la validación de cada una de las selecciones de forma manual, eliminando las selecciones de falsas detecciones y corrigiendo aquellas que sean parcialmente incorrectas (Ej. doble selección de una señal y su eco). La validación manual se realizó con el programa XBAT mediante la representación espectrográfica de los archivos de sonido superponiendo las selecciones resultantes de la detección automática. El criterio de clasificación de las selecciones como correctas o incorrectas es en parte subjetivo puesto que se basa en la experiencia del observador para identificar si una señal concreta corresponde a un pulso de un roscual común. Por ello, se aplicó un protocolo que facilitó la decisión con el fin de minimizar la subjetividad en la decisión en caso de duda. Empleando características visuales (representación espectrográfica) y acústicas (reproducción del sonido), los pulsos de roscuales deberían presentar todos los siguientes rasgos:

- Máxima energía acústica concentrada en la banda de 19-21 Hz
- Señal constante de duración inferior a 1,5 segundos
- Señal incluida en una secuencia cuyo intervalo entre pulsos debe coincidir en 12 a 14 segundos
- Carácter descendente en su modulación al reproducir el sonido acelerado 10 veces.

Si uno de estos 4 rasgos no pudo confirmarse en la señal, esta se descartó del análisis.

Las selecciones de todos los archivos de sonido obtenidos en el análisis fueron validados manualmente.

3.5.3 Registros PA e IPI

El programa XBAT permite guardar las selecciones manualmente validadas en registros asociados a cada archivo de sonido. Se crearon dos tipos de registros:

- 1) PA: creados en todos los tipos de fondeo para calcular parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz de rorcual común. Se seleccionaron los pulsos de 20 Hz de mejor calidad (máxima relación señal/ruido, ausencia de ecos o atenuación por propagación) de todos los archivos de sonido.
- 2) IPI: creados en todos los tipos de fondeo para calcular el intervalo de tiempo entre pulsos de una secuencia, Se seleccionaron los pulsos de 20 Hz en secuencias que claramente pudieron ser atribuidas a un mismo animal. En los casos en los que aparecieron dos o más secuencias solapadas (por tratarse de varios rorcuales vocalizando simultáneamente) los pulsos no fueron seleccionados para este registro.

Para ambos registros, en grabaciones de fondeos donde los dos canales se sincronizaron (dos MARU fondeadas simultáneamente), se seleccionaron señales indistintamente en uno de los dos canales en función de la calidad y la relación señal / ruido, siempre con la seguridad de no replicarlas con el fin de poder analizar el mayor número de ejemplos de parámetros acústicos. En grabaciones de fondeos donde los canales no se sincronizaron (dos EAR fondeados simultáneamente) se eligió la grabación con mayor número de detecciones y se descartó la de menor número para evitar replicas en la selección de señales a incluir en los registros.

3.5.4 Análisis registros PA, IPI

Para el análisis de los registros PA e IPI se utilizó el código “Energy Measurement Tool” desarrollado por BRP-Cornell en la plataforma Matlab e implementado para el programa XBAT. El código calcula 42 parámetros acústicos del dominio temporal y dominio espectral de todas las selecciones del registro. El código permite excluir un porcentaje de la energía incluida en cada una de las selecciones para el cálculo de los parámetros con el fin de eliminar la energía acústica que no corresponda a la señal de interés y que corresponde al ruido ambiente que rodea a la señal y que ha quedado incluido en la selección. Se seleccionó entre el 95 y el 99 % de la energía, en función del nivel de ruido ambiente de la grabación. Para ello, se realizaron varias pruebas previas al análisis final de cada grabación. El código guarda los valores de los diferentes parámetros acústicos obtenidos de los registros de cada carpeta de 24 horas de grabación en un formato específico para el programa XBAT. Con el fin de poder realizar análisis estadísticos de estos valores, estos se exportaron al formato de hoja de cálculo del programa Excel versión 2003 (del paquete Office 2003 SP3, Microsoft Corporation, EEUU) y al formato específico del programa Statistica 8 (Statsoft Inc., EEUU). La figura III-11 muestra espectrogramas con ejemplos de pulsos de 20 Hz de buena calidad seleccionados para incluirse en el registro PA e IPI.

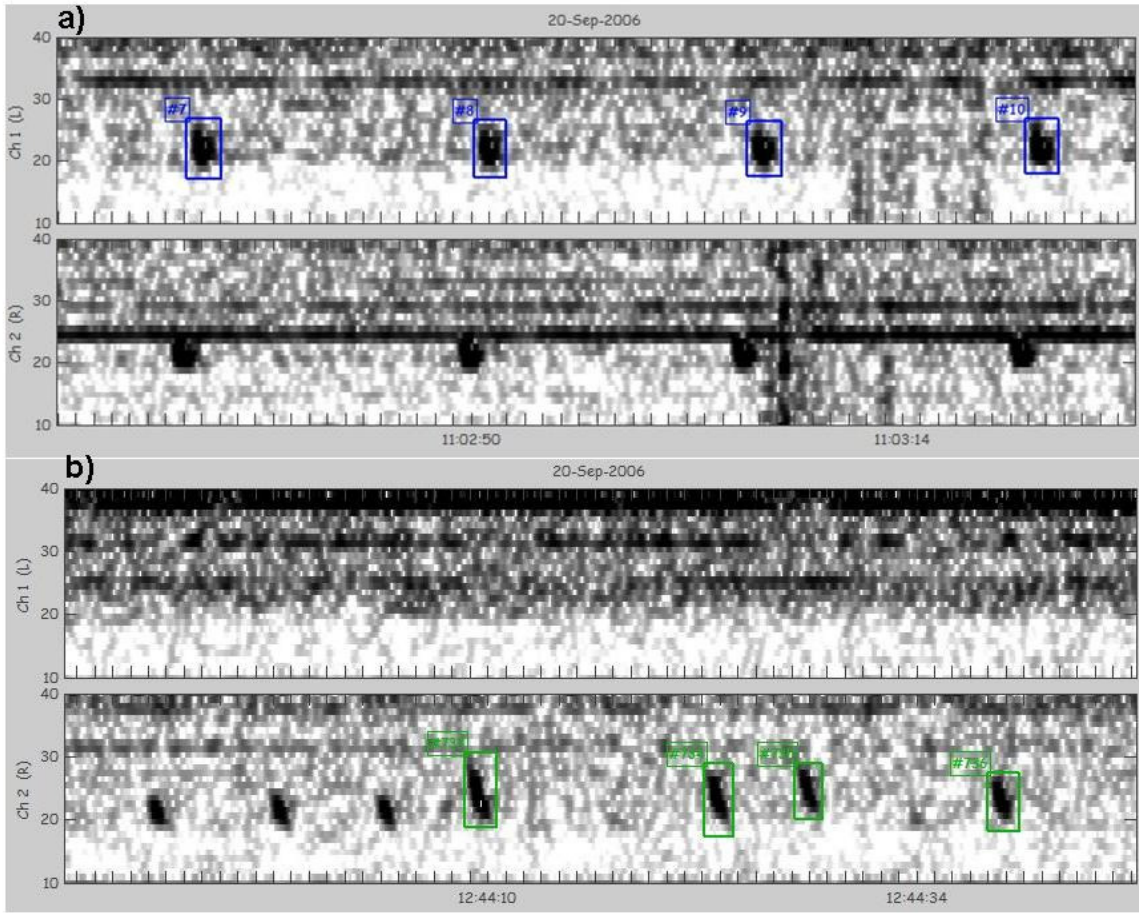


Figura III-11: Espectrogramas (10-40 Hz, 120 s, 512 bandas) con ejemplos de pulsos de 20 Hz de buena calidad seleccionados para incluirse en el registro a) IPI en azul y b) PA en verde.

De todos los parámetros acústicos calculados por el código “Energy Measurement Tool” se incluyeron solo los 5 siguientes: Duración del pulso, tiempo central, frecuencia central, ancho de banda y frecuencia de pico de energía. La tabla III-2 describe cada uno de los 4 parámetros. Estos parámetros se representan en la figura III-12. El criterio de selección de estos 4 parámetros fue definido por:

- 1- Resultados de estudios previos en los que se definen los parámetros más representativos de esta especie y más significativos para diferenciar poblaciones.
- 2- Las características acústicas de los pulsos de 20 Hz del rorcual común, que por su simplicidad limitan el uso de muchos de los parámetros medidos por el código.
- 3- La condición de que los valores de los parámetros elegidos no se vean afectados, o presenten una distorsión mínima, por la propagación de la señal en el agua, para minimizar el efecto de la distancia de los animales al grabador en las señales recibidas.

Parámetro acústico	Descripción
Duración del pulso	Duración en segundos del pulso emitido por el rorcual común en la banda de 20 Hz.
Tiempo central	Tiempo que divide la energía total del pulso en dos partes iguales, una anterior y una posterior al valor central.
Frecuencia central	Frecuencia en Hz que divide la energía total del pulso en dos partes iguales, una superior y una inferior al valor central.
Ancho de banda	Valor absoluto de la frecuencia en Hz cubierta por el pulso.
Frecuencia de pico de energía	Valor de la frecuencia en Hz que presenta el máximo de energía acústica del total de la duración del pulso.

Tabla III-2: Descripción de los 5 parámetros acústicos medidos en los ejemplos seleccionados de pulsos de 20 Hz de rorcual común en cada área de estudio.

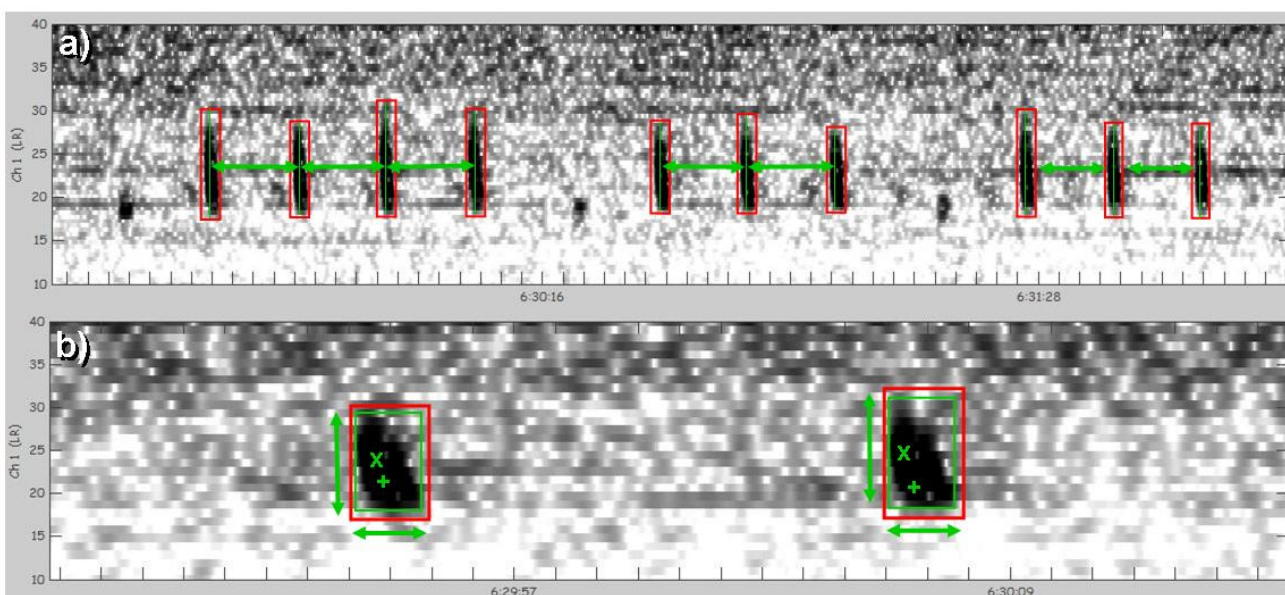


Figura III-12: Espectrogramas con ejemplo de pulsos de 20 Hz y los 5 parámetros acústicos incluidos en el análisis. a) Espectrograma (10-40 Hz, 200 s, 512 bandas) con las señales del registro IPI seleccionadas en rojo, dentro de cada selección una barra vertical verde marca el tiempo central. Las medidas del intervalo entre pulsos equivalen al intervalo entre barras verticales verdes indicadas con flechas verdes. b) Espectrograma (10-40 Hz, 30 s, 256 bandas) con las señales del registro PA seleccionadas en rojo y las medidas del 95 % de energía dentro de la selección en un recuadro verde, duración y ancho de banda indicadas con flechas verdes, frecuencia central indicada con el símbolo x y frecuencia de pico de energía indicada con el símbolo +.

Para el cálculo del intervalo entre pulsos (registro IPI), se utilizó el parámetro tiempo central medido por el código “Energy Measurement Tool” en todos los pulsos seleccionados para el estudio. La resta del tiempo central de un pulso al tiempo central

del pulso anterior en una misma secuencia equivale al intervalo entre los dos pulsos. Esta fórmula se aplicó en todos los tiempos calculados por el código “Energy Measurement Tool” para pulsos consecutivos obteniendo el intervalo entre pulsos de todos los seleccionados para el estudio.

Los parámetros acústicos intervalo entre pulsos, duración del pulso, ancho de banda, frecuencia central y frecuencia de pico de energía, se exploraron mediante un análisis de regresión jerárquico o multinivel. Cuando se aborda el análisis de datos que presentan una estructura jerárquica, como los pulsos de 20 Hz que se encuentran anidados dentro de una misma canción siendo, por tanto, dependientes, es preciso que las técnicas utilizadas para su análisis sean capaces de recoger dicha estructura y desvelar patrones específicos de cada nivel. Los análisis jerárquicos o multinivel (Bryk y Raudenbush, 1987, 1992; Goldstein et al., 1998; Snijders and Roel, 1999), también llamados modelos lineales multinivel (“multilevel linear models”), modelo de efectos fijos y efectos aleatorios (“mixed-effect models and random-effects models”) Modelos de regresión de efectos aleatorios (“random coefficient regresión models”) o modelos de componentes de covarianza, (“covariance components models”) han sido desarrollados con este propósito. Estos modelos tienen como objetivo general el estudio de la relación entre las unidades de observación que constituyen la estructura jerárquica. El término nivel se aplica a los distintos estratos en los que se pueden agrupar los datos y que constituyen fuentes importantes de variación de los mismos. En nuestro caso, en el *nivel 1* es el correspondiente a los pulsos de 20 Hz y el *nivel 2* a las canciones. Tenemos, por tanto, como fuentes de variación: 1) la variabilidad dentro de cada canción; y 2) la variabilidad entre las medias de las distintas canciones. Las diferencias entre los valores de los parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz de una misma canción constituyen la variabilidad del nivel 1. Las diferencias entre las medias de los valores de los parámetros acústicos de las canciones constituyen la variabilidad del nivel 2. Constatada la variabilidad de los parámetros acústicos entre canciones, el siguiente paso es averiguar si el área de estudio, variable de nivel dos, permite explicar parte de esas diferencias. Incluimos como variable predictora de *nivel 2* el área de estudio.

Las diferencias detectadas en los parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz entre áreas de estudio se exploraron mediante comparaciones múltiples aplicando la corrección de Bonferroni. Además se llevó a cabo un análisis de correlación lineal simple para identificar posibles tendencias. Finalmente, se compararon los valores medios de los parámetros acústicos agrupados en dos conjuntos, uno correspondiente a las áreas de población mediterránea y otro a las de población atlántica, mediante un ANOVA de un factor para identificar posibles diferencias entre los grupos. En el caso de detectar diferencias significativas se llevaron a cabo comparaciones a posteriori utilizando la corrección de Bonferroni, en caso de igualdad de varianzas y la de Dunnett en el caso contrario.

4. Resultados

4.1 Fondeos completados/fallidos

En total, se realizaron 9 fondeos de 3,3 meses de duración media en un periodo de 2 años y 5 meses, desde agosto de 2006 hasta enero de 2009. Se obtuvieron un total de 29.822 horas de grabación. No en todos los fondeos se obtuvieron grabaciones debido a fallos en los grabadores, pérdida de estanqueidad o pérdida del instrumento. La tabla III-3 enumera y describe los fondeos fallidos.

Área de estudio	Instrumento	Problema identificado
Cabo de Begur	EAR	Pérdida del instrumento debido a fuertes tormentas durante el periodo de muestreo (olas > 7 m).
Menorca	EAR	Error en el programa de control de la grabación. No se obtuvieron archivos binarios.
Cabo Espartel	EAR	Fallo de estanqueidad en el primer día de fondeo destruyendo la electrónica del instrumento.

Tabla III-3: Descripción de los fondeos fallidos, área y problema identificado.

El tamaño muestral obtenido en cada área de estudio fue diferente y se define en la tabla III-4. Las grabaciones de las áreas de referencia de las poblaciones de rorcual común Mediterráneo (cuenca Provenzal) y Atlántico noreste (A. islas Azores) se analizaron parcialmente puesto que el objetivo de estas fue únicamente el de identificar los parámetros acústicos característicos de ambas poblaciones.

Área de estudio	Horas de grabación de sonido	% analizado	Tamaño muestral
Cuenca Provenzal	2133 h	15 %	927 pulsos 20 Hz
I. Columbretes	4296 h	100 %	91.327 pulsos 20 Hz
Canal de Ibiza	2856 h	100 %	23 pulsos 20 Hz
I. Alborán 2006	4271 h	100 %	2.202 pulsos 20 Hz
I. Alborán 2007	3572 h	100 %	41 pulsos 20 Hz
E. de Gibraltar	5718 h	100 %	4.137 pulsos 20 Hz
Cabo Espartel	2847 h	100 %	4.089 pulsos 20 Hz
A. islas Azores	4129 h	22 %	911 pulsos 20 Hz
Total	29.822 h		103.664 pulsos Hz

Tabla III-4: Tamaño muestral (nº de pulsos de 20 Hz de rorcual común), número de horas de grabación obtenidos en cada área de estudio y porcentaje de la grabación analizado.

4.2 Tipo de señales detectadas

El análisis de las grabaciones obtenidas en este trabajo permitió detectar cuatro tipos de señales descritas para el rorcual común (Watkins *et al.*, 1987; Edds, 1988; Thomposn *et al.*, 1992), el pulso de 20 Hz, el pre-pulso y el pulso de 135-140 Hz. De las señales que no aparecen en secuencias repetitivas y que son raras sólo se detectaron ejemplos de la modulación descendente. El pulso de 20 Hz fue el utilizado en mayor proporción por los rorcuales detectados en todas las áreas de estudio, seguido en menor proporción del pre-pulso y en raras ocasiones se detectaron pulsos de 135-140 Hz y modulación descendente. La figura III-13 muestra ejemplos de los diferentes tipos de señales detectados.

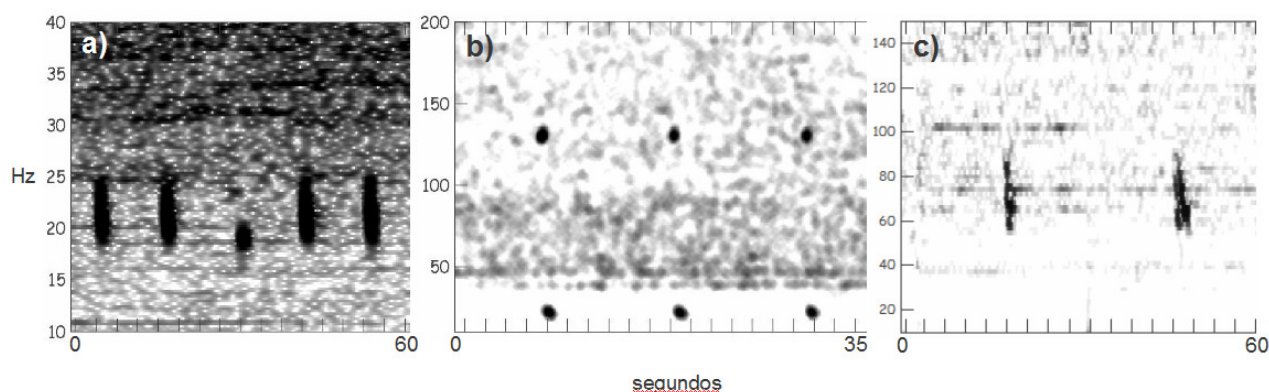


Figura III-13: Espectrogramas con ejemplos de los tipos de señales del rorcual común detectadas: a) pre-pulso (10-40 Hz, 60 s, 256 bandas) detectados en todas las áreas de estudio, b) pulsos de 135-140 Hz (10-200 Hz, 35 s, 1024 bandas) detectados en el Cabo de Espartel, Estrecho de Gibraltar e isla de Alborán y c) modulación descendente (10-150 Hz, 60 s, 512 bandas) detectados en las islas Columbretes.

4.3 Descripción de los parámetros acústicos medidos por área de estudio

Del total de 103.664 pulsos detectados en las grabaciones de todas las áreas de estudio, se incluyeron 4110 pulsos en los registros IPI, siendo señales consecutivas ordenadas en secuencias pertenecientes a diferentes canciones fácilmente distinguibles y útiles para medir el tiempo central de cada pulso y obtener el intervalo entre pulsos en cada área de estudio. Los pulsos seleccionados se repartieron en un total de 203 canciones diferentes. La tabla III-5 describe la proporción de pulsos y canciones seleccionadas por área de estudio y los valores medios y error estándar de los intervalos entre pulsos de los registros IPI obtenidos a partir de la medida de tiempo central:

Área de estudio	n	n canciones	Intervalo entre pulsos IPI (S.E.) en seg
Cuenca provenzal	835	41	14,92 (0,02)
Columbretes	698	31	14,83 (0,02)
C. Ibiza	7	1	11,73 (0,46)
I. Alborán 2006	949	41	12,88 (0,02)
I. Alborán 2007	13	1	11,99 (0,24)
E. de Gibraltar	623	37	13,06 (0,02)
Islas Azores	998	52	12,88 (0,01)

Tabla III-5: Número de pulsos de 20 Hz de rorcual común y número de canciones seleccionadas para obtener el intervalo entre pulsos consecutivos y los valores medios y error estándar en paréntesis del intervalo medido en cada área de estudio.

Del total de 103.664 pulsos detectados en las grabaciones de todas las áreas de estudio, se incluyeron 4.750 en los registros PA, siendo señales de alta calidad para la medición de los parámetros acústicos. Los pulsos seleccionados se repartieron en un total de 197 canciones diferentes. La tabla III-6 describe la proporción de pulsos y canciones seleccionadas por área de estudio y los valores medios y error estándar de los 4 parámetros acústicos medidos en los pulsos de los registros PA.

Área de estudio	n pulsos 20 Hz	n canciones	Duración (S.E.) en seg	Frecuencia central (S.E.) en Hz	Ancho de banda (S.E.) en Hz	Pico de energía (S.E.) en Hz
Cuenca provenzal	927	33	0,89 (0,01)	21,69 (0,03)	4,87 (0,04)	21,62 (0,03)
I. Columbretes	1093	18	0,95 (0,01)	21,66 (0,03)	4,91 (0,03)	21,58 (0,03)
C. Ibiza	13	1	1,26 (0,22)	21,63 (0,24)	5,41 (0,22)	21,33 (0,23)
I. Alborán 2006	1014	47	1,02 (0,01)	21,70 (0,02)	6,73 (0,03)	21,44 (0,04)
I. Alborán 2007	-	-	-	-	-	-
E. de Gibraltar	792	52	0,96 (0,00)	21,38 (0,01)	5,78 (0,01)	20,84 (0,01)
Azores	911	46	1,07 (0,00)	22,65 (1,04)	6,88 (0,01)	22,51 (0,01)

Tabla III-6: Número de pulsos de 20 Hz de rorcual común y número de canciones seleccionadas para la medición de los parámetros acústicos en cada área de estudio y valores medios y error estándar en paréntesis obtenidos para cada uno de los 5 parámetros acústicos incluidos en el análisis.

4.4 Resultados comparativos de los parámetros acústicos entre áreas

El tamaño muestral obtenido en el canal de Ibiza (n=23) e isla de Alborán durante 2007 (n=41) fue demasiado reducido como para ser incluido en el análisis estadístico, por tanto los resultados aquí expuestos omiten el área de estudio del canal de Ibiza y el fondeo realizado en la isla de Alborán en 2007.

Los parámetros intervalo entre pulsos, duración del pulso, ancho de banda, frecuencia central y frecuencia de pico de energía se exploraron para identificar similitudes y diferencias entre áreas de estudio mediante un análisis multinivel.

El primer paso consistió en el ajuste del modelo incondicional o modelo nulo que permitió explorar si existe variación sistemática en los parámetros acústicos y dónde (intra o intercanción). El modelo adopta la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + e_{ij}$$

En este nivel, el valor de del parámetro acústico del pulso i perteneciente a la canción j (Y_{ij}) se interpreta como el resultado de combinar la media de la canción j (β_{0j}) y los residuos o variación aleatoria (e_{ij}) en torno a esa media. Se asume que los errores o residuos se distribuyen normalmente con media cero y con igual varianza $\hat{\sigma}_e^2$ en todas las canciones.

En el nivel 2 (el nivel de las canciones) la media en el valor del parámetro acústico de la canción j (β_{0j}) se interpreta como la combinación de la media de todas las canciones (γ_{00}) y la variación aleatoria de la canción j (u_{0j}) en torno a esa media:

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + u_{0j}$$

Se asume que el componente aleatorio de este nivel, u_{0j} , tiene valor esperado cero y varianza $\hat{\sigma}_u^2$. Sustituyendo se obtiene el modelo mixto multinivel, o modelo combinado:

$$Y_{ij} = \gamma_{00} + u_{0j} + e_{ij}$$

Los resultados demuestran que existe variación estadísticamente significativa en los parámetros acústicos entre pulsos de una misma canción y entre canciones diferentes. La tabla III-7 resume los resultados de las estimas de los parámetros de covarianza para todos los parámetros acústicos. Entre ellos, se encuentran los coeficientes de correlación intraclase (CCI), que expresan la proporción de la varianza total ($\hat{\sigma}_e^2 + \hat{\sigma}_u^2$) que se debe a variabilidad entre canciones ($\hat{\sigma}_u^2$), calculados a partir del ajuste del modelo nulo.

Parámetros acústicos	estima de varianza (modelo nulo)		CCI
Intervalo entre pulsos	$\hat{\sigma}_e^2$	0,27	0,79
	$\hat{\sigma}_u^2$	0,98	
Duración del pulso	$\hat{\sigma}_e^2$	0,02	0,48
	$\hat{\sigma}_u^2$	0,02	
Ancho de banda	$\hat{\sigma}_e^2$	0,61	0,58
	$\hat{\sigma}_u^2$	0,85	
Frecuencia central	$\hat{\sigma}_e^2$	0,56	0,43
	$\hat{\sigma}_u^2$	0,42	
Frecuencia de pico de energía	$\hat{\sigma}_e^2$	0,53	0,53
	$\hat{\sigma}_u^2$	0,61	

Tabla III-7: Resultados de la estimación de los parámetros de covarianza del modelo nulo del análisis multinivel para cada parámetro acústico medido en todas las canciones y sus coeficientes de correlación intraclase.

Los resultados indican que la proporción de la varianza de los parámetros acústicos explicada por el efecto canción oscila entre el 43 y el 79 %.

El segundo paso en el ajuste del modelo consistió en introducir una variable predictora de *nivel 2*, el área de estudio, con el fin de poder explicar parte de la variabilidad encontrada entre canciones.

Los resultados del análisis demuestran que existe un efecto estadísticamente significativo del área de estudio en todos los parámetros acústicos. Las diferencias estadísticamente significativas entre todas las áreas de estudio y las estimaciones de los efectos fijos y aleatorios quedan recogidas en la tabla III-8.

Efectos fijos					
Variable dependiente	Área de estudio	γ_{00}	Std. Error	Grados lib.	Nivel de sig.
Intervalo entre pulsos	C. Provenzal	15,07	0,04	195,553	p<0,01
	I. Columbretes	14,81	0,04	155,02	p<0,01
	I. Alborán	12,89	0,04	148,76	p<0,01
	Estrecho de G.	13,05	0,04	172,08	p<0,01
	I. Azores	12,92	0,04	177,555	p<0,01
Duración del pulso	C. Provenzal	0,88	0,03	159,84	p<0,01
	I. Columbretes	1	0,04	163,7	p=0,028
	I. Alborán	0,97	0,03	173,66	p<0,01
	Estrecho de G.	0,98	0,03	173,47	p<0,01
	I. Azores	1,08	0,02	166,7	p<0,01
Frecuencia central	C. Provenzal	-0,87	0,11	152,24	p<0,01
	I. Columbretes	-1,07	0,13	157,27	p<0,01
	I. Alborán	-1,14	0,1	172,42	p<0,01
	Estrecho de G.	-1,24	0,1	170,27	p<0,01
	I. Azores	22,61	0,07	162,19	p<0,01
Ancho de banda	C. Provenzal	-2,01	0,12	158,25	p<0,01
	I. Columbretes	-1,8	0,15	163,3	p<0,01
	I. Alborán	-0,28	0,12	177,33	p=0,018
	Estrecho de G.	-1,05	0,11	175,75	p<0,01
	I. Azores	6,9	0,08	167,64	p<0,01
Frecuencia de pico de energía	C. Provenzal	-0,83	0,12	130,23	p<0,01
	I. Columbretes	-1,12	0,14	134,37	p<0,01
	I. Alborán	-1,07	0,11	145,72	p<0,01
	Estrecho de G.	-1,65	0,11	144,51	p<0,01
	I. Azores	22,52	0,08	137,85	p<0,01
Efectos aleatorios (modelo ajustado)					
Variable dependiente	Parámetro	Varianza	Std. Error	Wald Z	Nivel de sig.
Intervalo entre pulsos	u_{0j}	0,04	0,01	6,24	p<0,01
	e_{ij}	0,27	0,01	44,20	p<0,01
Duración del pulso	u_{0j}	0,02	0,00	7,99	p<0,01
	e_{ij}	0,02	0,00	47,64	p<0,01
Ancho de banda	u_{0j}	0,24	0,03	7,46	p<0,01
	e_{ij}	0,61	0,01	47,71	p<0,01
Frecuencia central	u_{0j}	0,18	0,02	7,14	p<0,01
	e_{ij}	0,56	0,01	47,70	p<0,01
F. de pico de energía	u_{0j}	0,22	0,03	6,80	p<0,01
	e_{ij}	0,53	0,01	47,49	p<0,01

Tabla III-8: Estimaciones de los efectos fijos (efecto del área), efectos aleatorios (efecto de las canciones) y su significación para todos los parámetros acústicos medidos en los pulsos de 20 Hz.

La proporción de la varianza de los parámetros acústicos explicada por el área de estudio puede ser estimada mediante un equivalente del estadístico R^2 en los modelos de regresión, llamado coeficiente pseudo- R^2 , comparando las estimaciones de los parámetros de covarianza del modelo nulo y del modelo ajustado, que incluye el área (Snijders y Bosker, 1999). Las estimaciones de los valores de pseudo- R^2 se resumen en la tabla III-9.

Variable dependiente	Parámetro	Varianza	pseudo-R^2
Intervalo entre pulsos	$\hat{\sigma}_u^2$ m. nulo	0,98	0,96
	$\hat{\sigma}_u^2$ m. ajustado	0,04	
Duración del pulso	$\hat{\sigma}_u^2$ m. nulo	0,02	0,22
	$\hat{\sigma}_u^2$ m. ajustado	0,02	
Ancho de banda	$\hat{\sigma}_u^2$ m. nulo	0,85	0,72
	$\hat{\sigma}_u^2$ m. ajustado	0,24	
Frecuencia central	$\hat{\sigma}_u^2$ m. nulo	0,42	0,57
	$\hat{\sigma}_u^2$ m. ajustado	0,18	
Frecuencia de pico de energía	$\hat{\sigma}_u^2$ m. nulo	0,61	0,65
	$\hat{\sigma}_u^2$ m. ajustado	0,22	

Tabla III-9: Estimaciones de los valores de pseudo- R^2 a partir de las estimaciones de los parámetros de covarianza del modelo nulo y del modelo que incluye el área.

La proporción de la varianza de los parámetros acústicos explicada por el área de estudio oscila entre el 22 y el 96 %. Dado este efecto del área de estudio, se llevan a cabo comparaciones múltiples entre las diferentes áreas, utilizando la corrección de Bonferroni. Los resultados de este test se resumen en la tabla III-10.

Intervalo entre pulsos

Área 1	Área 2	Dif. de medias	Std. Error	Grados lib.	Nivel sig.
EST	PROV	-2,02	0,06	183,03	p<0,01
	COL	-1,77	0,06	162,74	p<0,01
	ALB	-0,16	0,06	161,08	0,04
	AZO	-0,13	0,05	174,41	0,15
PROV	COL	0,26	0,06	172,01	p<0,01
	ALB	-2,18	0,05	171,90	p<0,01
	AZO	-2,16	0,05	187,29	p<0,01
COL	ALB	-1,92	0,06	152,36	p<0,01
	AZO	-1,90	0,06	163,58	p<0,01
ALB	AZO	-0,03	0,05	161,82	1

Duración del pulso

Área 1	Área 2	Dif. de medias	Std. Error	Grados lib.	Nivel sig.
EST	PROV	0,10	0,03	165,07	0,01
	COL	-0,02	0,04	167,31	1
	ALB	0,01	0,03	180,97	1
	AZO	-0,10	0,03	173,47	p<0,01
PROV	COL	-0,12	0,04	159,83	0,02
	ALB	-0,09	0,03	165,54	0,04
	AZO	-0,20	0,03	159,84	p<0,01
COL	ALB	0,03	0,04	167,57	1
	AZO	-0,08	0,04	163,70	0,281
ALB	AZO	-0,11	0,03	173,66	p<0,01

Frecuencia central

Área 1	Área 2	Dif. de medias	Std. Error	Grados lib.	Nivel sig.
EST	PROV	-0,37	0,11	158,48	p<0,01
	COL	-0,16	0,13	161,57	1
	ALB	-0,10	0,10	181,14	1
	AZO	-1,24	0,10	170,27	p<0,01
PROV	COL	0,21	0,14	151,73	1
	ALB	0,27	0,11	160,66	0,16
	AZO	-0,87	0,11	152,24	p<0,01
COL	ALB	0,06	0,14	162,96	1
	AZO	-1,08	0,13	157,27	p<0,01
ALB	AZO	-1,14	0,10	172,42	p<0,01

Ancho de banda

Área 1	Área 2	Dif. de medias	Std. Error	Grados lib.	Nivel sig.
EST	PROV	0,96	0,12	164,52	p<0,01
	COL	0,76	0,15	167,63	p<0,01
	ALB	-0,77	0,12	186,10	p<0,01
	AZO	-1,05	0,11	175,75	p<0,01
PROV	COL	-0,21	0,16	158,04	1
	ALB	-1,73	0,13	166,23	p<0,01
	AZO	-2,01	0,12	158,25	p<0,01
COL	ALB	-1,53	0,15	168,71	p<0,01
	AZO	-1,80	0,15	163,30	p<0,01
ALB	AZO	-0,28	0,12	177,33	0,18

Frecuencia de pico de energía

Área 1	Área 2	Dif. de medias	Std. Error	Grados lib.	Nivel sig.
EST	PROV	-0,82	0,12	135,38	p<0,01
	COL	-0,54	0,14	137,93	p<0,01
	ALB	-0,58	0,11	152,93	p<0,01
	AZO	-1,65	0,11	144,51	p<0,01
PROV	COL	0,29	0,15	130,09	0,58
	ALB	0,24	0,12	136,70	0,42
	AZO	-0,83	0,12	130,23	p<0,01
COL	ALB	-0,04	0,15	138,76	1
	AZO	-1,12	0,15	134,37	p<0,01
ALB	AZO	-1,08	0,11	145,72	p<0,01

Tabla III-10: Resumen de las comparaciones múltiples entre áreas con la corrección de Bonferroni para los diferentes parámetros acústicos.

Los resultados de las comparaciones múltiples entre las diferentes áreas para el intervalo entre pulsos permiten observar que no hay diferencias significativas entre las áreas Alborán, Estrecho de Gibraltar y Azores pero que estas difieren significativamente de Columbretes y cuenca Provenzal. Este patrón es muy similar para el ancho de banda, siendo estos los dos parámetros acústicos de mayor efecto del área de estudio (pseudo-R²). Las áreas de cuenca Provenzal y Columbretes se agrupan para el caso del ancho de banda pero no para el intervalo entre pulsos. Los resultados para el

resto de parámetros acústicos no permiten obtener una agrupación clara de las áreas de estudio.

El análisis estadístico de los valores medios de intervalo entre pulsos permite concluir que existen dos tendencias claramente definidas, una entorno a los 15 segundos para las áreas estrictamente mediterráneas (cuenca Provenzal y Columbretes) y otra entorno a los 13 segundos para las áreas Atlánticas (Azores, Estrecho de Gibraltar y Alborán). La figura III-14 muestra los valores medios y su varianza para cada área de estudio donde se observan las dos tendencias.

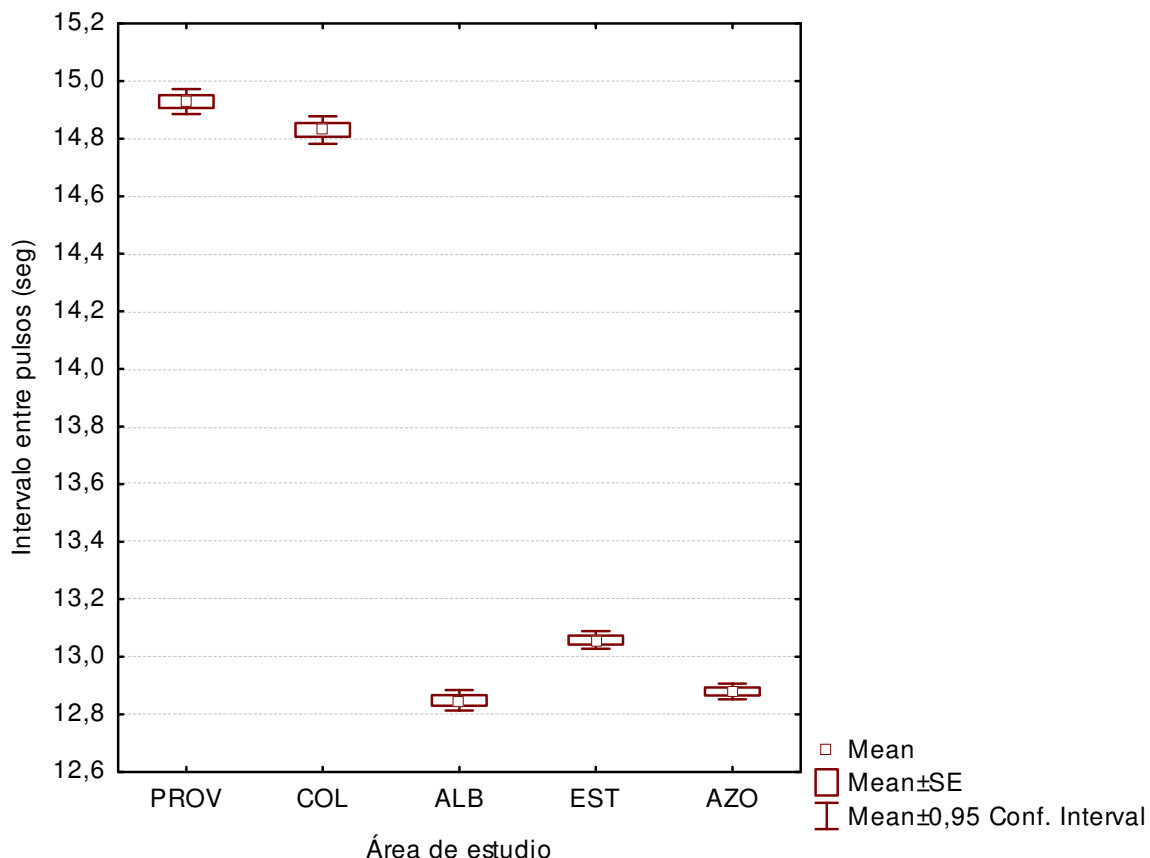


Figura III-14: Diagrama de cajas mostrando el valor medio del intervalo entre pulsos, el error estándar y el intervalo de confianza del 95 % de las diferentes áreas de estudio.

En base a los resultados del análisis del intervalo entre pulsos que agrupa las áreas de estudio en dos conjuntos, uno de carácter Atlántico y otro Mediterráneo, las diferencias en los demás parámetros acústicos se analizaron agrupándose de esta misma manera. Se calculó el valor medio y varianza de los parámetros acústicos para cada canción de cada área y se analizaron las posibles diferencias de estos valores mediante un ANOVA de un factor. Se analizó la normalidad y homocedasticidad de los datos observando que no siguen una distribución normal y todos salvo el conjunto de datos de la frecuencia de pico de energía presentan una varianza homogénea. Como el tamaño muestral es grande ($n_{\text{canciones}} = 197$), según el teorema del límite central (Grinstead y Snell, 1997) puede asumirse que la distribución tiende a la normalidad. Estos resultados se muestran en la tabla III-11. Los resultados del ANOVA se resumen en la tabla III-12 y se representan en la figura III-15.

Test de normalidad (Kolmogorov-Smirnov)		
Parámetro acústico	K-S d	Nivel sig.
Duración	0,12178	< 0,01
Ancho de banda	0,11103	< 0,05
Frecuencia central	0,17541	< 0,01
Frecuencia de pico de energía	0,1309	< 0,01

Test de homocedasticidad (Levene)		
Parámetro acústico	F	Nivel sig.
Duración	0,5161	0,473
Ancho de banda	0,0354	0,851
Frecuencia central	0,3351	0,563
Frecuencia de pico de energía	4,4894	< 0,05

Tabla III-11: Test de normalidad y homocedasticidad de los datos de los parámetros acústicos agrupados en dos conjuntos de áreas, uno Atlántico y otro Mediterráneo.

Parámetro acústico		SS	G.I.	MS	F	Nivel sig.
Duración	Intercept	4930,88	1	4930,88	9239,95	< 0,01
	ATL vs MED	89,84	1	89,84	168,36	< 0,01
	Error	103,53	194	0,53		
Ancho de banda	Intercept	4930,88	1	4930,88	9239,95	< 0,01
	ATL vs MED	89,84	1	89,84	168,36	< 0,01
	Error	103,53	194	0,53		
Frecuencia central	Intercept	71372,65	1	71372,65	129151,24	< 0,01
	ATL vs MED	0,78	1	0,78	1,41	0,24
	Error	107,21	194	0,55		
Frecuencia de pico de energía	Intercept	70364,30	1	70364,30	84918,94	< 0,01
	ATL vs MED	0,01	1	0,01	0,01	0,91
	Error	160,75	194	0,83		

Tabla III-12: Resumen de los resultados del ANOVA de un factor de los parámetros acústicos entre los conjuntos de áreas Atlántico y Mediterráneo.

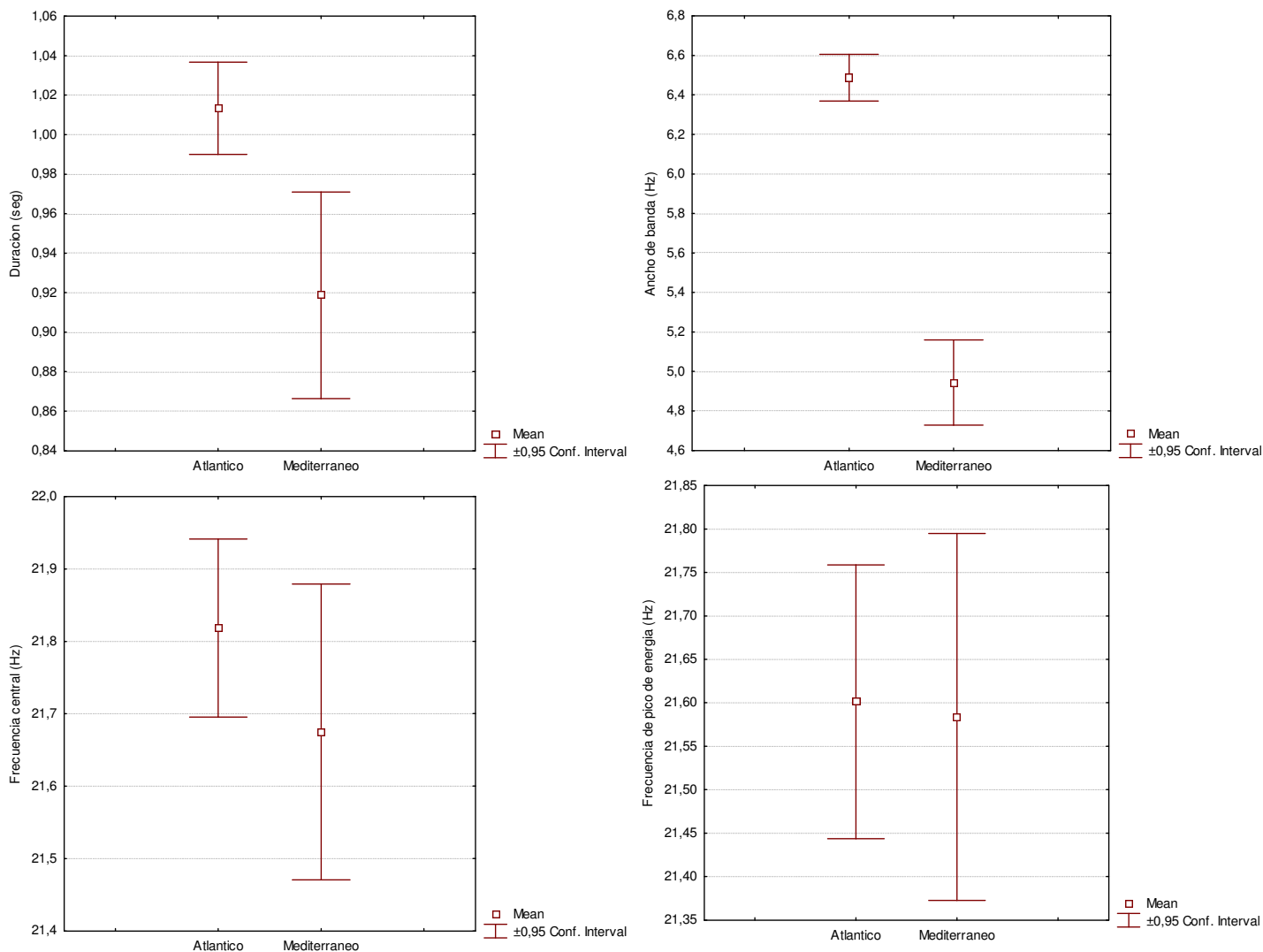


Figura III-15: Diagrama de cajas representado la media e intervalos de confianza del 95 % de cada parámetro acústico entre los conjuntos de áreas Atlántico y Mediterráneo.

En este caso, el ancho de banda pero también la duración del pulso, presentan diferencias altamente significativas entre los conjuntos de áreas Atlántico y Mediterráneo. El efecto del área en la frecuencia central así como en la frecuencia de pico de energía, a pesar de ser altamente significativo en todas las áreas como indica la estima del efecto fijo, no permite agrupar las áreas atlánticas y las mediterráneas en dos conjuntos, como queda expresado en los resultados del test de Bonferroni del modelo mixto y del ANOVA de un factor.

Finalmente, con el fin de explorar con más detalle el efecto del área sobre los parámetros acústicos, en especial sobre los que no permiten agrupar las áreas atlánticas y las mediterráneas en dos conjuntos, se analizaron posibles tendencias en los valores de los parámetros acústicos entre áreas mediante un análisis de correlación lineal simple. Los valores medios de todas las canciones se compararon entre áreas de estudio ordenadas por longitud, es decir de carácter más Atlántico a carácter más Mediterráneo. La tabla III-13 resume los resultados del análisis de correlación lineal simple y la figura III-16 los ajustes de las curvas de regresión para cada parámetro acústico.

Parámetro acústico	Duración	Ancho de banda	Frecuencia central	Frecuencia de pico de energía
r	-,3716	-,6386	-,3385	-,2002
Nivel de sig.	p<0,01	p<0,01	p<0,01	p<0,01

Tabla III-13: Resumen de los resultados del análisis de correlación linear simple de los valores medios de todas las canciones entre áreas de estudio.

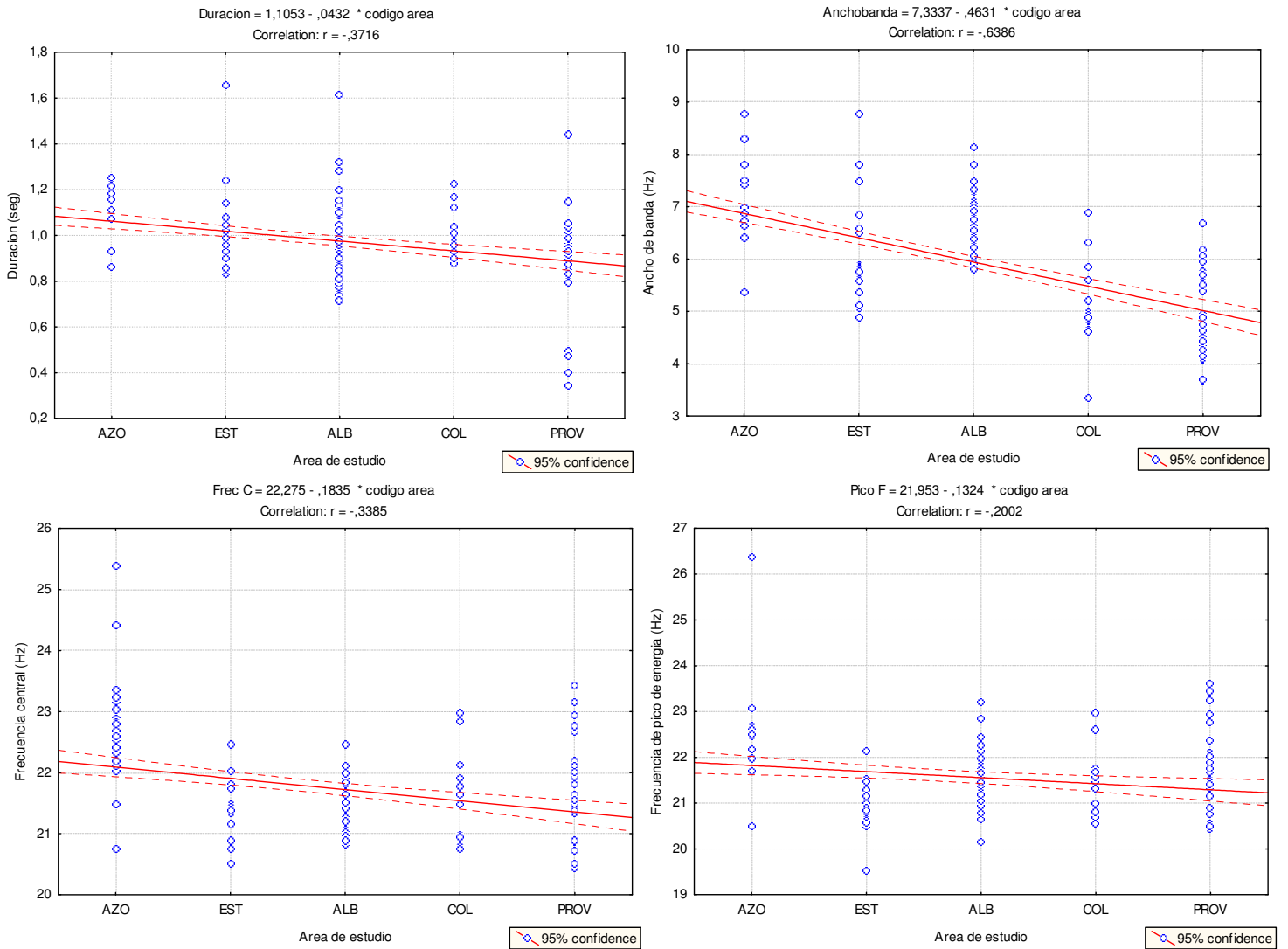


Figura III-16: Ajustes de las curvas de regresión de las correlaciones estudiadas entre los diferentes parámetros acústicos y las áreas de estudio.

4.4.1 Casos de breves detecciones

En dos casos, el tamaño muestral de los pulsos detectados en áreas de estudio resultó demasiado pequeño como para ser incluido en los análisis comparativos. Sin embargo, los valores obtenidos en los parámetros acústicos medidos en estos casos son relevantes y se incluyen en esta sección.

La primera detección acústica breve de un rorcual común fue identificada en el canal de Ibiza el 24 de junio de 2007 durante 14 minutos (de 21:46 a 22:00). Se trató de dos secuencias consecutivas que incluyeron pulsos de 20 Hz y pre-pulsos. Esta fue la única detección de todo el periodo de fondeo de 2856 horas de grabación. Se obtuvieron un total de 23 pulsos de 20 Hz de los cuales sólo en 8 se pudo calcular el intervalo entre pulsos y en 13 los restantes parámetros acústicos. La tabla III-14 resume los resultados de los parámetros acústicos de estas secuencias de pulsos.

	Intervalo entre pulsos (seg)	Duración (seg)	Frecuencia central (Hz)	Ancho de banda (Hz)	Frecuencia pico energía (Hz)
Media	11,73	1,26	21,63	6,41	21,33
Error estd.	0,46	0,06	0,22	0,24	0,22

Tabla III-14: Resultados de los parámetros acústicos medidos en 23 pulsos detectados en el canal de Ibiza el 24 de junio de 2007.

El valor medio del intervalo entre pulsos de estas secuencias es más cercano al obtenido para las regiones atlánticas que las mediterráneas. La duración de los pulsos es superior a la de todas las demás áreas de estudio por lo que no parece ajustarse a la tendencia descrita. La frecuencia central y frecuencia de pico de energía se encuentran dentro de la variabilidad descrita por las demás áreas de estudio pero tampoco parecen marcar ninguna tendencia geográfica. Por último, el ancho de banda se encuentra dentro de la variabilidad descrita por las áreas de carácter Atlántico, que no corresponde con su situación geográfica. Comparando el periodo de detección entre las dos unidades MARU fondeadas en esta área, se aprecia que la detección se inició 20 segundos antes en la unidad situada al sur del área de estudio, indicando que el rorcual se encontró en esta dirección del área de estudio durante el periodo de detección.

La segunda detección breve de un rorcual común fue identificada en la isla de Alborán el 31 de agosto de 2007. Se detectó un rorcual común durante 40 minutos (de 3:49 a 5:31 am). Las secuencias incluyeron pulsos de 20 Hz y pre-pulsos. Esta fue la única detección de todo el periodo de fondeo de 3572 horas. Se obtuvieron un total de 41 pulsos detectados de los cuales sólo en 13 se pudo calcular el intervalo entre pulsos sin ser viable la medición de los restantes parámetros acústicos por la baja calidad de las señales registradas. El intervalo entre pulsos medio obtenido en estas secuencias fue de 11,99 segundos con un error estándar de 0,55 segundos. El valor medio del intervalo entre pulsos de estas secuencias es más cercano al obtenido para las regiones atlánticas que las mediterráneas. Comparando el periodo de detección entre las dos unidades MARU fondeadas en esta área, se aprecia que la detección se inició 2 minutos antes en la unidad situada al este del área de estudio, indicando que el rorcual se encontró en esta dirección del área de estudio durante el periodo de detección.

5. Discusión

Los resultados obtenidos con las detecciones acústicas de rorcuales comunes en las 7 áreas de estudio tanto en el mar Mediterráneo como en el océano Atlántico, junto con la comparación de características acústicas de los sonidos registrados han permitido identificar dos poblaciones de rorcuales comunes claramente diferenciadas.

La ausencia de rorcuales comunes en el canal de Ibiza durante el inicio del verano y presencia de estos en la cuenca Provenzal y archipiélago de las islas Columbretes al final del verano coincide con los datos bien documentados acerca de la concentración de esta especie en la cuenca liguro-tirreno-provenzal durante la época de máxima productividad primara de esta región y su dispersión hacia otras áreas tras este periodo (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2003). El intervalo entre pulsos de 20 Hz identificado en estas áreas es de aproximadamente 15 segundos (ver tabla III-5 y figura III-14), coincidiendo con la única descripción sobre los parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz del rorcual común Mediterráneo, en el mar de Liguria (Clark *et al.* 2002), lo que permite confirmar que los rorcuales detectados en estas áreas de estudio son los mismos que los observados en la cuenca liguro-tirreno-provenzal.

La presencia de rorcuales comunes en el mar de Alborán y Estrecho de Gibraltar podría deberse al desplazamiento de rorcuales mediterráneos que al terminar su época de alimentación en la cuenca liguro-tirreno-provenzal, se dispersen hacia el sur hasta alcanzar la región más occidental del mar Mediterráneo, llegando incluso a cruzar el Estrecho de Gibraltar. Esta hipótesis ha sido planteada por algunos autores (Guinet *et al.* 2005) y ha servido de base para interpretaciones similares en estudios posteriores (ej. Cotté *et al.*, 2009; Gauffier *et al.*, 2009).

Sin embargo, el intervalo entre pulsos identificado en el mar de Alborán y Estrecho de Gibraltar entorno a los 13 segundos contradice esta hipótesis y las interpretaciones de los estudios posteriores. Este intervalo coincide con el obtenido en las áreas Atlánticas del cabo de Espartel y archipiélago de las islas Azores (ver tabla III-5 y figura III-14) y no difiere estadísticamente de estos. El análisis de comparaciones múltiples entre las diferentes áreas utilizando la corrección de Bonferroni agrupa las áreas de la isla de Alborán y el Estrecho de Gibraltar con las demás áreas Atlánticas y no con las Mediterráneas, que a su vez se agrupan por separado (ver tabla III-10).

El área de las islas Azores está ubicada en pleno área de distribución de la población del rorcual común del Atlántico noreste (Donovan, 1991) por lo que no hay duda de que los parámetros acústicos identificados en esta área se corresponden con los de esta población. Además, estudios del rorcual común en otras regiones del hemisferio norte del océano Atlántico en los que se han medido parámetros acústicos de sus sonidos demuestran que el intervalo entre pulsos de 20 Hz es de 11-13 segundos (Hatch y Clark, 2004) y 9-12 segundos para el Atlántico noroeste (Delarue *et al.* 2009). Estos resultados confirman que los rorcuales comunes detectados en el Estrecho de Gibraltar y mar de Alborán pertenecen a una población Atlántica, probablemente de la región noreste.

Contando con los resultados obtenidos sobre los tipos de señales detectadas podemos confirmar que los rorcuales comunes que entran al mar de Alborán desde el océano Atlántico durante el invierno pertenecen a la población noreste, ya que los pulsos de

135-140 Hz detectados en las áreas del Cabo de Espartel, Estrecho de Gibraltar e isla de Alborán han sido descritos como exclusivos del repertorio de la población de rorcual común del Atlántico noreste (Hatch y Clark, 2004) y con más precisión por Clark y Gagnon (2004) en esta misma población pero sólo por encima del paralelo 55° norte. También se identificaron canciones conteniendo exclusivamente pre-pulsos en cuatro ocasiones en el área del Estrecho de Gibraltar. Este comportamiento ha sido descrito únicamente por Clark y Gagnon (2004) en las regiones de mayor latitud del océano Atlántico norte.

Por lo tanto, los resultados del análisis de los parámetros acústicos confirman que la población de rorcuales comunes identificada en el mar de Alborán y Estrecho de Gibraltar pertenece a la población del Atlántico noreste y que esta población tiene un área de distribución que incluye el Estrecho de Gibraltar y mar de Alborán dentro del mar Mediterráneo, al menos durante el invierno.

Por otro lado, estos resultados también permiten confirmar que la población mediterránea no parece utilizar el mar de Alborán ni el estrecho de Gibraltar a lo largo del año, lo que implica que el límite entre ambas poblaciones y su posible área de solapamiento, se encuentra dentro del mar Mediterráneo, más al este de la isla de Alborán.

El análisis estadístico de los valores del intervalo entre pulsos demuestra que el efecto del área geográfica explica un 96 % de las diferencias observadas a pesar de existir considerable varianza dentro de las áreas y las canciones estudiadas. Desde el punto de vista estadístico, este porcentaje es extremadamente alto para ser explicado por un solo factor (Dytham, 1999), lo que indica que desde el punto de vista biológico, la emisión de pulsos de 20 Hz de forma precisa a intervalos concretos presenta una muy importante significación biológica. Teniendo en cuenta que la comunicación entre rorcuales en el océano puede alcanzar enormes distancias debido a las características acústicas de las señales que emiten (Payne y Webb, 1971) y que estas señales mientras recorren enormes distancias sufren una degradación importante por efecto de la pérdida por propagación (Urlick, 1983), cabe esperar que la información de mayor significado biológico se codifique en función de los intervalos de un conjunto de señales más que en las propias señales como ventaja adaptativa, puesto que los intervalos entre señales sufren mínima distorsión ambiental (Morton, 1975). Esta característica en la comunicación basada en los aspectos temporales de secuencias de señales ha sido propuesta para otro cetáceo, el cachalote (*Physeter macrocephalus*) por André y Kamminga (2000). Los autores desarrollan esta hipótesis sugiriendo que la producción de pulsos consecutivos por un individuo sigue una estructura rítmica única y en sincronía con la del grupo social al que pertenece. Cada grupo social presenta una estructura polirrítmica que se diferencia de la de otros grupos y que además facilita su cohesión social.

El análisis del resto de características acústicas de los pulsos de 20 Hz no ha permitido obtener resultados tan determinantes como en el caso del intervalo entre pulsos. Los resultados del análisis multinivel indican que los parámetros acústicos medidos no son muy estables en las secuencias de pulsos de 20 Hz de un mismo área, de hecho entre el 43 y el 58 % de la variabilidad observada en estos parámetros se debe a diferencias entre canciones independientemente del efecto del área geográfica (ver tabla III-7).

Pero a pesar de que no sean tan estables como el intervalo entre pulsos, se ha identificado un efecto del área geográfica altamente significativo para todos ellos en todas las áreas de estudio. El efecto del área geográfica explica entre un 22 y un 72 % de la variabilidad observada en estos parámetros acústicos en comparación con la observada entre canciones (ver tabla III-9).

Examinando este efecto, no parece que exista una diferenciación aparente entre las áreas mediterráneas y las atlánticas como puede observarse en la tabla III-10, salvo en el caso del ancho de banda, el cual sugiere un patrón paralelo al identificado con el intervalo entre pulsos, reuniendo las áreas de estudio en dos conjuntos, uno incluyendo a la población mediterránea en la cuenca Provenzal y el archipiélago de las islas Columbretes y otro a la población atlántica en la isla de Alborán y archipiélago de las islas Azores. En este caso, el área del Estrecho de Gibraltar que no debería presentar diferencias con los dos anteriores, presenta una significatividad de $p = 0,038$ cercana al valor crítico respecto al área de la isla de Alborán. Teniendo en cuenta que este análisis estadístico asume que las varianzas de las variables son homogéneas y conociendo que esta asunción no se cumple, podría ignorarse esta significatividad sin riesgo de cometer un error del tipo I. Sin embargo este no es el caso para las diferencias resaltadas por el test de Bonferroni entre las áreas del Estrecho de Gibraltar y archipiélago de las islas Azores, que son altamente significativas y no pueden ser ignoradas. No obstante, esta diferencia no necesariamente implica que ambas áreas geográficas presenten poblaciones de rorcuales diferentes ya que los parámetros acústicos estudiados pueden estar sometidos a diferentes niveles de presión ambiental y por tanto no tienen porqué ser perfectamente paralelos en sus tendencias entre áreas de estudio. Es posible que el área del Estrecho de Gibraltar presente algún factor ambiental que implique cambios en el ancho de banda de los pulsos de 20 Hz de los rorcuales.

Agrupando los resultados de todos los parámetros acústicos en estos dos conjuntos, uno que representa a las áreas estrictamente mediterráneas (islas Columbretes y cuenca Provenzal) y otro a las áreas en las que se han identificado rorcuales de origen Atlántico (islas Azores, Estrecho de Gibraltar e isla de Alborán) y comparando las medias de cada canción entre conjuntos, puede observarse que el ancho de banda y la duración del pulso presentan diferencias altamente significativas entre conjuntos (ver tabla III-12 y figura III-15). Sin embargo, para el caso de la duración del pulso, la variabilidad que existe dentro de ambos conjuntos impide que estos puedan agruparse correctamente como puede observarse con los resultados de las comparaciones múltiples, por lo que la significatividad de este análisis para la duración del pulso es cuestionable.

Ordenando las áreas de estudio por longitud geográfica, o lo que es lo mismo por su carácter más atlántico a más mediterráneo, se detecta una correlación altamente significativa para los 4 parámetros acústicos con una tendencia negativa (ver tabla III-13 y figura III-16). La tendencia descrita por este análisis sugiere que la duración de los pulsos de 20 Hz, el ancho de banda, la frecuencia central y la frecuencia de pico de energía son menores en áreas de carácter Mediterráneo que en áreas de carácter Atlántico. El ancho de banda es el parámetro cuya tendencia es más pronunciada. Tanto su valor medio (tabla III-6), su varianza entre áreas (tabla III-9) como su tendencia geográfica (figura III-16), diferencian claramente las áreas de presencia de rorcuales mediterráneos y atlánticos, por tanto este parámetro puede considerarse como otra característica acústica que permite la diferenciación entre ambas poblaciones. De hecho, el estudio realizado por Hatch y Clark (2004) con secuencias de pulsos de

rorcual común de 11 áreas geográficas del océano Pacífico y océano Atlántico demostró que el intervalo entre pulsos de 20 Hz y el ancho de banda fueron variables suficientes para clasificar correctamente el 82 % de las secuencias analizadas.

Las secuencias de pulsos emitidas por el rorcual común son más pronunciadas durante el periodo de reproducción de la especie, por tanto su función comunicativa se asocia al comportamiento sexual (Watkins, 1987; Moore *et al.*; 1998). Se ha descrito que sólo los machos producen largas series de pulsos a modo de display reproductivo (Croll *et al.*, 2002). Además, este comportamiento se produce en áreas de alta concentración de alimento, lo que implica que los machos utilizan este recurso para atraer hembras receptivas (Croll *et al.*, 2001; Croll *et al.*, 2002; Clark *et al.*, 2002; Clark y Gagnon, 2004). En este contexto, los parámetros acústicos de los pulsos emitidos por los rorcuales que no presenten diferencias entre poblaciones no tendrán significado reproductivo, ya que este tipo de estrategia sexual implica que las señales atractoras de larga distancia son cruciales para la identificación y selección de congéneres y por tanto para, el éxito reproductivo (Bradbury y Vehrencamp, 1998). Asimismo, las características acústicas que carecen de significado reproductivo, que no incorporan más valor a la señal o que no son indicadoras de la condición física del emisor, son más vulnerables a los efectos ambientales puesto que son prescindibles para esta función comunicativa. De igual modo, las características acústicas con mayor significado son imprescindibles y, por tanto, más robustas frente a los efectos ambientales (Ryan y Keddy-Hector, 1992).

Las características acústicas que actúen como descriptores no genéticos de la estructura poblacional de una especie han de ser más robustas a los factores ecológicos que las características acústicas que no tengan relación con la estructura poblacional. Aunque son pocos, algunos estudios de aves y ranas sustancian este argumento (Platz, 1989; Ryan *et al.* 1996; McCracken y Sheldon, 1997; Møers *et al.* 1999; Wright y Wilkinson, 2001).

Por lo tanto, la duración del pulso, la frecuencia media y la frecuencia de pico de energía, que son parámetros acústicos que presentan una tendencia general decreciente de áreas atlánticas a áreas mediterráneas y que, además, no presentan una diferencia significativa entre los conjuntos Atlántico y Mediterráneo, podrían considerarse como características acústicas que carecen de significado reproductivo. Estos parámetros acústicos serían más vulnerables a los efectos ambientales y, por tanto, la tendencia descrita podría estar regida por factores ambientales.

Las breves detecciones obtenidas en el área del canal de Ibiza en junio de 2007 y en el área de la isla de Alborán en agosto de 2007 permitieron obtener medidas de los parámetros acústicos (tabla III-14). Aunque el tamaño muestral es muy reducido, se pudo comprobar que el intervalo entre pulsos en los dos casos corresponde al definido para la población de rorcuales comunes del Atlántico noreste y el ancho de banda, que sólo pudo medirse en el caso del canal de Ibiza, también. Esta información es especialmente interesante por dos motivos: el primero porque se confirma la ausencia de rorcuales comunes mediterráneos en esta región de la cuenca occidental durante la época estival. Este hallazgo apoya la hipótesis migratoria propuesta por Marini *et al.* (1996a), los cuales proponen que la población de rorcuales mediterráneos se concentra en áreas de alimentación en altas latitudes de la cuenca oriental y occidental durante el verano y en áreas de reproducción en bajas latitudes junto a la costa africana durante el

invierno. El segundo motivo hace referencia a la presencia de rorcuales de origen atlántico en áreas mediterráneas en la época estival, complementando las detecciones invernales del mar de Alborán y estrecho de Gibraltar. La presencia continuada de rorcuales comunes de origen atlántico en la región occidental del mar Mediterráneo durante el invierno y esporádica durante el verano resalta la importancia de esta cuenca en la distribución de la población del atlántico noreste y obviamente del Estrecho de Gibraltar como único corredor entre cuencas marinas y único nexo entre poblaciones. El caso al sur del área de estudio del canal de Ibiza se convierte en la detección atlántica más oriental del trabajo y sugiere que estos no necesariamente limitan su entrada mediterránea al mar de Alborán, lo que implica que las posibilidades de solapamiento espacial y temporal entre ambas poblaciones sean todavía más probables de lo demostrado por los resultados de los fondeos invernales en el mar de Alborán.

En este sentido, el planteamiento de Guinet *et al.* (2005) y las posteriores interpretaciones de Cotté *et al.* (2009) y Gaufier *et al.* (2009) son interesantes. Cotté *et al.* (2009), estudiando la distribución de avistamientos de rorcuales comunes desde un ferry con ruta Marsella-Argelia y las condiciones oceanográficas, concluyen que la población de rorcuales comunes mediterráneos describe una fidelidad anual por la cuenca noroccidental del mar Mediterráneo, en particular el mar de Liguria, la cuenca Provenzal y el norte de la cuenca Balear, bajo un modelo de agregación estival y dispersión invernal coincidente con la dinámica del krill. El límite sur de la distribución de esta población está marcada por el frente norte Balear (Río *et al.*, 2007), el cual sólo traspasa un reducido porcentaje de la población que presenta hábitos de alimentación atlántica. Comparando esta interpretación con los resultados de este trabajo se observa una sorprendente similitud. Todas las detecciones acústicas de rorcuales comunes obtenidas al sur del frente norte Balear (canal de Ibiza, isla de Alborán, Estrecho de Gibraltar, cabo Espartel e islas Azores) han sido asociadas con la población del Atlántico noreste y todas las detecciones obtenidas al norte de este frente (islas Columbretes, cuenca Provenzal) han sido asociadas con la población mediterránea. Por tanto, parece que el límite de distribución entre la población mediterránea y la población del Atlántico noreste podría estar ubicado entorno al archipiélago Balear, al menos para la cuenca mediterránea occidental. Como sugieren Cotté *et al.* (2009), el frente norte Balear podría estar implicado en la definición de los límites de distribución de las poblaciones. El efecto de las condiciones oceanográficas en la distribución y dinámica de movimiento de los rorcuales comunes en el mar Mediterráneo ha sido bien documentado (Forcada *et al.*, 1996; Mouillot y Viale, 2001; Littaye *et al.*, 2004; Laran y Drouot-Dulau, 2007; Laran y Gannier, 2008; Azzelino *et al.*, 2008; Moulins *et al.*, 2008; Panigada *et al.*, 2008), demostrando que son muy sensibles a las características físicas del medio que habitan. Por esta razón, la definición de una barrera poblacional paralela a una barrera oceanográfica parece lógica. Esta hipótesis es más realista que la actual delimitación ubicada al sur de Portugal, en aguas atlánticas junto, al estrecho de Gibraltar, basada en una barrera arbitraria (IWC, 1992; 2007 y 2009; Cañadas *et al.*, 2005; Panigada *et al.*, 2005; Reeves y Notarbartolo di Sciara, 2006).

Cotté *et al.* (2009) definen el frente norte Balear como una barrera que atraviesa sólo un pequeño porcentaje de la población. Sin embargo, los resultados discutidos en el capítulo II contradicen esta hipótesis. El volumen de detecciones, el patrón estacional y el tipo de desplazamiento descrito en el área de las islas Columbretes demuestran que al finalizar el verano una proporción importante de la población de rorcuales mediterráneos se desplaza en dirección sur por esta zona. Estos resultados indican que

la barrera generada por el frente norte Balear muy probablemente no presente un carácter tan estricto como el propuesto por estos autores. Además, los autores no pueden confirmar la ausencia de rorcuales comunes en la cuenca Balear, puesto que no hubo esfuerzo de búsqueda en esta región. Basándose en resultados de telemetría satélite y análisis de isótopos estables en tejidos de ejemplares varados, Guinet *et al.*, (2005) proponen que una pequeña parte de la población mediterránea que sí traspasa el frente norte Balear presenta hábitos de alimentación atlántica.

Gaufier *et al.* (2009), estudiando avistamientos oportunistas y fotografías de diferentes fuentes en el estrecho de Gibraltar, concluye que los rorcuales comunes se observan desplazándose hacia el océano Atlántico en verano, pertenecen a la población mediterránea y que en algún momento durante el invierno deben volver a cruzar el estrecho de Gibraltar para regresar al mar Mediterráneo. Los autores indican que esta migración entre el mar Mediterráneo y el océano Atlántico es realizada principalmente por adultos y en menor proporción jóvenes y crías acompañadas de sus madres.

Los resultados del seguimiento acústico realizado en este trabajo contradicen este planteamiento y permiten proponer una interpretación diferente: es muy probable que el único rorcual común que se desplazó hasta el océano Atlántico de los ocho marcados con un transmisor satélite en la cuenca Provenzal y los tres ejemplares varados de las once muestras de tejido recolectadas en las costas francesas y españolas pertenecieran a la población del Atlántico noreste. Los animales observados migrando regularmente por el estrecho de Gibraltar, tanto adultos como inmaduros, son muy posiblemente rorcuales de esta misma población. Como ha quedado demostrado, la presencia de rorcuales comunes de la población atlántica noreste es común en el mar Mediterráneo, al menos durante los meses de invierno en el estrecho de Gibraltar y mar de Alborán. La detección de un ejemplar de esta población al sur del canal de Ibiza indica que estos no sólo limitan su entrada mediterránea al mar de Alborán, reforzando la nueva interpretación de los resultados de Guinet *et al.* (2005), Cotté *et al.* (2009) y Gaufier *et al.* (2009).

La información disponible acerca de la presencia de rorcuales comunes en el Estrecho de Gibraltar y áreas circundantes apoya la hipótesis de la entrada de rorcuales atlánticos en el mar de Alborán. Independientemente de si los autores la atribuyen a la población mediterránea o no, la tendencia de desplazamiento descrita en primavera-verano es en dirección oeste y en otoño-invierno en dirección este (Raga y Pantoja, 2004; Salazar-Sierra *et al.*, 2004; Gaufier *et al.*, 2009). Esta información coincide con los resultados acústicos obtenidos en la presente investigación, puesto que la presencia de sonidos emitidos por rorcuales comunes de la población noreste durante el invierno en el mar de Alborán implica que estos se desplacen hacia el este en otoño cruzando el Estrecho de Gibraltar para alcanzar el mar de Alborán. La ausencia de sonidos emitidos por rorcuales comunes en el mar de Alborán durante el verano implica que estos desalojan esta cuenca, desplazándose hacia el oeste en primavera y cruzando el estrecho de Gibraltar para volver al océano Atlántico.

En el rorcual común, las diferencias en ADN maternal y biparental son mayores cuanto mayor es la distancia geográfica entre poblaciones (Berubé, 1998; Palsbøll *et al.*, 2004), sin embargo, estudios que también han analizado ADN paternal no encontraron ninguna relación con la distancia geográfica (Hatch y Clark, 2004), lo que demuestra que los machos se dispersan mucho más que las hembras. Este patrón es común en

mamíferos que tienden hacia filopatrias dirigidas maternalmente, como el caso de muchos mamíferos marinos (Palumbi y Baker, 1994; Larsen et al. 1996).

Estudios comparativos entre las características genéticas de las poblaciones de rorcuales comunes del mar Mediterráneo y de la región norte del océano Atlántico sugieren un aislamiento genético a nivel de ADN mitocondrial (Bérubé et al. 1998) y un flujo genético periódico aunque reducido entre ambas poblaciones a nivel de ADN nuclear (Palsbøll *et al.*, 2004). Los autores indican que esta situación puede explicarse si el flujo genético entre poblaciones es mediado por individuos macho y si al menos dos hembras por generación son fertilizadas por machos de población opuesta. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en este trabajo, que demuestran que machos del Atlántico noreste pueden adentrarse en el mar Mediterráneo más allá del mar de Alborán alcanzando el contacto con rorcuales de población mediterránea.

Se desconoce hasta que punto el comportamiento acústico de los machos de rorcual común es genéticamente heredado o es dependiente de factores no hereditarios como el efecto del ambiente. Durante el primer año de vida, el rorcual común se ve expuesto predominantemente a vocalizaciones de animales asociados al entorno de su madre que, según los estudios de ADN mitocondrial, es un entorno reducido. Sin embargo, a lo largo de su vida se verá expuesto a patrones acústicos muy diferentes, ya que estos sonidos son capaces de viajar grandes distancias. Además, la diversidad genética entre poblaciones a escalas oceánicas demuestran que los rorcuales comunes macho no sólo migran grandes distancias sino que aprovechan estos desplazamientos para reproducirse con éxito con hembras de poblaciones geográficamente distantes (Hatch y Clark, 2004). Es en estos casos en los que cabe cuestionarse si los rorcuales incorporan características acústicas a su comportamiento a partir de estímulos a los que se exponen cuando entran en contacto con otras poblaciones o si, por el contrario, mantienen las características propias de su población de origen. Ambas posibilidades son frecuentes en los sistemas de comunicación animal, dependiendo únicamente de la co-evolución de los intereses entre el emisor y el receptor (Bradbury y Vehrencamp, 1998). La comunicación entre el emisor y el receptor será honesta sólo si ambos tienen el mismo interés por la información transmitida (Krebs y Dawkins, 1984).

Estas estrategias reproductivas han sido bien estudiadas en otros taxones. En las aves y en los anuros existen ejemplos de ambas funciones, incluyendo la imitación como ventaja reproductiva (Payne, 1982; Hafner y Petersen, 1985; Wright y Wilkinson, 2001) o la honestidad como mecanismo de aislamiento entre poblaciones simpátricas (Blair, 1964; Martens, 1996; Grant y Grant, 1996).

Existen sólo dos casos de imitación o aprendizaje vocal en misticetos, uno bien documentado es el de la yubarta (*Megaptera novaeangliae*) (Win y Win, 1978; Payne y Payne, 1985) en la que el canto cambia gradualmente durante la época de reproducción y todos los miembros de la población adquieren los cambios. El otro, anecdótico, ocurre en la ballena azul (*Balaenoptera musculus*): Stafford y Moore (2005) describieron el canto de un individuo que incorporaba características de las dos poblaciones bien diferenciadas acústicamente que habitualmente se solapan en la misma área de alimentación en el golfo de Alaska. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se puede confirmar si la incorporación de elementos del canto de poblaciones vecinas genera ventajas reproductivas, por tanto, no hay evidencia de esta estrategia reproductiva en ningún misticeto. En el caso de los odontocetos, la imitación se ha

descrito sólo en tres especies, el delfín mular (*Tursiops truncatus*), la beluga (*Delphinapterus leucas*) y la orca (*Orcinus orca*) (Rendell y Whitehead, 2001; Ford, 1991), sin poder definir cuál es su función en la estrategia reproductiva de estas especies.

En el rorcual común hay evidencia de cambios estacionales en algunas características acústicas, sin embargo estas variaciones son de reducidas proporciones comparándolas con las observadas entre poblaciones diferentes y son menores durante la época de reproducción (Hatch y Clark, 2004; Clark y Gagnon, 2004; Delarue *et al.*, 2009). Además, el display vocal del sexo masculino es más propicio a divergir en áreas geográficas donde los machos son física o acústicamente simpátricos (Hatch y Clark, 2004). Por tanto, cabe esperar que el comportamiento acústico de los machos sea honesto, especialmente en épocas o en áreas de solapamiento de poblaciones. Sin embargo, este carácter no puede confirmarse con los conocimientos actuales sobre el comportamiento acústico del rorcual común.

Si la estrategia seguida por los machos fuera la de adaptar su comportamiento acústico con el fin de atraer tanto a hembras de su población como de las de poblaciones vecinas, optimizando su éxito reproductivo, la interpretación de los resultados obtenidos en este trabajo sería muy distinta. Los machos de la población mediterránea que presentan un intervalo entre pulsos de 15 segundos en las regiones noroccidentales durante el verano podrían modificar su comportamiento acústico gradualmente al inicio del otoño durante su migración hacia regiones sudoccidentales y adoptar un intervalo de 13 segundos durante el periodo de reproducción, como el descrito en la población del Atlántico noreste, colindante con la población mediterránea. En este caso, las detecciones obtenidas en el mar de Alborán, Estrecho de Gibraltar e incluso cabo de Espartel y archipiélago de las islas Azores durante la época de reproducción podrían reflejar la existencia de una combinación de machos de ambas poblaciones en presencia de hembras atlánticas. En este caso la población mediterránea se caracterizaría acústicamente por dos tipos de canción diferentes.

Sin embargo, esta hipótesis no se sostiene si se contrasta con los conocimientos actuales sobre la genética, el comportamiento acústico y el patrón de observaciones del rorcual común en la región de estudio:

1- Los resultados de los estudios genéticos que analizan el grado de aislamiento de la población mediterránea contradicen la falta de honestidad en la comunicación acústica de larga distancia entre rorcuales comunes Mediterráneos y Atlánticos. Estos resultados indican que hay diferencias en ADN mitocondrial suficientes como para demostrar el aislamiento demográfico con poblaciones del Atlántico norte (Bérubé *et al.*, 1998) y las diferencias en ADN nuclear demuestran que el flujo genético mediado por la dispersión de los machos es muy moderado (Palsbøll *et al.*, 2004). Si el aislamiento demográfico es tan marcado y el intercambio entre poblaciones es tan reducido, la imitación del canto no puede estar sometida a una fuerte presión selectiva que la favorezca.

2- Tanto en el océano Atlántico como en el océano Pacífico, el display vocal del sexo masculino es más propicio a diverger en áreas geográficas donde los machos son física o acústicamente simpátricos (Hatch y Clark, 2004). Estos resultados contradicen la posibilidad de que rorcuales de dos poblaciones vecinas, incluso solapadas, como son la

mediterránea y la atlántica noreste presenten el mismo intervalo entre pulsos de 13 segundos.

3- Esta sería la primera vez en un misticeto donde se describe el cambio de un tipo de canción a otra bajo un efecto geográfico para una misma población, lo que haría crítica e incluso cuestionable la identificación de poblaciones de misticetos por sus características acústicas. Sin embargo, esta técnica ha demostrado ser útil para la descripción de poblaciones y especies en aves (Baptista, 1975; Catchpole y Slater, 1995; Martens, 1996; Wright, 1996; Irwin *et al.*, 2001), mamíferos terrestres (Maeda y Matasaka, 1987; Gautier, 1988; Bearder, 1999; Kingston y Rossiter, 2004; Siemers y Schnitzler, 2004), anfibios (Ryan, 1990) e insectos (Wells and Henry, 1998; Gray and Cade, 2000). Además, en varias especies de cetáceos se han permitido identificar discontinuidades demográficas o reproductivas que son demasiado recientes para quedar reflejadas genéticamente, pero que son importantes de cara a la gestión de los stocks (Cerchio *et al.*, 2001, Hatch y Clark, 2004, McDonald *et al.*, 2006; Rendell y Whitehead, 2003).

4- El flujo de rorcuales comunes observado en el Estrecho de Gibraltar no concuerda con un intercambio entre la población mediterránea y atlántica, sino más bien con un paso estacional de rorcuales atlánticos en ambas direcciones (Raga y Pantoja, 2004; Salazar-Sierra *et al.*, 2004).

5- Cabría esperar que el cambio de canciones típicas de cada población a canciones “imitando” la población vecina ocurriese de forma gradual, geográfica o estacionalmente, sin embargo, los datos acústicos obtenidos en este trabajo presentan diferencias drásticas de un área a otra. El 100 % de las canciones analizadas en cada área de estudio presentaron o bien un intervalo entre pulsos de 15 segundos o bien de 13 segundos: no se observaron situaciones intermedias.

Por tanto, los resultados obtenidos en este trabajo son acordes con un comportamiento acústico en el que es patente la identidad de cada población. La interpretación de estos resultados permite identificar claramente dos poblaciones de rorcual común en el mar Mediterráneo. Aunque no se ha podido definir el grado de solapamiento entre ambas poblaciones, los resultados sugieren que los rorcuales mediterráneos no utilizan el mar de Alborán. Estos no se encuentran en esta área ni más al norte, en el canal de Ibiza, durante el verano coincidiendo con el periodo de concentración de los mismos en la cuenca liguero-tirreno-provenzal. La población de rorcuales comunes del atlántico noreste se introduce en el Mediterráneo y utiliza el mar de Alborán como área de invernada aunque la entrada no sólo se limita al invierno. Los fondeos fallidos en cabo de Begur y sur de Menorca impiden la posibilidad de identificar estos rorcuales en áreas más allá del canal de Ibiza.

Es obvio que la función o funciones del canto del rorcual común macho no están bien definidas y aún queda mucho por explorar en este contexto, pero la información actualmente disponible y los resultados de este trabajo apuntan a que el seguimiento acústico de las poblaciones permite establecer su identidad e identificar relaciones entre poblaciones. Dada la reducida extensión de la cuenca mediterránea comparada con las cuencas oceánicas donde habitan otras poblaciones de rorcuales comunes, es muy probable que la población mediterránea y la atlántica noreste presenten un solapamiento acústico a lo largo del año y por tanto facilidad para identificarse y localizarse. La

existencia de un marcado aislamiento genético entre poblaciones simpátricas sólo puede explicarse si existe una barrera reproductiva que impida el flujo genético (Bradbury y Vehrencamp, 1998), que en este caso sólo puede estar mediado por la señalización honesta de los machos. Por tanto, el seguimiento acústico, especialmente en la época de alimentación y reproducción, puede facilitar la identificación de los límites de distribución y posibles áreas de solapamiento para definir el grado de contacto entre ambas poblaciones.

La presencia de rorcuales comunes del atlántico noreste en el cabo Espartel, estrecho de Gibraltar y mar de Alborán durante el invierno confirma la hipótesis planteada en 1976 por Duguay y Vallon acerca de la entrada de rorcuales Atlánticos y parte de la hipótesis propuesta por Viale (1977, 1985) sobre el uso del mar Mediterráneo por dos poblaciones diferentes procedentes del océano Atlántico. La presencia de rorcuales de una de estas poblaciones procedente de Mauritania no puede descartarse ya que no hay descripciones acústicas de las vocalizaciones de rorcual común en esta región.

La convicción de que rorcuales atlánticos accedían al mar Mediterráneo por el estrecho de Gibraltar debió en parte ser fomentada por la abundante presencia de estos animales en el estrecho de Gibraltar y aguas atlánticas adyacentes. Estos fueron objeto de una muy fructífera industria ballenera con estaciones de proceso en tierra entre 1921 y 1936 y tras la guerra civil y 2ª guerra mundial al menos entre 1950 y 1953 (Sanpera y Aguilar, 1992). Se calcula que unos 7000 rorcuales comunes fueron capturados en esta área (Reilly *et al.*, 2008). Además, expediciones balleneras de buques extranjeros también operaron en esta área a lo largo del siglo XIX (Aguilar y Borrel, 2007). Ingebrigsten (1929) comenta que la caza de rorcual común en el área de Gibraltar fue estacional, mayoritariamente entre el fin de noviembre y el inicio de abril. Esta información coincide con el patrón de presencia obtenido entre noviembre y enero en las áreas del cabo Espartel, estrecho de Gibraltar e isla de Alborán, por tanto, es probable que los rorcuales detectados en estas áreas sean descendientes de la población intensamente explotada durante los dos siglos pasados. Para algunos autores, esta intensiva caza extirpó la población de rorcuales comunes de esta región (Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2003; Capham *et al.*, 1999; Palsbøll *et al.*, 2004) e incluso se ha propuesto que debido a esta circunstancia la existencia de este hábitat se perdió en la memoria cultural de la especie (Clapham y Hatch, 2000; Clapham *et al.*, 2008). Los resultados de este trabajo demuestran que contrariamente a estas interpretaciones, la presencia de rorcuales comunes en el área del estrecho de Gibraltar continúa siendo importante.

El análisis de los parámetros acústicos de las canciones registradas en el estrecho de Gibraltar y cabo Espartel permiten confirmar que sólo rorcuales atlánticos utilizan el estrecho durante el invierno. Los resultados obtenidos en el área de estudio de la isla de Alborán confirman que tampoco se detectaron rorcuales de origen Mediterráneo durante el verano y el otoño lo que sugiere que es improbable que estos utilicen el estrecho de Gibraltar en estos periodos del año. El único periodo que no ha sido cubierto acústicamente es la primavera. Los resultados de este trabajo no pueden descartar que en esta época del año los rorcuales mediterráneos tengan acceso al océano Atlántico a través del estrecho de Gibraltar. Pero dados los conocimientos bien fundamentados acerca de la concentración de esta especie en la cuenca Liguro-tirreno-provenzal iniciándose en primavera durante la época máxima productividad primaria de esta región (Notarbartolo di Sciara *et al.* 2003), es improbable que algunos rorcuales se

desplacen hacia el océano Atlántico en este periodo. Además, todo el margen este del talud continental de la península Ibérica (desde el norte de Cataluña hasta Andalucía) ha sido propuesto como corredor migratorio durante la primavera, permitiendo a los rorcuales desplazarse hacia su principal área de alimentación estival en Liguria desde áreas de invernada del sur del mar Mediterráneo (Raga y Pantoja, 2004). Un desplazamiento hacia el oeste en la región sur de la península Ibérica sería incompatible a estos resultados.

La unidad EAR del cabo de Espartel que no aportó datos impide que se pueda estudiar la dinámica de movimiento de los rorcuales atlánticos detectados en esta área próxima al estrecho. Esta información hubiera sido útil para poder explicar más precisamente el uso del estrecho de Gibraltar por rorcuales atlánticos, pero como se describe en el capítulo II, la presencia es continua a lo largo del invierno, cruzando el estrecho en ambas direcciones. Aunque la intensidad de tráfico marítimo en esta área fue problemática, se pudo confirmar que la presencia a ambos lados del estrecho de Gibraltar mantiene una relación moderada. Estos resultados confirman que el estrecho de Gibraltar y aguas atlánticas adyacentes no actúan exclusivamente como un corredor de entrada y salida al mar Mediterráneo sino que son propiamente parte del hábitat de invernada de esta población. Es muy probable que los rorcuales detectados acústicamente en esta región sean parte de la población superviviente de la intensiva caza ballenera desarrollada a lo largo del siglo XIX y XX.

La aplicación de técnicas acústicas para identificar diferencias en poblaciones de cetáceos donde con otras técnicas no se han obtenido resultados concluyentes ha sido útil en varias especies de misticetos y odontocetos como por ejemplo con yubartas (Cerchio et al., 2001), con ballenas azules (McDonald *et al.*, 2006), con cachalotes (Weilgart y Whitehead, 1997) y con orcas (Ford, 1991). En el caso del rorcual común, Hatch y Clark (2004) señalaron la utilidad de combinar estudios genéticos con acústicos y, recientemente, Gedamke (2009) ha demostrado que el seguimiento acústico en varias regiones del hemisferio sur ha permitido identificar 3 poblaciones diferentes. Los resultados obtenidos en todos estos trabajos han demostrado la importancia de identificar las diferentes poblaciones y sus relaciones con el fin de aplicar una gestión de conservación apropiada.

La actual descripción de los diferentes stocks que constituyen la población global de rorcuales comunes delinea el mar Mediterráneo como hábitat de una sola subpoblación. La falta de datos acerca de la estructura poblacional de esta especie a lo largo de la cuenca mediterránea confiere alta prioridad a estudios que puedan facilitar información de este tipo (IWC, 1992; 2007 y 2009; Cañadas *et al.*, 2005; Reeves y Notarbartolo di Sciara, 2006). El presente trabajo demuestra que la identidad de los rorcuales comunes detectados acústicamente en el mar Mediterráneo corresponde a la de dos poblaciones diferentes, una mediterránea y otra del Atlántico noreste. Este hallazgo tiene dos importantes implicaciones para la conservación del rorcual común en el mar Mediterráneo. Primero, la subpoblación mediterránea presenta un área de distribución más limitado del actualmente establecido, centrándose en la cuenca noroccidental por encima de la cuenca Balear durante el periodo estival y posiblemente dispersándose hacia regiones más al sur sin incluir la región más occidental de la cuenca durante el invierno. Segundo, dado el grado de aislamiento genético de esta subpoblación, el acceso de rorcuales de origen Atlántico al mar Mediterráneo implica que ambas poblaciones compiten por los recursos del nicho ecológico que ocupan en la

cuenca mediterránea. En este caso, el balance entre ambas poblaciones puede fácilmente verse alterado por diferencias de presión antrópica. Siendo el mar Mediterráneo uno de los ecosistemas marinos que sufre una pérdida de la biodiversidad más extrema (Adula y Linden, 2008), cabe esperar que la subpoblación de rorcuales comunes mediterráneos esté sometida a una presión antrópica mucho mayor que la población del Atlántico noreste. Este desequilibrio ya ha sido alertado mediante el análisis de contaminantes bioacumulados en sus tejidos (Fossi *et al.*, 2006; Aguilar *et al.*, 2002).

Es importante que los resultados aportados por este trabajo acerca de la estructura poblacional del rorcual común en el mar Mediterráneo y el uso del estrecho de Gibraltar se incorporen en la gestión de conservación de las poblaciones mediterráneas con el fin de optimizar los esfuerzos encaminados a mantener la supervivencia de esta especie.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten confirmar que es posible hacer un seguimiento acústico de los rorcuales comunes en el mar Mediterráneo y su relación con las aguas atlánticas adyacentes. Se han conseguido datos acerca de su presencia y sus características acústicas en aguas de cuatro países (Francia, España, Marruecos y Portugal), incluyendo una de las áreas más complejas desde el punto de vista logístico, el estrecho de Gibraltar.

Se han identificado dos patrones acústicos bien diferenciados dentro del mar Mediterráneo. El análisis de estos patrones demuestra que estos pertenecen a dos poblaciones diferentes, una mediterránea y otra del atlántico noreste. Los resultados obtenidos en las áreas de control (cuenca Provenzal para el Mediterráneo e islas Azores para el Atlántico) confirman que los patrones se corresponden con los de las poblaciones mediterránea y atlántica noreste. Además, otras referencias sobre las características acústicas de estas dos poblaciones coinciden con los patrones identificados en este trabajo.

Las características de los parámetros acústicos estudiados en este trabajo y los resultados obtenidos a través de ellos sugieren que la señalización a larga distancia empleada por el rorcual común macho mantiene la identidad poblacional incluso en áreas en las que hay un solapamiento acústico y puede existir un solapamiento espacial entre poblaciones. Este carácter del comportamiento acústico implica un sistema de comunicación honesta en el que los caracteres de identidad presentan alto significado reproductivo. Esta característica confiere mucha robustez al seguimiento acústico como marcador de poblaciones. Los caracteres que mejor diferencian las poblaciones estudiadas han sido el intervalo entre pulsos de 20 Hz del canto del rorcual común macho y el ancho de banda de estos pulsos. Las diferencias acústicas entre ambas poblaciones han sido del 93 % por tanto estos parámetros acústicos son de alto significado reproductivo para la especie.

Las características del comportamiento acústico de los rorcuales comunes presentan una variación geográfica muy marcada que ha permitido describir dos áreas de distribución diferentes dentro del mar Mediterráneo. La población mediterránea se

encontró en la región norte de la cuenca occidental hasta el oeste de las islas Baleares. No se detectaron rorcuales de esta población en el mar de Alborán ni estrecho de Gibraltar por lo que es improbable que la población mediterránea acceda al océano Atlántico. La población atlántica abarcó el cabo Espartel, estrecho de Gibraltar, mar de Alborán y en menor grado el canal de Ibiza. Esta población utilizó el estrecho de Gibraltar activamente y al menos parte de ella invernó en el mar de Alborán. No se detectaron rorcuales de esta población más al norte de las islas Baleares por lo que no se identificaron áreas de solapamiento entre ambas poblaciones, aunque es muy probable que estos puedan desplazarse más allá del archipiélago Balear.

La definición actual del stock de rorcuales comunes en el mar Mediterráneo tanto para la Comisión Ballenera Internacional (CBI), la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), así como para el acuerdo para la Conservación de Cetáceos del Mar Negro y Mar Mediterráneo (ACCOBAMS) incluye sólo una subpoblación demográficamente aislada del resto del Atlántico norte. Los resultados de este trabajo han demostrado que esta definición es incorrecta y sirven de base para una más precisa interpretación de la estructura poblacional de esta especie en el mar Mediterráneo. El área de distribución de la subpoblación mediterránea en la cuenca occidental es menor de lo actualmente considerado y el nicho ecológico que ocupa lo comparte con la población del Atlántico noreste. Estas son dos importantes implicaciones ecológicas para la conservación del rorcual común en el mar Mediterráneo.

Los resultados obtenidos acerca de la presencia de rorcuales comunes en las áreas del cabo de Espartel y estrecho de Gibraltar contradicen la supuesta extinción de una población local en esta zona. Esta hipótesis fue establecida a partir de la fructífera actividad ballenera desarrollada durante los siglos XIX y XX. Los resultados de este trabajo han demostrado la presencia de rorcuales comunes en esta zona y sus características acústicas los han identificado como pertenecientes a la población del Atlántico noreste. Muy probablemente, la población que fue explotada en los dos siglos pasados formaba parte de la atlántica noreste que todavía hoy continúa utilizando esta zona e incluso el mar de Alborán como área de invernada accediendo por el estrecho de Gibraltar.

Por último, varias hipótesis quedan demostradas y han de ser mencionadas aquí puesto que han servido de base para el diseño de este trabajo. Richiardi (1874) planteó la entrada y salida de rorcuales comunes al mar Mediterráneo desde el océano Atlántico. Jonsgård (1966) propuso que los rorcuales comunes observados en el oeste de Escocia se alimentaban en las inmediaciones del Estrecho de Gibraltar o en el mar Mediterráneo. Duguy y Vallon (1976) propusieron que parte de la población de rorcuales comunes observados en el mar Mediterráneo eran residentes y parte provenían estacionalmente del océano Atlántico noreste. Viale (1977 y 1985) planteó que parte de la entrada de rorcuales comunes Atlánticos al mar Mediterráneo ocurría al inicio del invierno para reproducirse y estos provenían de áreas de alimentación al noroeste de Escocia.

CAPÍTULO IV:

Efecto del ruido como contaminante en el comportamiento del rorcual común



1. Introducción

El hombre realiza muchas actividades que producen ruido bajo el agua en el medio marino, algunas intencionadamente como la exploración geofísica o la defensa nacional y otras colateralmente, como el tráfico marítimo comercial o la pesca. El sonido es el medio principal de interacción con el entorno para las 119 especies de mamíferos marinos conocidos, así como para muchos otros taxones marinos (peces, invertebrados, etc.). La exploración del medio y la orientación, la comunicación a distancia, la reproducción y la alimentación dependen en mayor o menor medida del sonido. La posibilidad de que el ruido generado por las diferentes actividades humanas pudiera interferir con las funciones biológicas de estas especies es una preocupación creciente. Además, representa uno de los aspectos del efecto provocado por la presión antrópica en la biodiversidad marina más sensibles y controvertidos, aunque también uno de los menos conocidos (NRC, 2005).

Los diferentes tipos de ruido introducidos en el medio marino por el hombre producen dos tipos de contaminantes acústicos, unos de alta intensidad e impacto agudo y otros de baja intensidad pero crónico. Los dos ejemplos más representativos son el ruido generado por la exploración geofísica marina y por el tráfico marítimo, el primero por su carácter agudo y temporal y el segundo por su carácter moderado y continuo (Hildebrand, 2005).

Los diferentes tipos de perturbaciones generadas por este contaminante en los mamíferos marinos están siendo cada vez mejor documentados y la literatura disponible sobre este problema es cada vez más abundante, pero la manera en la que el ruido generado por actividades humanas está afectando a las poblaciones de los mamíferos marinos sigue siendo desconocida (NRC, 2005). La evaluación de este efecto a escala poblacional requiere asociar el nivel de exposición al ruido con cambios en la abundancia o parámetros demográficos. Para ello es necesario obtener medidas del nivel de ruido expuesto en animales y documentar sus respuestas, aunque en el medio marino ninguna de estas tareas son fáciles (Tyack, Gordon y Thompson, 2004).

Existen muy pocos datos acerca del nivel de ruido ambiente y su tendencia a largo plazo en los océanos. Aunque el origen del aumento progresivo del nivel de ruido en el medio marino se atribuye al inicio de la revolución industrial (cca. 1850), no está claro si esta tendencia continúa en el siglo XXI. El único campo en el que pueden atisbarse tendencias con relativa seguridad es en el ruido del tráfico marítimo comercial. Por un lado, el aumento substancial del número de buques en los últimos 50 años implica un aumento gradual del ruido generado por el tráfico del orden de 15 dB en incrementos de 3 dB por década (Ross, 1993; Andrew *et al.*, 2002; McDonald *et al.*, 2006). Este aumento lineal, especialmente en las bajas frecuencias, se debe al desarrollo tecnológico de los buques comerciales y los puertos y consecuente progresivo aumento del tráfico marítimo a escala global, pero también al progreso y a los cambios en el tipo de explotación de hidrocarburos en los fondos marinos. Los autores de estos trabajos discuten como hace 40 años los primeros 300 Hz del espectro todavía estaban dominados por fuentes naturales de ruido (p. ej., efecto del viento en la superficie), pero actualmente son el ruido generado por el tráfico marítimo y el que produce la exploración de hidrocarburos los que predominan en esta banda de frecuencias. Por otro lado, la modernización de los buques puede haber contribuido a reducir el ruido que

generan, además, la relación entre el ruido radiado por un buque y otros de sus parámetros (ej. eslora, velocidad, tonelaje) no se conoce suficientemente bien como para permitir elaborar predicciones fiables, por tanto, es difícil evaluar la relación entre las características del tráfico marítimo y el nivel de ruido que se produce (NRC, 2003).

Hildebrand (2005) calculó un patrón anual de energía de origen antrópico radiada al medio marino incluyendo todos los tipos de fuentes de ruido conocidas. La exploración geofísica quedó en segundo lugar con $3,9 \times 10^{13}$ Julios/año después de las explosiones nucleares submarinas. El tráfico marítimo se dividió en dos tipos: superpetroleros en cuarto lugar con $3,7 \times 10^{12}$ Julios/año tras las fuentes mencionadas y el sonar táctico de media frecuencia militar y el resto de buques comerciales en séptimo lugar tras las fuentes mencionadas y explosiones de prueba de resistencia de buques militares y sonar táctico de baja frecuencia militar con $1,4 \times 10^{11}$ Julios/año.

Las consecuencias ecológicas de la exposición de toda esta energía en la biodiversidad marina se desconocen y son extremadamente difíciles de cuantificar. Aunque no conozcamos con detalle las características de la tendencia del ruido en el medio marino a largo plazo y menos aún sus efectos sobre la vida marina, los datos disponibles en la actualidad son suficientes para condicionar un mayor esfuerzo en el estudio del impacto del ruido en el medio marino. En el caso de los mamíferos marinos, existen más que sobradas referencias acerca de la relación entre el éxito reproductivo y de supervivencia y la necesidad de percibir y producir sonidos (Clark *et al.*, en prensa). Estas especies se encuentran actualmente expuestas a una multitud de fuentes dinámicas de ruido y en múltiples rangos de frecuencias sobre una base de ruido ambiente en continuo aumento y por encima del nivel al cual están adaptados. El nivel de ruido del ecosistema que habitan ha cambiado considerablemente en una escala generacional, pudiendo limitar la capacidad adaptativa y evolutiva de las especies afectadas.

Son varios los mecanismos por los que el ruido puede afectar negativamente a los mamíferos marinos. El más considerable es una reducción del área de comunicación por efecto de enmascaramiento (Richardson *et al.*, 1995). Este mecanismo se produce cuando el ruido reduce la habilidad de detectar otros sonidos así como de ser detectado. El efecto sólo se produce si las frecuencias afectadas por el ruido se acercan a las de la señal de interés. Conceptualmente, el ruido debe encontrarse dentro de la banda de enmascaramiento de la señal y estas bandas son mayores cuanto más baja es la frecuencia, por lo que ruidos de baja frecuencia tienen un mayor potencial de generar enmascaramiento (Richardson *et al.*, 1995). Si el ruido generado alcanza intensidades elevadas, puede producirse un daño fisiológico, provocando una pérdida permanente de audición o una pérdida temporal de la sensibilidad auditiva en función de la intensidad y tiempo de exposición (Ketten, 2004). La temporalidad de la perturbación acústica juega un papel importante en el efecto que esta pueda generar en los individuos expuestos. Si el ruido se convierte en una perturbación constante, como ocurre con el producido por el tráfico marítimo, puede generar efectos crónicos (NRC, 2005; Southall, 2007). Si la perturbación acústica es breve, el efecto que esta puede producir es temporal. Sin embargo, si la perturbación breve es recurrente, su efecto puede convertirse en crónico. Este puede ser el caso de la exploración geofísica, cuyas campañas son breves pero se repiten en áreas de especial interés geológico (Gordon *et al.*, 2004).

El significado biológico y las consecuencias ecológicas del impacto acústico en los mamíferos marinos son cuestiones sin definir y en continua discusión (ej. NRC 2000, 2003, 2005; Cox *et al.*, 2006; Southall *et al.*, 2007; Boyd *et al.*, 2008; Southall, 2009). La mayoría de los estudios se han centrado en identificar el impacto fisiológico de perturbaciones acústicas breves, locales y de alta intensidad (ej. sonar). Pero se reconoce que la exposición continuada a perturbaciones moderadas (ej. tráfico marítimo) también puede estar teniendo un efecto negativo en las poblaciones afectadas (Payne y Webb, 1971; NRC, 2000; 2003; Southall, 2005; McDonald *et al.*, 2006; Nowacek *et al.*, 2007; Weilgart, 2007; Hatch *et al.*, 2008; Clark *et al.*, en prensa).

Se ha demostrado que algunos mamíferos marinos presentan mecanismos de compensación ante niveles elevados de ruido. Estos son sencillos, como esperar a que el ruido se reduzca para emitir señales, aumentar la intensidad o la duración de las mismas y algunos más complejos como aumentar la frecuencia de las vocalizaciones sin modificar su estructura para evitar los rangos de mayor nivel de ruido (Tyack, 2008). Estos mecanismos implican un aumento del coste de señalización, por lo que si han de utilizarse sistemáticamente significa que el ruido está comprometiendo la eficacia de la comunicación. Además, también se ha documentado la existencia de diferentes alteraciones del comportamiento debidas a la exposición al ruido (Gordon, 2004) indicando que, a pesar de la utilización de mecanismos de compensación, su comunicación puede verse comprometida por perturbaciones acústicas.

La comunicación a larga distancia del grupo de los misticetos es la función más propensa al impacto del ruido producido por las actividades humanas en el medio marino (Payne y Webb, 1971; Richardson *et al.*, 1995). Este grupo de cetáceos se ha especializado en la comunicación a bajas frecuencias en un hábitat cuyo ruido ambiente estaba dominado por el oleaje y no por el tráfico marítimo (NRC, 2003). Se cree que su máxima sensibilidad acústica se encuentra en el rango de frecuencias más afectado por el ruido (Southall *et al.*, 2007). Por estas razones, las especies de este suborden tienen máxima prioridad en el análisis del significado ecológico de los efectos del ruido marino en los mamíferos marinos (NRC, 2003; 2005; Southall *et al.*, 2009).

El rorcual común es el único misticeto comúnmente observado en el mar Mediterráneo. Actualmente se considera como una subpoblación aislada del resto de poblaciones del Atlántico norte (IWC, 1992; 2007 y 2009; Notarbartolo di Sciara *et al.*, 2003). Debido a sus costumbres pelágicas, tanto para su alimentación como para su reproducción, se desconocen gran parte de sus características biológicas y ecológicas, lo que hace difícil poder estimar el impacto de las perturbaciones acústicas comunes en el mar Mediterráneo. Esta cuenca es especialmente ruidosa. Ross (2005) indica que de todas las regiones marinas estudiadas, únicamente el mar Mediterráneo y algunas áreas del noreste del océano Atlántico presentan niveles medios de ruido ambiente en los primeros 1000 Hz por encima de los 100 dB. De las diferentes fuentes de ruido existentes en la cuenca mediterránea, el tráfico marítimo comercial y la exploración geofísica son las dos primeras en orden de importancia (Abdulla y Linden, 2008). El elevado número de buques comerciales que transitan diariamente por toda la cuenca Mediterránea impide que haya regiones silenciosas y hace que el ruido ambiente sea más elevado aquí que en otras cuencas marinas (Abdulla y Linden, 2008). Se estima que cada año 220.000 buques comerciales cruzan la cuenca mediterránea transportando el 30 % de la carga marítima mundial y alrededor de 2000 ferries, Fast-ferries e hydrofoils

navegan por aguas mediterráneas diariamente. Además, se estima que estas cifras se cuadripliquen en los próximos 20 años (Dobler, 2002; Abdulla y Linden, 2008).

Además del impacto del ruido, es importante indicar aquí que el rorcual común sufre otro serio problema medioambiental de escala global, permanente y en continuo crecimiento: las colisiones con buques. Se han descrito colisiones en 11 especies de misticetos, de las cuales el rorcual común es con diferencia el más afectado en todas las regiones del planeta donde se ha evaluado este problema (Laist *et al.*, 2001; Panigada *et al.*, 2006; Van Waerebeek *et al.*, 2007; Jensen y Silber, 2003; Weinrich *et al.* 2004; Douglas *et al.*, 2008). Panigada *et al.* (2006) encontraron que el número de colisiones entre buques comerciales y rorcuales comunes en la cuenca Mediterránea se duplicó en un periodo de 20 años. Teniendo en cuenta que los impactos de esta naturaleza son rara vez documentados o declarados, esta cifra muy probablemente subestima la situación real.

De todas las áreas mediterráneas, el estrecho de Gibraltar es probablemente la región más alterada desde el punto de vista acústico por tráfico marítimo. Esta región es atravesada por unos 100.000 barcos anualmente, convirtiéndose en el segundo espacio más transitado del mundo después del canal de la Mancha (REMPEC, 2002). Además actualmente existen 4 compañías comerciales de ferries sirviendo el tránsito entre España (Algeciras, Tarifa y Ceuta) y Marruecos (Tanger) incluyendo fast-ferries, por tanto el elevado nivel de ruido y el riesgo de colisión en el estrecho de Gibraltar lo convierten en un área altamente problemática para la conservación de este misticeto.

Este trabajo aborda el efecto del ruido originado por el tráfico marítimo y la exploración geofísica marina en el rorcual común del mar Mediterráneo. Siendo el rorcual común el único misticeto de esta cuenca y su hábitat uno de los más ruidosos del planeta, se considera que los resultados de este trabajo pueden aportar información de alto valor para la urgente necesidad de la regulación y control del ruido como contaminante y la conservación del rorcual común como especie altamente sensible.

2. Objetivos

El objetivo del trabajo es identificar posibles efectos de niveles elevados de ruido ambiente en el comportamiento acústico del rorcual común en la cuenca occidental del mar Mediterráneo. Se analizan dos tipos de efectos:

Efecto crónico: producido por el continuo nivel de ruido del tráfico marítimo en las diferentes áreas de estudio.

Efecto agudo: producido por elevados niveles de ruido temporal generado por una campaña de exploración geofísica marina en el área del mar de Alborán.

3. Material y métodos

3.1 Áreas de estudio

Se seleccionaron siete áreas de estudio, seis en el mar Mediterráneo occidental rodeando la península Ibérica (Cataluña, Comunidad Valenciana, Baleares y Andalucía) y al noreste de la Península Ibérica (cuenca Provenzal) cubriendo las áreas críticas de invernada, de alimentación y corredor migratorio definidas para el rorcual común Mediterráneo y una en el Océano Atlántico (archipiélago de las islas Azores) como referencia de un área donde el nivel de perturbaciones es inferior al del mar Mediterráneo. La figura IIV-1 muestra las diferentes áreas seleccionadas.

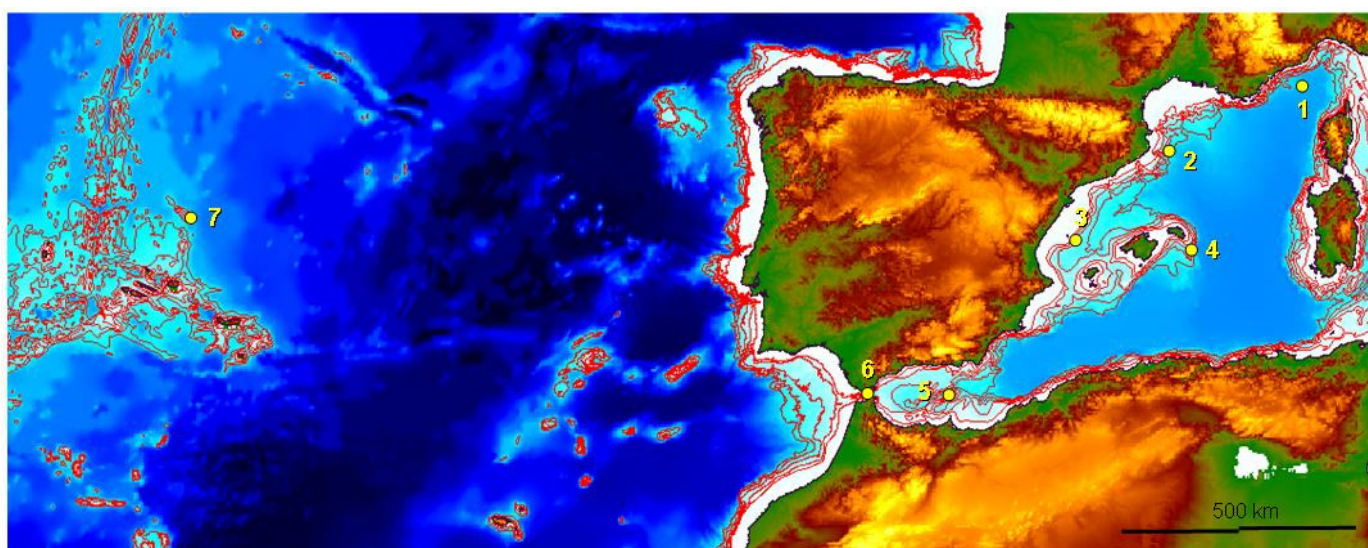


Figura IIV-1: Mapa de la cuenca Mediterránea occidental y aguas Atlánticas adyacentes con isóbatas de 200 a 1000 m. Las diferentes áreas de estudio se marcan en amarillo: 1- Cuenca Provenzal, 2-Cabo de Begur, 3-Islas Columbretes, 4-Menorca, 5-isla de Alborán, 6-estrecho de Gibraltar y 7-islas Azores.

Los muestreos en cada área se realizaron en diferentes periodos del año, con mayor prioridad por el otoño e invierno, entre agosto de 2006 y enero de 2009. La tabla IIV-1 muestra los periodos de muestreo para cada área.

Área	Instrumentos	Periodo de muestreo
Cuenca Provenzal (Francia)	1 EAR	Octubre – Diciembre 2008
Cabo de Begur (Cataluña)	1 EAR	Agosto 2007 - perdido
Islas Columbretes (C. Valenciana)	2 MARU	Agosto – Octubre 2006
Menorca (Baleares)	1 EAR	Agosto – Diciembre 2007
Isla de Alborán (Andalucía)	2 MARU	Noviembre 2006 – Enero 2007
Estrecho de Gibraltar (Andalucía)	2 EAR	Octubre 2008 – Enero 2009
Azores (Portugal)	1 EAR	Septiembre – Noviembre 2007
		Marzo- Mayo 2008
Total muestreo obtenido		23 meses

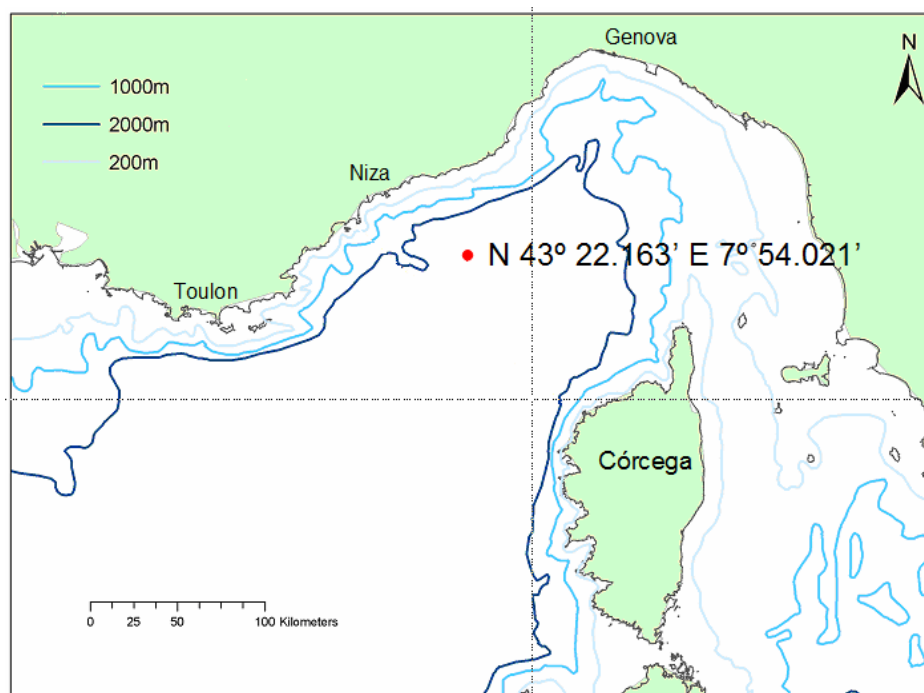
Tabla IV-1: Áreas de estudio, instrumentos utilizados y periodos de muestreo. Las líneas en rojo indican instrumentos perdidos o que no grabaron correctamente.

Las diferentes áreas de estudio se seleccionaron en función de tres criterios que, en orden descendente de importancia, son: 1- interés geográfico para los objetivos del trabajo, 2- seguridad de los instrumentos y 3- facilidad logística para la realización del trabajo de campo.

Siguiendo estos criterios se describen las razones principales para la selección de las nueve áreas de estudio:

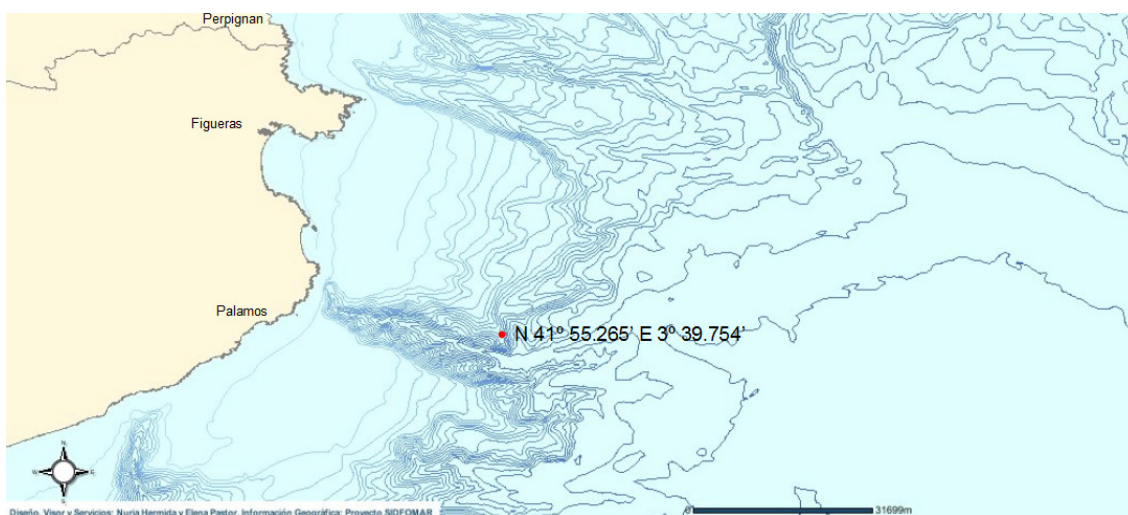
1- Cuenca Provenzal:

Esta área se encuentra geográficamente ubicada dentro de la cuenca tirreno-liguro-provenzal, habiéndose descrito como la principal zona de alimentación del rorqual común mediterráneo durante el periodo estival. El tráfico marítimo en esta zona es más intenso durante la misma época en la que la abundancia de rorcales comunes es mayor (Notarbartolo di Sciara and Gordon, 1997; Zanardelli et al., 1999; Gannier, 2002). La descripción del posible efecto del ruido en el comportamiento del rorqual común Mediterráneo en una de sus áreas críticas es de importancia para la gestión de su conservación. La batimetría del golfo es demasiado profunda para realizar un fondeo con este tipo de instrumentos, pero existe una boya de instrumentación oceanográfica (“Bouée pour l’acquisition d’une série optique à long terme, Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer”) fondeada a 2000 m de profundidad y a 30 millas náuticas al sureste de Niza, siendo una plataforma idónea para la instalación de un grabador en la línea de fondeo. La instalación de una unidad EAR en la línea de fondeo de la boya de instrumentación oceanográfica se realizó en colaboración con el “Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer” y con el “Centre de Recherche sur les Cétacés de Marineland Antibes”.



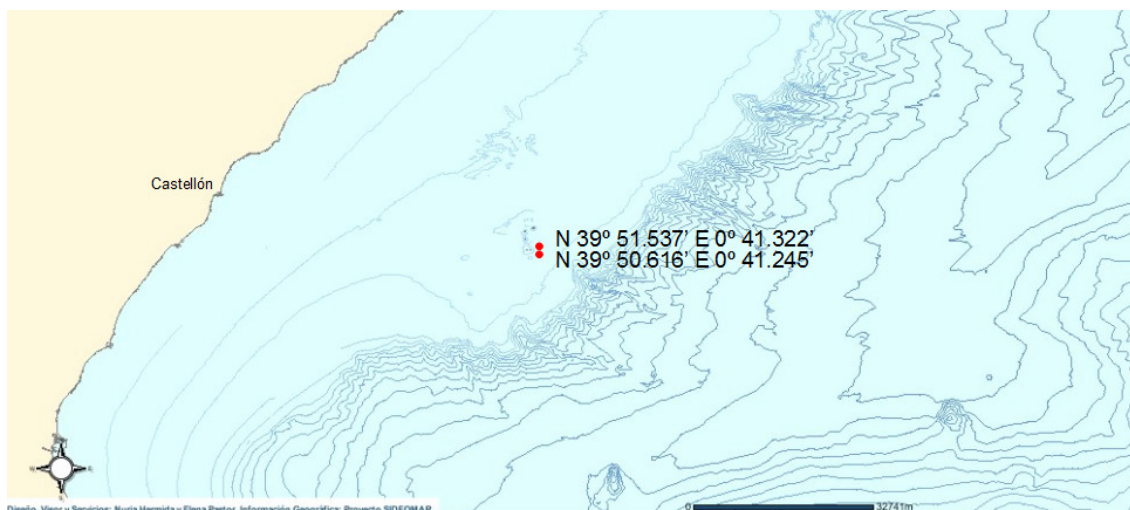
2- Cabo de Begur:

El cabo hace frontera geográfica con Francia y la plataforma continental es muy reducida alcanzándose profundidades superiores a los 2000 m a menos de 20 millas náuticas de la costa. Se trata de una zona de paso estacional de rorcual común entre su principal área de alimentación al norte y áreas de invernada al sur de la cuenca mediterránea. La medición del nivel de ruido ambiente en este cabo puede conferir información acerca de su efecto durante el comportamiento migratorio del rorcual común. Una boya meteorológica (Puertos del Estado) se encuentra fondeada a 1000 m de profundidad junto al cañón de Palamós siendo una plataforma idónea para la instalación de un grabador en la línea de fondeo.



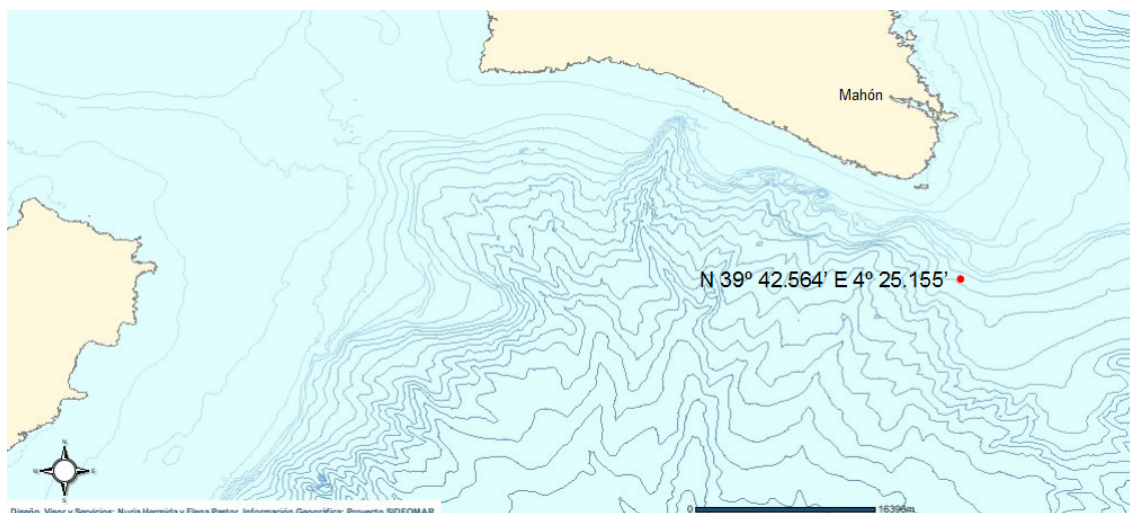
3- Islas Columbretes:

El archipiélago de las islas Columbretes se encuentra a 30 millas náuticas al este de Castellón al borde del talud continental. Al tratarse de una reserva marina, los fondos están protegidos de la actividad pesquera, facilitando la seguridad del fondeo de grabadores. Del mismo modo que en el cabo de Begur, la medición del nivel de ruido ambiente en este archipiélago puede conferir información acerca de su efecto durante el comportamiento migratorio del rorcual común para los individuos que utilicen el paso entre la península y el archipiélago Balear.



4- Menorca:

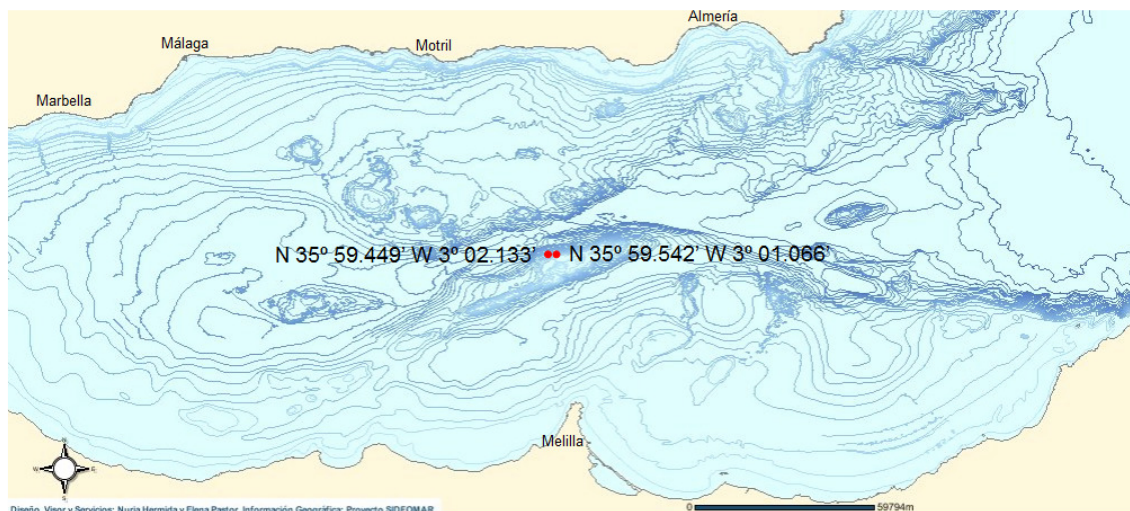
Se trata de una zona de paso estacional de rorcual común entre su principal área de alimentación al norte y áreas de invernada al sur de la cuenca mediterránea del mismo modo que en el cabo de Begur y las islas Columbretes. La medición del nivel de ruido ambiente en esta área puede conferir información acerca de su efecto durante el comportamiento migratorio del rorcual común, para aquellos individuos que utilicen la cuenca central del mar Mediterráneo. A 14 millas náuticas al sureste de Mahón se encuentra fondeada una boya meteorológica (Puertos del Estado) a 900 m de profundidad siendo una plataforma idónea para la instalación de un grabador en la línea de fondeo.



5- Isla de Alborán:

La isla de Alborán se encuentra ubicada en el centro del mar de Alborán, a 30 millas náuticas de Marruecos y 50 millas náuticas de la península Ibérica. Al tratarse de una reserva marina, los fondos están protegidos de la actividad pesquera, facilitando la seguridad del fondeo de grabadores. El mar de Alborán es la zona de mayor producción primaria del mar Mediterráneo (Perkins *et al.*, 1990) presentando características idóneas para ser utilizado como potencial zona de invernada por el rorcual común mediterráneo,

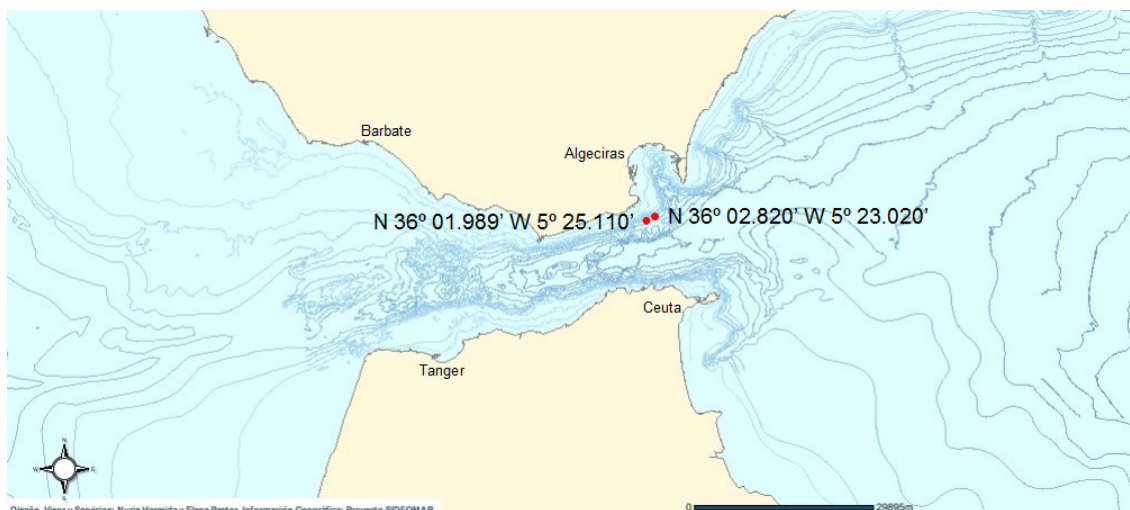
el rorcual común de la población del océano Atlántico noreste o por ambas poblaciones. La descripción del posible efecto del ruido en el comportamiento del rorcual común Mediterráneo en una de sus áreas críticas es de importancia para la gestión de su conservación.



6- Estrecho de Gibraltar:

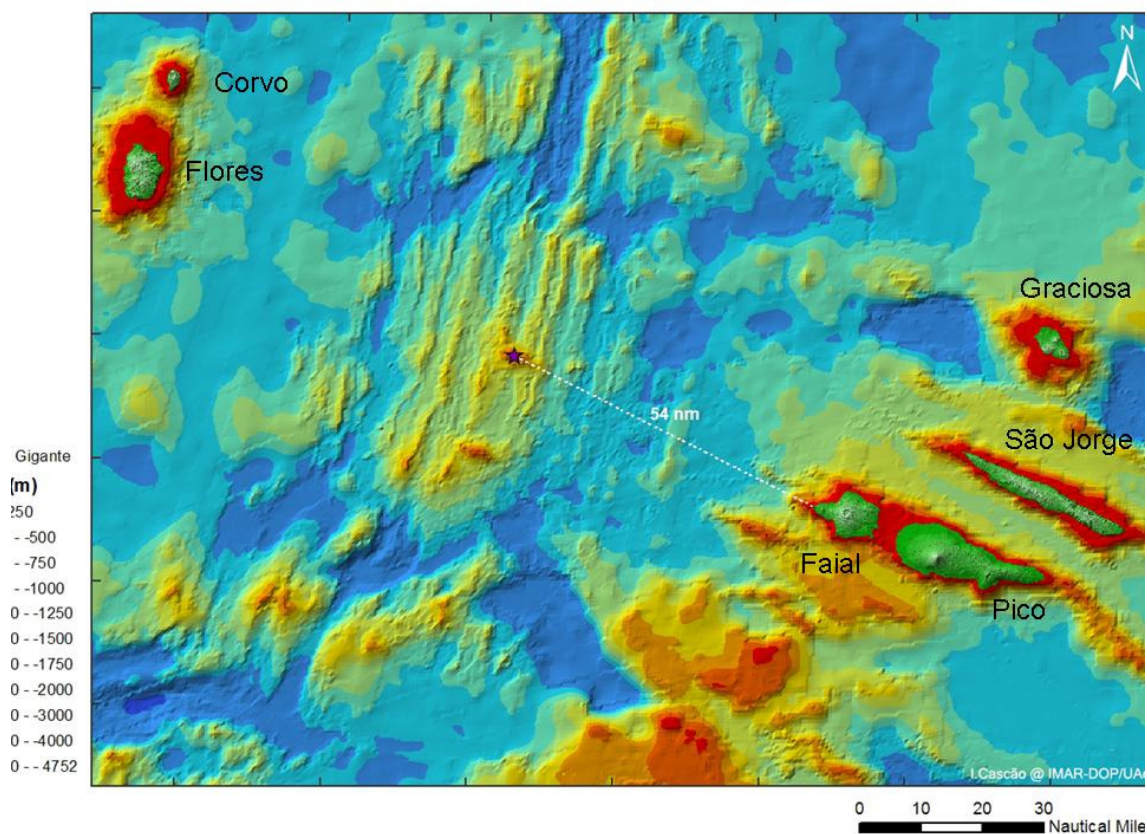
El Estrecho de Gibraltar es la única conexión entre el mar Mediterráneo y el Océano Atlántico. El estrecho de Gibraltar es atravesado por unos 100.000 barcos anualmente convirtiéndose en el segundo espacio más transitado del mundo después del canal de la Mancha (REMPEC, 2002). Además actualmente existen 4 compañías comerciales de ferries sirviendo el tránsito entre España (Algeciras, Tarifa y Ceuta) y Marruecos (Tanger) incluyendo fast-ferries. Por tanto el estrecho de Gibraltar es un área de máximo tráfico marítimo al tiempo que es de importancia para la conservación de las poblaciones de rorcual común que habitan el mar Mediterráneo. Se seleccionaron dos puntos de fondeo en base a los siguientes criterios:

- Batimetría no superior a 500 m
- Protección de corrientes extremas
- Actividad pesquera limitada o ausente
- Alejado de los puntos de máximo tráfico marítimo



7- Archipiélago de las islas Azores:

El archipiélago de las islas Azores se encuentra a 940 millas náuticas al oeste del Estrecho de Gibraltar. El fondeo en esta zona se realizó en un monte submarino ubicado al noroeste de las islas centrales, a 54 millas náuticas de la isla de Faial. La posición de fondeo se encuentra lejos de los principales puertos comerciales y fuera de las rutas de tráfico de estas islas. Por tanto se asume que los niveles de ruido ambiente en esta área son inferiores a los de las demás áreas. Los fondeos en esta zona se realizaron en colaboración con el Departamento de Oceanografía y Pesca de la Universidad de las islas Azores.



3.2 Grabación de sonido

En este trabajo se han utilizado dos tipos de instrumentos que se describen a continuación:

3.2.1 Marine Autonomous Recording Unit

El Marine Autonomous Recording Unit (MARU) <http://www.birds.cornell.edu/brp/hardware/pop-ups> desarrollado por el Programa de Investigaciones Bioacústicas de la Universidad de Cornell en Nueva York, EEUU, (BRP-Cornell) es un instrumento de 26 kg de peso con forma esférica, de 60 cm de diámetro, protegido por una armadura plástica para reducir los posibles impactos durante las maniobras de fondeo y recuperación. Una esfera, formada por dos piezas de un polímero de sílice y unidas por medio de vacío, mantiene la electrónica y baterías de alimentación en su interior de forma estanca. El instrumento consta de varios módulos para la adquisición de la señal recibida desde un hidrófono externo fijado a la armadura: un conversor analógico digital, un amplificador-acondicionador de señal, un relé conmutador que controla un liberador químico (una señal acústica emitida por el usuario desde la superficie del mar activa el mecanismo de liberación del muerto de fondeo) y un disco duro de 160 Gb y componentes de control de actividad del disco. Además, el instrumento contiene dos elementos que facilitan su recuperación cuando este sale a flote, una luz estroboscópica y un emisor de radio que permiten localizarlo. Este instrumento puede programarse para grabar de manera continua durante las 24 horas o siguiendo un ciclo de grabación con un periodo en pausa. La programación del grabador se hace desde un ordenador portátil conectado por puerto USB al grabador antes de su cierre estanco. La comunicación con el grabador una vez cerrado para confirmar la presión interna y activar o desactivar la grabación así como el dispositivo de liberación se hace a través de un transductor sumergible conectado a un amplificador. Las señales de comunicación pueden reproducirse desde un ordenador portátil o un reproductor mp3 conectado al amplificador.

La distancia de detección de rorcuales comunes mediante el fondeo de grabadores autónomos se ha calculado en varias regiones oceánicas, pero nunca en el mar Mediterráneo. Las detecciones estimadas rondan entre 56 km (Širović *et al.*, 2007) y 185 km (Cummings y Thompson, 1971). Aunque algunos estudios han demostrado la posibilidad de detectar estas señales a muchos cientos de kilómetros (ej. Clark y Gagnon, 2004). Teniendo en cuenta que la propagación de la señal depende de la intensidad a la que es emitida y la pérdida por transmisión y que ninguna de estas dos variables puede ser estimada en el contexto de este trabajo, el rango de detección ha de asumirse que oscila entre los valores calculados en estudios previos.

La figura IV-2 muestra el instrumento abierto y cerrado. Se utilizaron dos unidades MARU durante los fondeos realizados en 2006 y 2007 en las áreas de estudio de Islas Columbretes e isla de Alborán. Estos instrumentos se programaron para grabar de manera continua para todos los fondeos, a una velocidad de muestreo de 2 kHz, obteniendo un ancho de banda funcional de 0 a 1000 Hz suficiente para poder grabar todos los tipos de señal descritos para el rorcual común.

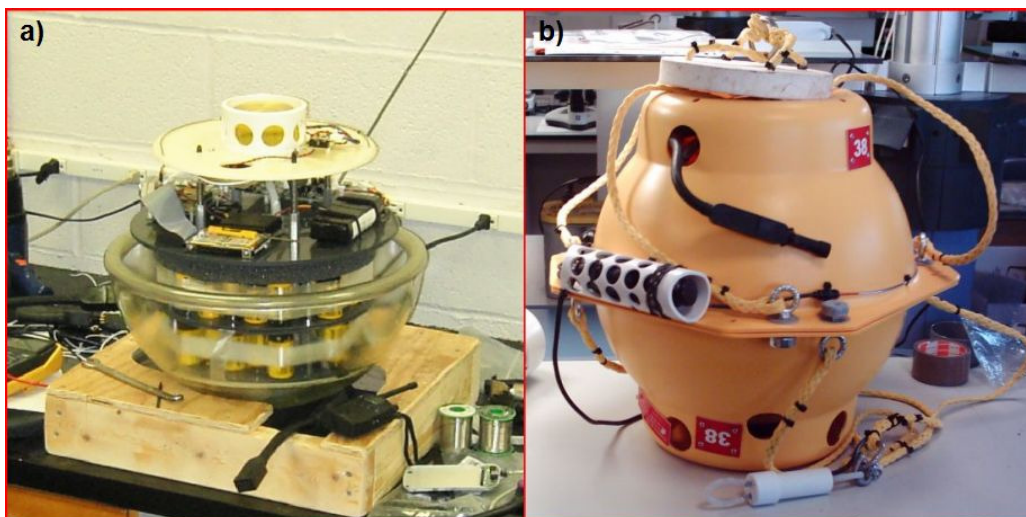


Figura IV-2: Marine Autonomous Recording Unit (MARU) (a) abierto durante la preparación para el fondeo y (b) cerrado listo para el fondeo.

3.2.2 Ecologic Acoustic Recorder

En 2007 se comercializó un nuevo grabador autónomo de fondeo más compacto y ligero facilitando la operación de fondeo y recuperación y mucho más económico. Se decidió cambiar a este nuevo instrumento para los siguientes fondeos. El Ecologic Acoustic Recorder (EAR) <http://oceanwidescience.org/docs/EAR.htm> desarrollado por Oceanwide Science Institute en Hawaii, EEUU, es un instrumento de 8 kg de peso con forma cilíndrica, de 60 cm de longitud y 20 cm de diámetro. El contenedor, de aluminio, está rodeado de un disco de flotación y presenta un extremo de polímero plástico extraíble donde se ubica un hidrófono y un interruptor magnético para la activación y desactivación del instrumento. La electrónica interior es muy similar a la de la unidad MARU excepto que no puede ser programado para grabar de manera continua (impidiendo la sincronización entre unidades fondeadas simultáneamente) y no incluye ningún mecanismo de liberación, por lo que en caso de fondearse, es necesario añadir un liberador a la línea de fondeo. La programación del grabador se hace desde un ordenador portátil conectado por puerto USB al grabador antes de su cierre estanco. La figura IV-3 muestra el instrumento abierto y cerrado. Se utilizaron cuatro unidades EAR durante los fondeos realizados en el periodo 2007-2009 en las áreas de estudio de cabo de Begur, Menorca y Estrecho de Gibraltar. Al igual que las unidades MARU, la velocidad de muestreo a la que se programaron fue de 2 kHz para todos los fondeos pero en un ciclo de grabación de 5 minutos cada 10 minutos.

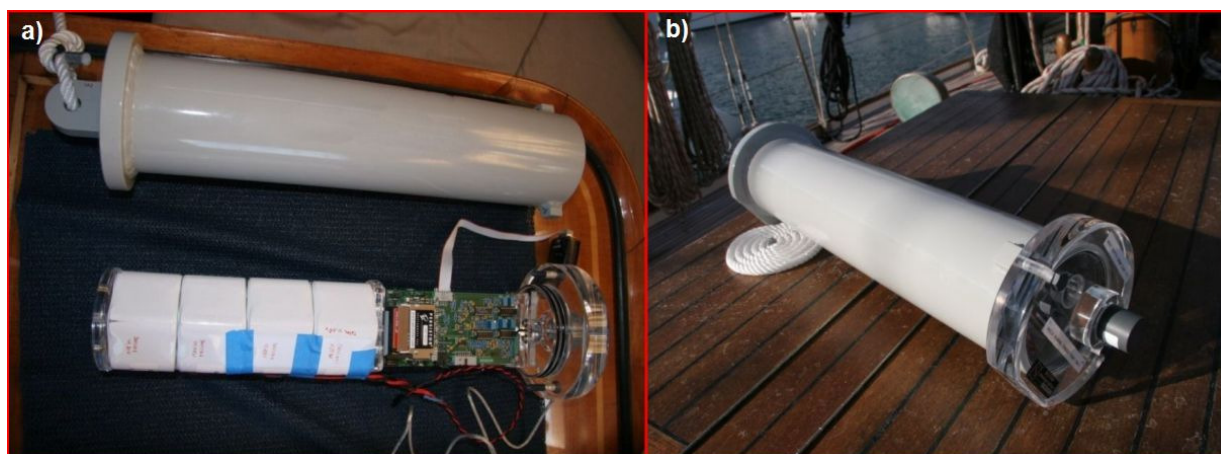


Figura IV-3: Ecologic Acoustic Recorder (EAR) (a) abierto durante la preparación para el fondeo y (b) cerrado listo para el fondeo.

3.3 Diseño de la línea de fondeo

Se utilizaron tres tipos de fondeo con el fin de adaptar la instalación submarina de los grabadores a los diferentes contextos en los que se trabajó. Se describen a continuación:

3.3.1 Fondeo de MARU

Las unidades MARU se fondearon en las Islas Columbretes, canal de Ibiza e Isla de Alborán. Se fondearon simultáneamente dos unidades en cada área de estudio por dos razones: La primera porque la detección simultánea de señales emitidas por un rorcual en dos grabadores permite calcular el ángulo de recepción de la señal. Esta información es de gran utilidad para describir la dirección de movimiento de los animales detectados cuando se desplazan dentro del radio de alcance de ambos grabadores. Y la segunda porque fondeando dos grabadores se amplía el radio de alcance y se reduce el riesgo de no obtener datos si uno de los dos fallase o se perdiera. La distancia de separación entre las dos unidades fue de dos millas náuticas para todos los fondeos. Esta distancia se calculó en base a resultados obtenidos por estudios previos con los mismos instrumentos (Clark & Gagnon, 2004; Hatch & Clark, 2004).

La línea de fondeo para las unidades MARU consistió en un lastre de 80 kg unido al liberador que se encuentra incorporado en el instrumento. El lastre para todos los fondeos realizados consistió en 5 sacos de gravilla de 16 kg cada uno. La operación de fondeo es sencilla, una vez posicionada la embarcación en el punto de fondeo, el lastre y el grabador se descuelgan por la borda hasta quedar sumergidos. Tras confirmar que el instrumento está activo se libera del cabo de amarre y se deja caer por gravedad hasta el fondo. La armadura del MARU presenta un arnés donde se fija el liberador químico, que consiste en un cable de aluminio trenzado conectado a un circuito de 28 V. Cuando el dispositivo es activado, el circuito eléctrico se cierra y energiza el cable provocando una reacción de electrólisis con el contacto del agua marina que disuelve el cable en pocos minutos liberando el grabador del muerto y ascendiendo hasta la superficie por flotación positiva. Para la recuperación del grabador una vez posicionada la embarcación en el punto donde se fondeó, se envía una señal acústica mediante el

transductor sumergible que activa el liberador químico. La figura IV-4 muestra imágenes de la operación de fondeo de los grabadores MARU en el canal de Ibiza.



Figura IV-4: Imágenes de la operación de fondeo de los grabadores MARU en el canal de Ibiza.

3.3.2 Fondeo de EAR

Las unidades EAR se fondearon en el Estrecho de Gibraltar y cabo de Espartel (Marruecos). Al igual que con las unidades MARU, éstas se fondearon en pareja, con una separación de dos millas náuticas.

El diseño de la línea de fondeo para las unidades EAR fue más robusto debido a las fuertes corrientes que pueden encontrarse en el fondo del Estrecho de Gibraltar. Consistió en un lastre de 200 kg unido por 2 m de cadena y 2 m de cabo a un liberador acústico marca ORE (Offshore Research, EEUU) modelo Port. El liberador se une al grabador por 2 m de cabo al que se le incorporó un flotador de 8 kg para reducir el peso de liberador en el agua. El lastre para los fondeos consistió en dos discos de hormigón de 100 kg cada uno. La operación de fondeo y recuperación es igual a la descrita para las unidades MARU. El liberador acústico se activa al recibir una señal enviada desde el módulo de superficie, que consta de un transductor sumergible y un amplificador. A diferencia del liberador químico de las unidades MARU, estos activan un dispositivo mecánico desenroscando el grillete que mantiene le liberador fijado al lastre. La figura IV-5 muestra la configuración de la línea de fondeo.



Figura IV-5: Configuración de la línea de fondeo que incluye un liberador ORE Port, un flotador de 8kg y un grabador EAR.

3.3.3 Instrumentación de líneas de fondeo con EAR

Además de fondear las unidades EAR, estos grabadores se utilizaron en Cabo de Begur y Menorca fijándolos a líneas de fondeo de boyas ubicadas en estas zonas con el permiso de la institución propietaria Puertos del Estado. Se realizaron inmersiones para instrumentar la línea de fondeo y para la posterior recogida. La metodología de instrumentación fue similar en todos los casos. Durante la inmersión se fijaron piezas de tubo de manguera para proteger la línea de fondeo del rozamiento con el grabador y para reducir la reacción de electrólisis en los casos en los que la línea de fondeo fuera de cable o de cadena. El grabador se fijó sobre la protección de manguera mediante bridas de 20 mm de grosor y cabo de seguridad a una profundidad de entre 20 y 30 m. La figura IV-6 muestra imágenes de la instrumentación de las boyas.

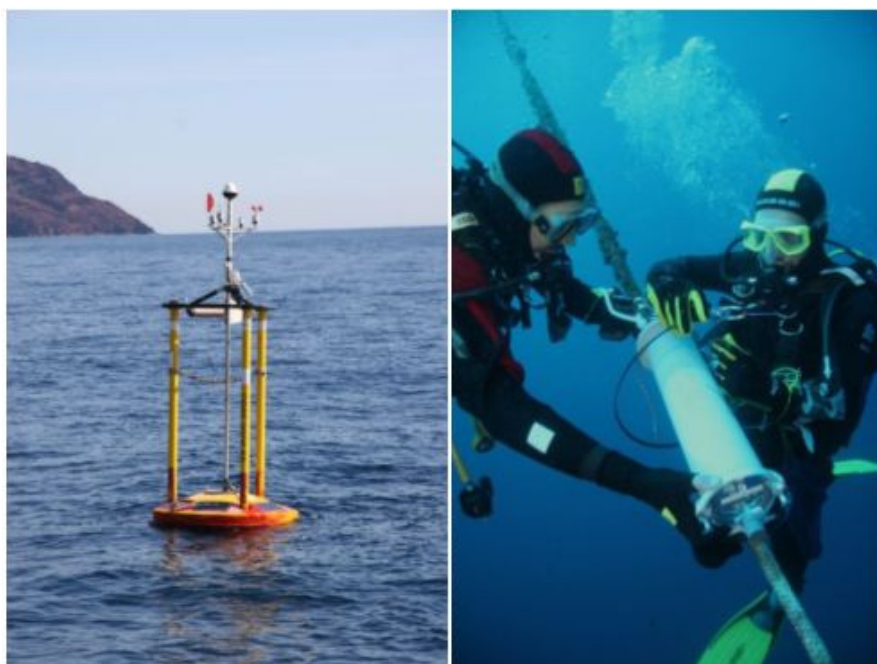


Figura IV-6: Imágenes de la boya de Puertos del Estado en el cabo de Begur. La imagen submarina muestra la instrumentación de la línea de fondeo.

3.3.4 Instrumentación de plataforma oceanográfica

En la cuenca Provençal, el grabador se instaló en la estructura que soporta instrumentos oceanográficos. El trabajo se realizó en colaboración con la institución propietaria de la plataforma (“Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer”) y con el “Centre de Recherche sur les Cétacés de Marineland Antibes”. Se realizaron inmersiones para instrumentar la plataforma y para la posterior recogida del grabador. Durante la inmersión se fijó una lámina de goma de 5mm de grosor sobre la barra de la plataforma donde se colocó el grabador para reducir la reacción de electrólisis entre la plataforma de acero inoxidable y la carcasa de aluminio del grabador. El grabador se fijó sobre la protección de goma mediante abrazaderas regulables de acero inoxidable de 10 mm de ancho y cabo de seguridad a una profundidad de 32 m. La figura IV-7 muestra esquema de la plataforma y la posición del EAR e imágenes de la instrumentación de la plataforma.

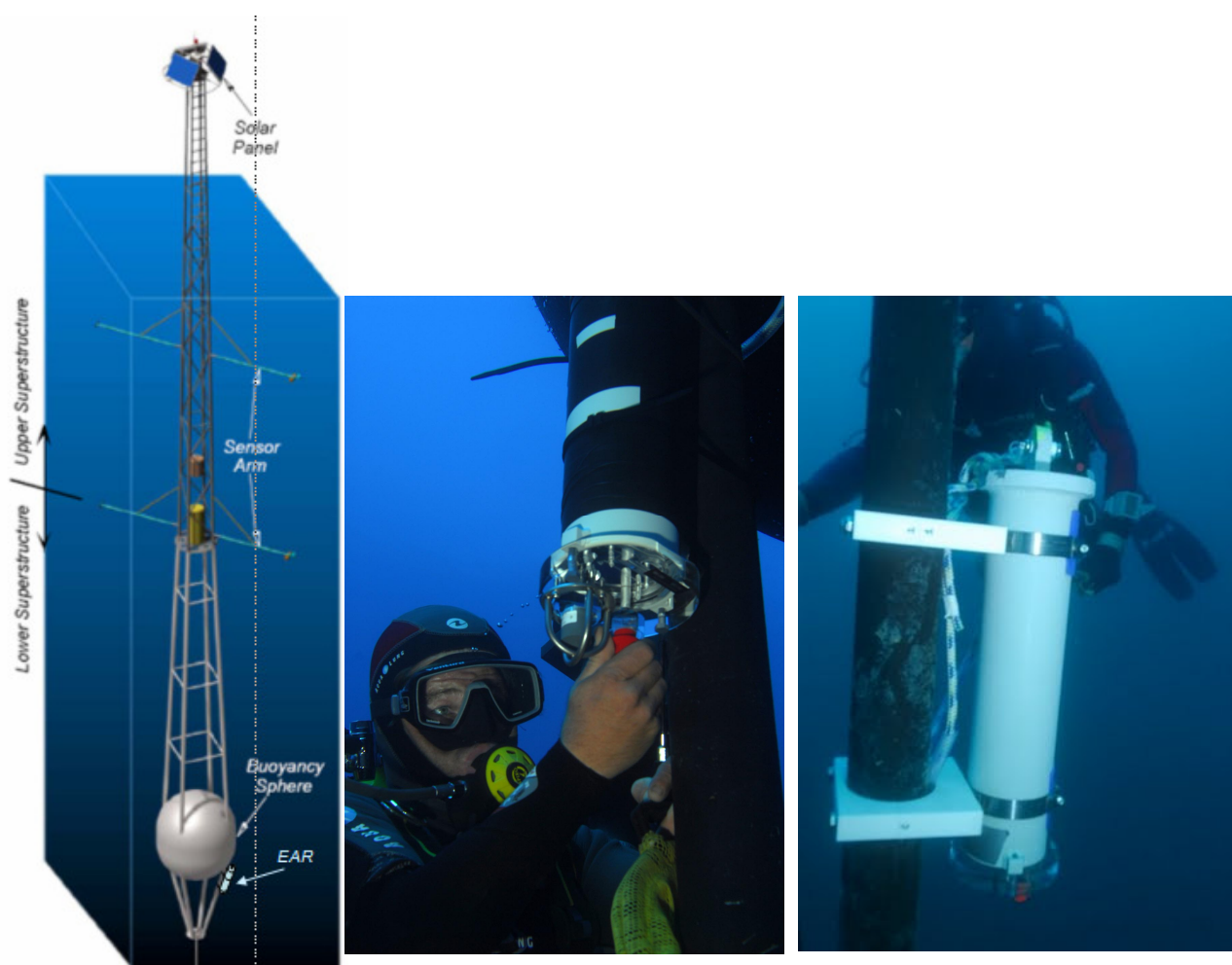


Figura IV-7: Esquema de la plataforma de instrumentación oceanográfica en la cuenca Provenzal con el grabador instalado. Las imágenes submarinas muestran la instrumentación de la plataforma.

3.4 Preparación de datos para detección

Tanto las unidades MARU como los EAR graban el sonido en formato binario (.bin). Los archivos se extraen del disco duro del grabador y se duplican para guardar una copia de seguridad en un disco duro externo. Los archivos binarios de la copia de trabajo se procesan con el código BEAST desarrollado por BRP-Cornell para la plataforma Matlab (Mathworks Inc., EEUU), que permite asignar la fecha y hora local del inicio y fin de grabación. En caso de haber realizado un fondeo de 2 unidades simultáneas (como el caso de las Islas Columbretes, canal de Ibiza e Isla de Alborán) BEAST permite sincronizar ambas grabaciones mediante la contracción o la expansión lineal de los archivos binarios para que la hora de inicio y fin de ambas grabaciones coincidan con exactitud.

Posteriormente a este proceso, los archivos binarios sincronizados son convertidos en múltiples archivos consecutivos de 30 minutos de duración y su formato binario es

transformado al de archivo de sonido no comprimido aiff (Audio Interchange File Format, Apple Inc). Una vez convertidos a este nuevo formato, los varios miles de archivos de sonido obtenidos de cada fondeo se organizan en carpetas siguiendo una estructura cronológica, con una carpeta para cada correspondiente intervalo de 24 horas de todo el periodo de muestreo. La figura IV-8 representa un esquema del protocolo seguido para la preparación de las grabaciones para detección.

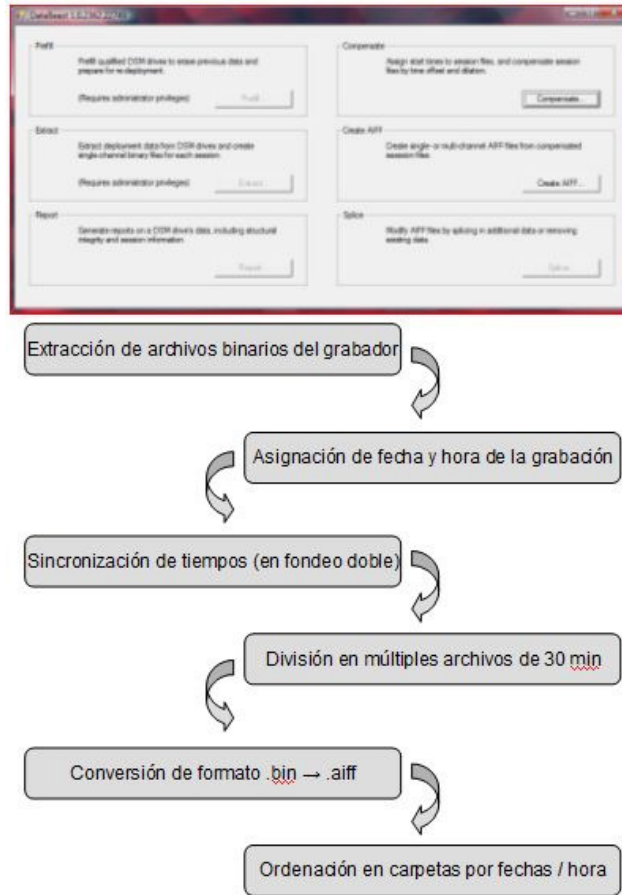


Figura IV-8: Interfaz del código BEAST y esquema del protocolo seguido para la preparación de las grabaciones para detección, transformando los archivos binarios brutos obtenidos del grabador en archivos de sonido aiff de duración estándar de 30 minutos y clasificados por fecha y hora local para cada periodo de muestreo.

3.5 Protocolo de análisis detección con XBAT

Los archivos de sonido fueron analizados para detectar señales de rorcual común con el programa Extensible Bioacoustic Tool (XBAT) versión 6 desarrollado por BRP-Cornell para la plataforma Matlab. El análisis incluye tres pasos, el proceso automático de detección de las señales de rorcual común, la validación manual de las detecciones obtenidas para eliminar aquellas que sean falsas y modificar las que sean incorrectas y la selección de señales para incluir en registros con los que realizar las medidas del ángulo de recepción. Cada registro incluye la información temporal y espectral para localizar las señales seleccionadas en cada archivo de sonido. Se definen a continuación los tres pasos del análisis:

3.5.1 Detección automática

El pulso de 20 Hz es con diferencia la señal más utilizada por el rorcual común (Watkins *et al.*, 1987) y la producida con más energía (Charif *et al.*, 2002) de su repertorio por lo que puede ser detectada con más facilidad y a mayor distancia que el resto de señales. Además, se trata de la señal de más energía y menor frecuencia, lo que facilita su propagación en el medio marino con mínima pérdida por propagación (Clark y Ellison, 2004). Por estas razones la detección de esta señal es más eficiente y por tanto la metodología de detección automática utilizada en este trabajo se centró solo en este tipo de señal. Otra ventaja de centrar la detección automática en el pulso de 20 Hz es que todas las demás señales de su repertorio se producen en acompañamiento de esta y nunca de manera aislada (Clark, *pers. com.*), por esta razón la detección de los pulsos de 20 Hz permite localizar al resto de los tipos de señales durante la validación manual de las detecciones automáticas.

La detección automática de pulsos de 20 Hz de rorcual común se realizó construyendo un conjunto de ejemplos de estas señales para incorporar a la función de detección con el detector por muestras (“template detector”) del programa XBAT. Para ello, se utilizó el programa Audition 3.0 (Adobe Systems Inc., EEUU) para inspeccionar manualmente archivos de sonido hasta localizar ejemplos de señales de rorcual común con las que construir el conjunto. Se seleccionaron pulsos de 20 Hz de diferentes calidades teniendo en cuenta, la relación señal/ruido, la presencia de ecos y la atenuación por propagación. Para realizar pruebas preliminares de detección con diferentes combinaciones del conjunto de ejemplos, se preparó un archivo de sonido de prueba consistente en secciones de 30 minutos de duración de diferentes días del periodo de muestreo en los que se incluyese la presencia de señales de rorcual común de diferentes calidades y con diferentes niveles de ruido ambiente, así como secciones con ausencia de rorcuales pero con ruidos dentro de la banda de 20 Hz. La figura IV-9 representa un ejemplo de la variedad de contextos incluidos en el archivo de sonido de prueba de detección automática.

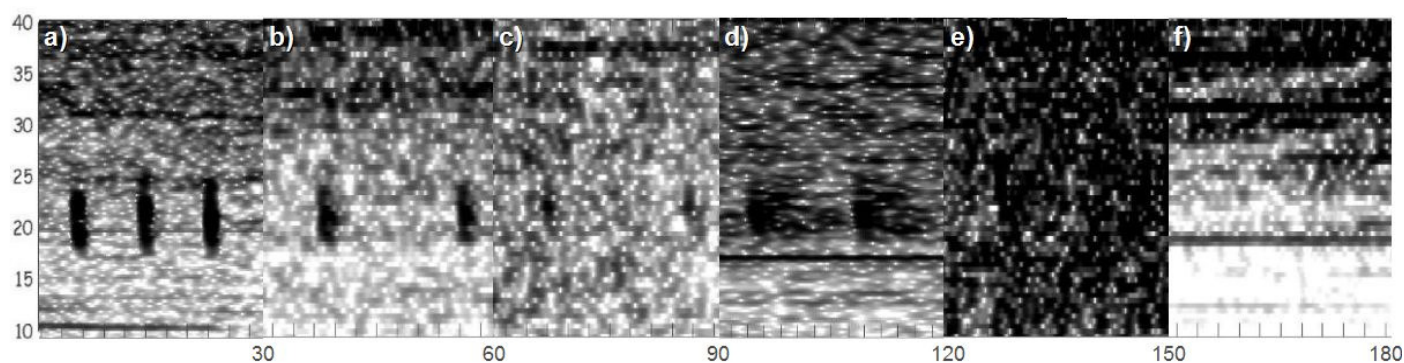


Figura IV-9: Espectrogramas (10-40 Hz, 30 s, 512 bandas) representando la variedad de contextos incluidos en el archivo de sonido de prueba de detección automática: a) pulsos de 20 Hz de alta calidad registrados cuando un rorcual se encontraba muy cercano al grabador, b) pulsos de 20 Hz de calidad media debido a la atenuación por propagación registrados cuando un rorcual se encontraba a una distancia media del grabador, c) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la fuerte atenuación por propagación registrados cuando un rorcual se encontraba a mucha distancia del

grabador, d) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la presencia de eco facilitado por las características de propagación del medio, e) pulsos de 20 Hz de baja calidad debido a la baja relación señal/ruido y f) ejemplo de ruido tonal en la banda de 20 Hz generado por el motor de un buque.

Se realizaron varias pruebas de detección con diferentes conjuntos de ejemplos hasta encontrar una combinación que obtuviese un número de detecciones de balance preferente por señales no detectadas frente a falsas detecciones. Puesto que las detecciones son revisadas manualmente, se dio preferencia a un conjunto sensible a señales en la banda de 20 Hz a pesar de obtener falsas detecciones, con el fin de evitar que algunas señales no fueran detectadas (reduciendo el error tipo I).

En total se seleccionaron 5 señales para el conjunto de ejemplos del detector. El detector por muestras permite seleccionar una función para cada ejemplo del conjunto, por lo que determinados ejemplos pueden ser utilizados para identificar las señales de interés y otros ejemplos pueden ser utilizados para rechazar señales que durante la búsqueda podrían confundir al detector. Por tanto, de las 5 señales utilizadas para construir el conjunto de ejemplos del detector, tres correspondieron a pulsos de 20 Hz de rorqual común de diferentes calidades y 2 a ruidos comunes en la banda de 20 Hz para ser rechazados. La figura IV-10 muestra los 5 ejemplos del conjunto construido para la detección automática.

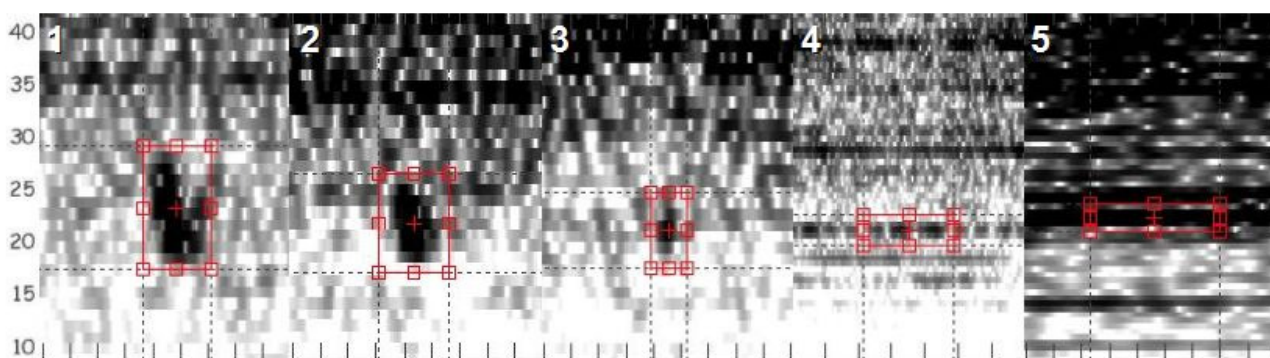


Figura IV-10: Espectrogramas (10-40 Hz, 15 s, 512 bandas) de los 5 ejemplos del conjunto construido para la detección automática. Los ejemplos 1 a 3 corresponden con pulsos de 20 Hz de rorqual de mejor a pero calidad, el ejemplo 4 corresponde a ruido de cavitación de hélice de buque y el ejemplo 5 corresponde a ruido tonal generado por los ejes de las hélices de buques. El detector por muestras se configuró de manera que los ejemplos 1 a 3 fueran aceptados y los ejemplos 4 y 5 rechazados.

Una vez seleccionados los ejemplos y construido el conjunto para el detector por muestras, se ejecutó la detección automática en todos los archivos de sonido obtenidos en este trabajo. El programa XBAT crea un archivo con los resultados de la detección en cada carpeta donde se encuentran los archivos de sonido analizados. Este archivo incluye la información de todas las selecciones realizadas en el archivo de sonido. Estas selecciones pueden ser representadas gráficamente sobre el espectrograma del sonido para su validación.

3.5.2 Validación manual

Las selecciones de cada archivo de sonido obtenidas mediante la detección automática son el resultado bruto del proceso de detección. Este resultado fue refinado mediante la validación de cada una de las selecciones de forma manual, eliminando las selecciones de falsas detecciones y corrigiendo aquellas que sean parcialmente incorrectas (Ej. doble selección de una señal y su eco). La validación manual se realizó con el programa XBAT mediante la representación espectrográfica de los archivos de sonido superponiendo las selecciones resultantes de la detección automática. El criterio de clasificación de las selecciones como correctas o incorrectas es en parte subjetivo puesto que se basa en la experiencia del observador para identificar si una señal concreta corresponde a un pulso de un rorcual común. Por ello, se aplicó un protocolo que facilitó la decisión con el fin de minimizar la subjetividad en la decisión en caso de duda. Empelando características visuales (representación espectrográfica) y acústicas (reproducción del sonido), los pulsos de rorcuales deberían presentar todos los siguientes rasgos:

- Máxima energía acústica concentrada en la banda de 19-21 Hz
- Señal constante de duración inferior a 1,5 segundos
- Señal incluida en una secuencia cuyo intervalo entre pulsos debe coincidir en 12 a 14 segundos
- Carácter descendente en su modulación al reproducir el sonido acelerado 10 veces.

Si uno de estos 4 rasgos no pudo confirmarse en la señal, esta se descartó del análisis.

Las selecciones de todos los archivos de sonido obtenidos en el análisis fueron validados manualmente.

3.5.3 Registros PA e IPI

El programa XBAT permite guardar las selecciones manualmente validadas en registros asociados a cada archivo de sonido. Se crearon dos tipos de registros:

- 1) PA: creados en todos los tipos de fondeo para calcular parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz de rorcual común. Se seleccionaron los pulsos de 20 Hz de mejor calidad (máxima relación señal/ruido, ausencia de ecos o atenuación por propagación) de todos los archivos de sonido.
- 2) IPI: creados en todos los tipos de fondeo para calcular el intervalo de tiempo entre pulsos de una secuencia, Se seleccionaron los pulsos de 20 Hz en secuencias que claramente pudieron ser atribuidas a un mismo animal. En los casos en los que aparecieron dos o más secuencias solapadas (por tratarse de varios rorcuales vocalizando simultáneamente) los pulsos no fueron seleccionados para este registro.

Para ambos registros, en grabaciones de fondeos donde los dos canales se sincronizaron (dos MARU fondeadas simultáneamente), se seleccionaron señales indistintamente en uno de los dos canales en función de la calidad y la relación señal / ruido, siempre con la seguridad de no replicarlas con el fin de poder analizar el mayor número de ejemplos de parámetros acústicos. En grabaciones de fondeos donde los canales no se sincronizaron (dos EAR fondeados simultáneamente) se eligió la grabación con mayor número de detecciones y se descartó la de menor número para evitar replicas en la selección de señales a incluir en los registros.

3.5.4 Análisis registros PA, IPI

Para el análisis de los registros PA e IPI se utilizó el código “Energy Measurement Tool” desarrollado por BRP-Cornell en la plataforma Matlab e implementado para el programa XBAT. El código calcula 42 parámetros acústicos del dominio temporal y dominio espectral de todas las selecciones del registro. El código permite excluir un porcentaje de la energía incluida en cada una de las selecciones para el cálculo de los parámetros con el fin de eliminar la energía acústica que no corresponda a la señal de interés y que corresponde al ruido ambiente que rodea a la señal y que ha quedado incluido en la selección. Se seleccionó entre el 95 y el 99 % de la energía, en función del nivel de ruido ambiente de la grabación. Para ello, se realizaron varias pruebas previas al análisis final de cada grabación. El código guarda los valores de los diferentes parámetros acústicos obtenidos de los registros de cada carpeta de 24 horas de grabación en un formato específico para el programa XBAT. Con el fin de poder realizar análisis estadísticos de estos valores, estos se exportaron al formato de hoja de cálculo del programa Excel versión 2003 (del paquete Office 2003 SP3, Microsoft Corporation, EEUU) y al formato específico del programa Statistica 8 (Statsoft Inc., EEUU). La figura IV-11 muestra espectrogramas con ejemplos de pulsos de 20 Hz de buena calidad seleccionados para incluirse en el registro PA e IPI.

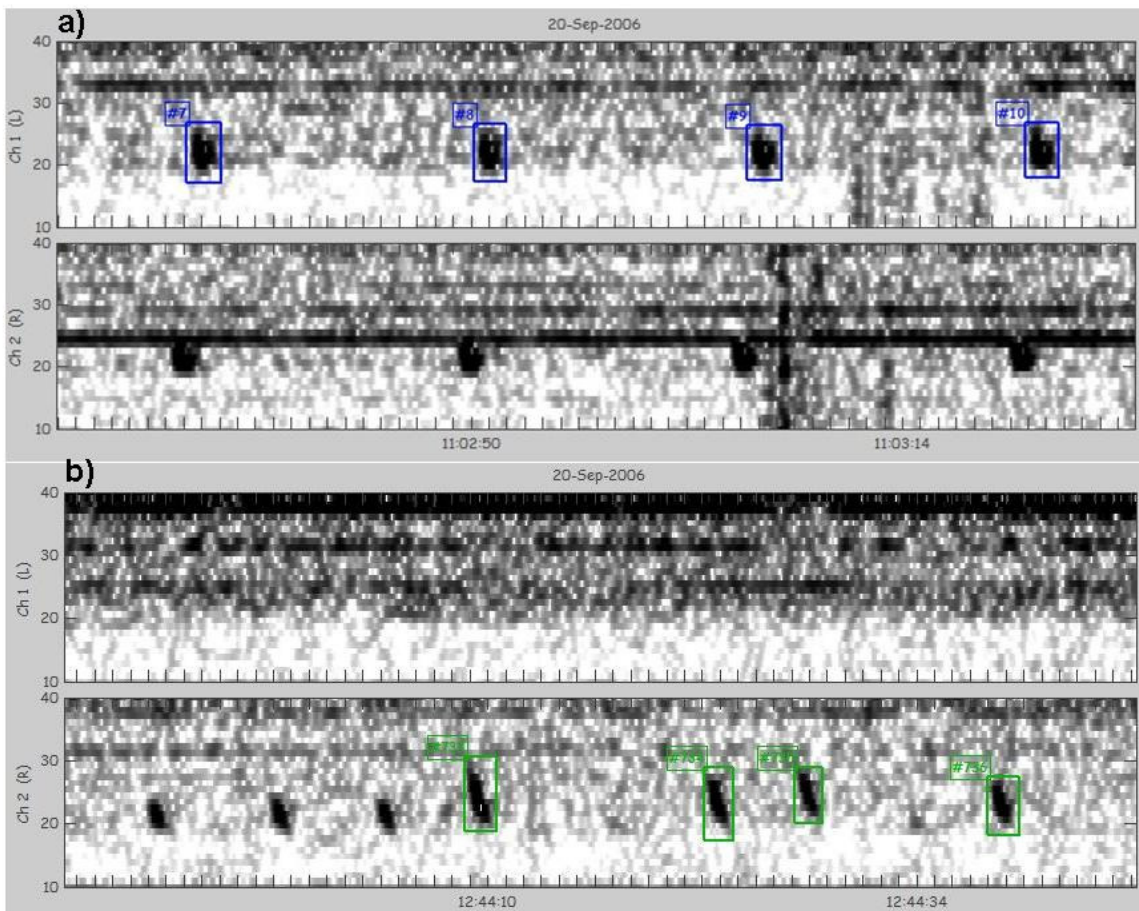


Figura IV-11: Espectrogramas (10-40 Hz, 120 s, 512 bandas) con ejemplos de pulsos de 20 Hz de buena calidad seleccionados para incluirse en el registro a) IPI en azul y b) PA en verde.

De todos los parámetros acústicos calculados por el código “Energy Measurement Tool” se incluyeron solo los 5 siguientes: Duración del pulso, tiempo central, frecuencia central, ancho de banda y frecuencia de pico de energía. La tabla IV-2 describe cada uno de los 4 parámetros. Estos parámetros se representan en la figura V12. El criterio de selección de estos 4 parámetros fue definido por:

- 1- Resultados de estudios previos en los que se definen los parámetros más representativos de esta especie y más significativos para diferenciar poblaciones.
- 2- Las características acústicas de los pulsos de 20 Hz del rorcual común, que por su simplicidad limitan el uso de muchos de los parámetros medidos por el código.
- 3- La condición de que los valores de los parámetros elegidos no se vean afectados, o presenten una distorsión mínima, por la propagación de la señal en el agua, para minimizar el efecto de la distancia de los animales al grabador en las señales recibidas.

Parámetro acústico	Descripción
Duración del pulso	Duración en segundos del pulso emitido por el rorcual común en la banda de 20 Hz.
Tiempo central	Tiempo que divide la energía total del pulso en dos partes iguales, una anterior y una posterior al valor central.
Frecuencia central	Frecuencia en Hz que divide la energía total del pulso en dos partes iguales, una superior y una inferior al valor central.
Ancho de banda	Valor absoluto de la frecuencia en Hz cubierta por el pulso.
Frecuencia de pico de energía	Valor de la frecuencia en Hz que presenta el máximo de energía acústica del total de la duración del pulso.

Tabla IV-2: Descripción de los 5 parámetros acústicos medidos en los ejemplos seleccionados de pulsos de 20 Hz de rorcual común en cada área de estudio.

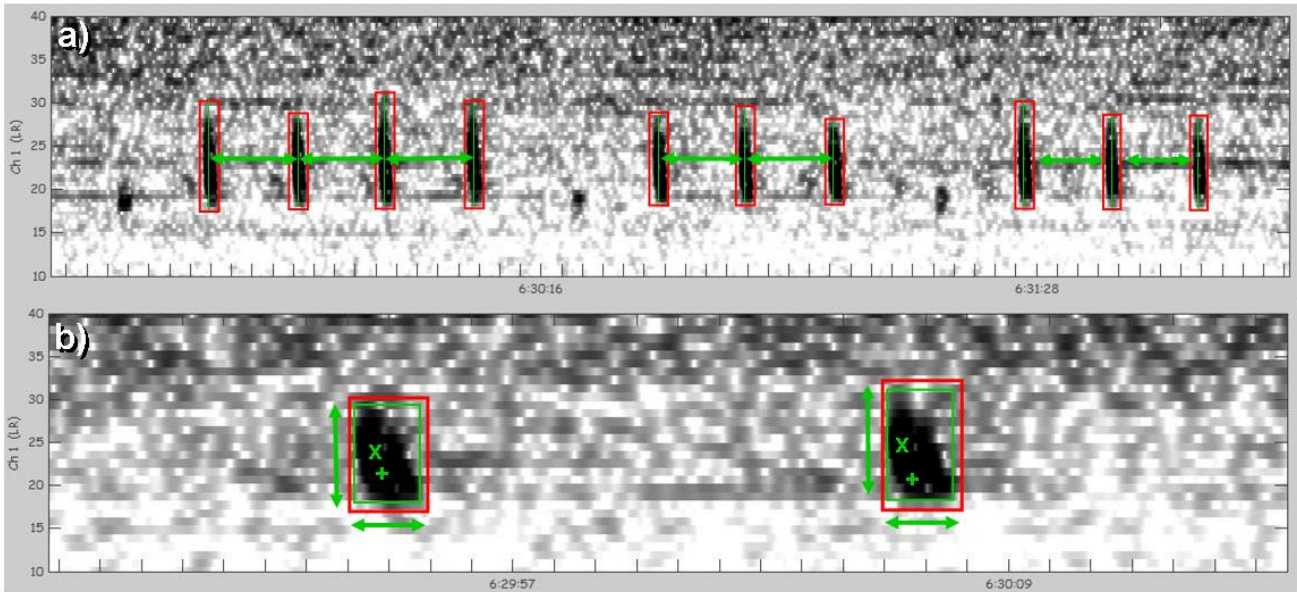


Figura IV-12: Espectrogramas con ejemplo de pulsos de 20 Hz y los 5 parámetros acústicos incluidos en el análisis. a) Espectrograma (10-40 Hz, 200 s, 512 bandas) con las señales del registro IPI seleccionadas en rojo, dentro de cada selección una barra vertical verde marca el tiempo central. Las medidas del intervalo entre pulsos equivalen al intervalo entre barras verticales verdes indicadas con flechas verdes. b) Espectrograma (10-40 Hz, 30 s, 256 bandas) con las señales del registro PA seleccionadas en rojo y las medidas del 95 % de energía dentro de la selección en un recuadro verde, duración y ancho de banda indicadas con flechas verdes, frecuencia central indicada con el símbolo x y frecuencia de pico de energía indicada con el símbolo +.

Para el cálculo del intervalo entre pulsos (registro IPI), se utilizó el parámetro tiempo central medido por el código “Energy Measurement Tool” en todos los pulsos seleccionados para el estudio. La resta del tiempo central de un pulso al tiempo central del pulso anterior en una misma secuencia equivale al intervalo entre los dos pulsos. Esta fórmula se aplicó en todos los tiempos calculados por el código “Energy Measurement Tool” para pulsos consecutivos obteniendo el intervalo entre pulsos de todos los seleccionados para el estudio.

3.6 Análisis del nivel de ruido ambiente

Para obtener una representación fiable del nivel de ruido ambiente de un área es imprescindible contar con largas series temporales de datos en los que calcular muchas medidas repetidas bajo diferentes condiciones ambientales (Richardson *et al.*, 1995). Con el fin de maximizar la fiabilidad de las medidas de ruido ambiente, se trató de emplear el máximo número de horas grabadas en cada área de estudio para obtener medidas representativas de presión de campo acústico. Se omitieron las primeras y últimas 5 horas de cada grabación para eliminar el ruido generado por la embarcación desde la cual se fondearon y recuperaron los equipos así como el ruido de la manipulación y caída del equipo desde la superficie hasta el fondo marino. El periodo total de grabación de cada área se dividió en fragmentos de 15 minutos para obtener medidas del valor medio y varianza de presión de campo acústico de cada uno de los

fragmentos para todo el rango de frecuencias (0-1000 Hz). Además, el periodo de grabación completo, salvo los fragmentos iniciales y finales eliminados, se analizaron para obtener percentiles de espectro de densidad de campo acústico total del periodo de fondeo para todo el rango de frecuencias (0-1000 Hz). Estas medidas permiten describir de manera fiable el nivel del ruido ambiente de cada área.

Puesto que se utilizaron dos equipos diferentes para la obtención de las grabaciones, se detalla la metodología seguida en cada caso en los siguientes dos apartados.

3.6.1 Grabaciones con EAR

Una vez eliminados los periodos iniciales y finales de la grabación, se procesan los archivos binarios de 15 minutos de duración con un código para la plataforma Matlab desarrollado por Marc Lammers, Hawaii Institute of Marine Biology, permite obtener el valor medio y varianza del nivel de presión de campo acústico (raíz media cuadrática dB re 1 microPa) de cada fragmento de 15 minutos en la banda 0 – 1000 Hz. Posteriormente, los archivos binarios son transformados a archivos de sonido en formato aiff mediante la función de procesamiento por lotes del programa Audition 3.0 (Adobe Systems Inc., EEUU) y ordenados por hora y fecha como se explica en el apartado 3.4. Los archivos de sonido son procesados con el código para la plataforma Matlab “Long Term Spectrogram Tool” desarrollado por BRP-Cornell permite calcular el espectro de presión de campo acústico y representar el promedio de distribución de energía acústica en los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95 % en función de las frecuencias estudiadas (0-1000 Hz) de todos los archivos incluidos en cada área de estudio. Este análisis permite describir como se reparte la energía acústica total para identificar las bandas de frecuencia más y menos ruidosas.

3.6.2 Grabaciones con MARU

Los archivos binarios obtenidos en cada fondeo, cuya duración es la total del fondeo, son procesados mediante la función de procesamiento por lotes del programa Audition 3.0 (Adobe Systems Inc., EEUU) para dividirlos en archivos binarios consecutivos de 15 minutos de duración. El procesado de estos archivos es el mismo que el descrito en el apartado 3.6.1 para obtener el valor medio y varianza del nivel de presión y los percentiles del espectro de densidad de campo acústico. La figura IV-13 muestra un esquema de todo este proceso de análisis.

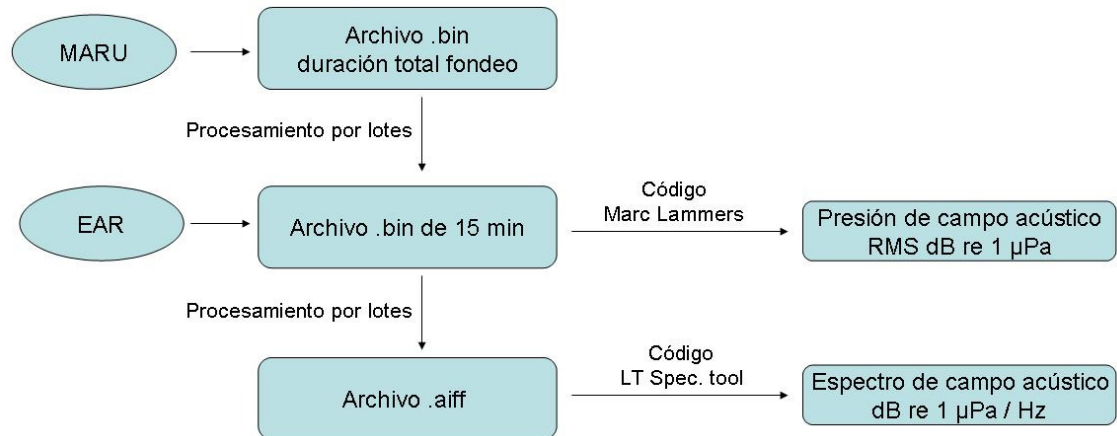


Figura IV-13: Esquema del proceso de análisis del ruido ambiente desde archivos obtenidos con EAR y con MARU.

Los resultados de estos tres análisis fueron comparados entre áreas de estudio para describir las diferencias del tipo de ruido ambiente e identificar cuales presentan los niveles de ruido más altos y cuales más bajos. Con el fin de identificar diferencias significativas en los niveles medios de ruido ambiente entre áreas, se realizó un ANOVA de una vía.

3.7 Análisis del efecto crónico del ruido ambiente generado por tráfico marítimo

Con el fin de controlar el efecto demostrado en el capítulo III de la diferencia de poblaciones en dos de los parámetros acústicos incluidos en el análisis (intervalo entre pulsos y ancho de banda de los pulsos), los parámetros acústicos se agruparon en dos conjuntos. El primer grupo de parámetros acústicos, dependientes de la población, se estudió únicamente entre áreas de estudio correspondientes a cada población, por un lado para la población mediterránea el área de la cuenca Provenzal y el área de las islas Columbretes y por otro lado para la población atlántica noreste, el área de las islas Azores, el área del estrecho de Gibraltar y el área de la isla de Alborán. Para el segundo grupo, al no existir una dependencia de la población de origen, los parámetros acústicos se compararon entre todas las áreas de estudio. Para evaluar el posible efecto del nivel de ruido ambiente en el comportamiento acústico del rorcual común, primero se estudiaron posibles diferencias del nivel de ruido ambiente entre áreas de estudio correspondientes a cada población. Se utilizó un análisis de la varianza de una vía (ANOVA) para detectar diferencias entre los dos grupos de áreas. En segundo lugar, se analizaron posibles tendencias de los parámetros acústicos relacionadas con las diferencias de nivel de ruido ambiente entre áreas de estudio. Para analizar el conjunto de parámetros acústicos independientes de la población de origen, se calcularon los valores medios de las medidas cada parámetro acústico por canción y se realizó una correlación lineal simple entre las medias de cada canción y los niveles medios de ruido ambiente de todas las áreas de estudio. Para el conjunto de parámetros acústicos dependientes de la población de origen, se realizó un ANOVA anidado (canciones dentro de áreas) de todos los valores de las medidas de los parámetros acústicos de cada canción entre los niveles medios de ruido ambiente de las dos áreas de población

mediterránea (cuena Provenzal e islas Columbretes) y de las tres áreas de población atlántica noreste (islas Azores, estrecho de Gibraltar y isla de Alborán).

Tras explorar estas tendencias y para controlar el posible efecto de las diferencias geográficas en los parámetros acústicos, se estudió el efecto del nivel de ruido ambiente en una sola área, la del estrecho de Gibraltar, por presentar esta el mayor nivel de ruido ambiente de todas las áreas incluidas en el trabajo. Se comprobó si existía un patrón diario del nivel de ruido ambiente significativo mediante un ANOVA de una vía y se analizó el efecto de las diferencias del nivel de ruido ambiente sobre los parámetros acústicos medidos en canciones de esta área de estudio a diferentes horas del día mediante un análisis de correlación linear simple.

3.8 Análisis del efecto agudo del ruido ambiente generado por una campaña geofísica marina

Las grabaciones realizadas en el área de la isla de Alborán durante el invierno de 2006 presentaron durante un periodo de diez días disparos continuados de baja frecuencia atribuidos a disparos de cañones de aire comprimido de una campaña de exploración geofísica marina. La campaña coincidió con la presencia de rorcuales comunes en el área de estudio y la circunstancia fue aprovechada para evaluar el efecto de esta fuente sonora sobre el nivel de ruido ambiente del área, el comportamiento acústico de los rorcuales comunes y su desplazamiento por el área de estudio.

Se analizó el nivel de ruido ambiente en dos periodos de 24 h, uno en ausencia de la campaña geofísica y otro en presencia de la misma. Los dos periodos se seleccionaron en función de las condiciones meteorológicas, con estado del mar inferior o igual a Beaufort 1, tras consultar el banco de datos oceanográficos de la red de boyas meteorológicas RAYO de Puertos del Estado (http://www.puertos.es/es/oceanografia_y_meteorologia/banco_de_datos/index.html). Se realizaron cuatro tipos de análisis: 1- el nivel de presión de campo acústico y 2- el espectrograma para el rango 0-1000 Hz, 3- el espectro de densidad de campo acústico y 4- el incremento de energía acústica sobre el ruido ambiente generado por los disparos de cañones de aire en la banda 0-200 Hz. Para realizar estos análisis se utilizó el código XBAT, salvo para el cálculo del incremento de energía acústica generado por los disparos que fue realizado con Excel versión 2003 (del paquete Office 2003 SP3, Microsoft Corporation, EEUU). Estos análisis permitieron definir el efecto de la campaña geofísica sobre el ruido ambiente del área de estudio.

Posteriormente se analizaron las posibles diferencias en los parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz emitidos por rorcuales comunes en el área de estudio en presencia y ausencia de la campaña geofísica. Para ello, se identificaron periodos en los que se solaparon disparos de cañones de aire con canciones de rorcuales comunes con suficiente calidad como para poder realizar medidas de parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz de rorcual común. Los pulsos seleccionados se incluyeron en un registro creado con el código XBAT con el fin de calcular los parámetros acústicos con el código “Energy Measurement Tool” como se describe en el apartado 3.5.4. Esta misma operación se repitió con el fin de identificar canciones emitidas en ausencia de disparos de cañones de aire en las horas previas o posteriores a los periodos de solapamiento entre canciones y disparos. Los resultados de estas medidas se

compararon entre sí por medio de una ANOVA anidado (canciones dentro de periodos de presencia o ausencia de disparos) para cada parámetro acústico.

Por último, el desplazamiento de los rorcuales comunes detectados en el área de estudio durante los días previos, posteriores y de la campaña geofísica fueron analizados. Para ello, con el código XBAT se creó un registro de pulsos de 20 Hz con una relación señal / ruido alta y que hubieran sido detectados en ambos grabadores en diferentes canciones a lo largo de todo el periodo de muestreo. Este registro fue analizado con el código ISRAT_LT (“Ildar's Statistical Recognition and Analysis Tool Location and Tracking”), desarrollado por BRP-Cornell para la plataforma Matlab, como se detalla en el capítulo II, apartado 4.4.1, para calcular su ángulo de recepción y mediante el seguimiento de ángulos obtenidos en pulsos consecutivos de una misma canción identificar el sentido y dirección de movimiento así como su progreso entre los diferentes días.

4. Resultados

4.1 Fondeos completados/fallidos

En total, se realizaron 7 fondeos de 3 meses de duración media en un periodo de 2 años y 5 meses, desde agosto de 2006 hasta enero de 2009. Se obtuvieron un total de 20.547 horas de grabación. No en todos los fondeos se obtuvieron grabaciones debido a fallos en los grabadores o pérdida del instrumento. La tabla IV-3 enumera y describe los fondeos fallidos.

Área de estudio	Instrumento	Problema identificado
Cabo de Begur	EAR	Pérdida del instrumento debido a fuertes tormentas durante el periodo de muestreo (olas > 7 m).
Menorca	EAR	Error en el programa de control de la grabación. No se obtuvieron archivos binarios.

Tabla IV-3: Descripción de los fondeos fallidos, área y problema identificado.

El tamaño muestral obtenido en cada área de estudio fue diferente y se define en la tabla IV-4.

Área de estudio	Horas de grabación de sonido	Tamaño muestral
Cuenca Provenzal	2133 h	927 pulsos 20 Hz
I. Columbretes	4296 h	91.327 pulsos 20 Hz
I. Alborán 2006	4271 h	2.202 pulsos 20 Hz
E. de Gibraltar	5718 h	4.137 pulsos 20 Hz
A. islas Azores	4129 h	911 pulsos 20 Hz
Total	20.547 h	99.504 pulsos Hz

Tabla IV-4: Tamaño muestral (nº de pulsos de 20 Hz de rorcual común) y número de horas de grabación obtenidos en cada área de estudio.

4.2 Descripción de los parámetros acústicos medidos por área de estudio

Del total de 99.504 pulsos detectados en las grabaciones de todas las áreas de estudio, se incluyeron 4103 pulsos en los registros IPI, siendo señales consecutivas ordenadas en secuencias pertenecientes a diferentes canciones fácilmente distinguibles y útiles para medir el tiempo central de cada pulso y obtener el intervalo entre pulsos en cada área de estudio. Los pulsos seleccionados se repartieron en un total de 202 canciones diferentes. La tabla IV-4 describe la proporción de pulsos y canciones seleccionadas por área de estudio y los valores medios y error estándar de los intervalos entre pulsos de los registros IPI obtenidos a partir de la medida de tiempo central:

Área de estudio	n	n canciones	Intervalo entre pulsos IPI (S.E.) en seg
Cuenca provenzal	835	41	14,92 (0,02)
I. Columbretes	698	31	14,83 (0,02)
I. de Alborán	949	41	12,88 (0,02)
E. de Gibraltar	623	37	13,06 (0,02)
Islas Azores	998	52	12,88 (0,01)

Tabla IV-5: Número de pulsos de 20 Hz de rorcual común y número de canciones seleccionadas para obtener el intervalo entre pulsos consecutivos y los valores medios y error estándar en paréntesis del intervalo medido en cada área de estudio.

Del total de 99.504 pulsos detectados en las grabaciones de todas las áreas de estudio, se incluyeron 4.737 en los registros PA, siendo señales de alta calidad para la medición de los parámetros acústicos. Los pulsos seleccionados se repartieron en un total de 196 canciones diferentes. La tabla IV-6 describe la proporción de pulsos y canciones seleccionadas por área de estudio y los valores medios y error estándar de los 4 parámetros acústicos medidos en los pulsos de los registros PA.

Área de estudio	n pulsos 20 Hz	n canciones	Duración (S.E.) en seg	Frecuencia central (S.E.) en Hz	Ancho de banda (S.E.) en Hz	Pico de energía (S.E.) en Hz
Cuenca Provenzal	927	33	0,89 (0,01)	21,69 (0,03)	4,87 (0,04)	21,62 (0,03)
I. Columbretes	1093	18	0,95 (0,01)	21,66 (0,03)	4,91 (0,03)	21,58 (0,03)
I. Alborán	1014	47	1,02 (0,01)	21,70 (0,02)	6,73 (0,03)	21,44 (0,04)
E. de Gibraltar	792	52	0,96 (0,00)	21,38 (0,01)	5,78 (0,01)	20,84 (0,01)
Islas Azores	911	46	1,07 (0,00)	22,65 (0,04)	6,88 (0,01)	22,51 (0,01)

Tabla IV-6: Número de pulsos de 20 Hz de rorcual común y número de canciones seleccionadas para la medición de los parámetros acústicos en cada área de estudio y valores medios y error estándar en paréntesis obtenidos para cada uno de los 5 parámetros acústicos incluidos en el análisis.

4.3 Descripción de los niveles de ruido obtenidos en cada área de estudio

Se calculó el nivel de presión de campo acústico de un total de 81.988 fragmentos de 15 minutos. La tabla IV-7 resume el número de fragmentos y los valores medios y error estándar del nivel de campo acústico de cada área de estudio.

Área de estudio	Fragmentos de grabación de 15 min	Presión de campo acústico (dB re 1µPa)	Error estandar de presión de campo acústico(dB re 1µPa)
Cuenca Provenzal	8.492	106,9	0,06
I. Columbretes	17.144	105,2	0,03
I. Alborán	17.044	103,7	0,03
E. de Gibraltar	22.832	112,5	0,05
Islas Azores	16.476	102,6	0,03
Total	81.988	-	-

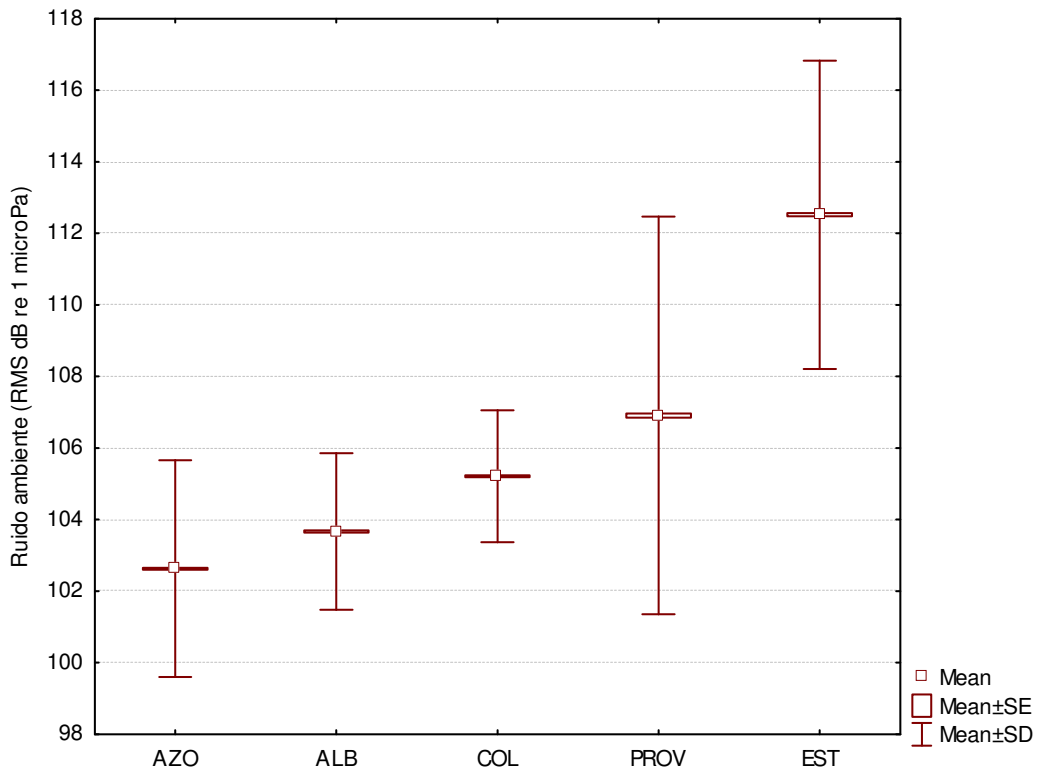
Tabla IV-7: Resumen del número de fragmentos de grabación de 15 minutos de duración de cada área de estudio y los valores medios y error estándar del nivel de campo acústico obtenidos.

Se realizó un ANOVA de una vía para detectar diferencias significativas en el nivel de ruido entre áreas. La tabla IV-7 resume los resultados del ANOVA.

	SS	Grados lib.	MS	F	Nivel sig.
Intercept	396638563	1	396638563	26321716	< 0,01
AREA	536917	4	134229	8908	< 0,01
Error	584552	38792	15		

Tabla IV-8: Resumen de resultados del ANOVA de una vía para identificar diferencias en el nivel de ruido ambiente entre áreas de estudio.

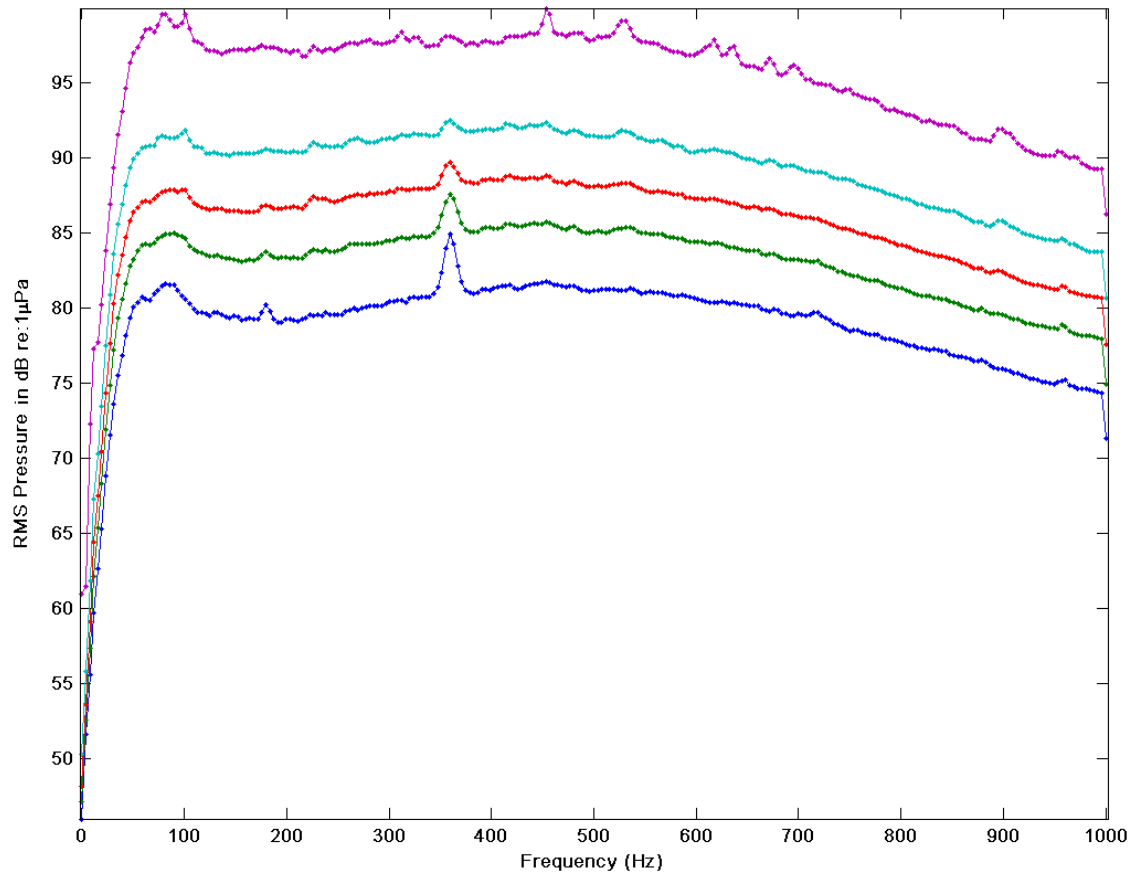
Los resultados del ANOVA indican que hay diferencias altamente significativas en los niveles de ruido ambiente entre áreas de estudio. La figura IV-14 muestra las diferencias y la varianza del nivel de ruido ambiente en un diagrama de cajas.



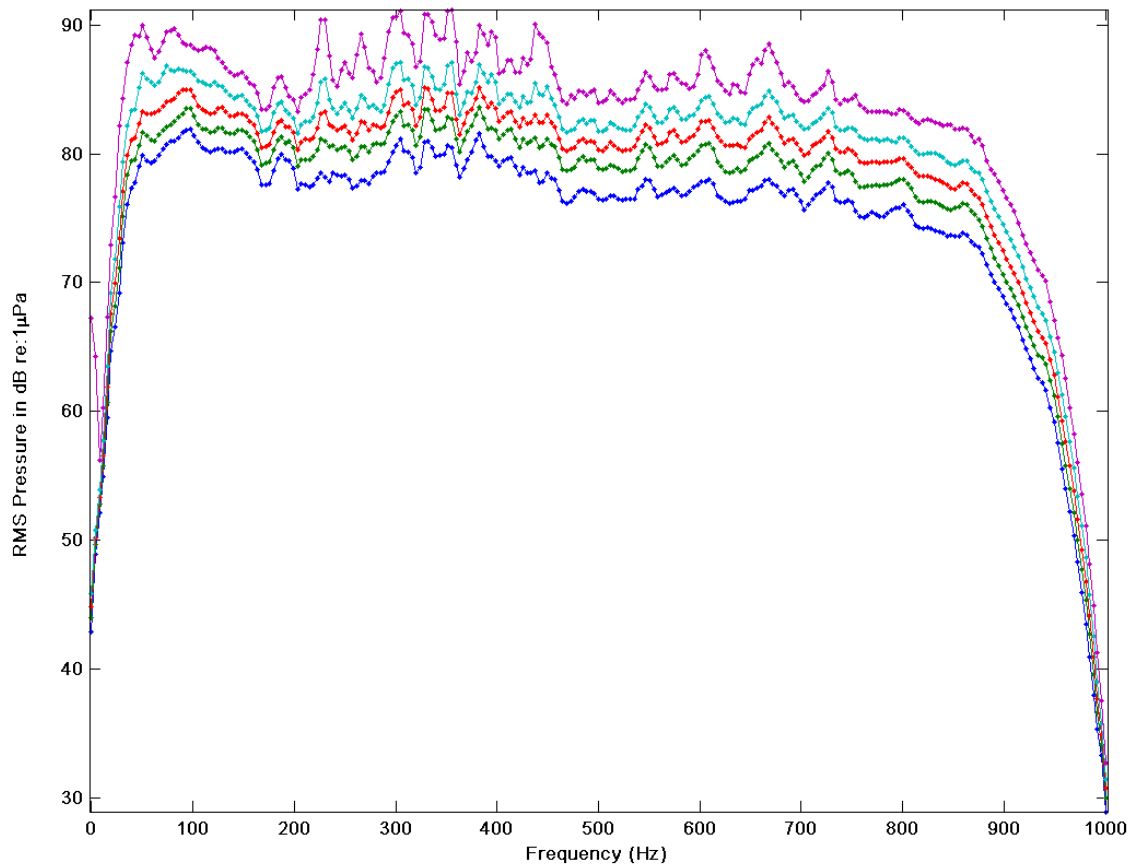
IV-14: Diagrama de cajas representando las diferencias y la varianza (desviación estándar y error estándar) del nivel de ruido ambiente en cada área de estudio. Las áreas se ordenan en función del nivel de ruido ambiente, de menor a mayor nivel.

Puede observarse en la figura IV-14 que el estrecho de Gibraltar es el área más ruidosa y las islas Azores la más silenciosa, como se preveía por el nivel de tráfico marítimo de ambas áreas. La distribución de energía en la banda 0-1000 Hz se analizó para todas las áreas de estudio. La figura IV-15 muestra percentiles de los espectros de densidad de campo acústico de la totalidad el periodo de muestreo de cada área organizados de mayor a menor nivel de ruido.

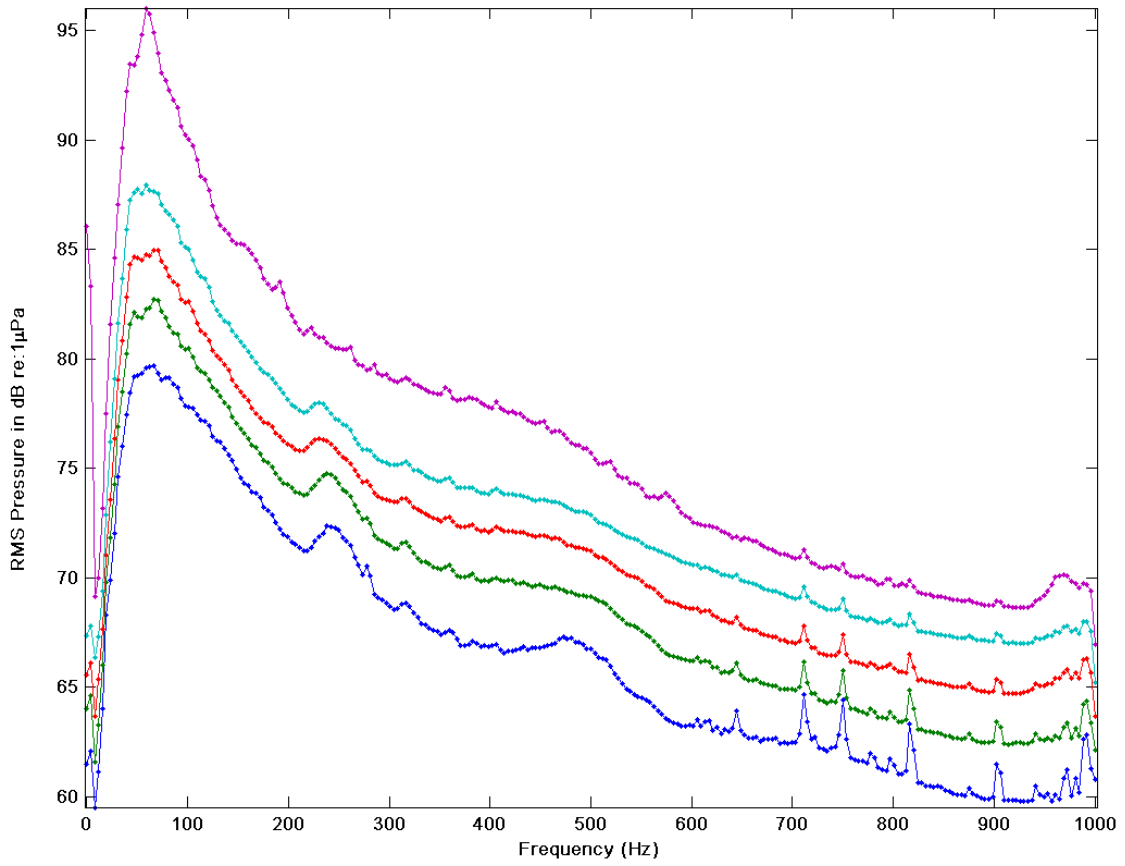
a)



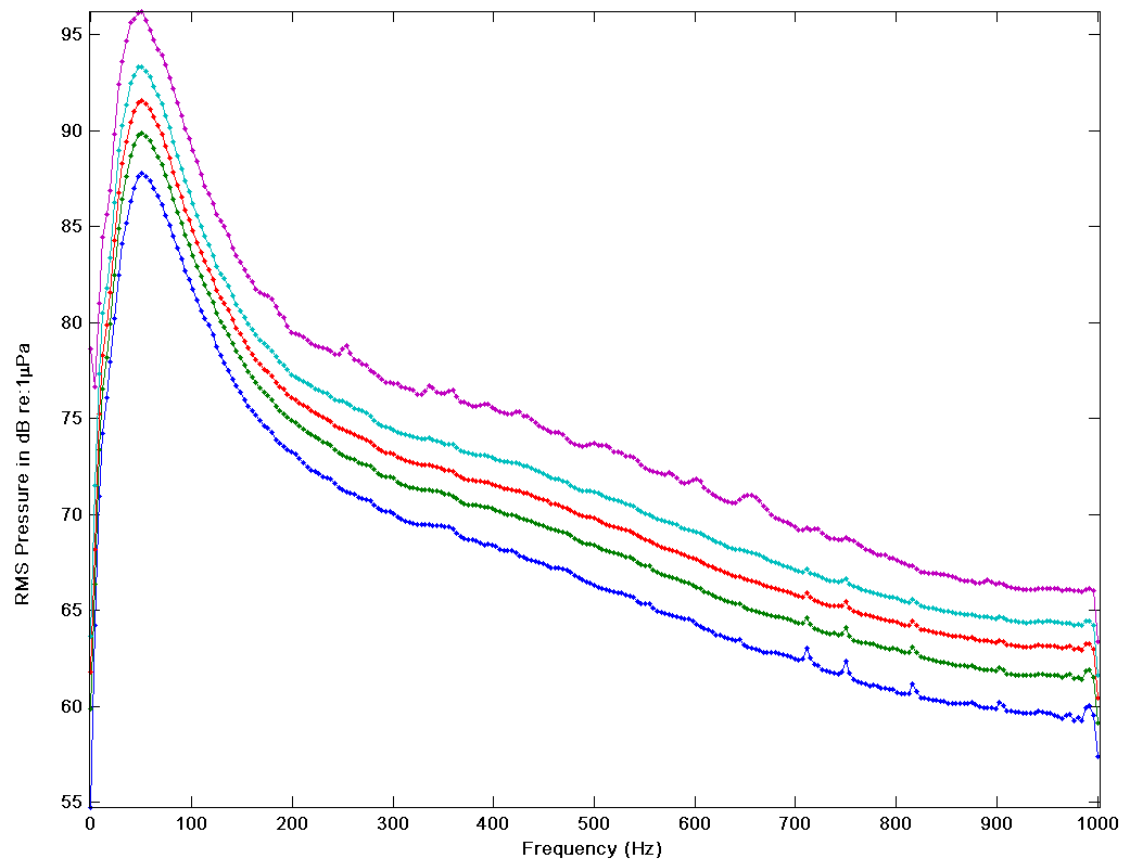
b)



c)



d)



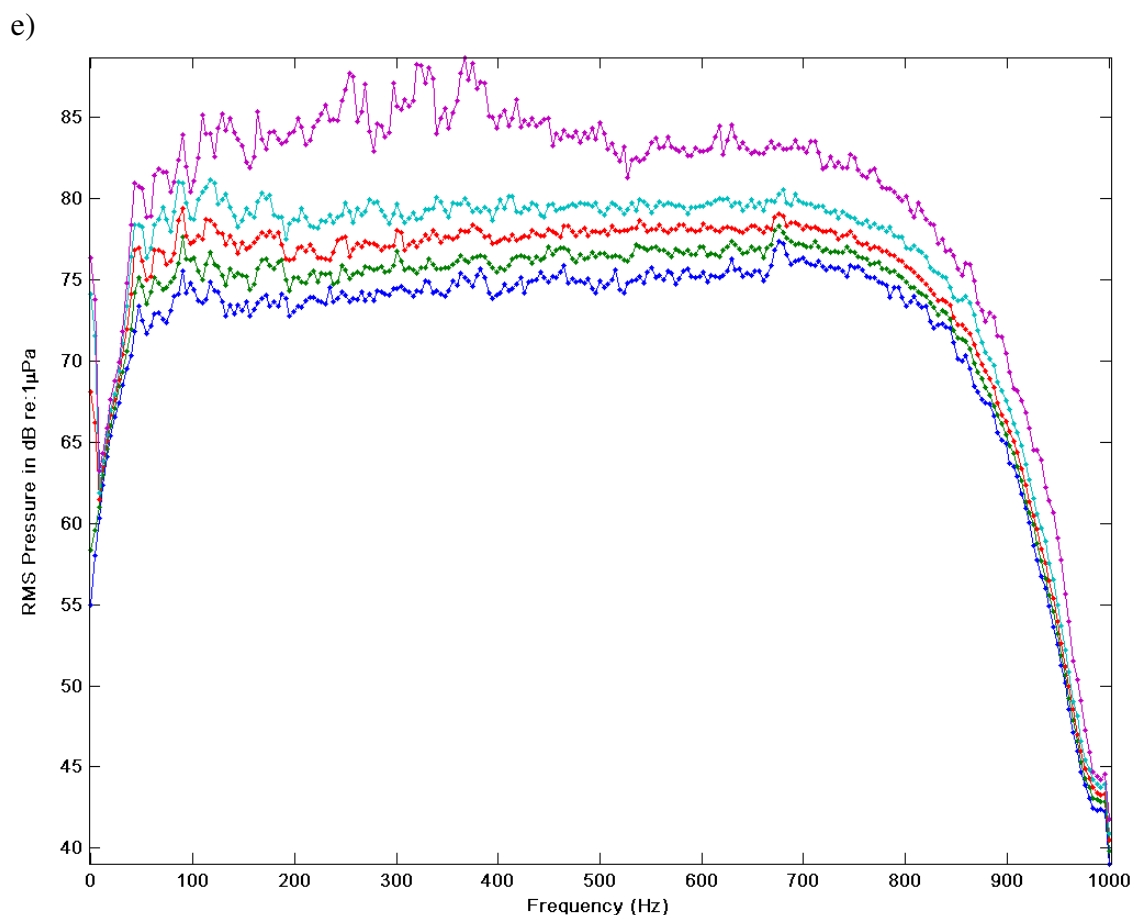


Figura IV-15: Percentiles 5, 25, 50, 75 y 95 % del espectro de densidad de campo acústico de la banda 0-1000 Hz de la totalidad del periodo de muestreo de las diferentes áreas de estudio en orden de mayor a menor nivel de ruido: a) estrecho de Gibraltar, b) cuenca Provenzal, c) Islas Columbretes, d) Isla de Alborán, e) islas Azores. Se representan los percentiles por colores, azul el menor (5 %) y violeta el mayor (95 %).

4.4 Análisis del efecto del tráfico marítimo en el comportamiento acústico del rorcual común

4.4.1 Efecto entre áreas de estudio

Puesto que el análisis se realizó en dos grupos, primero se estudiaron las diferencias en los niveles de ruido ambiente de las áreas correspondientes a estos dos grupos.

Se realizó un ANOVA de una vía para identificar diferencias significativas entre las áreas de la población mediterránea, islas Columbretes y cuenca Provenzal y entre las áreas de la población atlántica noreste, islas Azores, estrecho de Gibraltar e isla de Alborán. Los resultados se resumen en la tabla IV-9.

	SS	Grados lib.	MS	F	Nivel de sig.
Intercept	145314541	1	145314541	6919393	p < 0,01
Áreas pobl. mediterr.	9354	1	9354	445	p < 0,01
Error	294771	14036	21		

	SS	Grados lib.	MS	F	Nivel de sig.
Intercept	253433152	1	253433152	21650811	p < 0,01
Áreas pobl. atlántica	527374	2	263687	22527	p < 0,01
Error	289781	24756	12		

Tabla IV-9: Resumen de los resultados del ANOVA de una vía para identificar diferencias significativas del nivel de ruido ambiente entre las áreas de la población mediterránea, islas Columbretes y cuenca Provenzal y entre las áreas de la población atlántica noreste, islas Azores, estrecho de Gibraltar e isla de Alborán.

Los resultados del ANOVA demuestran que hay diferencias altamente significativas en el nivel de ruido medio entre las áreas de estudio en los dos grupos. Estas diferencias pueden verse representadas en la figura IV-14. Por lo tanto, la comparación de valores de los parámetros acústicos medidos en canciones de distintas áreas permite explorar un posible efecto del nivel de ruido ambiente en el comportamiento acústico de ambas poblaciones de rorcual común.

Para el grupo de parámetros acústicos dependientes de la población de origen se aplicó un ANOVA anidado (secuencias dentro de áreas) de todos los valores de las medidas de los parámetros acústicos de cada canción entre los niveles medios de ruido ambiente de las dos áreas de población mediterránea (cuenca Provenzal e islas Columbretes) y de las tres áreas de población atlántica noreste (islas Azores, estrecho de Gibraltar y isla de Alborán). Se asume que la distribución de los valores de ruido ambiente tienden a la normalidad por ser un tamaño muestral elevado ($n > 1500$ para todos los grupos de parámetros acústicos), según el teorema del límite central (Grinstead y Snell, 1997). Los resultados del análisis para áreas de población mediterránea se resumen en la tabla IV-10 y para áreas de población atlántica noreste en la tabla IV-11:

Parámetro acústico	SS	Grados lib.	MS	F	Nivel sig.	
Intervalo entre pulsos	Intercept	138368,2	1	138368,2	377634,2	p < 0,01
	Nivel ruido ambiente	13,5	1	13,5	9,7	p < 0,01
	Secuencia(nivel r. amb.)	97,6	70	1,4	3,8	p < 0,01
	Error	535,3	1461	0,4		
Ancho de banda	Intercept	10311,25	1	10311,25	13381,95	p < 0,01
	Nivel ruido ambiente	5,07	1	5,07	0,29	p = 0,596
	Secuencia(nivel r. amb.)	870,46	49	17,76	23,05	p < 0,01
	Error	1523,35	1977	0,77		

Tabla IV-10: IPI Resumen de resultados del ANOVA anidado entre áreas de población mediterránea los parámetros acústicos dependientes de la población de origen: intervalo entre pulsos de 20 Hz y ancho de banda de los pulsos.

Parámetro acústico		SS	Grados lib.	MS	F	Nivel sig.
Intervalo entre pulsos	Intercept	185085,1	1	185085,1	901476,2	p < 0,01
	Nivel ruido ambiente	4,0	2	2,0	2,8	p = 0,06
	Secuencia(nivel r. amb.)	90,0	127	0,7	3,5	p < 0,01
	Error	501,0	2440	0,2		
Ancho de banda	Intercept	29887,04	1	29887,04	62206,20	p < 0,01
	Nivel ruido ambiente	129,38	2	64,69	46,20	p < 0,01
	Secuencia(nivel r. amb.)	198,85	142	1,40	2,91	p < 0,01
	Error	1235,24	2571	0,48		

Tabla IV-11: Resumen de resultados del ANOVA anidado entre áreas de población atlántica los parámetros acústicos dependientes de la población de origen: intervalo entre pulsos de 10 Hz y ancho de banda de los pulsos.

El intervalo ente pulsos de 20 Hz presenta diferencias significativas entre los diferentes niveles de ruido ambiente para la población mediterránea, pero no para la atlántica, aunque en esta es próximo al nivel de significatividad. La variación del intervalo entre pulsos de 20 Hz entre canciones bajo un mismo nivel de ruido ambiente es significativa tanto en áreas de población mediterránea como atlántica, sugiriendo que el efecto del ruido ambiente es diferente entre individuos en ambas poblaciones, aunque siempre en menor grado que el efecto global entre diferentes niveles de ruido ambiente. El ancho de banda no parece ser afectado por la diferencia del nivel de ruido ambiente en la población mediterránea pero sí lo es en la población atlántica. Al igual que para el intervalo entre pulsos, el efecto es diferente entre individuos.

Para el grupo de parámetros acústicos que no presentan una dependencia con la población de origen se calcularon los valores medios de las medidas cada parámetro acústico por canción y se realizó una correlación linear simple entre las medias de cada canción y los niveles medios de ruido ambiente de todas las áreas de estudio. La tabla IV-12 muestra el resumen de resultados de este análisis.

Parámetro acústico	Duración	Frec. central	Frec. max. energía
r	-0,21	-0,47	-0,63
r ²	0,04	0,22	0,40
Nivel de sig.	p = 0,01	p < 0,01	p < 0,01

Tabla IV-12: Resumen del análisis de correlación linear simple entre los valores medios de los parámetros acústicos de cada canción y el nivel de ruido ambiente de todas las áreas de estudio.

Los tres parámetros acústicos presentan una correlación altamente significativa con el nivel de ruido ambiente entre áreas de estudio. Aunque el valor de r² no es muy elevado para la duración del pulso y la frecuencia central. Todas las correlaciones son negativas lo que sugiere que a mayor nivel de ruido ambiente menor es la duración de los pulsos, la frecuencia central y la frecuencia de máxima energía. La tendencia negativa en las correlaciones puede observarse en la figura IV-16, donde se representan lo valores

medios de los parámetros acústicos de cada canción en función del nivel de ruido de cada área de estudio y el ajuste de regresión linear simple.

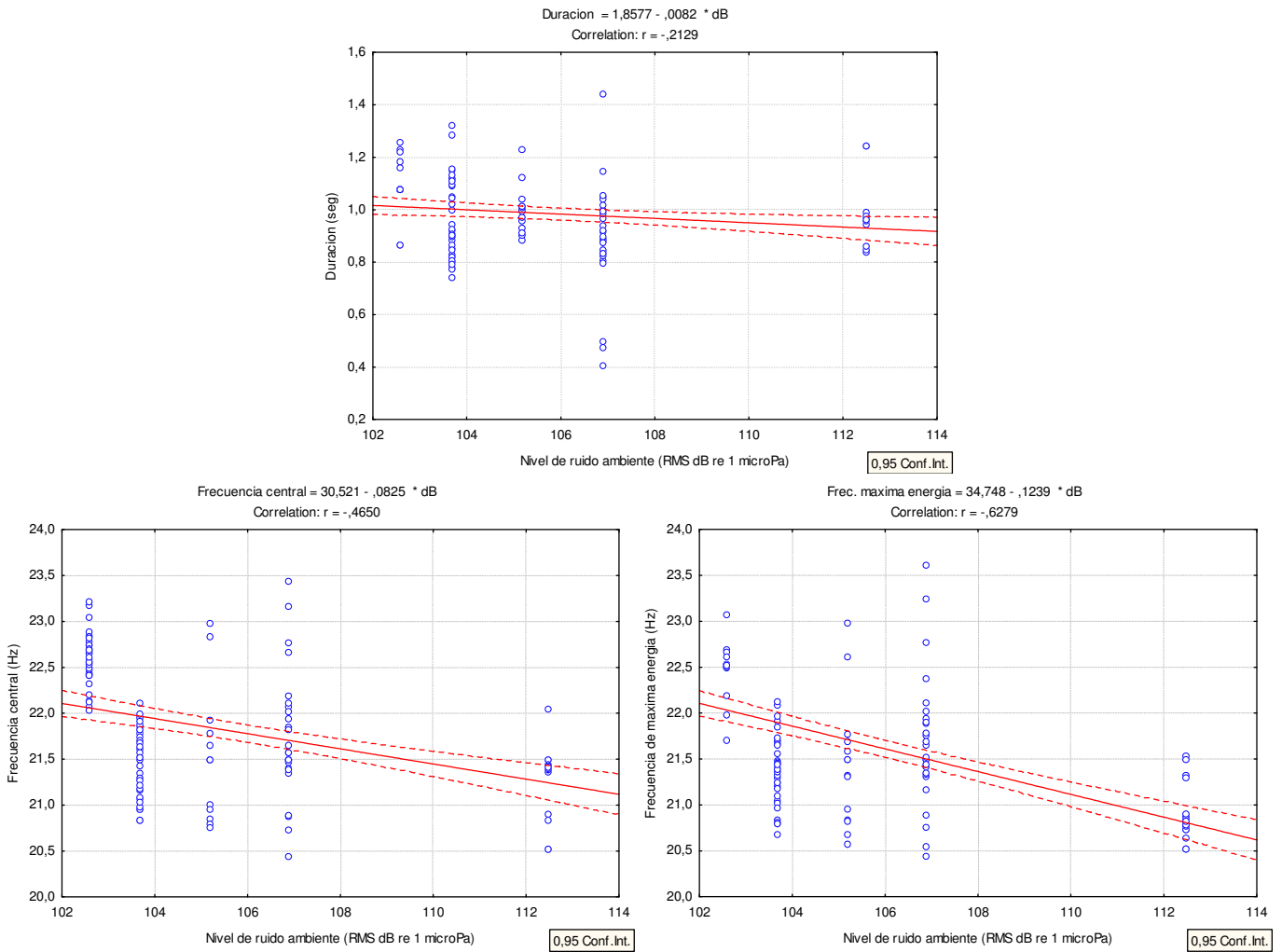


Figura IV-15: Figura de los ajustes de regresión linear simple para los valores medios de los parámetros acústicos, que no presentan una dependencia con la población de origen, de cada canción en función del nivel de ruido ambiente de cada área de estudio.

La figura IV-15 muestra como la frecuencia de máxima energía presenta la tendencia más fuerte. La frecuencia central presenta una tendencia más moderada y la duración una tendencia muy leve. Todos los valores tienden a ser menores ante niveles de ruido ambiente mayores.

4.4.2 Efecto en el estrecho de Gibraltar

Con el fin de controlar el posible efecto geográfico en la variación de los parámetros acústicos, se analizó el efecto del ruido ambiente en una sola área de estudio. Para ello se exploró el patrón diario del nivel de ruido ambiente medio por hora en las diferentes áreas de estudio y se observó que el área del estrecho de Gibraltar presentaba un patrón diario marcado además de ser el área de mayores niveles de ruido ambiente de todas las

estudiadas. Por estas razones fue seleccionada para realizar este estudio. La figura IV-17 muestra el patrón diario del nivel de ruido ambiente medio por hora en el área del estrecho de Gibraltar.

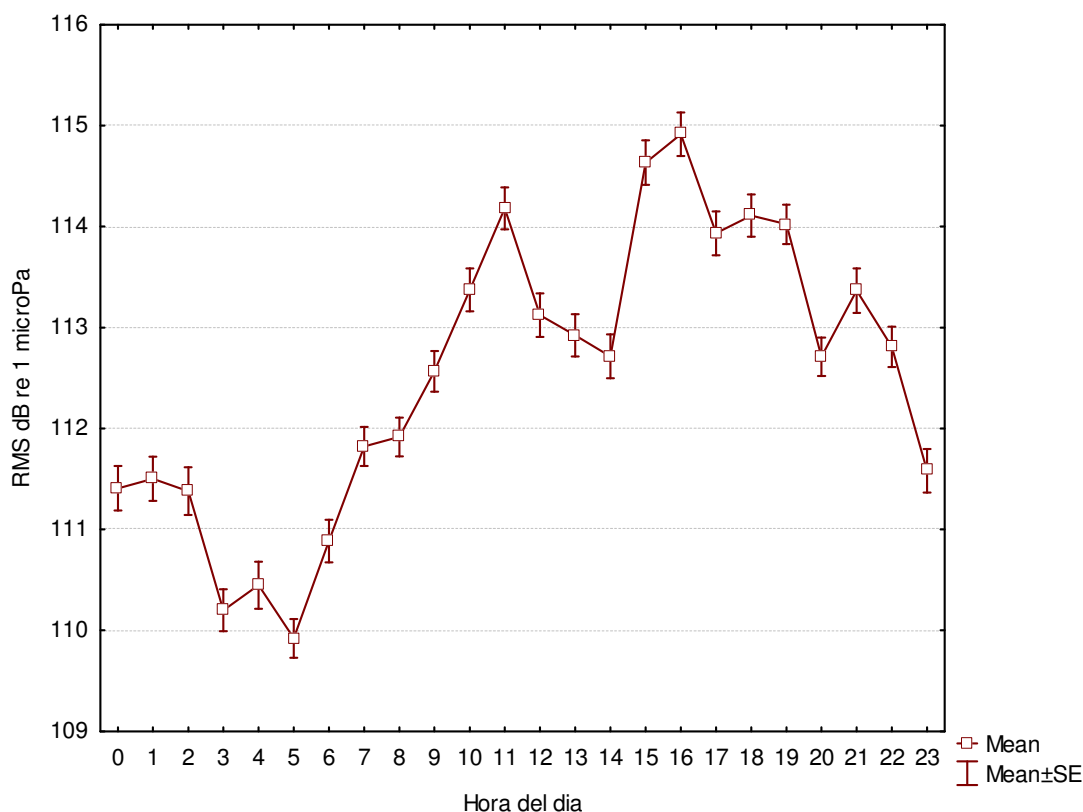


Figura IV-16: Diagrama de cajas del nivel de ruido ambiente medio y error estándar, representando el patrón diario del ruido ambiente en el área del estrecho de Gibraltar.

Se observa un aumento del nivel de ruido ambiente durante el amanecer y un descenso durante el atardecer. El nivel durante el día se mantiene más elevado que durante la noche, con un máximo a las 16:00 horas y un mínimo a las 05:00 horas. Con el fin de comprobar si estas diferencias son significativas, se realiza un ANOVA de una vía asumiendo que la distribución de los valores de ruido ambiente tienden a la normalidad por ser un tamaño muestral elevado ($n = 9021$), según el teorema del límite central (Grinstead y Snell, 1997). Los resultados del análisis se muestran en la tabla IV-13.

	SS	Grados lib	MS	F	Nivel sig.
Intercept	114209869	1	114209869	6836570	$p < 0,01$
Hora del día	17399	23	756	45	$p < 0,01$
Error	150301	8997	17		

Tabla IV-13: Resumen del ANOVA de una vía para comprobar si hay diferencias significativas en el nivel de ruido ambiente de las diferentes horas del día en el área del estrecho de Gibraltar.

Las diferencias en nivel de ruido ambiente medio por hora descritos en este análisis son altamente significativas.

Los valores de los diferentes parámetros acústicos obtenidos de los pulsos de 20 Hz de cada canción del estrecho de Gibraltar se ordenaron por la hora a la que fueron detectados y se asociaron al nivel de ruido ambiente medio calculado a lo largo de las 24 horas. Se realizó un análisis de correlación linear simple para explorar posibles tendencias entre los niveles de ruido ambiente y los valores de los parámetros acústicos. La tabla IV-14 resume los resultados de este análisis.

Parámetro acústico	Intervalo entre pulsos	Duración	Frec. central	Ancho de banda	Frec. max. energía
r	-0,15	-0,50	-0,05	-0,19	-0,41
r²	0,02	0,25	0,002	0,04	0,17
Nivel de sig.	p<0,01	p<0,01	p<0,01	p<0,01	p<0,01

Tabla IV-14: Resumen del análisis de correlación linear simple entre los valores de los parámetros acústicos medidos en pulsos de 20 Hz en canciones detectadas en el estrecho de Gibraltar y los niveles de ruido ambiente medios por hora registrados en esta misma área.

El análisis de correlación muestra que todos los parámetros acústicos presentan una correlación altamente significativa con la variación diaria del nivel de ruido ambiente. Sin embargo los niveles de r^2 son muy bajos para todos los parámetros excepto para la duración, cuya correlación con el nivel de ruido explica un 25 % de la variación. La correlación se representa en la figura IV-17 mediante el ajuste de curvas de regresión para cada parámetro acústico.

Efecto del ruido como contaminante

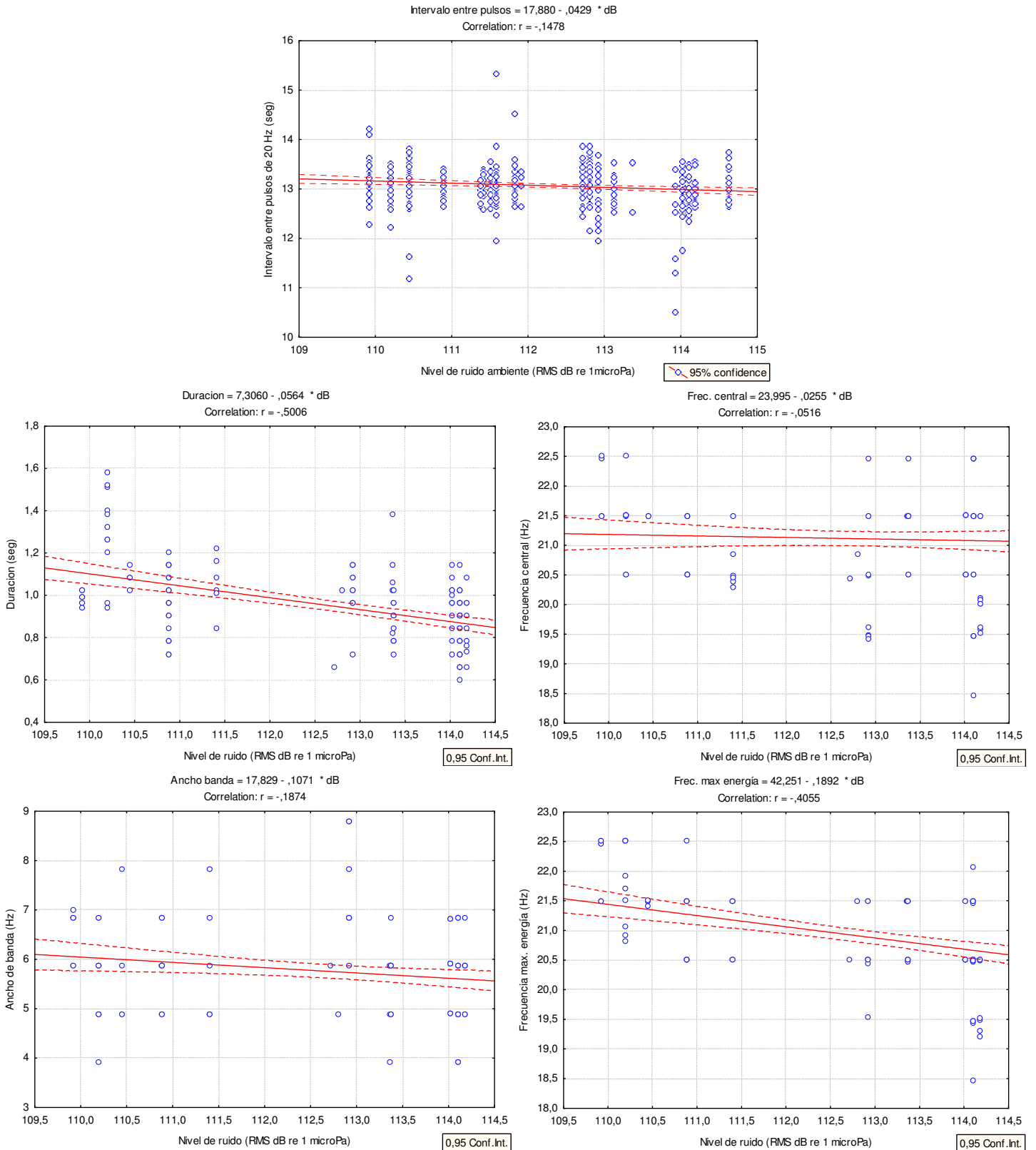


Figura IV-17: Ajuste de curvas de regresión de los valores de los parámetros acústicos medios por canción ordenados por nivel de ruido ambiente del estrecho de Gibraltar.

La correlación es negativa para todos los casos al igual que en la comparación entre áreas de estudio, indicando que a mayor nivel de ruido ambiente menor es el valor de los diferentes parámetros acústicos. Aunque en este caso la tendencia es pronunciada únicamente para la duración de los pulsos de 20 Hz. El valor de r^2 de los demás parámetros es muy bajo o insignificante por lo que no hay una tendencia bien definida.

4.5 Análisis del efecto de una campaña geofísica marina

Las grabaciones realizadas en el área de la isla de Alborán durante el invierno de 2006 presentaron durante un periodo de once días, del 8 al 18 de diciembre, explosiones continuadas de baja frecuencia a intervalos de entre 18 y 60 segundos. El patrón y estructura acústica de estas explosiones fue atribuida a los disparos de cañones de aire comprimido de la campaña científica de exploración geofísica marina MARSIBAL 1-06, realizada a bordo del B.I.O. Hespérides. La campaña fue organizada por el Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra en colaboración con el Instituto de Ciencias del Mar y el Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera” todos pertenecientes a la red de centros del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Esta campaña se encuentra dentro del marco del proyecto coordinado SAGAS (CTM2005-08071-C03-1/MAR) financiado por el Plan Nacional de I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia.

El buque contó con equipamiento para obtener perfiles sísmicos de reflexión multicanal y perfiles monocanal de alta resolución. El equipo multicanal consistió en un streamer (línea de hidrófonos de arrastre) Teledyne de 2400 m de 24 secciones con 96 elementos. Las fuentes acústicas para los perfiles de reflexión multicanal utilizadas fueron cinco cañones de aire comprimido Bolt modelos LongLife 1500 y 1900, con un total de 1395 ci (22,86 l) y una presión de aire de 140 bar. El equipo monocanal consistió en un streamer de 360 m con tres elementos. Las fuentes acústicas para los perfiles monocanal de alta resolución utilizadas fueron cuatro cañones de mezcla de aire y propano Texas Instruments modelo Sleeve Gun.

Ambos sistemas se utilizaron simultáneamente o por separado. Además de estos, el buque contó con varias sondas de acústica activa, entre ellas una multihaz SIMRAD EM120 con una frecuencia carrier de 12 kHz con un nivel de fuente superior a 225 dB re 1 μ Pa a 1m y otra Kongsberg TOPAS PS 18 con frecuencia carrier variable de 0,5 a 6 kHz y un nivel de fuente de 204 dB re 1 μ Pa a 1m.

Se obtuvieron 1705 km de perfiles sísmicos multicanal y más de 550 km de perfiles monocanal de alta resolución repartidos por la región sur de la cuenca Balear y el mar de Alborán.

4.5.1 Efecto sobre el ruido ambiente del área

El periodo de la campaña de exploración geofísica marina detectada durante el invierno de 2006 en el área de la isla de Alborán fue analizado en detalle con el fin de estudiar su posible efecto en el comportamiento acústico de los rorcuales comunes y su desplazamiento por el área de estudio.

Con el fin de explorar las diferencias en la estructura e intensidad del ruido ambiente en el contexto de presencia y ausencia de campaña geofísica, se realizaron tres tipos de

análisis del ruido ambiente en dos periodos de 24 horas, uno en ausencia y otro en presencia de campaña geofísica. El primer análisis fue del nivel de presión de campo acústico en todo el rango de frecuencias completo (0-1000 Hz) y en la banda 15-25 Hz que es el rango principal de comunicación del rorcual común. Este análisis permitió explorar la intensidad de energía acústica global y de la banda principal de comunicación del rorcual común y su variación en el dominio temporal. El segundo fue un análisis espectrográfico del rango de frecuencias completo (0-1000 Hz) en los contextos de presencia y ausencia de campaña geofísica. Este análisis permitió explorar el reparto de energía acústica en el dominio de frecuencias. El tercero fue un análisis del espectro de densidad de campo acústico en la banda 0-200 Hz en los mismos contextos para explorar con más detalle el reparto de energía acústica en las frecuencias más afectadas por la campaña geofísica.

Para los métodos de análisis del nivel de presión de campo acústico y análisis espectrográfico se utilizó una transformada rápida de Fourier (Cooley y Tukey, 1965) de 512 puntos, ajustando una ventana de Hanning con una resolución de 3,91 Hz y 2,56 seg. sobre los mismos periodos de 24 horas. Para el análisis de espectro de densidad se utilizó una transformada rápida de Fourier de 512 puntos, ajustando una ventana de Hanning con una resolución de 0,78 Hz y 12,8 seg. sobre los mismos periodos de 24 horas.

La figura IV-18 muestra el nivel de presión de campo acústico de los periodos de 24 horas a) sin presencia de campaña geofísica y b) con presencia de campaña geofísica. El nivel de presión de campo acústico de la banda 0-1000 Hz se representa en rojo y el de la banda 15-25 Hz en azul.

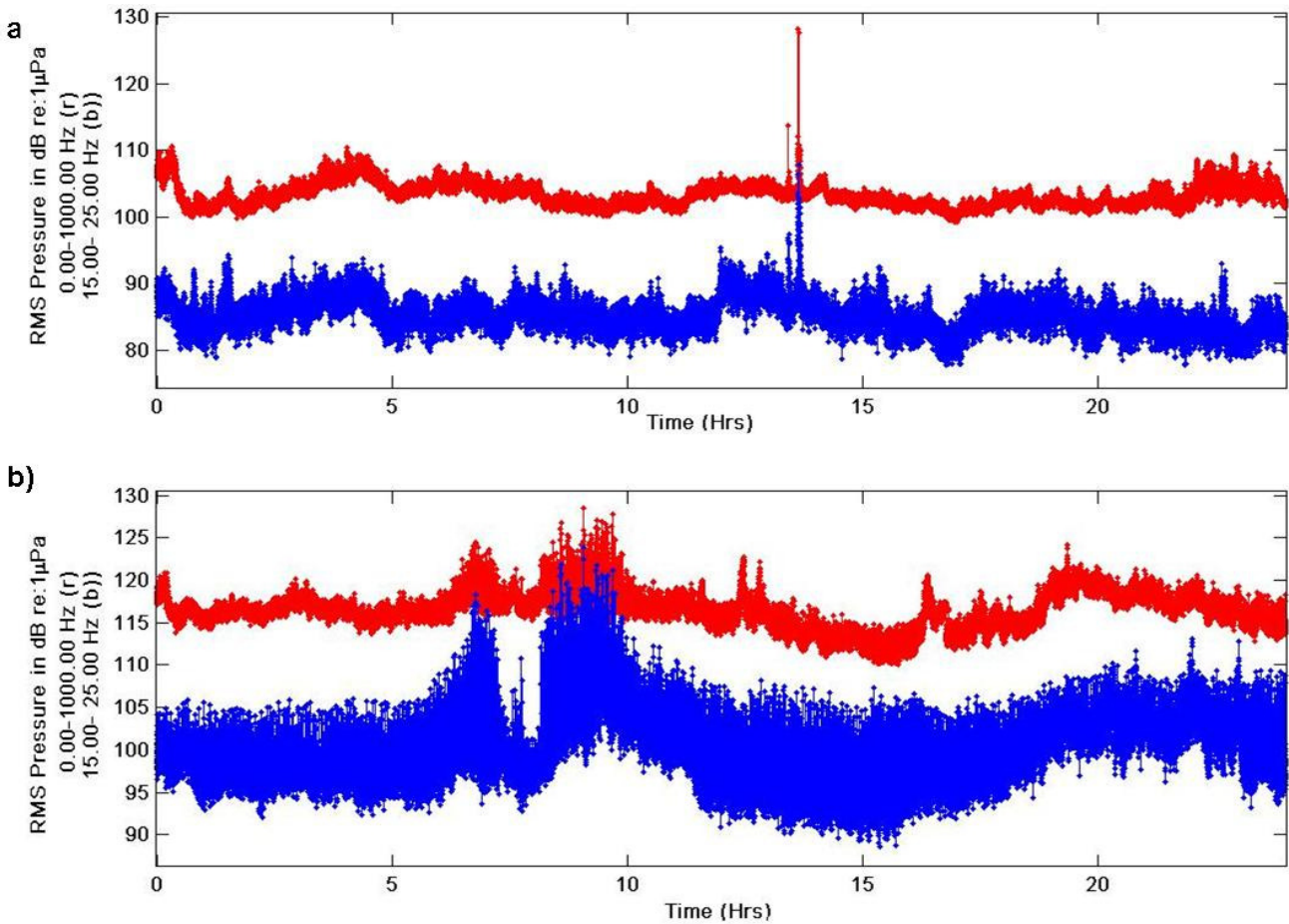


Figura IV-18: Nivel de presión de campo acústico de un periodo de 24 horas a) sin presencia de campaña geofísica y b) con presencia de campaña geofísica. La banda 0-1000 Hz se representa en rojo y la banda 15-25 Hz en azul.

La presencia de la campaña hizo incrementar el nivel presión de campo acústico medio en la banda 0-1000 Hz en 12,94 dB y en concreto, en la banda de comunicación principal del rorcual común 15-25 Hz en 15,32 dB. La varianza del nivel de ruido ambiente también se ve afectada por la presencia de la campaña geofísica, aumentando su error estándar en 0,06 dB para el rango 0-1000 Hz y en 0,18 dB para la banda 15-25 Hz. La tabla IV-15 muestra los valores medios y variación del nivel de ruido ambiente global (0-1000 Hz) y específico de la banda de comunicación del rorcual común (15-25 Hz) en presencia y ausencia de la campaña geofísica.

La figura IV-19 muestra los espectrogramas de ambos periodos de 24 horas, a) sin presencia de campaña geofísica y b) con presencia de campaña geofísica donde se observa la distribución temporal y espectral de la energía acústica generada por la campaña geofísica. La figura IV-20 muestra la distribución de energía acústica a lo largo de los primeros 200 Hz en forma de percentiles de espectro de densidad de campo acústico de los dos periodos de 24 horas representados en la figura IV-18 y IV-19.

Periodo de grabación	dB re 1 μ Pa banda 0-1000 Hz	Error estándar banda 0-1000 Hz	dB re 1 μ Pa banda 15-25 Hz	Error estándar banda 15-25 Hz
Ausencia de campaña	103,74	0,05	86,12	0,03
Presencia de campaña	116,68	0,11	101,44	0,21

Tabla IV-15: Valores medios de presión de campo acústico y error estándar de 2 periodos de 24 horas en la banda 0-1000 Hz y en la banda 15-25 Hz de comunicación principal del rorcual común en presencia y ausencia de la campaña geofísica.

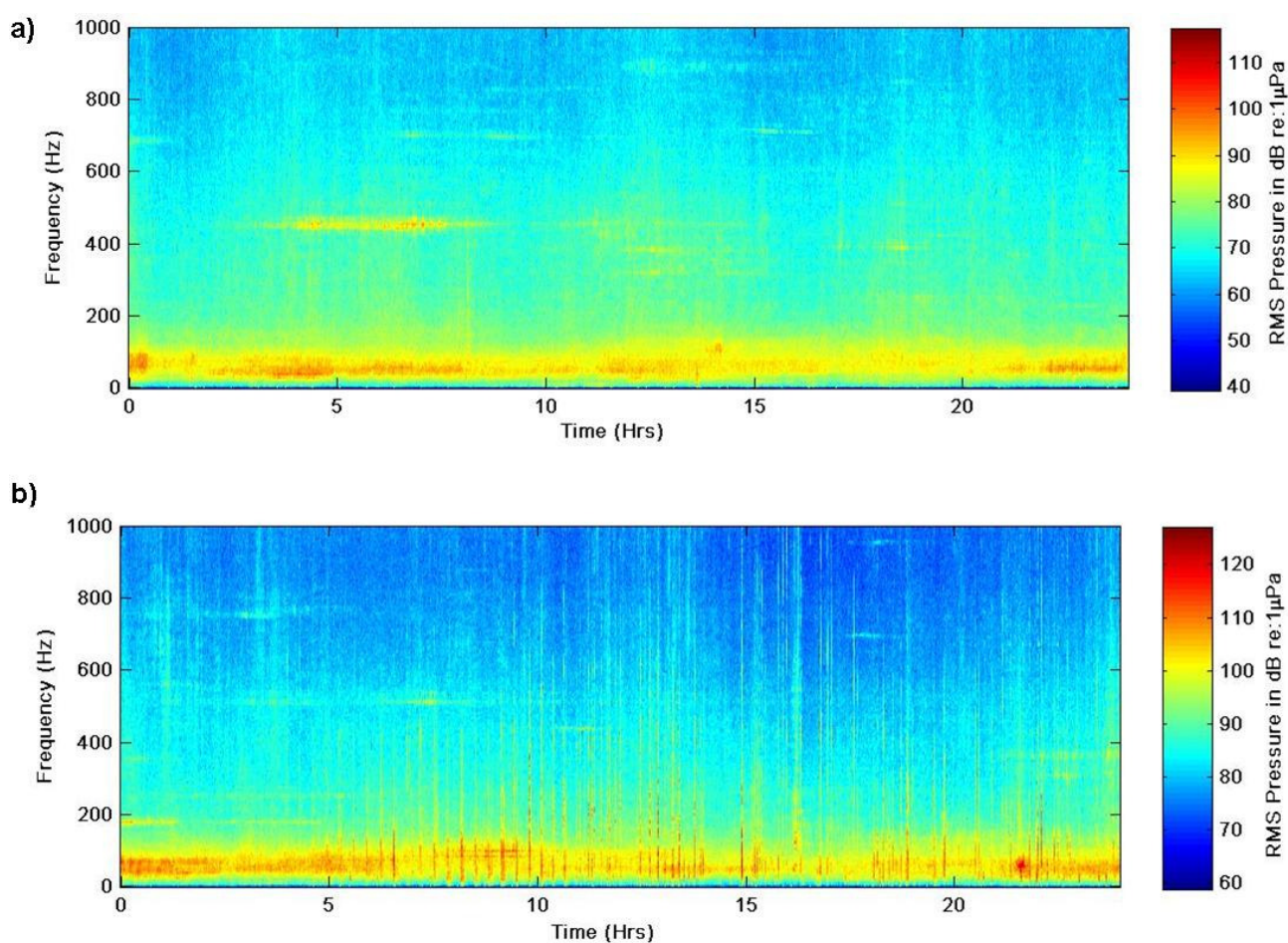


Figura IV-19: Espectrograma de la banda 0-1000 Hz de un periodo de 24 horas a) sin presencia de campaña geofísica y b) con presencia de campaña geofísica.

Se observa más energía pulsada, mayor intensidad de ruido en los primeros 200 Hz y mayor variabilidad en el espectrograma con presencia de campaña geofísica.

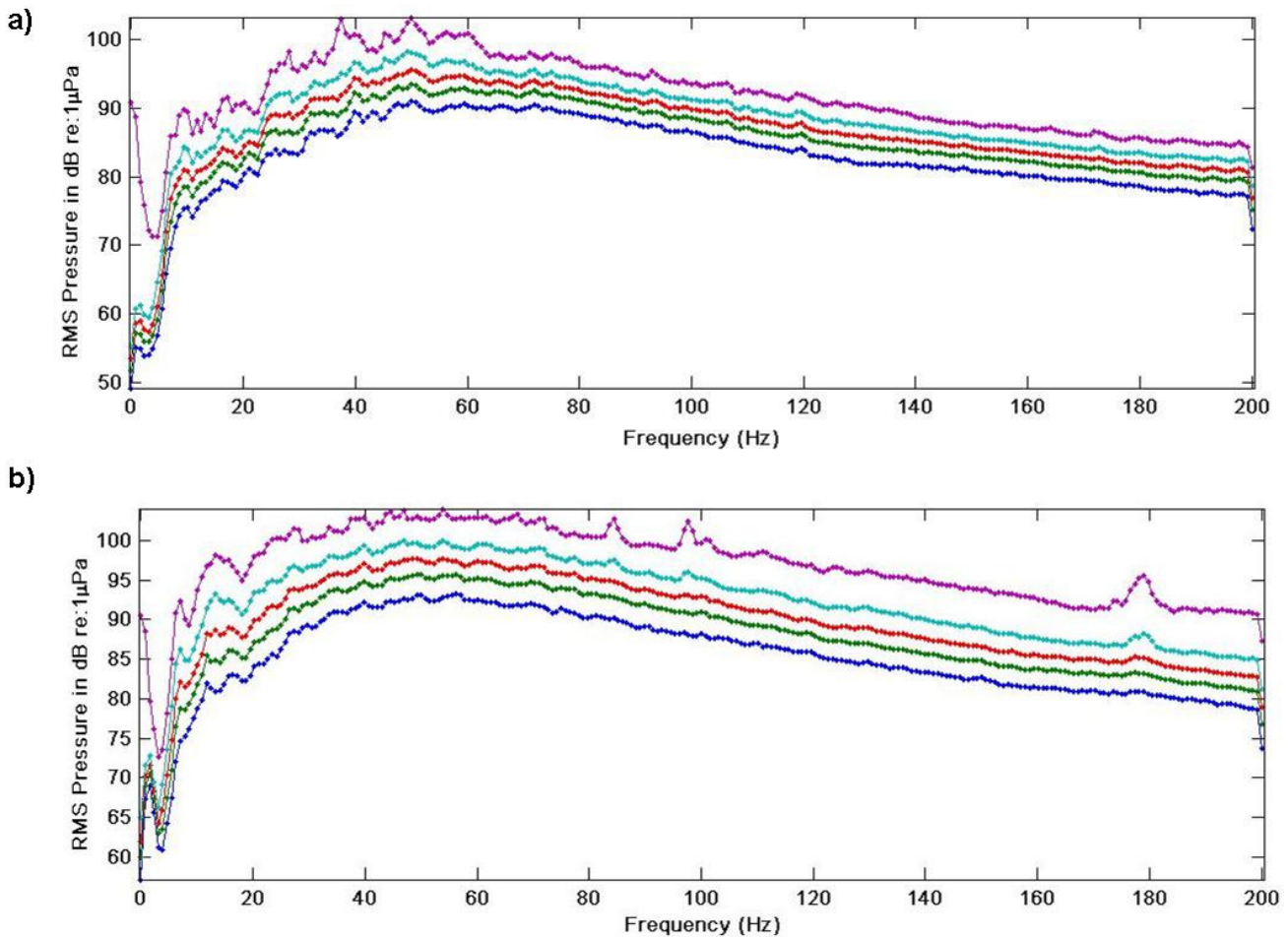


Figura IV-20: Percentiles de espectro de densidad de campo acústico de la banda 0-200 Hz de un periodo de 24 horas a) sin presencia de campaña geofísica y b) con presencia de campaña geofísica. Se representan los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95 % por colores, azul el menor y violeta el mayor.

La presencia de la campaña hizo incrementar la densidad de campo acústico de forma considerable en la banda 0-40 Hz y de forma moderada para todos los percentiles hasta una frecuencia aproximadamente de 100 Hz, por encima de esta frecuencia el efecto sólo es visible en el percentil 95 hasta los 200 Hz.

La detección de disparos de cañones de aire fue prácticamente continua desde el 8 hasta el 17 de diciembre con muy breves interrupciones. El intervalo entre disparos fue muy variable, entre 18 y 60 segundos. En varios periodos, el intervalo entre disparos y la distribución de energía acústica de los disparos recibidos permitieron identificar dos fuentes de disparo simultáneas operando a diferentes intervalos de tiempo. La figura IV-21 muestra ejemplos de series de disparos a diferentes intensidades e intervalos. La duración de los disparos varió entre 0,06 a 0,9 segundos viéndose típicamente afectada por la reverberación de la señal emitida a gran distancia.

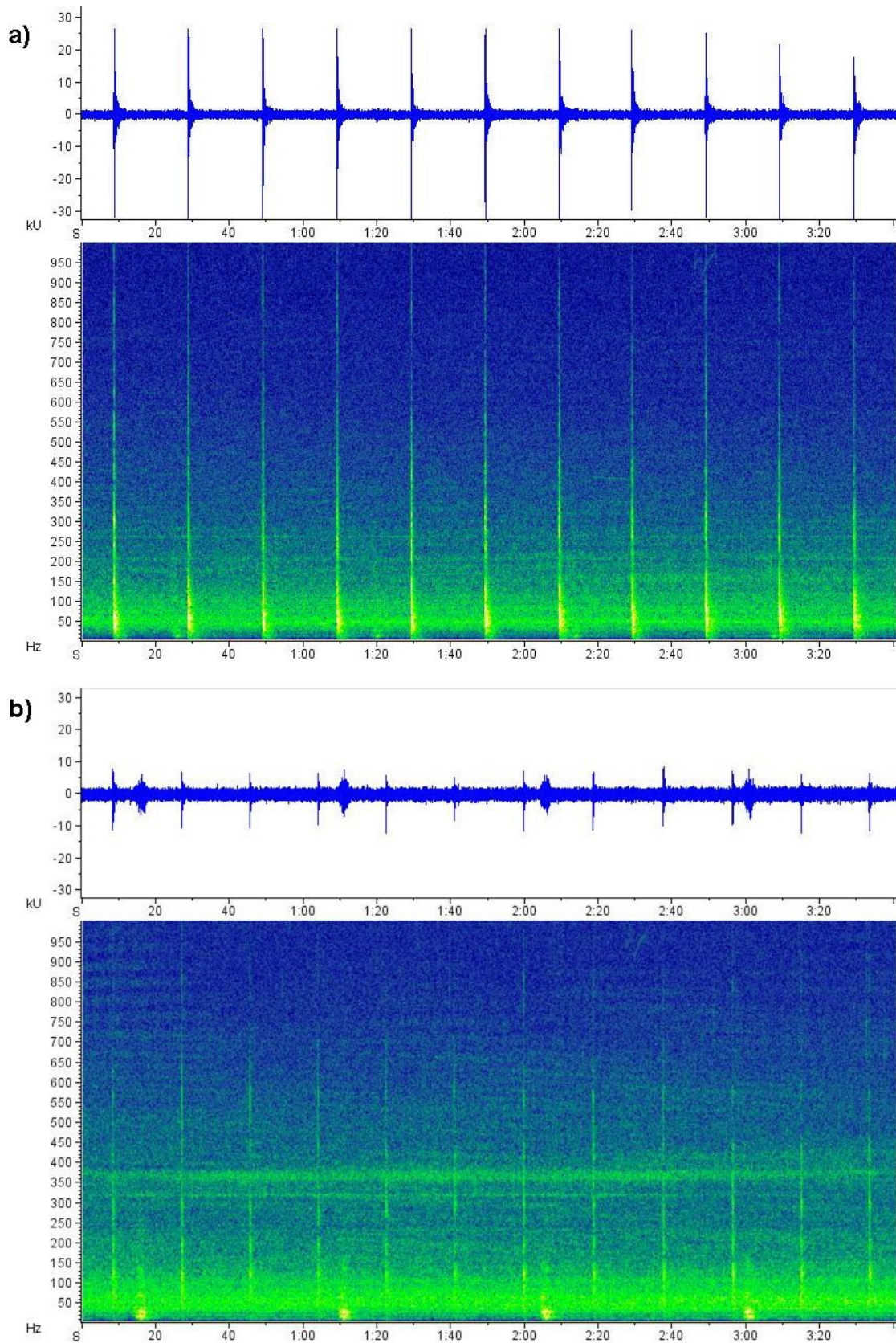


Figura IV-21: Forma de onda y espectrograma de 3 minutos 40 segundos de duración y 0-1000 Hz de a) una serie de disparos de cañones de aire a intervalos de 20 segundos recibidos con intensidad alta el 13 de diciembre de 2006 y b) dos series simultáneas de disparos de cañones de aire recibidos con intensidad moderada el mismo día, una serie

con intervalos de 60 segundos y otra serie con intervalos de 18 segundos. Se utilizó una transformada rápida de Fourier (Cooley y Tukey, 1965) de 1024 puntos, ajustando una ventana de Hanning con una resolución de 1,95 Hz y 0,1s).

Como se observa en los espectros de las figuras IV-19 y IV-20, la mayoría de la energía de los disparos de los cañones de aire registrada en el área de la isla de Alborán se centra en los primeros 200 Hz. Por tanto, se realizó un análisis en la banda 0-200 Hz para definir el reparto de energía en el momento de los disparos y compararlo con el del ruido ambiente inmediatamente anterior a los disparos. Se calculó la energía media de 70 disparos consecutivos y del periodo inmediatamente anterior a cada uno de estos disparos, en dos periodos seleccionados manualmente. El primero, el día 12 de diciembre de 2006 entre las 06:00 y las 07:00 horas, presentando una intensidad que representa el valor medio aproximado a lo largo de todo el periodo de detección de disparos de la campaña geofísica. El segundo, el día 13 de diciembre de 2006 entre las 06:30 y las 07:00 horas, presentando una intensidad que representa el valor máximo aproximado a lo largo de todo el periodo de detección de disparos de la campaña geofísica. Un análisis espectrográfico de la variación del nivel de ruido ambiente registrado a lo largo de los 10 días de detecciones de disparos de cañones de aire comprimido se presenta en la figura IV-22, indicando los dos periodos seleccionados para este análisis.

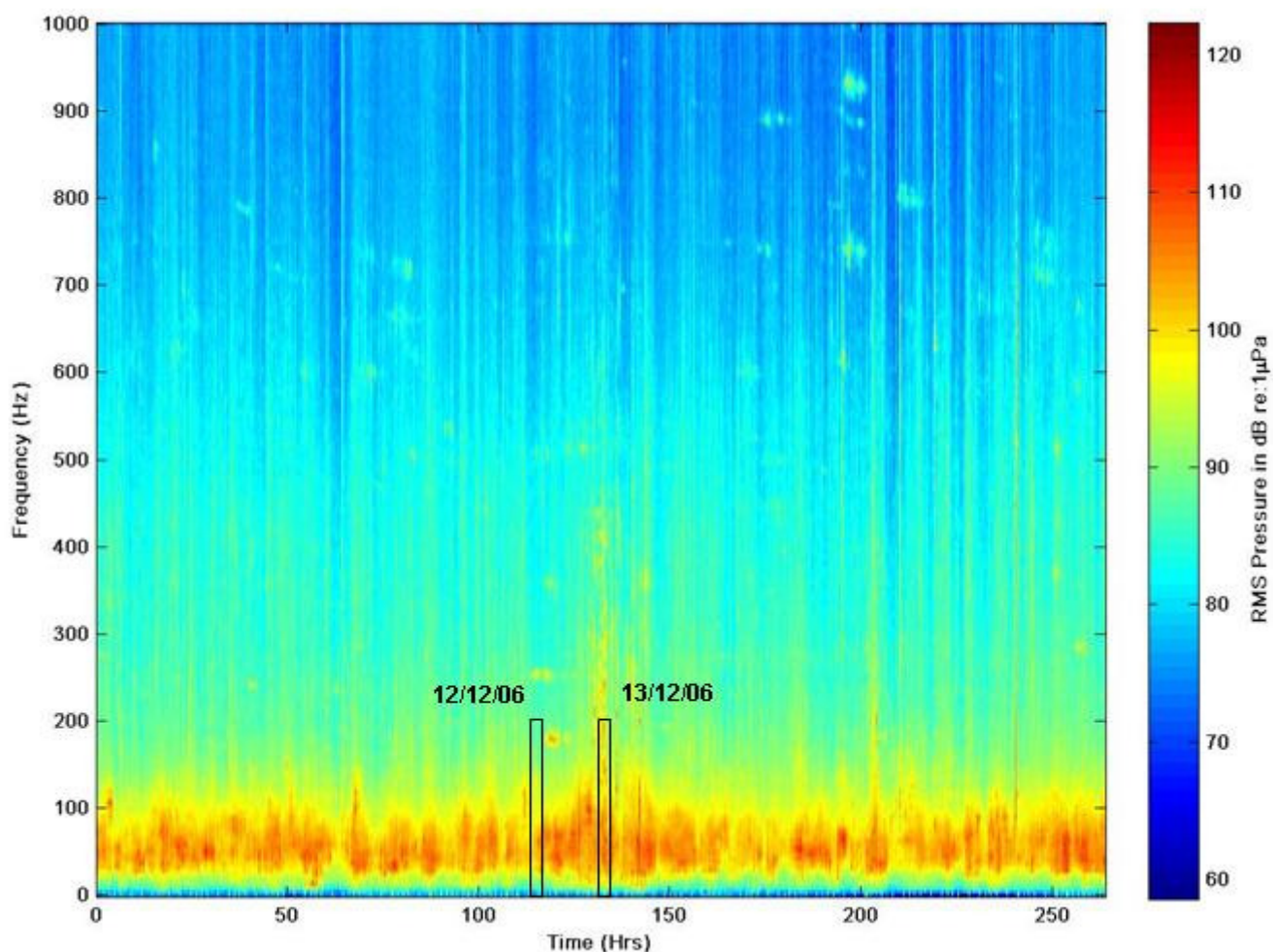


Figura IV-22: Espectrograma en la banda 0-1000 Hz de los 10 días de detecciones de disparos de cañones de aire comprimido de la campaña geofísica detectada en el área de la isla de Alborán en diciembre de 2006. Los dos periodos seleccionados para el análisis de incremento de nivel de ruido ambiente se indican con un rectángulo negro. Se utilizó una transformada rápida de Fourier (Cooley y Tukey, 1965) de 512 puntos, ajustando una ventana de Hanning con una resolución de 3,91 Hz y 25,6 seg.

Los valores obtenidos para el ruido ambiente entre disparos se restaron a los obtenidos en los disparos para calcular el incremento de energía acústica generado por los disparos en ambos periodos. Para el análisis espectral de la energía acústica se utilizó una resolución de 4 Hz. El resultado del incremento de energía en ambos periodos se representa en la figura IV-23.

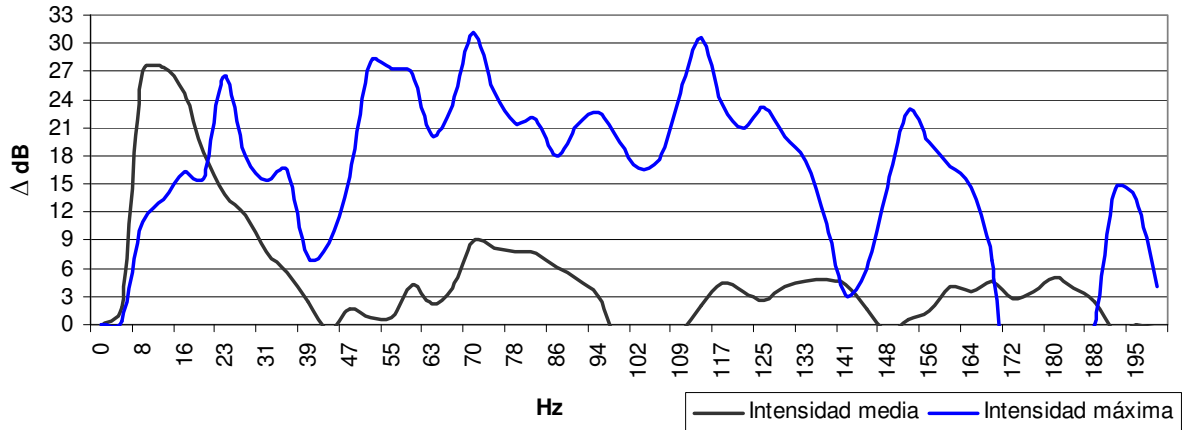


Figura IV-23: Incremento de energía acústica en decibelios entre el ruido medio de 70 disparos consecutivos de cañones de aire comprimido y el ruido ambiente medio inmediatamente anterior a estos disparos para dos series de datos: a) de intensidad media el día 10 de diciembre de 2006 entre las 07:00 y las 08:00 horas y b) de intensidad máxima el día 13 de diciembre de 2006 entre las 06:30 y las 07:00 horas.

Para la serie de datos de intensidad máxima, que probablemente coincidió con el periodo en el que el buque de la campaña geofísica se encontró a menor distancia del área de estudio, el incremento positivo del nivel de ruido entre los disparos y el ruido ambiente fue máximo para la frecuencia de 70 Hz con un valor de 31,2 dB por encima del nivel de ruido ambiente. En la banda 15-25 Hz el valor medio fue de 19,1 dB. El incremento positivo de energía acústica es continuo hasta 168 Hz, sin embargo análisis posteriores demostraron que el incremento de energía positiva sigue siendo patente por encima de los 200 Hz y hasta el límite superior del rango de grabación de 1000 Hz, con una media de 6 dB.

Para la serie de datos de intensidad media, el incremento positivo del nivel de ruido entre los disparos y el ruido ambiente fue máximo para la frecuencia de 12 Hz con un valor de 27,5 dB por encima del nivel de ruido ambiente. En la banda 15-25 Hz el valor medio fue de 18,9 dB. Se aprecian cuatro nodos en la figura, este tipo de reparto de energía es típico de conjuntos de cañones de aire (NRC, 2003). El primero y más importante se ubica en la banda 8-30 Hz que son las frecuencias más afectadas por las disparos, el segundo en la banda 47-94 Hz con diferencias máximas de 9 dB seguido del tercer nodo en las bandas 113-145 Hz con un máximo de 4,7 dB y un cuarto nodo en la banda 152-188 Hz con un máximo de 5 dB. Análisis posteriores demostraron que el incremento de energía positiva sigue siendo patente por encima de los 200 Hz hasta los 600 Hz con media de 1,6 dB.

4.5.2 Efecto en el comportamiento acústico del rorcual común

Se identificaron dos periodos en los que se solaparon la presencia continuada de disparos de cañones de aire con canciones de rorcuales comunes con suficiente calidad como para poder realizar medidas de parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz de rorcual común. Sólo se encontró una canción en cada periodo con suficiente relación señal / ruido para poder realizar medidas de los parámetros acústicos. En total se

analizaron 152 pulsos de 20 Hz. Para el cálculo de parámetros acústicos en ausencia de disparos, se identificaron 6 canciones en 3 periodos anteriores o posteriores a los solapamientos seleccionados. En total se analizaron 162 pulsos de 20 Hz. Los valores de las medidas de ambos grupos de pulsos se resumen en la tabla IV-16. Los valores de los parámetros acústicos medidos en canciones solapadas por disparos de cañones de aire se compararon con los mismos parámetros medidos en periodos de ausencia de campaña geofísica.

Contexto	n canciones	Intervalo entre pulsos (S.E.) en seg	Duración (S.E.) en seg	Frec. central (S.E.) en Hz	Ancho de banda (S.E.) en Hz	Pico de energía (S.E.) en Hz
Ausencia disparos	6	13,02 (0,03)	0,95 (0,04)	21,60 (0,10)	6,24 (0,15)	21,39 (0,15)
Presencia disparos	2	12,99 (0,04)	0,92 (0,02)	21,44 (0,06)	5,70 (0,07)	21,32 (0,10)
n pulsos		265	123	193	193	193

Tabla IV-16: Resumen de los valores medios y error estándar (entre paréntesis) de los parámetros acústicos analizados en pulsos de 20 Hz de rorcual común en presencia y en ausencia de disparos de cañones de aire comprimido.

Con el fin de controlar el posible efecto de la dependencia entre pulsos de una misma canción, los valores de los parámetros acústicos en contexto de ausencia y presencia de disparos de cañones de aire se analizaron mediante un ANOVA anidado. Se asume que la distribución de los valores de los parámetros acústicos tienden a la normalidad por ser un tamaño muestral elevado ($n = 123$ a 265), según el teorema del límite central (Grinstead y Snell, 1997). Se analizaron las diferencias entre los cinco parámetros acústicos y los resultados se resumen en la tabla IV-17. Las diferencias entre los valores medios de los parámetros acústicos en contexto de ausencia y presencia de disparos de cañones de aire se representan en la figura IV-24.

Parámetro acústico		SS	Grados de libertad	MS	F	Nivel de sig.
Intervalo entre pulsos	Intercept	35663,07	1	35663,07	248784,2	p < 0,01
	Disparos	0,45	1	0,45	0,53	0,50
	Canciones(disparos)	5,10	6	0,85	5,9	p < 0,01
	Error	36,84	257	0,14		
Duración	Intercept	31,97	1	31,97	1126,88	p < 0,01
	Disparos	0,02	1	0,02	0,08	0,79
	Canciones(disparos)	1,45	6	0,24	8,50	p < 0,01
	Error	3,26	115	0,028		
Ancho de banda	Intercept	2394,08	1	2394,08	3240,37	p < 0,01
	Disparos	13,46	1	13,46	5,75	0,05
	Canciones(disparos)	14,051	6	2,342	3,17	p < 0,05
	Error	136,68	185	0,739		
Frecuencia central	Intercept	29019,21	1	29019,21	76850,61	p < 0,01
	Disparos	0,05	1	0,05	0,01	0,93
	Canciones(disparos)	33,96	6	5,66	14,99	p < 0,01
	Error	69,86	185	0,38		
Frecuencia pico energía	Intercept	28589,01	1	28589,01	21497,42	p < 0,01
	Disparos	0,00	1	0,00	0,00	0,98
	Canciones(disparos)	32,05	6	5,34	4,02	p < 0,01
	Error	246,03	185	1,33		

Tabla IV-17: Resumen del ANOVA anidado (pulsos dentro de canciones) utilizado para explorar diferencias entre los valores de los parámetros acústicos de pulsos de 20 Hz de canciones en contexto de ausencia y presencia de disparos de cañones de aire.

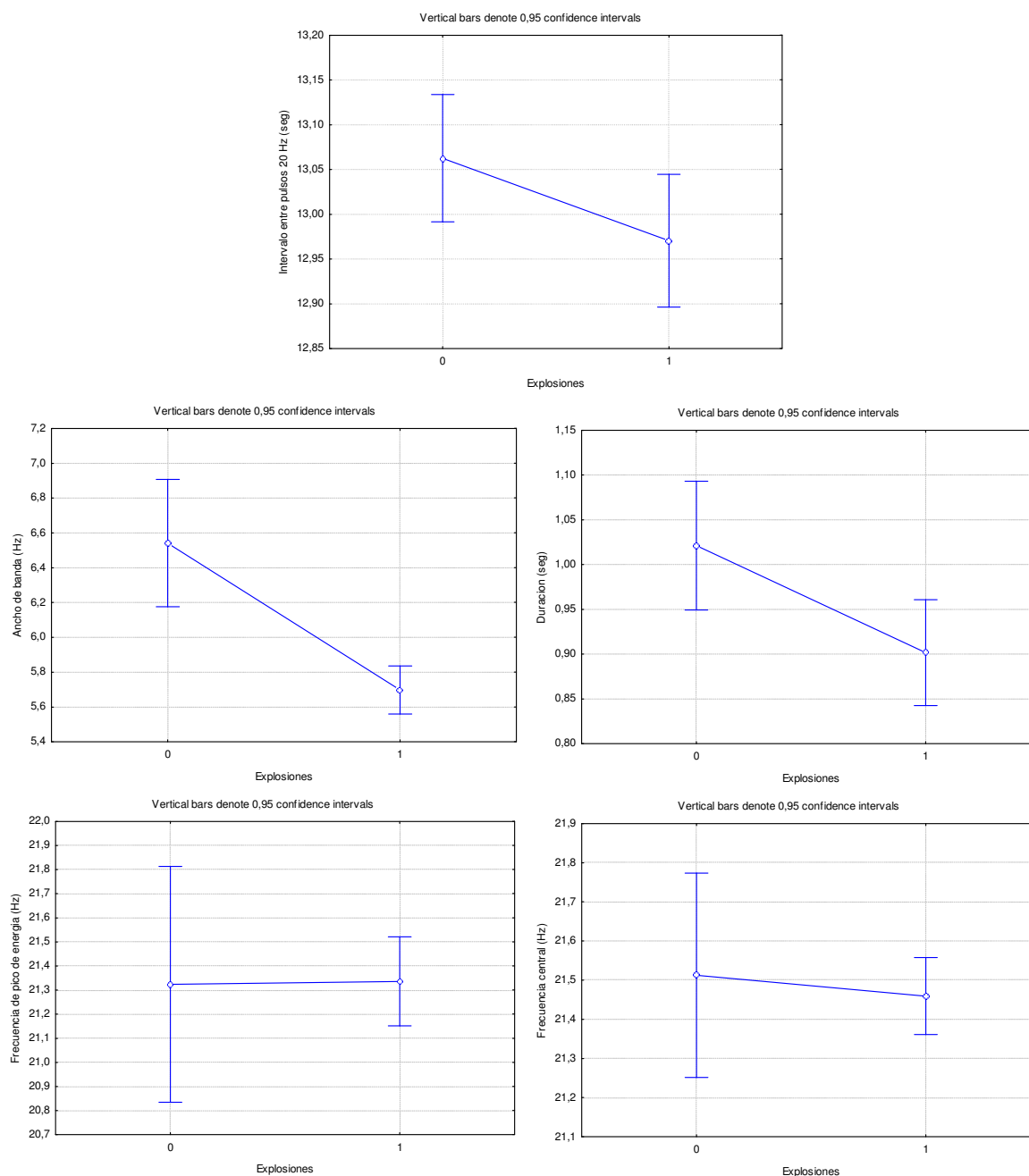


Figura IV-24: Diagramas de las diferencias entre los valores medios de los cinco parámetros acústicos en contexto de ausencia (0) y presencia (1) de disparos de cañones de aire.

Todos los parámetros acústicos medidos presentan diferencias significativas entre canciones de un mismo contexto, pero sólo el ancho de banda presenta diferencias significativas mayores entre contextos de presencia y ausencia de disparos de cañones de aire. Los resultados indican que hay una variabilidad importante entre canciones que impiden detectar diferencias importantes entre los dos contextos estudiados, no obstante se observa una tendencia general a presentar valores más bajos en presencia de disparos de cañones de aire (excepto para la frecuencia de pico de energía).

4.5.3 Efecto en el desplazamiento de los rorcuales comunes por el área de estudio

El desplazamiento de los rorcuales comunes detectados en el área de la isla de Alborán fue analizado durante el periodo previo y posterior a los días en los que se realizaron disparos de cañones de aire así como durante el periodo de presencia de disparos. Siguiendo la misma técnica explicada en el capítulo II, apartado 4.4.1, se crearon registros de pulsos de 20 Hz presentes en los dos canales de la grabación para calcular su ángulo de recepción y mediante el seguimiento de ángulos obtenidos en pulsos consecutivos de una misma canción identificar el sentido y dirección de movimiento así como su progreso entre los diferentes días.

De todos los pulsos de 20 Hz detectados en el muestreo de esta área de estudio, se obtuvieron un total de 721 pulsos útiles para calcular el ángulo de recepción, distribuidos en 63 canciones a lo largo de 12 días. También se seleccionaron 90 disparos de cañones de aire repartidas a lo largo de los 10 días de duración de la campaña geofísica para identificar el ángulo de recepción de la fuente de ruido. La tabla IV-18 resume la distribución de los pulsos utilizados para el cálculo del ángulo de recepción a lo largo del periodo de muestreo.

Periodo pre-campaña						
Fecha	29-nov	30-nov	3-dic	4-dic	5-dic	n
n canciones	5	5	8	6	3	27
n pulsos	20	29	62	29	13	153

Periodo de campaña geofísica				
Fecha	08-dic	09-dic	10-dic	n
n canciones	5	9	9	23
n pulsos	69	143	102	314
Disparos	30	30	30	90

Periodo post-campaña					
Fecha	01-ene	03-ene	07-ene	09-ene	n
n canciones	4	2	3	4	13
n pulsos	26	18	72	48	164

Tabla IV-18: Resumen del número de pulsos de 20 Hz, canciones y disparos de cañones de aire utilizados para medir el ángulo de recepción a lo largo del periodo de muestreo.

La representación gráfica utilizada para interpretar los valores angulares fue un histograma polar de 360° equivalente al dominio de detección de la antena de recepción formada por el eje este-oeste de posición de los 2 grabadores MARU. Por tanto, el ángulo 0° en el diagrama corresponde a la dirección oeste del eje de posición de los grabadores que se desvía 4° del oeste magnético, como puede observarse en la figura IV-25.

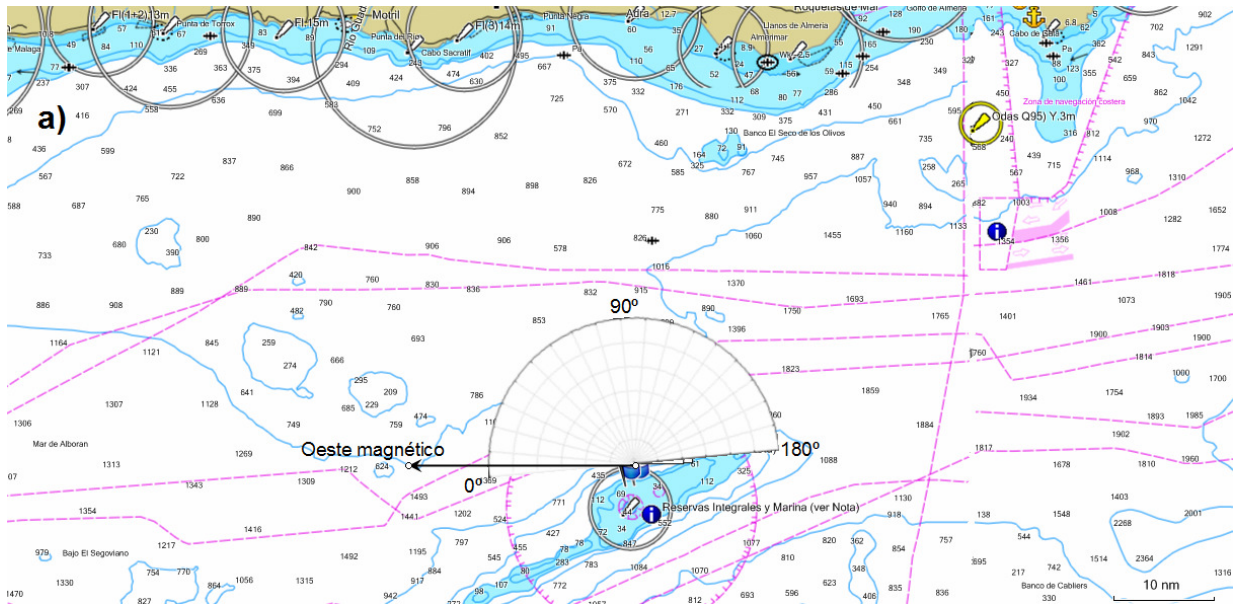
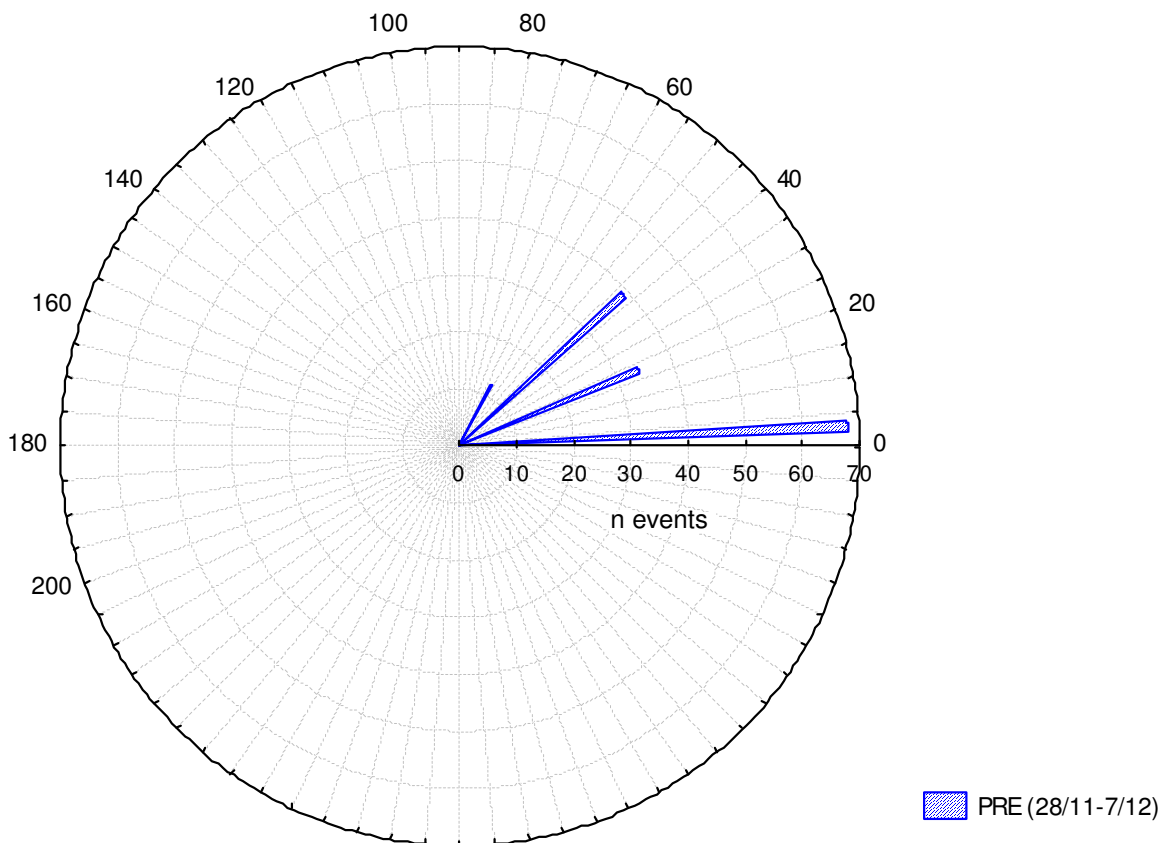
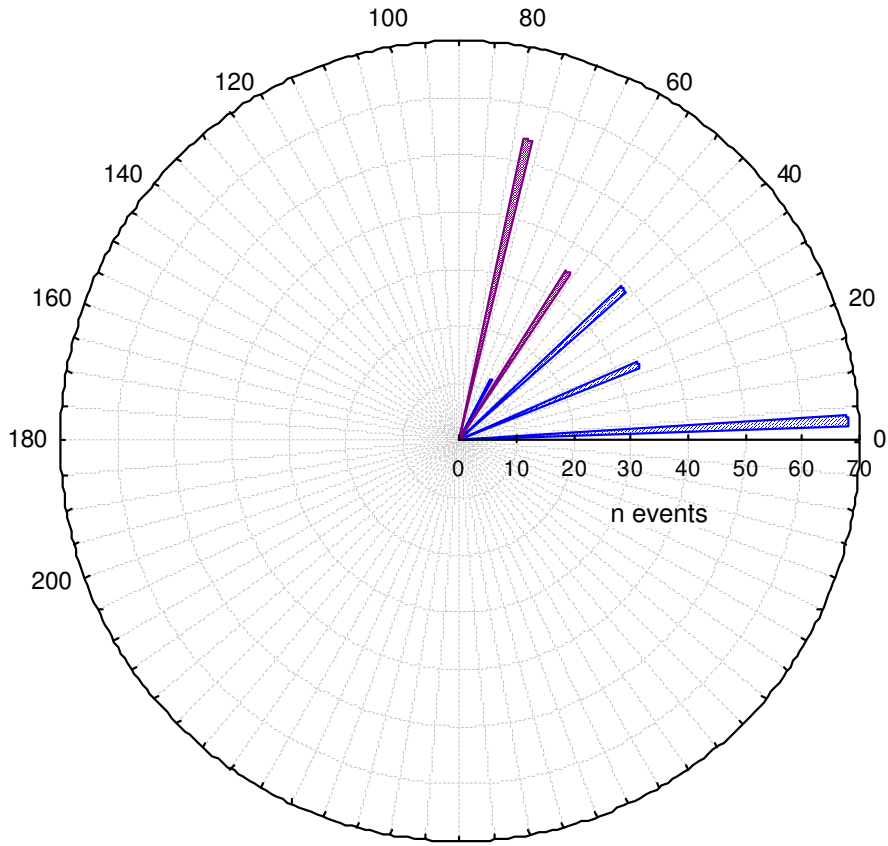


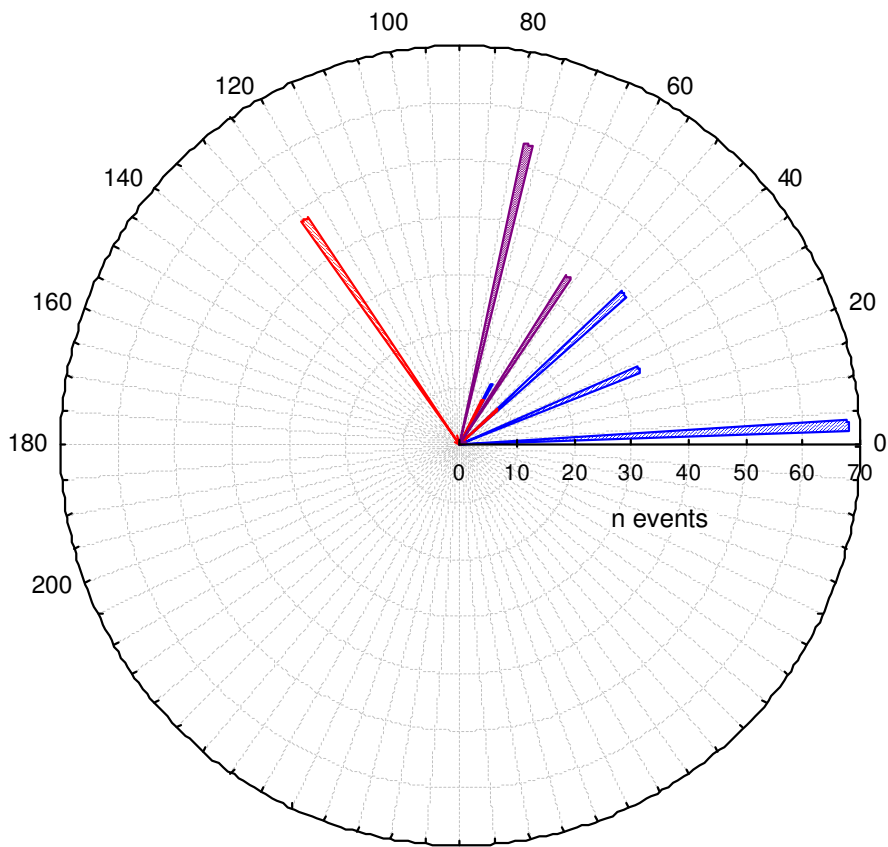
Figura IV-25: Sección norte del mar de Alborán con la posición de los grabadores fondeados respecto a la situación de la isla y el dominio angular correspondiente a los posibles ángulos de detección de las señales emitidas por rorcuales comunes.

Los valores angulares se ordenaron en intervalos de 5° para facilitar su representación gráfica y se representaron por periodos de 24 horas de duración. La figura IV-26 muestra histogramas polares con los valores angulares calculados por día en orden cronológico.

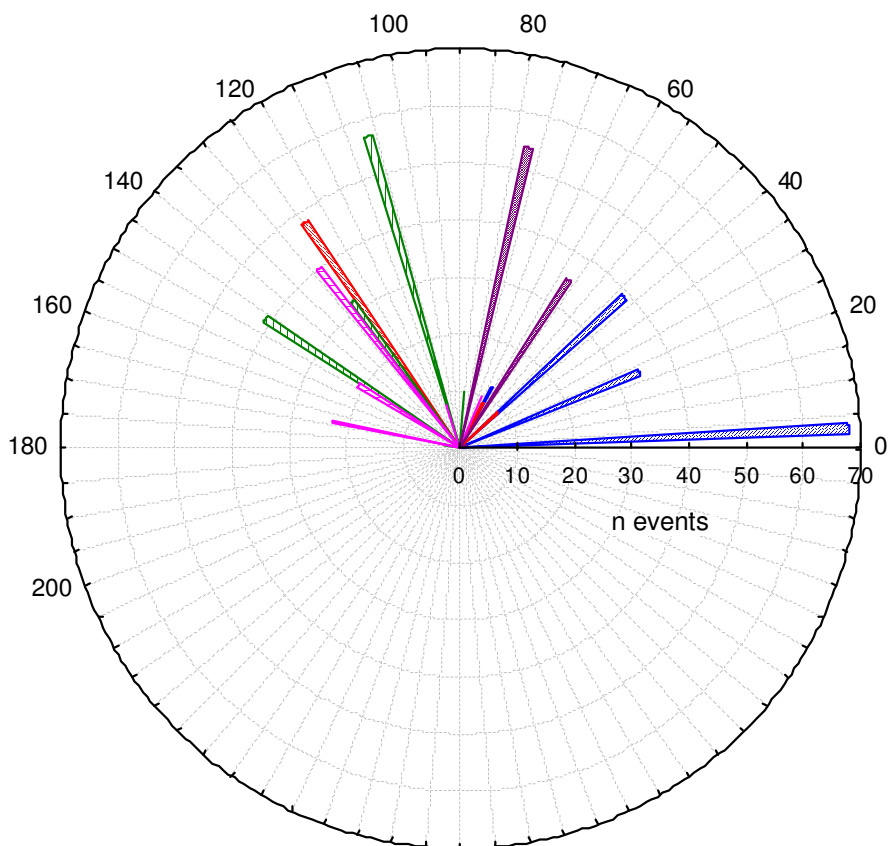
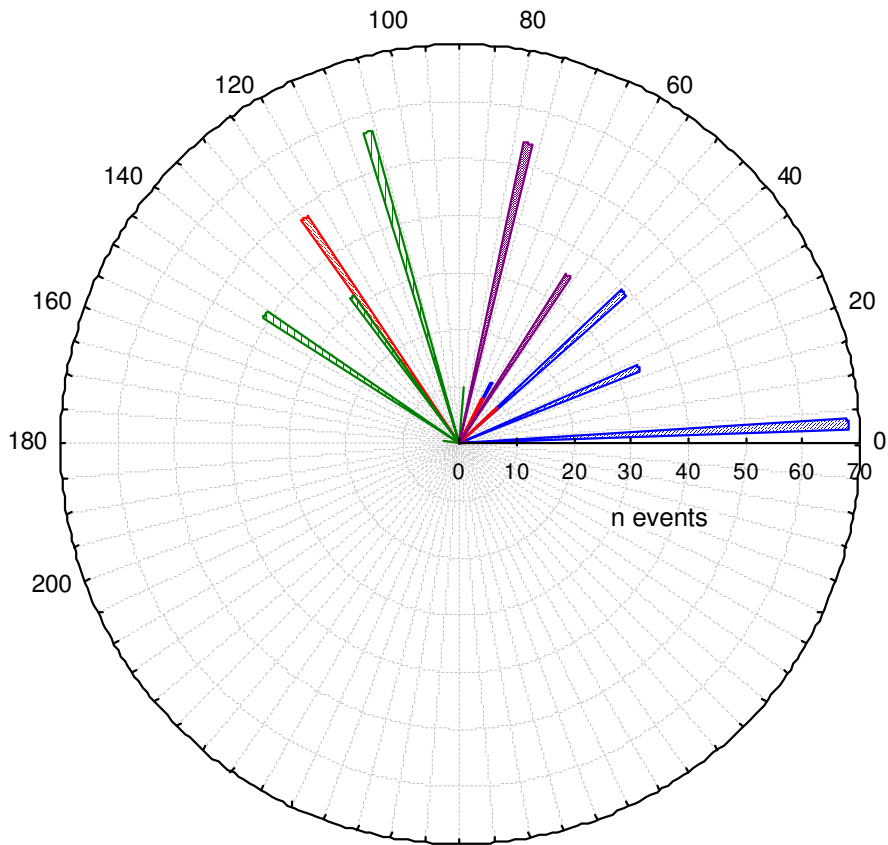


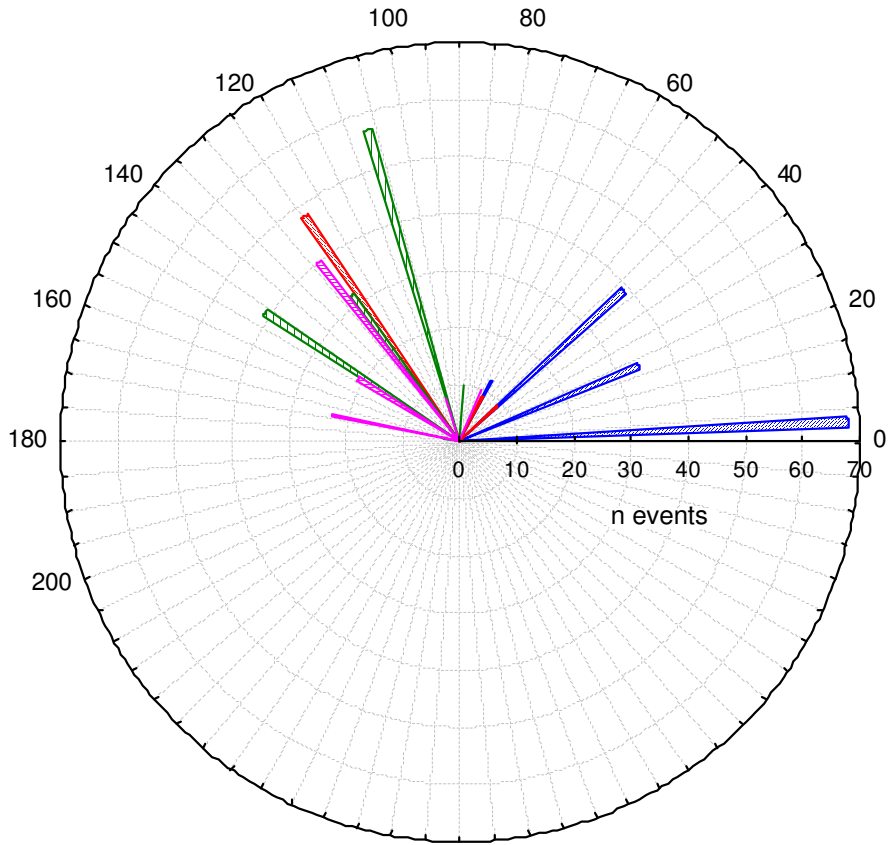


PRE (28/11-7/12)
Airgun

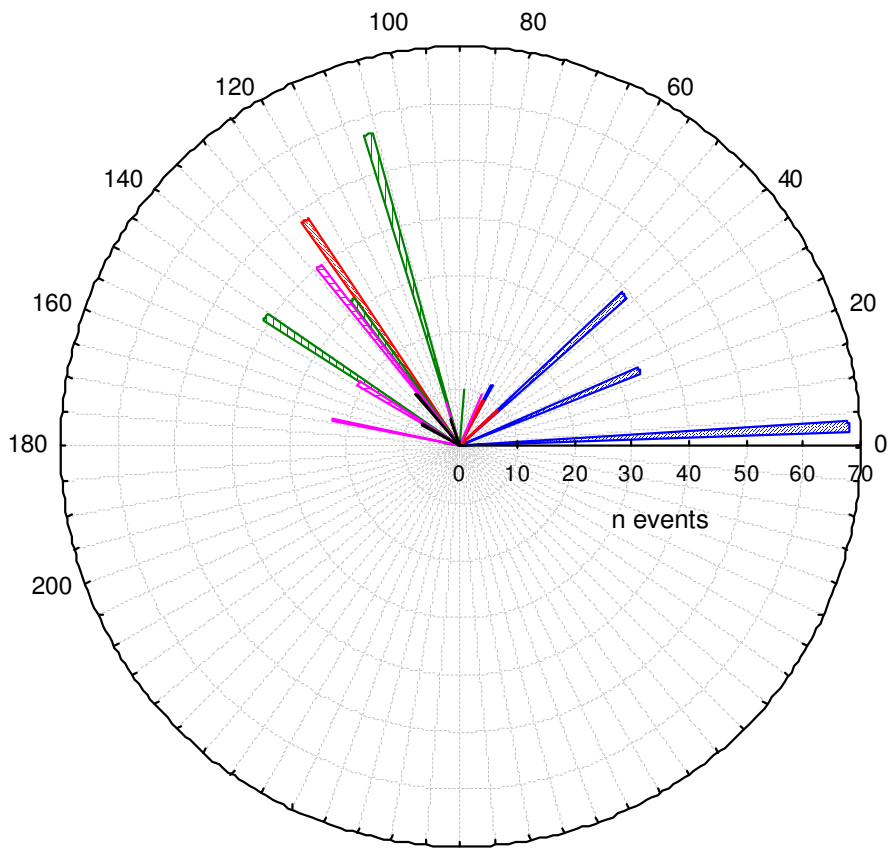


PRE (28/11-7/12)
8dic
Airgun

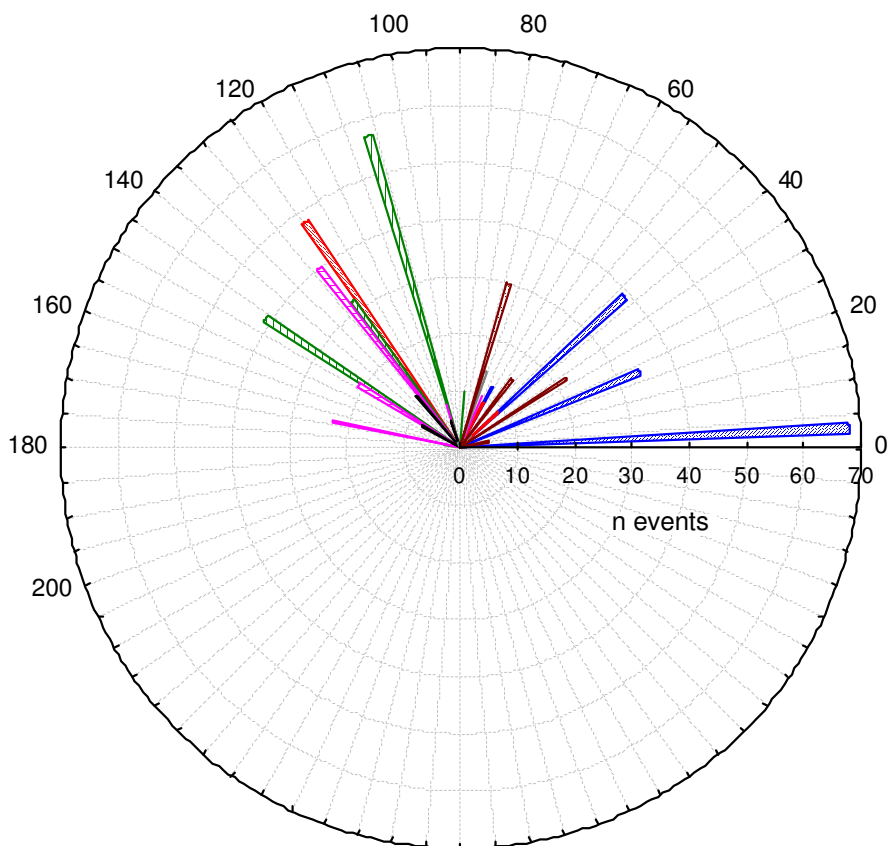
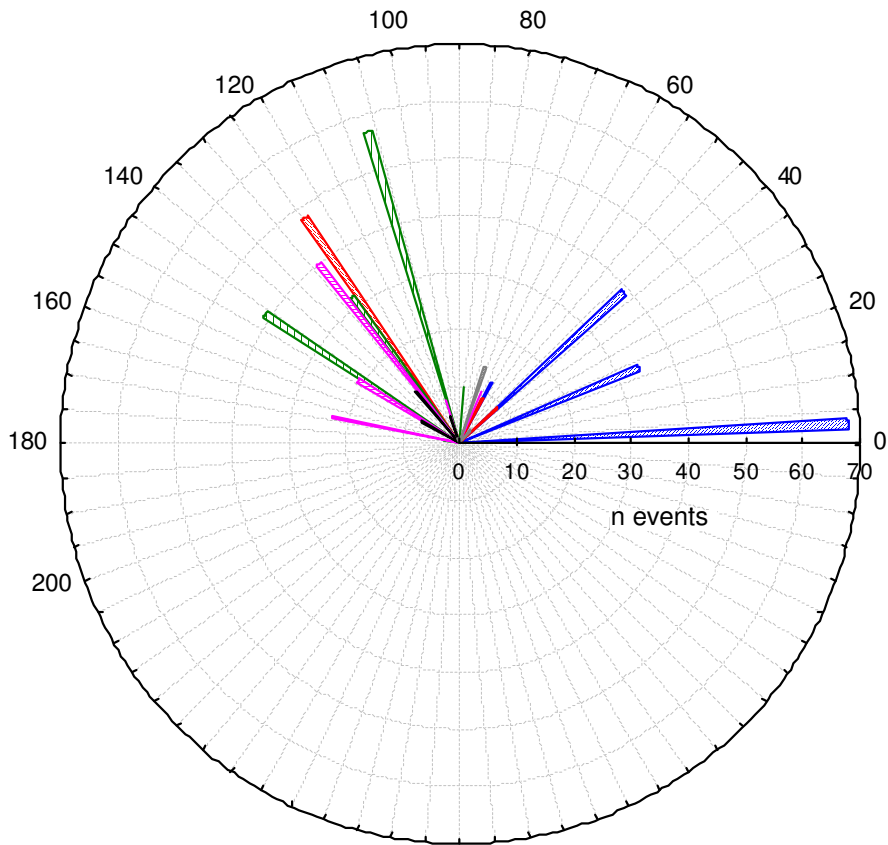




- PRE (28/11-7/12)
- 8dic
- 9dic
- 10dic



- PRE (28/11-7/12)
- 8dic
- 9dic
- 10dic
- 1ene



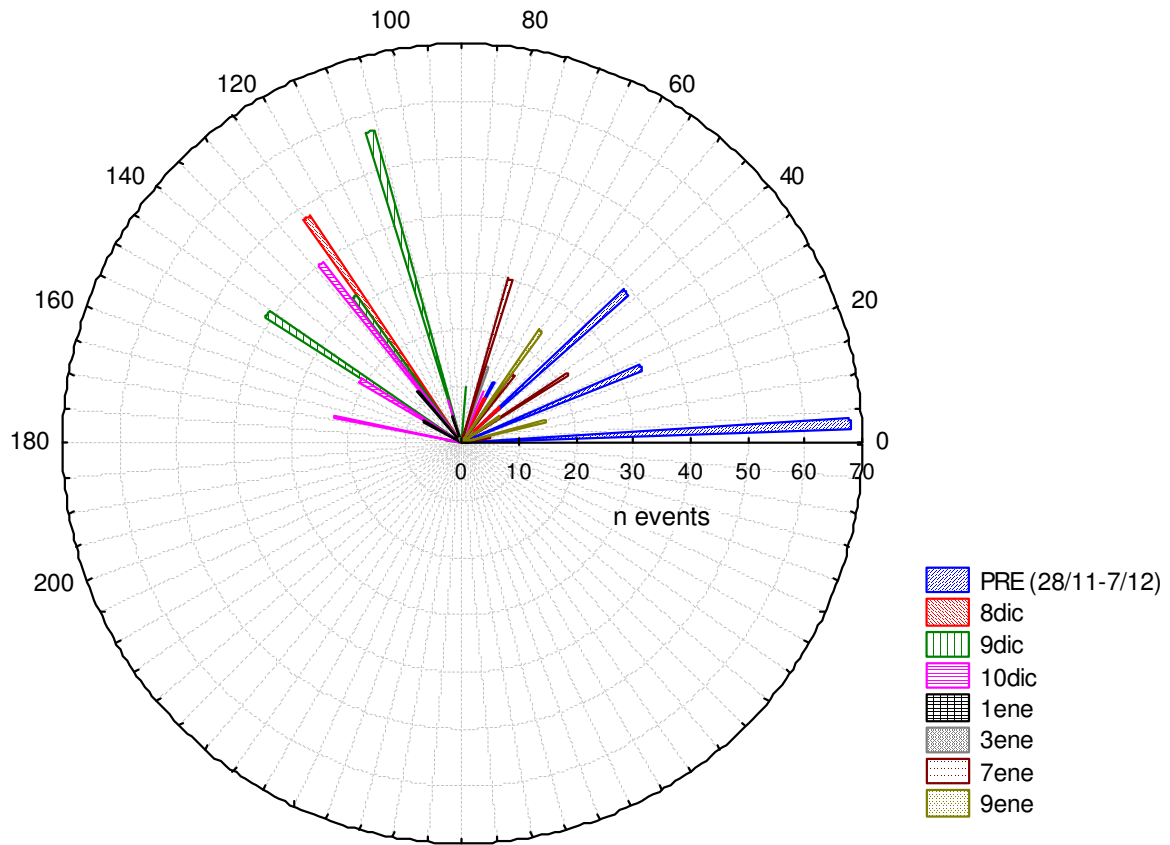


Figura IV-26: Histogramas polares con los valores angulares de los pulsos de 20 Hz y disparos de cañones de aire agrupados en intervalos de 5° para facilitar su representación gráfica, por periodos de 24 horas de duración en orden cronológico.
 Nota: La detección de cañones de aire ocurre entre el 8 y el 18 de diciembre, por lo que los ángulos de estos eventos se representan sólo en los días donde estuvieron presentes.

Los valores angulares diarios presentaron una tendencia similar desde el inicio del periodo de muestreo (28 noviembre 2006) hasta el día 7 de diciembre, manteniendo una variabilidad comprendida entre 2° y 76°. Este fue el periodo previo al inicio de la detección de disparos de cañones de aire comprimido utilizados en una campaña de exploración geofísica marina. El día 8 de diciembre se detectaron los primeros disparos que continuaron hasta el día 17. Entre el 8 y el 10 de diciembre, los rorcuales comunes detectados acústicamente se desplazaron hacia el oeste desde ángulos de recepción entorno a los 50° hasta los 175°. Tras este periodo, destaca la ausencia de detecciones durante 22 días de los cuales sólo en 7 de ellos se detectaron breves secuencias de pulsos de 20 Hz (inferiores a 30 minutos de duración) y sin calidad suficiente para poder calcular ángulos de recepción, lo que sugiere que estos se desplazaron más allá del área de detección de los grabadores y sólo ocasionalmente llegaron a ser detectados a mucha distancia. Tras 11 días desde la finalización de la campaña geofísica y pasados 22 días desde los últimos ángulos medidos, el 1 de enero de 2007 se detectaron 4 canciones con pulsos de 20 Hz de suficiente calidad para poder calcular ángulos de recepción. Estos rorcuales se encontraron entre 114° a 159°, habiéndose desplazado ligeramente hacia el este y por tanto acercándose hacia el área de estudio. El 3 de enero se pudieron calcular ángulos en 2 canciones de entre 45° a 114°, demostrando que el desplazamiento hacia el este continuó. Hasta el 7 de enero no se detectaron ángulos de recepción que solapen con el intervalo descrito por los

pulsos detectados durante el periodo previo al inicio de la campaña. Por último, el 9 de enero los ángulos calculados se mantuvieron entre 10° y 60°, intervalo similar al descrito durante el periodo previo al inicio de la campaña.

El progresivo incremento en los ángulos de recepción observado en el análisis angular se representa mediante una figura que indica el valor medio de todos los ángulos calculados por día. Estos resultados se muestran en la figura IV-27.

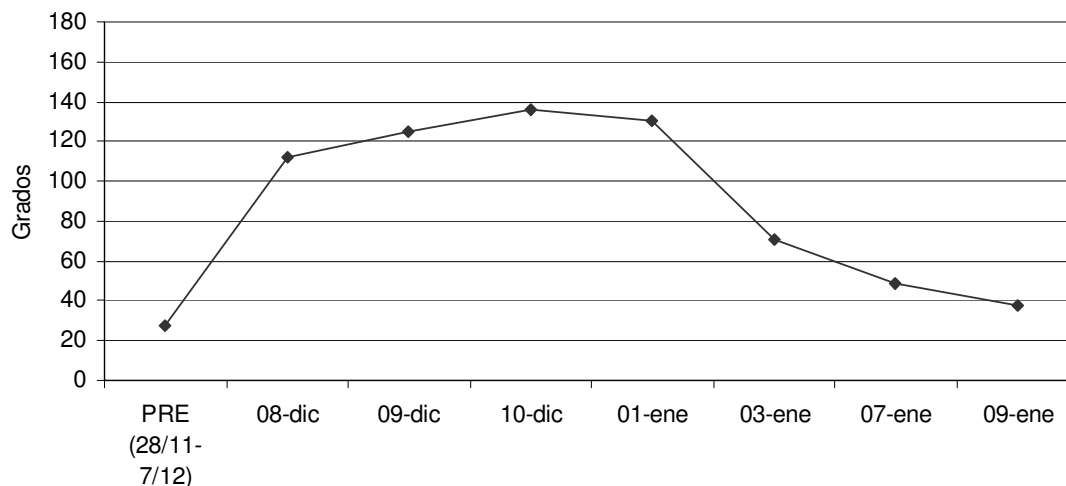


Figura IV-27: Valores medios diarios de los ángulos de recepción de pulsos de 20 Hz detectados durante el periodo de muestreo del área de la isla de Alborán en invierno de 2006.

La figura IV-27 muestra un incremento drástico de 84° durante el primer día de presencia de disparos de cañones de aire. Posteriormente y de manera progresiva el incremento se va reduciendo hasta hacerse negativo a partir del 1 de enero de 2007.

5. Discusión

Los resultados de este trabajo son acordes con las descripciones de Richardson *et al.* (1995) acerca de la contribución del ruido generado por el tráfico marítimo en los primeros 200 Hz y con las de NRC (2003) respecto al dominio de esta fuente en regiones del hemisferio norte para la banda 10-200 Hz. Las cinco áreas de estudio incluidas en los análisis de este trabajo se ubican en regiones de muy diferente nivel de tráfico marítimo y el nivel medio de ruido ambiente calculado a lo largo de varios meses para las cinco áreas de estudio demostró ser muy distinto (tabla IV-7). La figura IV-14 muestra las áreas de estudio en orden ascendente de su nivel medio de ruido ambiente. Estos niveles coinciden con la intensidad del tráfico marítimo, por tanto, el ruido de esta actividad parece ser la dominante en el rango de frecuencias estudiado. El área de las islas Azores es el más silencioso con un nivel medio de 102,6 dB, comparado con las demás áreas que se encuentran en el mar Mediterráneo ya que el nivel de tráfico marítimo en el mar Mediterráneo es muy superior al que circunda el archipiélago de las islas Azores (Ross, 2005). De las áreas del mar Mediterráneo, la del estrecho de Gibraltar es la de mayores niveles de ruido ambiente con un valor medio de 112,5 dB re 1 μ Pa. Obviamente, el tráfico marítimo extremo de esta zona eleva los niveles medios en 10 dB respecto al área de las islas Azores y en 5,6 dB respecto a la segunda área de estudio más ruidosa en el mar Mediterráneo, la de la cuenca Provenzal. Esta última presenta niveles de tráfico marítimo muy elevados respecto a otras regiones del mar Mediterráneo (Abdulla y Linden, 2008), por lo que este resultado también coincide con el nivel de tráfico marítimo. El área de la isla de Alborán se encuentra lejos de las dos rutas marítimas principales que cruzan esta cuenca, una que conecta el estrecho de Gibraltar con los principales puertos de Europa occidental y que sigue los cabos de la península Ibérica, dejando la isla de Alborán al sur y la otra que comunica el estrecho con los principales puertos de la costa norte de Marruecos, Argelia, Túnez y Libia y continúa por el canal de Suez, dejando la isla de Alborán al norte (Dobler, 2002). Su nivel medio de ruido ambiente fue de 103,7 dB siendo el más bajo de las áreas de estudio mediterráneas. El área de las islas Columbretes presentó un nivel medio algo superior al de la isla de Alborán, de 105,2 dB, posiblemente por una mayor exposición al tráfico marítimo de cabotaje al encontrarse este archipiélago más cerca de la costa peninsular que la isla de Alborán.

Es interesante indicar que todas las áreas estudiadas presentan niveles medios de ruido ambiente superiores a los 100 dB. Según las curvas de referencia utilizadas actualmente para representar el ruido ambiente marino en diferentes contextos (ej. Wenz, 1962; Ross, 1976; Urick, 1983 y Richardson *et al.* 1995), los niveles de ruido para contextos de tráfico marítimo elevado no superan los 100 dB. Los valores obtenidos en las diferentes áreas de estudio superan los de las curvas de referencia entre 10 dB y 20 dB para la banda 0-500 Hz. Aunque la tendencia espectral se ajusta a las curvas de referencia a partir de los 500 Hz para las áreas de la isla de Alborán e islas Columbretes y a partir de los 900 Hz en las dos áreas más ruidosas, siendo la cuenca Provenzal y el estrecho de Gibraltar (figura IV-15). Estas diferencias en las frecuencias bajas son acordes con la evolución de las actividades humanas en el medio marino: el desarrollo de los buques comerciales y puertos mercantes, incremento del tráfico marítimo y explotación de hidrocarburos en los fondos marinos (NRC, 2003; Ross, 2005; Heitmeyer *et al.*, 2004; Tyack, 2008). Por tanto, los valores de los primeros 500 Hz de las curvas de referencia utilizadas para representar el ruido ambiente no son válidas, al menos para las áreas estudiadas en este trabajo y el promedio de los valores obtenidos

en las 3 regiones del mar Mediterráneo (cuena Provenzal, islas Columbretes, isla de Alborán) puede considerarse como una curva actual de referencia para esta región marina.

Las diferencias del nivel medio de ruido ambiente entre áreas de estudio han permitido evaluar el efecto del ruido del tráfico marítimo en el comportamiento acústico del rorcual común. Tanto los parámetros acústicos del dominio espectral (ancho de banda, frecuencia central y frecuencia de máxima energía) como los del dominio temporal (duración del pulso e intervalo entre pulsos) presentaron una correlación altamente significativa con el nivel de ruido ambiente: a mayor nivel de ruido menores son las frecuencias y las duraciones. Estos resultados sugieren que el rorcual común expuesto a niveles de ruido ambiente elevados modifica su comportamiento acústico tendiendo a reducir la frecuencia y duración de sus vocalizaciones.

El ancho de banda es uno de los dos parámetros acústicos de los estudiados que presenta diferencias en función de la población de origen, según se ha demostrado en el capítulo III. El análisis de este parámetro acústico indicó que sus valores en los pulsos emitidos por los rorcuales comunes de población atlántica noreste fueron más bajos en presencia de niveles elevados de ruido ambiente. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en la población mediterránea, aunque en este caso las diferencias en nivel de ruido ambiente entre áreas fueron menores y quizá no suficientes para provocar cambios significativos. Aun así, la variación del ancho de banda dentro de áreas de la misma población es menor que la variación observada entre áreas de diferentes poblaciones, indicando que incluso bajo el efecto de un notable incremento de ruido ambiente, este parámetro acústico mantiene las características de identidad de la población. Para la población atlántica, el ancho de banda medio osciló entre 6,8 y 5,8 Hz, incluyendo datos del área del estrecho de Gibraltar con niveles extremos de ruido. La población mediterránea presentó un ancho de banda medio entorno a los 4,9 segundos con una oscilación de sólo 4 centésimas de Hz, manteniéndose casi 1 Hz por debajo del valor más bajo de la población atlántica noreste.

El intervalo entre pulsos es el segundo parámetro acústico de los estudiados que presenta diferencias en función de la población de origen. Al contrario que en el caso del ancho de banda, los intervalos se reducen significativamente en presencia de mayores niveles de ruido ambiente en la población mediterránea, pero no ocurre así en la población atlántica noreste. Estos resultados son interesantes ya que las diferencias del nivel de ruido ambiente medio entre las dos áreas mediterráneas son muy inferiores (1,5 dB) a las diferencias entre niveles de áreas atlánticas (10 dB). Si se comparan las diferencias del intervalo entre pulsos entre todas las áreas de estudio indistintamente de la población se distinguen dos patrones bien definidos como se aprecia en la tabla IV-4. La tendencia de intervalos entre 14,8 y 14,9 segundos se corresponde con las áreas de población mediterránea y la tendencia entre 12,9 y 13,1 segundos se corresponde con las áreas de población atlántica. Aunque este parámetro acústico presente diferencias significativas entre los niveles de ruido ambiente de áreas de población mediterránea, estas diferencias son menores que entre poblaciones.

Estos resultados indican que tanto el intervalo entre pulsos como el ancho de banda son sensibles a incrementos de ruido ambiente siguiendo la tendencia significativa y general observada en los demás parámetros acústicos. Pero, a diferencia de los parámetros no dependientes de la población de origen, sus variaciones parecen acotarse manteniendo

las diferencias entre poblaciones, aunque se desconoce cual puede ser el efecto de estas variaciones en su función sexual en el contexto de la señalización a distancia.

Hay que destacar que el análisis de estos datos demostró diferencias altamente significativas en el ancho de banda de los pulsos e intervalo entre pulsos de canciones de una misma área, lo que indica que posiblemente el nivel de ruido ambiente tenga un efecto diferente entre individuos. Sería necesario analizar las variaciones de estos dos parámetros identificando las canciones de los individuos por separado, pero este tipo de análisis es actualmente inviable debido a la dificultad de identificar los mismos individuos por sus canciones en varias áreas diferentes.

Con el fin de controlar un posible efecto geográfico además del producido por diferencias en el nivel de ruido ambiente, se analizó el comportamiento acústico de los rorcuales comunes en una sola área de estudio. La marcada variación diaria del nivel medio de ruido ambiente que se produce en el estrecho de Gibraltar (figura IV-16) se aprovechó para explorar posibles diferencias en los parámetros acústicos de los pulsos de las canciones detectadas en esta área a distintas horas del día. El nivel de ruido ambiente fue superior al valor medio entre las 09:00 y las 22:00 horas, con un incremento máximo de 5 dB. Este ritmo circadiano puede estar causado por una combinación de dos efectos: La actividad de los ferries que cruzan el área de estudio diariamente conectando Marruecos con España durante el día pero no durante la noche, así como una preferencia por transitar por el dispositivo de tráfico marítimo del estrecho de Gibraltar durante las horas de luz por parte de los buques comerciales como medida de seguridad marítima (IMO, 1972). Es improbable que el incremento diario del nivel de ruido ambiente fuera provocado por fuentes biológicas, como se ha descrito en otras regiones por decápodos bentónicos y coros de peces (ej. Cato 2000 y 2001), puesto que el área de estudio comprendía profundidades medias de 450 m, encontrándose fuera del área de distribución de estas especies de decápodos y la ausencia de sonidos generados en coro por peces en las grabaciones analizadas. El valor mínimo se alcanzó a las 05:00 horas con 109,9 dB que a pesar de ser el mínimo, se encuentra por encima de todas las demás áreas de estudio, lo que indica que el tráfico marítimo se reduce pero no por debajo del nivel de las demás áreas de estudio. El análisis demostró que, al igual que en el análisis anterior, los parámetros acústicos siguieron una tendencia a reducirse en respuesta al aumento del nivel de ruido ambiente. Aunque en este caso, el efecto fue pronunciado únicamente para la duración del pulso y en menor medida para la frecuencia de máxima energía, reiterando el efecto del ruido en parámetros de significado reproductivo.

Este análisis demuestra que eliminando el posible efecto geográfico y poblacional en la variabilidad del comportamiento acústico del rorcual común, la significatividad de los resultados se mantiene. Cambios en la estructura acústica de las señales como consecuencia del incremento de ruido en el medio han sido descritos en la ballena franca. Parks *et al.*, (2007) documentan un cambio notable en el rango de frecuencias de las señales de contacto emitidas por esta especie tanto en el hemisferio norte como en el sur a lo largo de un periodo de más de 3 décadas. Las ballenas francas emitían sus señales a frecuencias inferiores en los años 50 y 60 que en la actualidad. Los autores discuten que el incremento del nivel de ruido ambiente en frecuencias bajas provocado por el desarrollo del tráfico marítimo es la causa de este cambio de comportamiento. Concluyen que esta especie presenta un mecanismo de compensación para reducir el efecto de enmascaramiento de sus señales por el gradual aumento del ruido.

Posteriormente, Parks *et al.*, (2009) demuestran que las ballenas francas en varias regiones del hemisferio norte modifican la frecuencia de máxima energía de sus señales de contacto para mantenerla por encima de este mismo parámetro acústico en el ruido ambiente como parte del mecanismo de compensación descrito. Los resultados de este trabajo indican que, como en el caso de la ballena franca, el rorcual común expuesto al ruido del tráfico marítimo también presenta un mecanismo de compensación.

Las grabaciones realizadas en el área de la isla de Alborán durante el invierno de 2006 presentaron durante un periodo de once días, del 8 al 18 de diciembre, explosiones continuadas de baja frecuencia a intervalos de entre 18 y 60 segundos. El patrón y estructura acústica de estas explosiones fue atribuida a disparos de cañones de aire comprimido típicamente utilizados por campañas de exploración geofísica marina. Se realizó una búsqueda extensiva a nivel nacional e internacional para identificar permisos de campañas comerciales de exploración geofísica marina realizadas en esta región de la cuenca occidental mediterránea durante el invierno de 2006. El propósito fue identificar la campaña y establecer contacto con la operadora para obtener información acerca del tipo de fuente de sonido utilizado y líneas de navegación durante los días incluidos en el análisis. Se contactó con la Subdirección General de Hidrocarburos y la Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y se consultó el Archivo Técnico de Hidrocarburos de este Ministerio. También se contactó con el Instituto Geológico y Minero de España y se consultó el Sistema de Información Geográfica del mismo. El último permiso identificado en el área de la cuenca de Alborán fue concedido en 2005 para la operadora Repsol S.A.. La información disponible en las bases de datos consultadas indica que la información de este tipo de actividades es de carácter confidencial de acuerdo con el artículo 12 de la Ley 34/1998, de 7 de octubre, del sector de hidrocarburos. Esta ley indica que los permisos de exploración concedidos con menor antigüedad a 5 años son de carácter confidencial y si la explotación que derivase de ellos continúa tras este periodo, el carácter confidencial de la actividad se mantendrá hasta el cese de explotación. Posteriormente, se pudo confirmar que esta operadora no había desarrollado campañas de prospección geofísica bajo este permiso durante 2006 (*com. pers.* Pedro Viar, consejero técnico de la Subdirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, el 22 de enero de 2008).

Se estableció contacto con el Departamento de Comercio e Industria del Ministerio de Industria, Comercio y Nuevas Tecnologías de Marruecos, así como con la Dirección General de Desarrollo Industrial Ministerio de Industria y Promoción de Inversiones de Argelia, quienes confirmaron que no se habían procesado permisos de prospección geofísica marina en la cuenca de Alborán en 2006. Se contactó con la Sección de Europa, Africa y Oriente Medio de la “International Association of Geophysical Contactors”, con base en EEUU, que mantiene una base de datos de todos los contratistas internacionales especializados en exploración geofísica con el fin de identificar contratistas que hubieran operado en la cuenca de Alborán durante el invierno de 2006 pero no se identificó ninguno. Tras una extensa búsqueda no se localizó ningún permiso ni contratista que hubiese operado en la cuenca de Alborán durante el invierno de 2006.

Puesto que la definición de Zonas Económicas Exclusivas en el mar Mediterráneo se encuentra en un estado excepcionalmente indefinido y ni Marruecos ni España han delimitado su jurisdicción en el mar de Alborán (Chevalier, 2005) para la exploración y

explotación de los recursos minerales, la regulación de esta actividad fuera de las 24 millas náuticas de mar territorial y área contigua recae en la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS). El artículo 77 de esta convención indica que si el Estado soberano explora o explota recursos minerales fuera del mar territorial y zona contigua pero dentro de su plataforma continental, otros estados también pueden realizar estas actividades aunque tiene el derecho de regularlo.

El Ministerio e Industria, Comercio y Turismo regula los permisos de exploración comercial por parte de contratantes extranjeros dentro de la plataforma continental española, pero no la exploración científica (*com. pers.* Diego Vázquez, consejero técnico de la Subdirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, el 2 de septiembre de 2009). En Mayo de 1994 el gobierno español estableció la creación de un "Plan Hidrográfico y Oceanográfico de la Zona Económica Exclusiva Española", liderado y dirigido por el Instituto Hidrográfico de la Marina y el Instituto Español de Oceanografía. Uno de los objetivos de este plan es revisar posibles extensiones y establecer límites de la Zona Económica Exclusiva donde no estén definidos. Pero entre los objetivos de este plan no se incluye revisar la situación del mar de Alborán. Actualmente el límite de jurisprudencia español para el mar de Alborán es arbitrario y no aparece definido en ningún documento oficial. Se ha establecido que la línea equidistante entre la costa española y la costa marroquí que recae aproximadamente en el paralelo 36° queda definida como límite de jurisprudencia española, aunque este límite no siempre es cumplido (*com. pers.* Pedro Herranz, Departamento de Geología y Geofísica Marinas del Instituto Español de Oceanografía) y no existe acuerdo con el gobierno de Marruecos sobre este criterio (*com. pers.* José Manuel Quijano, Jefe de la Sección de Oceanografía, Instituto Hidrográfico de la Marina, Armada Española).

Con el fin de identificar si la campaña geofísica detectada fue de carácter científico y por tanto no regulada por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, se consultaron las bases de datos del Centro de Información y Documentación Científica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas con el fin de explorar información relacionada con estudios geofísicos en la zona económica exclusiva del mar Mediterráneo pero no se encontró ninguna base de datos relacionada con esta actividad. Finalmente, se contactó con el Centro Mediterráneo de Investigaciones Marinas y Ambientales del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Este centro dispone de una colección de perfiles sísmicos de alta resolución. Tras consultar la colección se identificaron tres campañas realizadas en 2006 en la cuenca de Alborán con múltiples líneas sísmicas de navegación, vinculadas al proyecto "Estudios geológicos y geofísicos integrados en márgenes y cuencas sedimentarias del sur de Iberia: Relación entre Procesos Superficiales y Profundos en el Mar de Alborán y su Conexión con el Atlántico" (Acrónimo MARSIBAL). Pero esta base de datos no incluye las fechas concretas de las diferentes líneas de navegación ni las características ni configuración de los cañones de aire utilizados. Se contactó con los dos investigadores principales de las diferentes campañas del proyecto, la Dra. M^a Carmen Comas del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra y la Dra. Belén Alonso del Departamento de Geología Marina del Instituto de Ciencias del Mar. Sin embargo ambas investigadoras se mostraron reacias a facilitar información acerca de este proyecto para los fines de este trabajo. Posteriormente se contactó también con varios investigadores de otros centros que habían participado en este proyecto pero no se obtuvo información complementaria.

Con el fin de identificar que buque realizó las campañas, se contactó con la Unidad de Tecnología Marina Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Esta Unidad mantiene un sitio web dinámico en el que se describen las campañas realizadas por los buques oceanográficos a los que esta unidad da apoyo logístico y técnico. Entre la información disponible en línea, se encontró el calendario de 2006 de uso de los buques el cual fue consultado hasta identificar la campaña MARSIBAL 06-1 realizada a bordo del B.I.O. Hespérides entre el 4 y el 21 de diciembre de 2006. El resto de campañas de este proyecto se realizaron fuera de los periodos de fondeo de unidades EAR y MARU de este trabajo.

Una vez identificada la posible campaña que se detectó acústicamente durante el fondeo del invierno de 2006 en el área de la isla de Alborán, se realizó la búsqueda de información técnica de la misma con el fin de identificar las fechas de navegación de las diferentes líneas sísmicas así como las características y configuración de los cañones de aire. Se realizó una búsqueda bibliográfica de posibles publicaciones científicas derivadas del proyecto MARSIBAL en bases de datos de geología y geofísica y se consultó el listado de publicaciones del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra y del Instituto de Ciencias del Mar pero no se encontraron documentos ni publicaciones que aportasen la información buscada (última búsqueda realizada en agosto de 2009). Por último, se exploró el contenido de la sección del sitio web de Unidad de Tecnología Marina Consejo Superior de Investigaciones Científicas dedicada a los buques oceanográficos con el fin de localizar información técnica referente al equipamiento del B.I.O. Hespérides, encontrándose relevante información acerca de la campaña realizada en diciembre de 2006 en el mar de Alborán en la sección “Diario de campaña”, un símil de cuaderno de bitácora convertido en blog, en el que los investigadores a bordo de estos buques anotan comentarios y descripciones de las campañas y sus experiencias. La entrada escrita por la Dra. Comas el 4 de diciembre de 2006 (http://www.utm.csic.es/hesperides_diario.asp?ID={17390DF4-EC0A-4141-BADC-1E687A5B0676}&fecha=04/12/2006) describe con detalle el equipamiento y adquisición de datos a utilizar en la campaña MARSIBAL 1-06 durante los días 4 a 21 de diciembre de 2006. Posteriormente, la misma autora creó otra entrada en el diario el 20 de diciembre de 2006 (http://www.utm.csic.es/hesperides_diario.asp?ID={10A3B22E-64E9-4868-9B9C-9461AD361C8B}&fecha=06%2F12%2F2006) a modo de crónica de la campaña, detallando los resultados obtenidos, periodos de navegación y adquisición de datos. El periodo de detecciones de disparos de cañones de aire identificado en las grabaciones realizadas en el área de la isla de Alborán (8-17 de diciembre de 2006) coincide exactamente con las descripciones de la entrada del “Diario de campaña” del 20 de diciembre de 2006. La utilización de dos streamers simultáneos, uno multicanal y otro monocanal de alta resolución descrito en esta misma entrada también coincide con los resultados del análisis acústico de grabaciones de este periodo en el que en varias ocasiones se observaron dos series simultáneas de disparos a distinto ritmo y con distinta distribución de energía acústica (figura IV-21).

La campaña geofísica MARSIBAL 1-06 coincidió con la presencia de rorcuales comunes en el área de estudio y la circunstancia fue aprovechada para evaluar el efecto de esta fuente sonora sobre el nivel de ruido ambiente del área, el comportamiento acústico de los rorcuales comunes y su desplazamiento por el área de estudio. El nivel medio de ruido ambiente aumentó en 12,94 dB para todo el rango de frecuencias estudiado y en concreto, en la banda de comunicación principal del rorcual común el

aumento fue de 15,32 dB. La variabilidad del nivel de ruido aumentó con la presencia de la campaña, como se observa en la figura IV-18, especialmente para la banda 15-25 Hz, indicando que la perturbación no sólo provoca un aumento de más de 10 veces el nivel de ruido ambiente sino que también aumenta más del doble la variabilidad de estos niveles para todo el rango de frecuencias estudiado y 7 veces para la banda de comunicación principal del rorcual común (tabla IV-15).

Los primeros disparos de cañones de aire comprimido se detectaron en el área de estudio de la isla de Alborán el 8 de diciembre a las 08:57 horas. Según la entrada del “Diario de campaña” del 20 de diciembre de 2006, el inicio de la adquisición para el perfil MSB-01 de la campaña MARSIBAL 1-06 fue a las 01:00 horas habiendo partido del puerto de Cartagena. La colección de perfiles sísmicos del Centro Mediterráneo de Investigaciones Marinas y Ambientales del Consejo Superior de Investigaciones Científicas no dispone de información del perfil MSB-01 pero sí del MSB-02. La posición de inicio de este segundo perfil se encuentra a 154 millas náuticas (285 km) de distancia al ENE de la posición de fondeo de los grabadores MARU. Asumiendo que el perfil MSB-01 se realizó previamente al MSB-02 entre el puerto de Cartagena y la posición de inicio del perfil MSB-02, es probable que las primeras 7 horas 57 minutos de adquisición correspondieran a la navegación de la línea de disparos para el perfil MSB-01. De ser así, estos no fueron detectados muy posiblemente por la sombra acústica creada por el cabo de Gata y aguas someras circundantes presentes entre el área de disparos y la posición de los grabadores. Posiblemente, los disparos detectados a partir de las 08:57 horas equivalen al momento en que el B.I.O Hespérides queda fuera de esta sombra acústica. La posición de inicio del perfil MSB-02 se encuentra a una distancia equidistante entre el área de fondeo de los grabadores, la isla de Ibiza y el puerto de Argelia. Por tanto, asumiendo una propagación homogénea del medio, el área alcanzada por los disparos desde esa posición hubiera sido superior a los 100.000 km². Obviamente este cálculo es muy poco preciso ya que las características de propagación del medio marino son muy heterogéneas y el cálculo se basa en una figura trapezoidal encajada entre el límite del talud continental de la península, la costa norte de África y las islas Baleares, por lo que no incluye posibles áreas expuestas al ruido de los taludes y plataformas continentales, ni áreas que recibieran niveles de ruido inferiores a los detectados en el área de fondeo de los grabadores. Pero el cálculo es útil para enmarcar la magnitud de la perturbación acústica detectada. Además, cálculos similares demuestran que esta cifra no es desmesurada. Se han establecido áreas de hasta 300.000 km² de exposición a disparos aumentando en 20 dB el nivel de ruido ambiente de manera continua durante días (IWC, 2005).

El mismo día 8 de diciembre la recepción de disparos cesó a las 09:36 horas y no se reanudó hasta las 23:43 horas. Según la entrada del “Diario de campaña” del 20 de diciembre de 2006, debido a una avería se sacó el streamer del agua a las 11:00 y no se reanudaron los disparos hasta las 23:30 horas, coincidiendo con el periodo de ausencia de detección de explosiones. Tras estos acontecimientos, la presencia de disparos fue prácticamente continua hasta el 18 de diciembre a las 08:27 horas cuando se detectó la última explosión de todo el periodo de muestreo. Según la misma entrada del “Diario de campaña”, la finalización de la doble adquisición simultánea ocurrió a las 12:30 horas del 17 de diciembre cuando se recogió el streamer multicanal dejando sólo el monocanal y se sustituyeron los cañones BOLT por los Sleeve Gun para adquisición de sísmica de alta resolución. La diferencia en horario entre las detecciones registradas y la descripción en el “Diario de campaña” podría deberse a que los disparos detectados

durante el día 17 y 18 de diciembre correspondieran a este otro tipo de cañones y que la ausencia de explosiones a partir de las 08:27 horas del día 18 tuviera relación con la posición del B.I.O. Hespérides, que según los perfiles consultados de la colección del Centro Mediterráneo de Investigaciones Marinas y Ambientales del CSIC, llegó a realizar líneas de explosiones al sur del mar de Alborán, en la plataforma continental del continente Africano. Esta zona se encuentra dentro de la sombra acústica generada por la propia isla de Alborán y los contornos de aguas someras que la rodean, puesto que el área de fondeo de los grabadores se encontraba al norte de la isla. Además, la pérdida por transmisión de las señales acústicas de baja frecuencia en áreas de aguas someras, como las exploradas por el B.I.O. Hespérides al sur del mar de Alborán, es mucho mayor que en áreas profundas (Urick, 1983), limitando el rango de alcance de la energía acústica de los disparos.

El nivel de ruido de los disparos recibidos en la posición de los grabadores fue muy variable (figuras IV-22 y IV-23). Los niveles máximos se encontraron entre los 12 y los 70 Hz, con un incremento respecto al ruido ambiente de hasta 31,2 dB, incluyendo la banda de comunicación principal del rorcual común. Hay que destacar que la energía acústica de los disparos en varios periodos llegó a afectar todo el rango de análisis de 0 a 1000 Hz, con un incremento medio de 6 dB, es decir, el doble del nivel de ruido ambiente en ausencia de explosiones. El intervalo de los disparos varió entre 18 y 60 segundos, llegando a encontrarse periodos con presencia de dos series de disparos simultáneas con diferente energía acústica (figura IV-21).

Por tanto, queda demostrado que la perturbación acústica generada por la actividad de la campaña geofísica durante los días 8 a 18 de diciembre de 2006 en la cuenca de Alborán y, sin duda, la región sur de la cuenca Balear, ocurrió al menos en un rango de frecuencias de 0 a 1000 Hz y con una importante intensidad en la banda de comunicación principal del rorcual común.

El análisis de los parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz de las canciones de rorcuales comunes que se encontraban en la cuenca de Alborán durante el desarrollo de la campaña geofísica demuestra que estos modificaron su comportamiento acústico. Las diferencias entre el ancho de banda de pulsos de 20 Hz emitidos en presencia y ausencia de disparos de cañones de aire es significativa. Se demuestra que su valor disminuye en presencia de disparos de cañones. A su vez el análisis sugiere que el intervalo entre pulsos, la duración de los pulsos, la frecuencia central y la frecuencia de máxima energía de los pulsos presentan todos la misma tendencia que el ancho de banda. Aunque la variabilidad de estos parámetros entre canciones de diferentes rorcuales comunes es altamente significativa, indicando que el efecto difiere entre individuos. Esta característica impide que las diferencias presenten el mismo nivel de significatividad cuando se analizan a nivel de población y no de individuo. Como ocurrió en el estudio del efecto del ruido del tráfico marítimo sobre estos parámetros acústicos, sería necesario repetir este análisis identificando canciones de un mismo rorcual común en presencia y ausencia de disparos de cañones de aire, experimento que desde el punto de vista metodológico no es inviable pero sí extremadamente complicado. Las diferencias de respuesta entre individuos ante el ruido del tráfico marítimo y ante disparos de cañones de aire podrían atribuirse a las diferencias en el fitness de los mismos. El nivel de tolerancia de la perturbación acústica será diferente para individuos que se encuentren en diferentes estados fisiológicos. Por ejemplo individuos adultos y sexualmente receptivos en la época de reproducción tendrán mayor

tolerancia a la perturbación si el área en el que se encuentran les da acceso a la reproducción. El mismo caso ocurre con animales desnutridos en áreas de alimentación. Por otro lado, si la población afectada por la perturbación tiene acceso a otros hábitats no afectados, tendrán mayor predisposición a desplazarse que aquellos de poblaciones que no dispongan de hábitats alternativos. El efecto en el fitness de estos animales será menor si pueden desplazarse a hábitats alternativos que si permanecen expuestos a la perturbación, y por tanto, sometidos a estrés. Gill (2001) menciona que la intensidad de respuesta de una población a una perturbación no es un buen predictor de las posibles consecuencias de esta perturbación, puesto que el nivel de respuesta es dependiente del grado de vulnerabilidad individual. Este efecto es difícil de medir en mamíferos marinos, aunque hay algunas descripciones, por ejemplo McCauley et al. (1998) documentó que las yubartas con crías fueron los primeros animales en responder ante el ruido generado por el acercamiento de un buque de prospección geofísica de un grupo de ballenas en el que también se encontraban machos adultos. Los machos adultos tardaron más tiempo en desplazarse del área.

Es importante mencionar que los rorcuales comunes estudiados en diferentes áreas parecen utilizar un mecanismo de compensación común para aumentar la detectabilidad de sus vocalizaciones en regiones o en horas de elevados niveles de ruido ambiente ocasionados por el tráfico marítimo, por una campaña geofísica o por una combinación de ambos tipos de fuentes. Los pulsos de 20 Hz se modifican en el dominio temporal reduciendo su duración y su intervalo y se modifican en el dominio espectral reduciendo su frecuencia central, de máxima energía y su ancho de banda ante el aumento de ruido. La reducción de la frecuencia en las señales, así como el aumento de la tasa de repetición de las mismas son mecanismos que favorecen la disminución del enmascaramiento por el ruido del tráfico marítimo ya que el nivel de ruido ambiente decrece por debajo de 20 Hz (Richardson et al. 1995) y el aumento de la redundancia de la señalización favorece la detectabilidad en presencia de ruido (Shannon y Weaver 1949; Morton, 1975). Sin embargo, la producción de sonidos es más eficiente para frecuencias cuya longitud de onda sea igual o inferior a la del tamaño del animal (Ryan y Brenowitz, 1985; Bradbury y Vehrencamp, 1998). Esta relación obliga a los rorcuales a realizar un mayor esfuerzo para adaptar sus emisiones a frecuencias más bajas y ritmos más rápidos de los utilizados en condiciones naturales de ruido ambiente. Un aumento del esfuerzo en el comportamiento acústico del canto, que puede durar muchas horas, incluso todas las del día en la época de reproducción, implica un considerable aumento del coste energético de la señalización, pudiendo generar efectos crónicos negativos. Hay que tener en cuenta que la estructura acústica de las señales emitidas por el rorcual común contribuyen a la evolución adaptativa de la comunicación a larga distancia en un medio en el que la luz se atenúa rápidamente, pero el sonido se transmite con mucha eficiencia, especialmente a bajas frecuencias. Su comportamiento acústico ha sido el resultado de un balance de presiones selectivas en un hábitat en el que producir sonidos en la banda de 20 Hz presenta ventajas (Bass y Clark, 2003; Clark y Ellison, 2004). Una ventaja inmediata de comunicarse en bajas frecuencias en el medio marino es un mayor rango de alcance. Esta ventaja ha sido descrita en otros organismos, tanto vertebrados como invertebrados (Morton, 1975; Michelsen, 1992, Gerhardt, 1994). Sin embargo, si las características del hábitat aprovechadas por el rorcual común para su comunicación son transformadas a causa de perturbaciones acústicas generadas por la actividad humana, la ventaja adaptativa que ha llevado a esta especie a amoldar su comunicación desaparece. El efecto que pueda tener esta alteración sobre la supervivencia de la especie depende de la función de la comunicación y de su

tolerancia y capacidad de adaptación al cambio. Aunque, especies de ciclos de vida largo, como los misticetos, muy probablemente no dispongan de la capacidad de adaptarse genéticamente a cambios rápidos de su hábitat, como es el caso del incremento del ruido ambiente marino (Rabin y Greene, 2002). Mayores niveles de ruido disminuyen el efecto atractor de las señales puesto que estas alcanzan a un menor número de individuos y el número de animales en contacto acústico disminuye. Considerando la función propuesta para el canto del rorcual común y la posible incapacidad de adaptación al incremento del ruido, la consecuencia de este efecto podría ser una reducción de la tasa reproductiva (Payne y Webb, 1971; Croll et al., 2002), que sumándose a un efecto crónico por la constante presencia de ruido en su hábitat (NRC, 2005; Southall, 2007) podría tener fatales consecuencias para la supervivencia de las poblaciones afectadas.

Además del posible efecto crónico en la reproducción como consecuencia del enmascaramiento, los resultados de este trabajo muestran otra posible vía por la cual el ruido podría estar reduciendo la capacidad reproductiva del rorcual común. Como se discutió en el capítulo III, las características acústicas de las señales emitidas por el rorcual común macho que carecen de significado reproductivo y que, por tanto, no difieren entre la población mediterránea y la atlántica noreste pueden ser más vulnerables a los efectos ambientales típicos de su hábitat. Los resultados de este trabajo demuestran que la tendencia de estas características acústicas se rige, en gran medida, por la intensidad del ruido generado por actividades humanas. Sin embargo, las características acústicas que difieren entre la población mediterránea y la atlántica noreste también demuestran ser sensibles a este factor no natural en todos los contextos de incremento de ruido estudiados. Si el mecanismo de compensación necesario para poder mantener la comunicación en presencia de ruido modifica parámetros acústicos de significado reproductivo, estos podrían reducir o perder su función. No obstante, esta hipótesis no podrá ser demostrada mientras no se mejoren los conocimientos acerca de la estrategia sexual del rorcual común.

Por otro lado, el nivel medio de ruido ambiente en el estrecho de Gibraltar es el más elevado de los registrados, por encima de los niveles descritos en todas las demás cuencas oceánicas (ej. Wenz, 1962; Ross, 1976; Urick, 1983 y Richardson et al. 1995), sin embargo, la presencia de rorcuales en este área es regular al menos durante los meses de invierno, como se ha descrito en este trabajo. Su presencia en áreas de elevado nivel de ruido originado por el tráfico marítimo sugiere que los mecanismos de compensación del ruido utilizados por los rorcuales comunes en su comunicación permitirían mantener su función. Quizá el patrón diario del nivel de ruido descrito permita desarrollar su función comunicativa sólo durante ventanas de tiempo específicas, aunque la presencia de vocalizaciones a lo largo de las 24 horas del día no apoya esta hipótesis. Si el nivel de perturbación permite mantener una comunicación efectiva, es probable que no exista un desplazamiento o abandono del área y, por tanto, los animales expuestos a la perturbación se vean más o menos afectados en función de la persistencia de la misma, su efecto acumulativo y su nivel de tolerancia. En el caso del área de la isla de Alborán, el mecanismo de compensación ante elevados niveles de ruido también fue utilizado por los rorcuales comunes que se encontraban en el área cuando se inició la campaña geofísica, como queda demostrado por el análisis de los parámetros acústicos de sus señales. Sin embargo, a pesar de este mecanismo y a diferencia de lo que ocurre con las observaciones en el estrecho de Gibraltar, la

perturbación superó el límite de tolerancia de esta especie, como se demuestra por el estudio de los desplazamientos.

Además de efectos potencialmente negativos en el comportamiento acústico por enmascaramiento y por alteración de caracteres de significado reproductivo, la presencia de disparos de cañones de aire provocó un desplazamiento en masa de los rorcuales acústicamente activos en la cuenca de Alborán. Durante el periodo de muestreo previo al inicio de la detección de disparos de cañones de aire (28 de noviembre a 7 de diciembre), los ángulos de recepción de rorcuales comunes demostraron que estos se situaban al noroeste de la posición de fondeo de los grabadores, en ángulos comprendidos entre 2° y 76°. Estos animales se encontraban dispersos en un área relativamente limitado y sin un desplazamiento aparente ya que en un periodo de 8 días los ángulos de recepción no variaron de manera sustancial. A partir del día 8 de diciembre, coincidiendo con la detección de los primeros disparos de cañones de aire, los ángulos de recepción iniciaron un incremento positivo que se mantuvo durante los siguientes 3 días hasta el 10 de diciembre, último día de 2006 en que se detectaron pulsos de 20 Hz en le área de estudio. Este incremento de hasta 120°, siendo de 84° en las primeras 24 horas (figura IV-27), se atribuye al abandono del área que estaba siendo utilizado las semanas previas al 8 de diciembre por todos los rorcuales acústicamente activos en el área de estudio como consecuencia de la perturbación acústica generada por la campaña de exploración geofísica MARSIBAL 1-06. La ausencia de pulsos de 20 Hz durante los siguientes días confirma que los rorcuales se desplazaron hacia el este saliendo del área de detección de los grabadores. Esta ausencia no puede ser debida a una posible permanencia de estos animales en silencio dentro del área de detección puesto que el gradual incremento de los ángulos de recepción de los pulsos de 20 Hz durante los siguientes 3 días tras el inicio de la recepción de disparos de cañones de aire demuestran que estos se desplazaron activamente y en todo su conjunto. Además, las posteriores detecciones, iniciadas el 1 de enero de 2007, fueron recibidas en ángulos de 150 a 130° y mantuvieron un incremento negativo a lo largo de los siguientes 7 días, demostrando que estos animales se desplazaron desde áreas fuera del alcance de los grabadores al este del área de estudio de vuelta a la zona inicial previa a la perturbación acústica.

Los resultados del estudio del desplazamiento de los rorcuales comunes por la perturbación acústica creada por la campaña geofísica documentan dos efectos importantes:

Primero, los rorcuales comunes que se encontraban explotando una zona concreta de la cuenca de Alborán abandonaron el área en grupo y en un intervalo de pocas horas desde el inicio de la recepción de disparos de cañones de aire. Este comportamiento indica que la reacción de los animales al estímulo acústico de los disparos fue drástica, generalizada y sin que la perturbación llegase a ser intensa. Segundo, estos animales no volvieron al área inicial tras la finalización de la perturbación acústica en el área de estudio sino que tardaron 17 días desde la finalización de la campaña MARSIBAL 1-06. Esta observación demuestra que el efecto generado en los animales fue muy persistente, manteniéndose durante más de dos semanas en ausencia de la perturbación acústica.

Otros estudios del efecto de campañas geofísicas en misticetos sugieren que los balaenopteridos son especialmente sensibles al ruido de los disparos de los cañones de

aire. La reacción de alejamiento de buques de exploración geofísica parece ser más evidente en ballenas azules y rorcuales (McDonald *et al.*, 1995; Stone, 1997, 1998 y 2003; Gordon *et al.*, 2004; MacLeod *et al.*, 2006; Stone y Tasker, 2006) que en yubartas (McCauley *et al.*, 1998; Lien *et al.*, 1993), ballenas de Groenlandia (Richardson *et al.*, 1999) o ballenas grises (Malme *et al.*, 1984; Miles 1984; Würsig *et al.* 1999; Johnson *et al.*, 2002). Aunque parece lógico que las especies cuya comunicación acústica se centran en las más bajas frecuencias sean más sensibles al ruido en estas frecuencias, es aun prematuro concluir que otras especies menos especializadas en la comunicación de baja frecuencia sean menos sensibles, ya que la información disponible es muy escasa, local y en gran parte oportunista.

Identificar cual es la causa del efecto de la perturbación en el comportamiento de los rorcuales comunes es fundamental para poder aplicar medidas que permitan reducir su impacto. El abandono del área de estudio de la isla de Alborán podría deberse a que los disparos de cañones de aire impidieran una comunicación efectiva entre rorcuales comunes a pesar de los mecanismos de compensación observados. Pero también podría ocurrir que el elevado nivel de ruido impidiera explotar los recursos del área donde estos animales se encontraban, o incluso una combinación de ambas situaciones. Es interesante indicar que las diferencias en el nivel de ruido y la naturaleza del mismo, entre el intenso tráfico marítimo del estrecho de Gibraltar y los disparos de los cañones de aire de la campaña geofísica, parecen suficientes para provocar el abandono del área. La comunicación acústica requiere que las señales no sólo sean detectadas sino que también sean decodificadas y reconocidas (Bass y Clark, 2003). La presencia de disparos de cañones de aire que incrementan en más de 30 dB el nivel de ruido en la banda de comunicación acústica de los rorcuales comunes, cuya duración puede alcanzar y superar la de sus señales por efecto de reverberación a distancia y cuya tasa de repetición puede llegar a ser cercana a la de los intervalos entre pulsos de canciones podría fácilmente incapacitar el reconocimiento de las señales y por tanto su decodificación, impidiendo la función comunicativa entre los individuos de la población expuesta al ruido.

La drástica reacción observada en todos los rorcuales comunes detectados acústicamente en las primeras horas desde el inicio de recepción de disparos de cañones de aire hace pensar que estos animales podrían haber sido sometidos a un proceso de sensibilización de este tipo de estímulos perturbadores. El proceso de sensibilización ha sido bien documentado en los mamíferos marinos y se ha descrito para diversas especies, siempre para estímulos acústicos, por ejemplo, al sobrevuelo de avionetas (Johnson, 1977) y aproximación de helicópteros (Walker, 1949), embarcaciones vinculadas a la caza de focas (Johnson *et al.* 1989), o a la captura de delfines (Irvine *et al.*, 1981) y al acercamiento de pesqueros de cerco (Norris *et al.*, 1978; Au y Perryman, 1982; Hewitt, 1985). La sensibilización ocurre cuando un animal aprende a asociar un estímulo con un evento dañino o doloroso. En este caso la respuesta a los estímulos en ocasiones sucesivas ocurre en cuanto estos empiezan a ser detectables ya que presentan una ventaja adaptativa, un ejemplo son las respuestas a señales de depredadores (Gordon *et al.*, 2004). En el caso de disparos de cañones de aire, los rorcuales podrían haber estado expuestos a niveles de ruido extremos que generen dolor e incluso daño fisiológico hasta desencadenar el abandono de un área. En sucesivas exposiciones a este estímulo el abandono se produciría mucho antes de la exposición a niveles de ruido tan elevados, como ocurrió en el caso de este trabajo.

El mar de Alborán parece ser una de las áreas de mayor reincidencia de campañas geofísicas tanto de carácter científico como comercial de las aguas de jurisprudencia española. Esta observación es evidente tras consultar el archivo técnico de hidrocarburos del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, el Sistema de Información Geográfica del Instituto Geológico y Minero de España y la colección de perfiles sísmicos de alta resolución del Centro Mediterráneo de Investigaciones Marinas y Ambientales del CSIC. En la cuenca de Alborán, desde el año 1981, hay catalogadas 15 campañas geofísicas comerciales y desde 1983 hay 13 campañas científicas. Desde la realización de la primera campaña del proyecto MARSIBAL en 2006, se han realizado otras tres más cuyas líneas sísmicas se solapan entre sí. La persistencia de disparos de cañones de aire en esta región del mar Mediterráneo parece ser muy elevada, favoreciendo la sensibilización de los rorcuales comunes que se vean expuestos a los recurrentes disparos de cañones de aire. Esta es una característica importante a tener en cuenta de cara a la regulación y control de esta actividad con el fin de reducir su impacto en el rorcual común en el mar Mediterráneo.

Un efecto contrario a la sensibilización es la habituación que también podría ocurrir en las poblaciones de rorcuales comunes expuestos a elevados niveles de ruido. En este caso, el nivel de tolerancia a la perturbación acústica aumenta progresivamente durante una exposición continuada o exposiciones sucesivas siempre que este estímulo no genere consecuencias significantes para el animal (Thorpe, 1963). Aunque una reciente revisión de este concepto indica que la ausencia de reacción a la perturbación por habituación no excluye daños fisiológicos (Bejder *et al.*, 2009). La habituación en los mamíferos marinos parece más común ante estímulos que son predecibles y estables (Gordon *et al.*, 2004) y también ha sido descrita en misticetos. Por ejemplo, en áreas de intenso tráfico marítimo en el golfo de San Lorenzo en Canadá, en la bahía de Boston en EEUU (Mitchell y Gahnimé, 1982; Beach y Weinrich, 1989) o en áreas de intensa actividad de pesca de arrastre (Brodie, 1981; Richardson *et al.*, 1995) donde importantes niveles de ruido generados por el tráfico marítimo alcanzan la mayoría de las áreas de importante presencia de misticetos sin desplazamientos evidentes.

Aunque hasta la fecha no ha habido estudios centrados en analizar si la reincidencia de campañas geofísicas en una misma zona puede provocar el abandono permanente de la misma por los animales afectados, sí que existen numerosas descripciones de abandonos temporales por perturbaciones acústicas de los hábitats utilizados, muchas de ellas por la ballena gris (ej. Jones *et al.*, 1994; Bryant *et al.*, 1984; IWC, 2005) pero también para otras especies de misticetos como la yubarta y varias especies de rorcuales (Stone y Tasker 2006) o la ballena de Groenlandia (Richardson *et al.*, 1985 y 1990). Aunque también hay descripciones de la ausencia de efecto de desplazamiento. Por ejemplo, las ballenas grises continúan su migración por la costa oeste americana exponiéndose dos veces cada año a zonas de elevado tráfico marítimo y regiones de activa exploración geofísica (Malme *et al.* 1984). Las ballenas de Groenlandia están presentes todos los veranos en el mar de Beaufort donde la exploración geofísica es cada vez más intensa (Richardson *et al.* 1987) y la población residente de delfines mulares en el estuario de Moray, Escocia, no parecen desplazarse durante periodos de repetidas campañas de exploración geofísica (Turnpenny y Nedwell 1994; Evans y Nice 1996). Aunque hay que indicar que ninguno de estos estudios es de carácter cuantitativo y no se han comparado las abundancias de estos cetáceos en periodos de presencia y ausencia de las perturbaciones acústicas.

Una posible explicación de las diferencias observadas entre el impacto del ruido del tráfico marítimo y el de la campaña de exploración geofísica en el comportamiento del rorcual común podría estar relacionada con el efecto de habituación de un tipo de ruido y el de sensibilización de otro. Puesto que el tráfico marítimo es constante, el ruido que genera es de carácter estable y en cierta manera predecible, puesto que el tráfico se concentra en rutas determinadas por las que se distribuyen numerosas fuentes de ruido (buques). La presencia de este ruido es permanente en todo el mar Mediterráneo y gran parte del océano Atlántico norte, por lo que el hábitat de las dos poblaciones estudiadas está sometido a una perturbación continua y global. El nivel de tolerancia a esta perturbación ha de ser forzosamente elevado ya que de lo contrario no podrían mantener la ocupación del nicho disponible en estos ecosistemas. Siempre que este contaminante no genere consecuencias significativas para la supervivencia de las poblaciones, como un efecto crónico, estas podrían mantener un equilibrio entre el nivel de tolerancia y la permanencia en estos ecosistemas. Este razonamiento podría explicar por qué las áreas estudiadas en este trabajo con elevados niveles de ruido generado por el tráfico marítimo son utilizadas por el rorcual común. Este concepto ha de valorarse para definir una estrategia de conservación efectiva del rorcual común en el mar Mediterráneo, ya que uno de los principales problemas que derivan del tráfico marítimo es su posible efecto crónico y este podría estar fácilmente ocurriendo en áreas donde se han identificado niveles de ruido especialmente elevados como en el estrecho de Gibraltar o la cuenca provenzal.

Sin embargo, la perturbación acústica generada por la campaña de exploración geofísica en el mar de Alborán presentó unas características muy diferentes a las del ruido del tráfico marítimo. Esta no es de carácter estable, puesto que el ruido es generado en breves e intensos disparos de intervalos variables, ni permanente, puesto que todas las campañas tienen una duración limitada. Pero sí es de naturaleza recurrente, puesto que tanto las campañas geofísicas de carácter científico como las de carácter comercial tienden a realizarse en zonas concretas cuyas características geomorfológicas son de interés en diversos campos de geología y donde estas características condicionan la acumulación de hidrocarburos. Además su explotación requiere un seguimiento de los mismos empleando las mismas técnicas que durante la exploración (NRC, 2003). La presencia e intensidad del ruido generado por los disparos de los cañones de aire depende del nivel de fuente y la distancia entre la posición de la fuente y el receptor. La posición de la fuente es variable puesto que el buque de exploración realiza líneas de disparos cubriendo un área de forma más o menos intensiva y de forma más o menos ordenada. En este caso la fuente puede considerarse como un solo punto en el mar por lo que el nivel de perturbación acústica es impredecible y muy heterogéneo si se compara con el nivel de homogeneidad predecible en las rutas de tráfico marítimo. El nivel de fuente es mucho más elevado que el generado por los buques mercantes, con diferencias de hasta 70 dB (ej. Richardson *et al.*, 1995), que se correspondería con un incremento de energía acústica de más de 1000 veces el del buque mercante más ruidoso. El impacto acústico de este tipo de fuentes sonoras podría fácilmente desencadenar situaciones de daño fisiológico en organismos de particular sensibilidad acústica en el medio marino. Esta perturbación, aunque por su intensidad puede afectar un área importante de la distribución de las poblaciones de rorcual común estudiadas, no es de carácter global puesto que no suelen darse situaciones de múltiples campañas geofísicas al tiempo en la cuenca mediterránea como se observó en las bases de datos consultadas. Todas estas características que diferencian el ruido generado por una campaña geofísica del

generado por el tráfico marítimo hacen de los disparos de cañones de aire una perturbación de fácil sensibilización por los organismos que sufran su la experiencia de manera recurrente. La sensibilización a una perturbación puede presentar ventajas adaptativas, ya que reduce el riesgo a una exposición de consecuencias biológicamente negativas, como el daño fisiológico, pero también genera un coste por el gasto energético y tiempo dedicado a los alejamientos de las perturbaciones y por perder oportunidades tróficas, reproductivas o de otro tipo que beneficien al individuo (McEwen y Wingfield, 2003). Por tanto, las consecuencias de la sensibilización a los disparos de cañones de aire deben tenerse en cuenta en el diseño de una gestión de conservación apropiada para el rorcual común en el mar Mediterráneo.

No hay que olvidar que la población de rorcuales comunes que utiliza el mar de Alborán es de origen atlántico. Esta circunstancia podría potenciar el posible impacto del ruido marino y, por tanto, sus consecuencias en la población de rorcuales que utilizan esta cuenca durante el invierno. El nivel medio de ruido ambiente del mar Mediterráneo es superior al nivel del océano Atlántico norte (Ross, 2005; Abdulla y Linden, 2008) y este carácter queda reflejado en las medidas realizadas en este trabajo entre el área de las islas Azores y las del mar Mediterráneo. Si a este incremento de nivel de ruido, al que los rorcuales responden con un mecanismo de compensación en su comportamiento acústico, se suma la perturbación de una campaña geofísica, la diferencia de nivel de ruido a la que estos animales se exponen entre el océano Atlántico y el mar de Alborán es suficientemente grande como para desencadenar el abandono temporal del área. El significado biológico de esta perturbación en parte depende de la importancia del comportamiento interrumpido. Se desconocen las consecuencias del desplazamiento descrito en el mar de Alborán, pero la presencia de rorcuales comunes en esta cuenca durante el invierno indica que se trata de un área de invernada, por lo que se perturbó acústicamente un área crítica para la conservación del rorcual común. Además, la confirmación de que estos rorcuales comunes abandonaron el área temporalmente sugiere que muy probablemente se interrumpió su actividad de reproducción, que supuestamente ocurre durante los meses de invierno (Lockyer y Brown, 1981), siendo esta una actividad crítica para su supervivencia. El hecho de que estos rorcuales pertenezcan a la población atlántica noreste implica que cruzan el estrecho de Gibraltar para acceder a esta área de invernada. Habiendo demostrado que el estrecho de Gibraltar es un área de especial impacto por el ruido del tráfico marítimo, su esfuerzo por cruzar un área altamente perturbada indica que el área del mar de Alborán tiene un elevado significado biológico para esta población. No cabe duda de que la documentación del drástico efecto generado por la campaña geofísica en la población de rorcuales que se encontraron en el mar de Alborán durante el invierno de 2006 es de utilidad para la aplicación de una correcta gestión del medio marino y la conservación de su ecosistema.

El abandono de un área y consecuente desplazamiento a un nuevo hábitat representa una modificación drástica de la homeostasis de cualquier población animal. En el medio marino, a pesar de su aspecto homogéneo, las diferentes especies de mamíferos marinos requieren condiciones del hábitat muy específicas en términos de profundidad, temperatura y condiciones oceanográficas (Gordon *et al.*, 2004). Además, el acceso a nichos ecológicos en diferentes áreas puede estar limitado por la presencia de otras poblaciones o especies que lo ocupan, por lo que la permanencia en hábitats expuestos a niveles elevados de ruido podría generar niveles de stress que desencadenen daños fisiológicos o comportamientos patológicos.

Incluso se han descrito casos de efectos sinérgicos entre el estrés producido por la exposición a ruido y otros contaminantes, en particular los químicos. Los conocimientos de esta sinergia en el campo de la medicina muestran escenarios que podrían fácilmente reproducirse con mamíferos marinos en presencia de ruido y agentes organoclorados persistentes, dos contaminantes comúnmente encontrados en altas concentraciones en sus ecosistemas. El riesgo de la pérdida de audición se multiplica entre cuatro y once veces cuando la exposición al ruido se combina con agentes químicos de distinta naturaleza (Prasher, 2000; Braun *et al.*, 2005; Steyger, 2008). En el campo de la zoología, se han descrito sinergias entre estresores que de forma independiente no presentan efectos negativos pero que al combinarse generan un fuerte impacto incluso aumentando la mortandad. Experimentos realizados con dos especies de anuros demostraron que la tasa de mortalidad se multiplicaba por nueve cuando se exponían a pesticidas en combinación con el olor de sus depredadores naturales (Reylea y Mills, 2001; Reylea 2003; Sih *et al.* 2004). En este contexto es interesante mencionar que las poblaciones de ballena franca del hemisferio sur están recuperándose rápidamente tras el efecto de la industria ballenera del siglo pasado en hábitats donde los niveles de ruido derivado del tráfico marítimo y de contaminantes químicos bio-acumulables presentan concentraciones mucho menores que en el hemisferio norte, donde las poblaciones de esta misma especie están en serio declive (Payne, 2004). Aunque este mecanismo sinérgico no ha sido demostrado en mamíferos marinos, sin duda se ha de tener en cuenta en la gestión de conservación de poblaciones en áreas de fuerte presión antrópica y elevados niveles de ruido y, en particular, para especies con mayor potencial de ser afectadas por el ruido, como se demuestra en este trabajo con el rorcual común en el mar Mediterráneo.

En general, se asume que las consecuencias de las perturbaciones acústicas moderadas, temporales, aisladas y que repercuten a una pequeña porción de una población no tienen porqué generar efectos negativos (Richardson *et al.*, 1995). Los cetáceos habitan un medio en el que a diario se exponen a perturbaciones naturales del nivel de ruido ambiente, por lo que es de esperar que estos puedan tolerar sin un coste elevado las consecuencias de perturbaciones acústicas de origen humano. Sin embargo, este escenario cambia si estas perturbaciones, aunque moderadas, se convierten en prolongadas o reinicidentes. Sus consecuencias dependerán en gran medida de la capacidad de habituación como se ha discutido anteriormente. Las consecuencias a largo plazo de una perturbación prolongada o continua, como ocurre con el ruido en el medio marino, no están bien descritas en los mamíferos y son prácticamente desconocidas para los mamíferos marinos (NRC, 2003), y son estas las de mayor preocupación desde el punto de vista de la conservación, en especial las que alcanzan a una porción importante de la población. Aunque algunos autores coinciden en que incluso las perturbaciones acústicas temporales y locales pueden desencadenar consecuencias importantes desde el punto de vista ecológico (Weilgart, 2007; NRC, 2005). Las consecuencias tanto breves como prolongadas a escala de ecosistema son desconocidas por la falta y dificultad de cuantificar su efecto en la supervivencia de las comunidades que lo componen (Richardson *et al.*, 1995; NRC, 2003; Southall *et al.*, 2007; Tyack, 2008, Clark *et al.*, en prensa). Además, hay que tener en cuenta la posibilidad de que ocurran efectos indirectos, como el impacto provocado en sus presas. Se ha demostrado en varias especies de peces que estas también pueden ser perturbadas negativamente, presentando aumentos temporales y permanentes del umbral auditivo, reducción de las tasas de captura, estrés y reacciones de

comportamiento ante exposición a ruidos (Weilgart, 2007). Desde el punto de vista de la conservación, los cambios más importantes son aquellos que afectan a nivel de población, como el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de los individuos. La mayoría de los trabajos dedicados a evaluar el impacto de la contaminación acústica han demostrado cambios, a veces severos, en el comportamiento durante la exposición a las perturbaciones acústicas. Pero muy pocos han podido evaluar el efecto de estos cambios a largo plazo (Tyack, 2008). NRC (2005) discute la necesidad al menos de establecer predicciones de los efectos a largo plazo del ruido de origen antropogénico en las poblaciones de los mamíferos marinos partiendo de los efectos fisiológicos y etológicos descritos en casos individuales. Incluso, se han desarrollado algunos modelos que pueden facilitar la predicción de las consecuencias biológicas del impacto del ruido en los mamíferos marinos. Por ejemplo, Frid y Dill (2002) sugieren que los modelos ecológicos de riesgo de depredación pueden explicar el balance de las respuestas ante perturbaciones. Estudios sobre las respuestas a la presión de depredación sugieren que las estrategias anti-depredadoras implican pérdidas de energía y tiempo y también implican un coste por perder oportunidades tróficas, reproductivas o de otros tipos que beneficien al individuo. Estos costes reducen la probabilidad de ser capturados, pero también afectan al balance entre el abastecimiento y el consumo energético de los individuos y la dinámica de sus poblaciones. Esta falta de balance energético, cuando el consumo supera al abastecimiento, ha sido definido como la carga alostática (McEwen y Wingfield, 2003). En periodos de elevada carga alostática, el efecto de las perturbaciones será negativo aunque estas sean de muy baja intensidad. Se desconoce si la exposición prolongada o crónica a niveles elevados de ruido como el generado por el tráfico marítimo, puede producir estrés alostático, pero se ha demostrado que hay periodos en el ciclo de vida de los misticetos que su carga alostática es más severa y, por tanto, son más vulnerables al estrés, como, por ejemplo, el periodo de recuperación tras la migración estacional o durante el periodo de lactancia tras el parto de una cría (McEwen y Wingfield, 2003).

Las consecuencias energéticas de las perturbaciones acústicas dependen de la intensidad de la perturbación, la duración, la reincidencia y el área que abarquen, pero también de la especie, hábitat, requerimientos de alimentación y estatus reproductivo de los organismos afectados (Richardson *et al.*, 1995). Se han desarrollado modelos energéticos que podrían facilitar la evaluación de las consecuencias de las perturbaciones acústicas en las poblaciones afectadas (ej. Huntley *et al.*, 1987), sin embargo, los parámetros necesarios para poder hacer funcionar este tipo de modelos se desconocen para la mayoría de las especies de mamíferos marinos. Es necesario obtener más datos sobre la biología y ecología de la mayoría de las especies antes de poder evaluar el impacto de muchas de las perturbaciones que actualmente afectan a estas poblaciones, incluido el ruido de origen antropogénico.

Richardson *et al.*, (1995) comentan que una característica importante del ruido como contaminante en el medio marino es que habitualmente se genera desde múltiples fuentes simultáneamente (ej. buques) provocando efectos acumulativos. Este hecho incrementa la severidad del efecto por varios motivos: La proporción de una población de cetáceos expuesta a una sola fuente de ruido puede ser pequeña, pero la suma de las proporciones de cada fuente puede alcanzar fácilmente a la población completa. Si el distanciamiento entre fuentes es de magnitud similar a la distancia provocada por el desplazamiento, la población completa podría verse desplazada de la totalidad del área afectada. Si los cetáceos de una población se desplazan o las fuentes se desplazan, el

encuentro entre fuentes e individuos es más probable, o al menos el acceso a la zona de efectos severos de la fuente. Si el ruido se genera desde múltiples fuentes repartidas en un área, este tendrá un carácter menos direccional, reduciendo la eficacia de la escucha direccional, que permite a los cetáceos expuestos al ruido distinguir las señales de interés. Todos estos efectos acumulativos del ruido en el ambiente marino pueden aplicarse fácilmente al provocado por el tráfico marítimo, en especial en áreas de alta densidad y hábitats aislados, como ocurre en el mar Mediterráneo. Existen varios estudios que sugieren que el efecto acumulativo de este contaminante provoca que las respuestas de los cetáceos no sean adaptativas. Por ejemplo, Nowacek *et al.* (2004) demostraron que la ballena franca boreal ignora el acercamiento de los buques a pesar de que las colisiones sean una de las principales causas del declive de esta población. Los autores concluyeron que la habituación a este tipo de estímulo sonoro continuo y la dificultad por ubicar espacialmente la fuente debido al alto nivel de ruido provocaron la falta de respuesta. Gordon *et al.*, (2004) comentan que debido a las características de las líneas de arrastre de cañones de aire comprimido utilizadas en las campañas de exploración geofísica, se producen zonas de convergencia acústica a distancias considerables de la zona de exploración. Además, fenómenos de interferencia destructiva y nula de la propagación de sonidos de largas longitudes de onda en capas de agua superficiales hacen que los niveles de ruido producido por los disparos de los cañones de aire sean muy inferiores junto a la superficie. Estas características físicas de la propagación del sonido pueden desorientar a los animales que tratan de localizar la fuente acústica para alejarse de ella, explicando las observaciones descritas de varias especies de cetáceos que no parecieron alejarse de buques de campañas de exploración geofísica.

Tanto los efectos acumulativos como los efectos crónicos de las perturbaciones acústicas del medio marino, a primera vista parecen menos severos que la mortandad directa causada por las mismas. Sin embargo, estas afectan a porciones mucho mayores de las poblaciones y se desarrollan sobre periodos de tiempo mucho más extensos. Cabe esperar que los efectos acumulativos, crónicos y sinérgicos del impacto acústico en el medio marino resulte en la reducción de la tasa de reproducción e incremento de la mortandad de las poblaciones de cetáceos expuestos, especialmente aquellos más sensibles a las frecuencias de ruido dominante (Gordon *et al.*, 2004). Muchas especies de mamíferos marinos presentan tasas de reproducción muy bajas, por tanto estos efectos sub-letales, que podrían alcanzar a poblaciones enteras, pueden provocar mayores consecuencias a nivel de población que a nivel de individuos.

El efecto a largo plazo del impacto acústico por tráfico marítimo y por campañas de exploración geofísica aún no ha podido ser cuantificado para poblaciones de cetáceos, sin embargo, es evidente que perturbaciones causadas a corto plazo, bien documentadas en numerosas ocasiones, incluida la de este trabajo, sobre todo si son de carácter recurrente, pueden generar efectos crónicos que reduzcan la supervivencia de las poblaciones afectadas. La magnitud de estos efectos se incrementa si el área perturbada es grande. Debido a las características físicas del medio marino que permiten una eficiente propagación y canalización del sonido, es de esperar que el área afectada por las perturbaciones acústicas sea grande. Los resultados de este trabajo demuestran, sorprendentemente, que el efecto de abandono temporal generado por la campaña geofísica MARSIBAL 1-06 ocurrió días antes de que la prospección se acercase al área donde se encontraban los rorcuales comunes. La fuente de ruido se encontraba aproximadamente a 285 km de distancia de la zona donde se encontraban los rorcuales

comunes cuando se detectó el cambio de comportamiento. Esta distancia hace cuestionable la viabilidad de muchas de las medidas de mitigación del impacto acústico propuestas para la exploración geofísica marina, al menos para el rorcual común, puesto que el seguimiento de poblaciones de cetáceos en un radio de esta envergadura es actualmente inviable tanto logística como económicamente. Las únicas medidas de mitigación potencialmente útiles son las restricciones temporales y espaciales (Dolman, 2007). Por otro lado, las medidas de mitigación actualmente aconsejadas por diferentes gobiernos y organizaciones contemplan campañas geofísicas comerciales, pero rara vez citan campañas científicas (ej, Weir y Dolman, 2007; Castellote, 2007). No hay que olvidar que el impacto acústico documentado en este trabajo fue consecuencia de una campaña científica con dos líneas de un total de 9 cañones. Las campañas comerciales utilizan varias líneas con un total de hasta 90 cañones (Hildebrand, 2005). El área de impacto acústico de campañas comerciales puede ser superior en varios ordenes de magnitud al descrito en este trabajo, por ejemplo radios de 2500 km (Gedamke *et al.*, 2009) o 3000 km (Nieukirk *et al.*, 2004) y áreas de de insonificación de hasta 300.000 km² (IWC, 2005). Por otro lado, no es raro que las campañas geofísicas de carácter científico estén vinculadas a las compañías comerciales de exploración y explotación de hidrocarburos puesto que existen intereses recíprocos en los resultados de los estudios. Por ejemplo, los proyectos MARSIBAL y SAGAS del CSIC, ambos implicados en la campaña geofísica de carácter científico estudiada en este trabajo, incluyen como uno de sus objetivos la “evaluación del potencial de recursos no renovables (esencialmente hidrocarburos) de posible interés económico”. En este caso, REPSOL-YPF S.A. participa en los proyectos mencionados como Ente Promotor / Observador. Por tanto, parece lógico que las campañas de exploración geofísica de carácter científico se ciñan a la misma regulación que la aplicable a las campañas comerciales, al menos de cara a su carácter contaminante. Actualmente este no es el caso en ningún país. Es más, se realizan campañas geofísicas de carácter científico en áreas donde otros contaminantes son estrictamente regulados por las características medioambientales, como por ejemplo la Antártida. España, como miembro del Tratado Antártico desde 1982, realiza exploraciones geofísicas en esta región del planeta y por tanto la regulación de este tipo de contaminante debería considerarse con especial atención, no sólo por nuestro país sino por todos los demás países miembros del tratado.

Queda claro que existe una preocupación científica razonable acerca del impacto biológico, a nivel de poblaciones y ecosistemas, en los mamíferos marinos y en particular en los mysticetos por el ruido generado por el tráfico marítimo y las campañas de exploración geofísica. El impacto a este nivel ecológico no ha sido medido ni parece fácil que lo pueda ser en el presente. Esto induce a preguntarse qué estrategia de seguimiento de estas poblaciones puede hacerse con el fin de poder aplicar un esquema de protección o regulación del ruido como contaminante, al menos en sus hábitats críticos. Se presentan dos problemas principales, el primero es cómo demostrar que el tamaño o la distribución de las poblaciones o incluso de una especie han cambiado cuando ni siquiera conocemos su situación actual. El segundo es demostrar que ese cambio es consecuencia de un impacto ecológico originado por el ruido de las actividades humanas en el medio marino. Si no podemos resolver estos dos problemas, tampoco podemos atribuir objetivamente al ruido y no a otros factores la causa de un declive en las poblaciones o la especie estudiada. Sería necesario conocer en detalle la biología de las poblaciones y las especies potencialmente afectadas, su dinámica poblacional y su rol en el ecosistema antes de poder establecer de manera directa el efecto del ruido sobre estos organismos. Además, no hay que olvidar que diferentes

factores derivados de la presencia del ruido pueden afectar a los cetáceos de forma directa o indirecta incluso mediante efectos sinérgicos (Gordon *et al.*, 2004). Es importante que se continúe estudiando el impacto de este contaminante en las poblaciones de mamíferos marinos, pero es más importante aún que el problema se aborde de manera realista, puesto que no es viable identificar efectos negativos a nivel ecológico y asociarlos al impacto del ruido por el tráfico marítimo y/o la exploración geofísica marina a tiempo como para poder regular y remediar su efecto antes de que sea demasiado tarde. Siendo conscientes de las limitaciones actuales para poder abordar el problema de esta manera, es esencial aplicar el principio de precaución a la gestión medioambiental de este contaminante. La falta de conocimientos sobre la ecología de los mysticetos y la dificultad de obtenerlos junto con el grado de incertidumbre acerca del impacto que el ruido puede causar en estas especies es un problema muy común en otras áreas de la conservación del medio ambiente donde se ha desarrollado y adoptado el principio de precaución como medida inicial frente al problema (Hey, 1991). Este principio implica tomar medidas para reducir y, en la medida de lo posible, evitar el impacto incluso en ausencia de evidencia científica que demuestre la causa y el efecto.

En el caso de la contaminación por ruido en el medio marino, un problema añadido es que no sólo se desconoce su impacto a largo plazo y a escala ecológica sino que tampoco existen instrumentos legales que permitan, ya no regular, sino al menos conocer el nivel de este contaminante en las regiones marinas de principal interés para su protección. Un ejemplo cercano es el mar de Alborán en el que de manera recurrente se realizan exploraciones geofísicas tanto comerciales como científicas solapando múltiples líneas sísmicas sobre áreas de invernada y probable reproducción del rorcual común.

Aunque el ruido como contaminante ambiental es conocido desde hace décadas en el medio aéreo, las fuentes que lo originan en el medio marino continúan sin estar reguladas. No obstante, en los últimos años se ha incrementado la preocupación por el impacto crónico y agudo del ruido generado por diferentes actividades humanas en la biodiversidad marina y actualmente no son pocas las organizaciones internacionales que lo reclaman: La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS) incorporó el ruido en el medio marino como contaminante a reducir y controlar en 1982 (Artículo 1(1)(4)). En 1994, el Acuerdo para la Conservación de pequeños cetáceos del mar Báltico y mar del Norte (ASCOBANS) incluyó el ruido en el medio marino como agente nocivo en su plan de gestión y conservación, con una resolución a todos sus países miembros en 2003 y otra en 2006 solicitando la aplicación del principio de precaución y la reducción de este contaminante y la elaboración de protocolos para minimizar su impacto por las diferentes actividades humanas. En 2004, el Acuerdo para la Conservación de Cetáceos del mar Negro y mar Mediterráneo (ACCOBAMS) reconoce que el ruido antropogénico en el océano es una forma de contaminación que puede tener efectos adversos en la vida marina y que ha aumentado como resultado de las actividades humanas. Urge a los países miembros prestar especial atención y si es adecuado rechazar el uso de ruido antropogénico en hábitats de especies vulnerables.

La Comisión Ballenera Internacional (IWC) reconoció en 2004 el ruido como factor de impacto y potencial amenaza en las poblaciones de cetáceos solicitando la cooperación internacional para controlar y regular este contaminante. También solicitó a las naciones miembro reducir y eliminar las fuentes de ruido antropogénico en los hábitats críticos de las especies de cetáceos amenazadas. Una resolución posterior fue adoptada

en 2007 para solicitar la urgente necesidad de que sus naciones miembro actuaran de acuerdo con una serie de principios para reducir el impacto del ruido en estas especies. La Convención para la Conservación de las Especies Migratorias (CMS) adoptó en 2005 una resolución para desarrollar medidas de protección contra las amenazas generadas por las actividades humanas incluyendo el ruido. Naciones Unidas (UN) reconoció en 2005 el ruido submarino como una amenaza creciente para los ecosistemas marinos y lo clasificó como uno de las cinco amenazas más graves para algunas especies de cetáceos y una de las 10 amenazas más preocupantes para la biodiversidad marina. En abril del año pasado, la Organización Marítima Internacional (IMO) ha reconocido los efectos dañinos del ruido originado por el tráfico marítimo en la biodiversidad marina y ha invitado a los gobiernos participantes a dialogar para obtener soluciones para su mitigación. En junio del año pasado, la Unión Europea (EU) ha desarrollado la Directiva de Estrategia Marina (Directiva 2008/56/CE de 17 de junio de 2008) como primer instrumento legal internacional que incluye explícitamente el ruido generado por actividades humanas en el medio marino como contaminante a ser regulado y controlado en aguas marinas europeas antes de 2020, definiendo una clara obligación para todos sus estados miembros de evaluar este contaminante. En enero de 2009, la Convención para la Protección del Medio Marino del Atlántico Noreste (OSPAR) ha desarrollado un primer borrador de la evaluación del impacto ambiental del ruido marino.

Al menos quince años después de ser conscientes de que el ruido en el medio marino actúa como contaminante afectando negativamente a la biodiversidad marina, con particular incidencia en los organismos más sensibles desde el punto de vista acústico, este continúa sin estar regulado. Las actividades de principal aporte de ruido al medio marino, como son el tráfico marítimo y la exploración geofísica marina, no sólo continúan realizándose con el mismo grado de libertad legal sino que además su presencia se ha duplicado en la última década y su pronóstico es de un aumento aún mayor en el futuro (McDonald *et al.*, 2006).

En España, la situación acerca de la regulación del ruido como contaminante marino no es muy distinta a la de otros países vecinos y todavía se encuentra en su fase embrionaria. En junio de 2008 se estableció un marco de acción comunitaria para la política del medio marino mediante la trasposición de la Directiva de Estrategia Marina de la Unión Europea, incluyendo el ruido como contaminante a regular y controlar. Este marco de acción obliga en un plazo de 6 años a elaborar y aplicar un programa de supervisión para la evaluación permanente y la actualización periódica de los objetivos y obliga a haber establecido en 2016 un programa de medidas para alcanzar un buen estado ecológico de las regiones marinas que debería iniciarse en 2018. A parte de esta regulación, en diciembre de 2007 se ratificó el Real Decreto de Conservación de Cetáceos en el que se prohíbe producir ruidos o sonidos estridentes en un radio de 500 metros de la zona de presencia de cetáceos aunque actualmente sólo la comunidad autónoma de las islas Canarias implementa esta medida. La falta de implementación de regulaciones, normas o protocolos parece ser un problema generalizado, al menos en el marco Mediterráneo. Bearzi *et al.*, (2007) comenta que la conservación del medio marino de esta cuenca sufre una importante falta de rigor en su implementación respecto a otros campos de conservación del medio ambiente. A pesar de los numerosos esfuerzos a nivel científico por documentar los problemas medioambientales y generar recomendaciones para paliarlos, la ejecución de medidas basadas en la ciencia son habitualmente escasas o inexistentes.

Los resultados de este trabajo, apoyados por los conocimientos sobre la ecología del rorcual común y las descripciones de efectos de perturbaciones acústicas en otras especies de mysticetos, permiten sugerir estrategias concretas de actuación para mitigar el impacto acústico en el rorcual común en sus regiones críticas del mar Mediterráneo occidental, como son el estrecho de Gibraltar y el mar de Alborán. Este trabajo demuestra que el estrecho de Gibraltar es el área de estudio con mayor nivel de ruido por tráfico marítimo. Puede que existan otros puntos mediterráneos con niveles elevados pero muy posiblemente el estrecho de Gibraltar sea la región de máximo nivel de ruido por tráfico marítimo de todo el Mediterráneo, dadas sus características geográficas y su nivel de tráfico marítimo. La presencia continuada de rorcuales comunes de origen atlántico en el mar de Alborán para los meses de invierno y la ausencia de estos durante el verano queda demostrada confirmando que esta región puede considerarse parte del área de invernada de la población atlántica noreste. Estos resultados implican que el estrecho de Gibraltar es utilizado estacionalmente por los rorcuales comunes para acceder al mar de Alborán en otoño y volver al océano Atlántico en primavera. Además, la presencia de rorcuales comunes durante el invierno en el Estrecho de Gibraltar y el área del cabo de Espartel indican que el área de invernada no sólo se concentra en el mar de Alborán sino que también incluye el área de conexión con el océano Atlántico. Estos resultados confieren especial importancia al estrecho de Gibraltar durante la primavera, el otoño y el invierno. Siendo este un cetáceo especializado en la comunicación acústica de bajas frecuencias, las únicas medidas de mitigación del ruido potencialmente útiles son las restricciones temporales y espaciales de las actividades que lo producen. Puesto que la reducción espacial del ruido del tráfico marítimo en el estrecho de Gibraltar es inviable, la reducción estacional cobra elevada importancia para la gestión de conservación de esta especie. Por tanto, la reducción del ruido en el estrecho de Gibraltar es especialmente necesaria en primavera y otoño, pero también en invierno aunque en menor medida. Siendo estos los periodos en los que los rorcuales comunes son más abundantes en el estrecho de Gibraltar, la regulación del ruido del tráfico marítimo por medio de la limitación de la velocidad de navegación contribuiría doblemente a la conservación del rorcual común. Se ha demostrado que la principal causa de mortandad de esta especie es la colisión con buques (Laist *et al.*, 2001; Panigada *et al.*, 2006) y que las colisiones ocurren a velocidades superiores a los 14 nudos, por tanto, la reducción de la velocidad de navegación en el estrecho de Gibraltar durante los periodos de mayor abundancia no sólo reduciría el impacto del ruido sino también el riesgo de colisión. Obviamente, esta reducción de la velocidad debería convertirse en una limitación de la actividad para el caso de la exploración geofísica marina. A diferencia del tráfico marítimo comercial, el nivel de necesidad social de la exploración geofísica marina permite una limitación estacional. Por tanto, los periodos de importante presencia de rorcuales comunes en el estrecho de Gibraltar deberían protegerse de esta actividad.

En el caso del mar de Alborán, los resultados de este trabajo demuestran que si la campaña geofísica se hubiera realizado fuera del periodo invernal, el impacto en los rorcuales comunes hubiera sido mínimo puesto que la presencia de rorcuales en esta región del mar Mediterráneo es estacional. Por lo tanto, la exploración geofísica marina debería limitarse en esta cuenca exclusivamente a los meses de verano. Además de esta regulación, la reincidencia de campañas tanto comerciales como científicas observadas en esta cuenca marina y el enorme solapamiento de las líneas sísmicas reclama la urgente necesidad de un esfuerzo de coordinación entre ambos sectores. El objetivo de

este esfuerzo debe reflejarse en la minimización de la exploración de áreas ya prospectadas. La regulación y control de la exploración geofísica marina debería exigir esta coordinación con el fin de alcanzar una reducción de la persistencia de disparos de cañones de aire y consecuente sensibilización a este contaminante en una región crítica para la conservación del rorcual común en el mar Mediterráneo.

De todos los cetáceos que forman parte del ecosistema de la cuenca mediterránea, los rorcuales comunes son con seguridad los más sensibles al ruido generado por el tráfico marítimo y la exploración geofísica marina. No hay que olvidar que estas poblaciones se encuentran en desventaja frente a la mayoría de su especie ya que una presenta un grado de aislamiento genético muy elevado y un tamaño de población muy reducido y otra ha sufrido la explotación ballenera más fructífera de la historia. Sus cargas alostáticas se desconocen pero es de esperar que reflejen la fuerte presión antrópica a la que están sometidas, en un ecosistema parcialmente aislado y eutrofizado cuyos recursos cada día son más limitados. De lo que no hay duda es de que el resultado del actual reto para regular, controlar y reducir el impacto del ruido en el rorcual común del mar Mediterráneo servirá en el futuro de ejemplo a seguir, o bien a evitar, en las regiones oceánicas, donde la presión antrópica es menos concentrada y las consecuencias ecológicas de este contaminante tardarán más en aparecer.

6. Conclusiones

La descripción del efecto del ruido de origen antropogénico en los organismos marinos es un nuevo campo de estudio. Lo que empezó como una preocupación por el efecto del tráfico marítimo en la comunicación a larga distancia de los misticetos (Payne y Webb, 1971) se ha convertido hoy en un complejo campo de fuentes muy diversas de ruido con un riesgo potencial de estar provocando daños de consecuencias biológicas importantes (Clark *et al.*, en prensa). La preocupación por el posible efecto negativo en los organismos marinos compromete el uso del sonido en aplicaciones científicas, comerciales y militares en un contexto en el que los conocimientos científicos son escasos y en muchas ocasiones ambiguos. El balance entre el impacto medioambiental producido por la introducción de ruido al medio marino y los beneficios del comercio marítimo e investigación y explotación de recursos naturales depende de cómo regulemos y controlemos estas actividades. Sin los conocimientos que permitan justificar y definir cómo estas actividades pueden estar generando un impacto significativamente negativo en la biodiversidad marina es difícil poder regularlas o controlarlas. Sin duda es necesario obtener más conocimientos científicos acerca del efecto del ruido en los organismos marinos para poder abordar el problema correctamente, pero esto no impide que se inicien medidas como principio de precaución si existen motivos suficientes para ello.

¿Cuál es el coste en las poblaciones de misticetos ante un mayor esfuerzo por comunicarse, una reducción de la eficacia de la misma de manera continua y crónica, recurrentes desplazamientos de sus hábitats por efecto de perturbaciones perjudiciales, o cambios del comportamiento acústico como mecanismo de compensación del nivel de ruido? Por ahora sólo es posible especular acerca de la importancia biológica de este coste y no hay conocimientos científicos suficientes para poder cuantificar y definir el significado biológico de sus consecuencias. Pero a partir de los conocimientos actuales acerca de las funciones de la comunicación a larga distancia de los misticetos, se puede

indicar que el ruido sin duda está limitando las posibilidades de atraer a congéneres y agruparse para socializar, reproducirse, orientarse y mantener una cohesión durante las migraciones y localizar áreas de concentración de alimento. Estos efectos han de ser urgentemente reducidos o evitados en áreas críticas para la supervivencia de las especies afectadas como principio de precaución. Mientras tanto se debe continuar estudiando su potencial impacto para obtener una base científica suficiente que permita tomar medidas voluntarias o legales para reducir los factores acústicos que contribuyan a la pérdida de biodiversidad marina global.

En el mar Mediterráneo el único mysticeto comúnmente encontrado es el rorcual común y no se dispone de suficiente información para evaluar correctamente su estatus de conservación. Sin embargo el contexto en el que se encuentran no las favorece, su historial de caza, su aislamiento genético, su tamaño poblacional reducido, las limitaciones físicas y tróficas de su ecosistema, la presión antrópica sobre su hábitat y las colisiones con el tráfico marítimo componen un escenario poco optimista para la supervivencia de esta especie.

El rorcual común es el cetáceo mediterráneo más sensible a la contaminación acústica producida por el tráfico marítimo y la exploración geofísica marina, por lo que el esfuerzo de reducción del potencial impacto del ruido en los organismos marinos del mar Mediterráneo debería considerarse prioritario.

Los resultados de este trabajo han puesto de relieve que el nivel de ruido ambiente en el mar Mediterráneo es superior al descrito en las demás regiones marinas y oceánicas, situando a los rorcuales comunes de esta región marina en desventaja ecológica. Los análisis de los parámetros acústicos de los pulsos de 20 Hz utilizados en su comunicación demuestran que el ruido generado por el tráfico marítimo y las campañas de exploración geofísica alteran sus características. Los rorcuales comunes tienden a reducir el intervalo entre señales, su duración y sus frecuencias en presencia de mayores niveles de ruido. Estos cambios son consecuencia de un mecanismo de compensación para reducir el efecto de enmascaramiento de su comunicación por el ruido. Además, la presencia de disparos de cañones de aire de campañas geofísicas provoca desplazamientos de al menos todos los rorcuales acústicamente activos durante periodos superiores a los de la perturbación. Aunque no puede ser demostrado por la falta de datos acerca de las funciones del canto y la estrategia sexual de esta especie, las alteraciones del comportamiento acústico por el aumento de los niveles de ruido tienen el potencial de provocar consecuencias biológicas negativas en las poblaciones de rorcual común del mar Mediterráneo, al menos mediante cuatro mecanismos:

- 1- Un aumento del coste energético de la comunicación por la modificación de sus características.
- 2- Una posible reducción de los caracteres de significado reproductivo del canto.
- 3- Una reducción del alcance espacial y reconocimiento de las señales por sus congéneres.
- 4- Una reducción de la eficacia de aprovechamiento del hábitat por enmascaramiento de señales acústicas.

Actualmente se definen dos efectos particularmente preocupantes acerca de las consecuencias biológicas del impacto del ruido. Uno es el efecto crónico que puede producirse por la permanente exposición al tráfico marítimo (NRC, 2005; Southall, 2007). El otro es el efecto recurrente que puede producirse por las características de reincidencia y fidelidad geográfica de las campañas de exploración geofísica (Gordon *et al.*, 2004). Desafortunadamente, ambos efectos quedan demostrados en los resultados de este trabajo. La presencia estacional de rorcuales comunes en el estrecho de Gibraltar implica que estos toleran la exposición de niveles permanentemente elevados de ruido producido por el tráfico marítimo. Este nivel de tolerancia sólo puede estar mediado por la habituación de estos animales a este tipo de estímulo acústico. Por otro lado, la drástica reacción de desplazamiento documentada en el mar de Alborán durante el inicio de la campaña geofísica MARSIBAL 1-06 implica que estos animales presentan una sensibilización a este tipo de perturbación acústica. El proceso de sensibilización se desarrolla por exposiciones repetidas a un estímulo nocivo, lo que sugiere que estos rorcuales comunes han sido expuestos a disparos de cañones de aire de manera recurrente. La observada reincidencia de campañas geofísicas en el mar de Alborán durante la consulta de las bases de datos existentes para esta actividad confirma esta hipótesis. A este efecto hay que sumar el gasto energético derivado de los posibles desplazamientos como consecuencia de la sensibilización y el coste de la interrupción de los comportamientos que se realicen en el área expuesta a los disparos de los cañones.

Los resultados de este trabajo también han podido abordar la problemática actual sobre el control, la regulación y la mitigación de los efectos del ruido producido por la exploración geofísica. Para poder regular de manera efectiva el posible impacto causado por esta actividad es necesario poder conocer cómo y cuándo se ha desarrollado en áreas que solapan con la distribución del rorcual común. Los contactos realizados con las instituciones responsables de esta actividad y las consultas de sus bases de datos demuestran que 1º) no todas las campañas geofísicas comerciales quedan incluidas en los archivos ya que el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio únicamente controla (sin ser un control estricto ya que la jurisprudencia no está definida) la exploración y explotación en la mitad norte de la cuenca de Alborán. 2º) Los permisos con antigüedad inferior a 5 años o los permisos que hayan derivado en la explotación de hidrocarburos y permanezcan activos son por ley de carácter confidencial vedando el acceso a la información referente a las líneas sísmicas y periodos y áreas de exploración. 3º) No todas las campañas científicas se reflejan en la única base de datos española y 4º) las campañas científicas desarrolladas por centros de investigación extranjeros no son controladas por ninguna institución española ni quedan incluidas en ninguna base de datos española. Los resultados de la búsqueda de información referente a esta actividad han demostrado importantes lagunas de regulación y control de la misma tanto en aguas de jurisprudencia española como fuera de ellas. Además, la delimitación de la jurisprudencia española en el mar de Alborán no está definida ni acordada con los demás países ribereños por lo que el control no puede hacerse de manera estricta. Actualmente, el mar de Alborán está siendo explorado y explotado por otros países como Marruecos y Francia, especialmente la región al sur del paralelo 36º, los cuales no tienen un sistema de centralización de las campañas y líneas sísmicas desarrolladas ni comparten esta información con instituciones españolas (*com. pers.* Marcelli Farra, Dpto. Geología marina, Instituto de Ciencias del Mar – CSIC, 1 de septiembre de 2009).

Respecto a la mitigación, la distancia a la que se provocó la reacción de desplazamiento por la campaña geofísica demuestra que las únicas técnicas efectivas por el momento son la restricción temporal y espacial. Con el fin de poder reducir el potencial impacto que pueda generar el ruido en el medio marino, es necesario que se aplique el principio de precaución y se limiten espacial y temporalmente las actividades que generan este contaminante en áreas críticas para la supervivencia del rorcual común. Este trabajo ha identificado dos áreas de alta prioridad: el estrecho de Gibraltar donde sería adecuado limitar la velocidad del tráfico marítimo en primavera y otoño y evitar la exploración geofísica aquí y en el mar de Alborán fuera del periodo estival. En el mar de Alborán en particular, la reincidencia de campañas geofísicas debería reducirse mediante la coordinación de los sectores comercial y científico y la potenciación de la misma mediante la regulación adecuada para evitar la exploración en áreas ya prospectadas.

Por último, los resultados del efecto del ruido del tráfico marítimo y de una campaña geofísica en el comportamiento acústico y desplazamiento del rorcual común en el mar Mediterráneo reiteran la necesidad del principio de precaución y el realismo en el análisis de este problema medioambiental, puesto que no es viable identificar efectos negativos a nivel ecológico y asociarlos al impacto del ruido a tiempo como para poder regular y remediar su efecto antes de que sea demasiado tarde. Las decisiones que tomemos ahora tendrán profundas implicaciones para la futura supervivencia de los mamíferos marinos.

CAPITULO V:
Discusión y Conclusiones Generales



1. Discusión general

Esta sección sintetiza la interpretación de los resultados de todos los capítulos anteriores, en los que se ha analizado la presencia estacional, el patrón migratorio y la identidad poblacional del rorcual común en el mar Mediterráneo occidental, así como la influencia del ruido por tráfico marítimo y por la exploración geofísica en la comunicación de esta especie.

1.1 Sobre la presencia estacional y movimiento migratorio del rorcual común en el mar Mediterráneo occidental

Estudios que hayan aplicado técnicas acústicas para la detección de cetáceos son prácticamente inexistentes en mar Mediterráneo, a pesar de haber sido demostrada su utilidad en muchas otras regiones oceánicas y haber sido propuestas como herramienta clave para mejorar los conocimientos de la ecología de los cetáceos en el mar Mediterráneo y mejorar su estatus de conservación (Notarbartolo di Sciara y Gordon, 1997). Esta circunstancia hace que los resultados obtenidos en los trabajos incluidos en esta tesis doctoral sean novedosos e incluso cuestionen algunas concepciones clásicas sobre la ecología del rorcual común en el mar Mediterráneo.

La síntesis de los resultados de estos trabajos permite demostrar que al menos una parte importante de la población de rorcuales comunes mediterráneos presenta un patrón migratorio bien definido. El volumen de detecciones obtenidos a lo largo de la cuenca Balear, mar de Alborán y Estrecho de Gibraltar durante el otoño y el invierno confirman que la presencia del rorcual común es más habitual de lo anteriormente descrito en estas áreas (ej. Clapham *et al.*, 2008), especialmente para la región de las islas Columbretes. El valor medio de pulsos detectados por día obtenido en esta zona en otoño fue de 1.473 pulsos/día (stdv. = 1023). Las cifras obtenidas por Clark *et al.* (2002) en la misma época del año, pero en el mar de Liguria, oscilan entre 60 y 677 pulsos por día. Teniendo en cuenta que el mar de Liguria ha sido descrito como la zona de mayor concentración de rorcuales comunes del mar Mediterráneo (Forcada, 1996), la comparación de estas cifras pone de relieve la importante presencia de rorcuales en la zona de las islas Columbretes, que supera el doble del máximo obtenido en Liguria.

Los resultados sobre la presencia y dirección de movimiento de los rorcuales comunes detectados en el área de las islas Columbretes apoyan y amplían la hipótesis planteada por Raga y Pantoja (2002), quienes sugieren que todo el margen este del talud continental de la península Ibérica (desde el norte de Cataluña hasta Andalucía) actúa como corredor migratorio durante la primavera, permitiendo a los rorcuales desplazarse hacia su principal área de alimentación estival desde áreas de invernada del sur del mar Mediterráneo. Nuestros resultados demuestran que los rorcuales también utilizan este corredor durante su migración hacia el sur al final de su periodo de alimentación estival.

Asimismo, las detecciones obtenidas en el área de estudio de la isla de Alborán demuestran la presencia continua de rorcuales a lo largo del invierno y la ausencia de estos a finales de verano y principios del otoño. Estos resultados confirman que el mar

de Alborán es un área de invernada para el rorcual común y refuerzan, junto con la descripción de la presencia de rorcuales en las inmediaciones de la isla de Lampedusa durante el invierno (Canese *et al.*, 2006), la hipótesis de un patrón migratorio norte-sur, donde los rorcuales permanecerían en la época invernal en regiones del sur del mar Mediterráneo.

Los resultados del estudio del ángulo de recepción de los pulsos de rorcual común en la zona de la isla de Alborán sugieren que los rorcuales en esta área durante el invierno tienden a permanecer en grupo y a realizar desplazamientos dentro de un área limitada. Siendo un ambiente de características físicas y biológicas marcadamente heterogéneas, parece lógico pensar que los rorcuales exploten los recursos alimentarios concentrados en zonas concretas del mar de Alborán. Este comportamiento podría explicar la permanencia durante días en un mismo ángulo respecto a la posición de los grabadores y la preferencia por permanecer en grupo. No obstante, dado que estas detecciones fueron realizadas en pleno invierno y en latitudes bajas del mar Mediterráneo, el comportamiento que correspondería, según las concepciones convencionales sobre la ecología de los balaenopteridos, sería el de la reproducción. Nuestras observaciones refuerzan, por tanto, la hipótesis planteada tanto para el rorcual común como para la ballena azul (Ljungblad *et al.*, 1998; McCauley *et al.*, 2001; Moore *et al.*, 2002) sobre la asociación funcional entre los recursos alimentarios y el display reproductivo de los machos. Los rorcuales comunes en el mar de Alborán durante el invierno podrían desarrollar conjuntamente actividades de alimentación y de reproducción.

Los patrones de presencia estacional en el estrecho de Gibraltar y en el cabo Espartel y su correlación en número de detecciones por día indican una presencia continua a lo largo del invierno en esta región. La ausencia de una dirección de desplazamiento predominante en este periodo del invierno sugiere que el área del estrecho de Gibraltar y sus alrededores actúan como zona de invernada. El hecho de encontrar abundantes detecciones de rorcual común, de manera continuada a lo largo de todo el periodo de muestreo, es sorprendente ya que muchos autores han coincidido en que la presencia de esta especie en el estrecho de Gibraltar es actualmente anecdótica. Estos autores sugieren que la intensa actividad ballenera ocurrida entre 1921 y 1955 extirpó la población de esta zona (Bayed y Beaubrun, 1987; Hashmi y Adloff, 1991; Walmsley, 1996; Cañadas *et al.*, 1999; Sanpera y Aguilar, 1992, Palsbøll *et al.*, 2004) y proponen que la desaparición de rorcuales en esta zona pudo haberse producido por la pérdida de la existencia de este hábitat en la memoria cultural de la población de rorcuales (Clapham y Hatch 2000; Clapham *et al.*, 2008). Los resultados de este trabajo demuestran que la población explotada en el pasado continúa estando presente en esta área durante el invierno y la presunta ausencia postulada por algunos autores se debe a la falta de observaciones durante este periodo.

1.2 Sobre la identidad poblacional y movimiento migratorio del rorcual común en el mar Mediterráneo occidental

Los resultados del estudio de identidad poblacional del rorcual común han demostrado que el mar Mediterráneo alberga dos poblaciones bien diferenciadas de rorcuales comunes. Una, aparentemente residente, que ocupa la región central de la cuenca occidental, y otra, de presencia estacional, que utiliza el estrecho de Gibraltar y el mar de Alborán durante el invierno, y que pertenece a la población del Atlántico noreste. Se

confirma la hipótesis planteada en 1976 por Duguy y Vallon acerca de la entrada de rorcuales Atlánticos, y parte de la hipótesis propuesta por Viale (1977, 1985) sobre el uso del mar Mediterráneo por dos poblaciones diferentes procedentes del océano Atlántico.

Estos resultados son acordes con los conocimientos de las características genéticas de las poblaciones de rorcuales comunes del mar Mediterráneo y de la región norte del océano Atlántico. La relación genética entre ellas se basa en un flujo genético periódico aunque reducido (Palsbøll *et al.*, 2004).

Los únicos datos existentes acerca de la presencia del rorcual común en el mar de Alborán y estrecho de Gibraltar también apoyan los resultados sobre la presencia de rorcuales atlánticos en el mar de Alborán en invierno. Observaciones realizadas en la vertiente norte del mar de Alborán y del estrecho de Gibraltar durante el periodo estival indican la existencia de un patrón opuesto al del resto de los rorcuales del mar Mediterráneo (Raga y Pantoja, 2002). La tendencia de desplazamiento en primavera-verano es en dirección oeste y en otoño-invierno en dirección este (Salazar-Sierra *et al.*, 2004).

Los resultados acústicos demuestran que la población atlántica noreste es la que utiliza el estrecho de Gibraltar estacionalmente. La ausencia de rorcuales de origen mediterráneo, tanto en el estrecho de Gibraltar, como en el área de la isla de Alborán, sugiere que estos se mantienen fuera del área de influencia atlántica. El mar de Alborán en el periodo de invierno podría ser un buen escenario para que las concentraciones de zooplancton descritas en este área sean explotadas por rorcuales comunes, ampliando así su periodo de alimentación. Al mismo tiempo, esta área podría ser utilizada para reproducirse, puesto que la asociación entre la presencia de alimento, la producción de secuencias largas y estereotípicas de pulsos de 20 Hz y el comportamiento sexual ya ha sido sugerida en otras regiones oceánicas y es actualmente la hipótesis que mejor explica la función del comportamiento acústico del rorcual común. Los resultados de presencia y de desplazamientos en el área de la isla de Alborán apoyan esta hipótesis. En este caso, y habiéndose demostrado que existe un flujo genético recurrente entre la población mediterránea y la atlántica noreste, el área de intercambio genético entre ambas poblaciones debe ocurrir dentro del mar Mediterráneo. Conociéndose que los rorcuales comunes macho se dispersan mucho más que las hembras (Hatch y Clark, 2004), es menos probable que sean las hembras mediterráneas las que accedan al mar de Alborán durante el invierno para favorecer el flujo entre poblaciones. Sin embargo, la dispersión de machos atlánticos desde el mar de Alborán en invierno hacia áreas más internas de la cuenca mediterránea podría ocurrir con mayor probabilidad. De hecho, las detecciones de un rorcual macho atlántico en el área del canal de Ibiza demuestran que estos no limitan su acceso al mar de Alborán, apoyando la hipótesis del flujo genético entre poblaciones en regiones más allá del mar de Alborán dentro de la cuenca mediterránea.

Sin embargo, todos estos resultados acordes con la entrada de rorcuales de origen atlántico al mar Mediterráneo, donde se produciría el intercambio genético entre poblaciones, se contradicen con los obtenidos por los únicos estudios de telemetría satélite e isótopos estables realizados en rorcuales comunes del mar Mediterráneo (Guinet *et al.*, 2005), que, además, han servido de base para interpretaciones similares en estudios posteriores (ej. Cotté *et al.*, 2009; Gauffier *et al.*, 2009). Los autores

plantean la hipótesis de que una parte reducida de la población de rorcuales mediterráneos migra estacionalmente a un área de invernada en el océano Atlántico, donde se alimentan. Los resultados de estos estudios apoyan la hipótesis de un intercambio genético entre la población mediterránea y atlántica fuera del mar Mediterráneo y no implican la entrada de rorcuales de origen atlántico en el mar Mediterráneo. Los resultados del seguimiento acústico realizado en este trabajo contradicen este planteamiento y permiten proponer una interpretación diferente: es muy probable que el único rorcual común que se desplazó hasta el océano Atlántico de los ocho marcados con un transmisor satélite en la cuenca Provenzal y los tres ejemplares varados de las once muestras de tejido recolectadas en las costas francesas y españolas pertenecieran a la población del Atlántico noreste. Los animales observados migrando regularmente por el estrecho de Gibraltar, tanto adultos como inmaduros, son muy posiblemente rorcuales de esta misma población. Como ha quedado demostrado, la presencia de rorcuales comunes de la población atlántica noreste es común en el mar Mediterráneo, al menos durante los meses de invierno en el estrecho de Gibraltar y mar de Alborán.

La información disponible acerca de la presencia de rorcuales comunes en el estrecho de Gibraltar y áreas circundantes es acorde con entrada de rorcuales comunes de origen atlántico. Independientemente de si los autores la atribuyen a la población mediterránea o no, la tendencia de desplazamiento descrita en primavera-verano es en dirección oeste y en otoño-invierno en dirección este (Raga y Pantoja, 2004; Salazar-Sierra *et al.*, 2004; Gauffier *et al.*, 2009). Esta información coincide con los resultados acústicos obtenidos, puesto que la presencia de sonidos emitidos por rorcuales comunes de la población noreste durante el invierno en el mar de Alborán implica que estos se desplazan hacia el este en otoño, cruzando el estrecho de Gibraltar para alcanzar el mar de Alborán. La ausencia de sonidos emitidos por rorcuales comunes en el mar de Alborán durante el verano implica que estos hayan desalojado esta cuenca desplazándose hacia el oeste en primavera cruzando el Estrecho de Gibraltar para volver al océano Atlántico.

Es obvio que la función o funciones del canto del rorcual común macho no están bien definidas y aún queda mucho por explorar sobre este tema, pero la información actualmente disponible y los resultados de este trabajo apuntan a que el seguimiento acústico de las poblaciones permite establecer su identidad e identificar relaciones entre poblaciones. Dada la reducida extensión de la cuenca mediterránea comparada con las cuencas oceánicas donde habitan otras poblaciones de rorcuales comunes, es muy probable que la población mediterránea y la atlántica noreste presenten un solapamiento acústico a lo largo del año y, por tanto, facilidad para identificarse y localizarse. El hecho de que exista un marcado aislamiento genético entre poblaciones simpátricas sólo puede explicarse si existe una barrera reproductiva que impida el flujo genético (Bradbury y Vehrencamp, 1998), que en este caso sólo puede estar mediado por la señalización honesta de los machos. Por tanto, el seguimiento acústico, especialmente en la época de alimentación y reproducción, puede facilitar la identificación de los límites de distribución y posibles áreas de solapamiento para definir el grado de contacto entre ambas poblaciones.

La actual descripción de los diferentes stocks que constituyen la población global de rorcuales comunes delinea el mar Mediterráneo como hábitat de una sola subpoblación. La falta de datos sobre la estructura poblacional de esta especie a lo largo de la cuenca mediterránea confiere alta prioridad a estudios que puedan facilitar

información de este tipo (IWC, 1992; 2007 y 2009; Cañadas *et al.*, 2005; Reeves y Notarbartolo di Sciara, 2006). Este trabajo demuestra que la identidad de los rorcuales comunes detectados acústicamente en el mar Mediterráneo corresponde a la de dos poblaciones diferentes, una mediterránea y otra del Atlántico noreste. Este hallazgo tiene dos importantes implicaciones para la conservación del rorcual común en el mar Mediterráneo. Primero, la subpoblación mediterránea presenta un área de distribución más limitada de la actualmente establecida, centrándose en la cuenca noroccidental por encima de la cuenca Balear durante el periodo estival y posiblemente dispersándose hacia regiones más al sur sin incluir la región más occidental de la cuenca durante el invierno. Segundo, dado el grado de aislamiento genético de esta subpoblación, el acceso de rorcuales de origen Atlántico al mar Mediterráneo implica que ambas poblaciones compiten por los recursos del nicho ecológico que ocupan en la cuenca mediterránea. En este caso, el balance entre ambas poblaciones puede fácilmente verse alterado por diferencias de presión antrópica. Siendo el mar Mediterráneo uno de los ecosistemas marinos que sufre una pérdida de la biodiversidad más extrema (Adula y Linden, 2008), cabe esperar que la subpoblación de rorcuales comunes mediterráneos esté sometida a una presión antrópica mucho mayor que la población del Atlántico noreste. Este desequilibrio ya ha sido alertado mediante el análisis de contaminantes bioacumulados en sus tejidos (Fossi *et al.*, 2006; Aguilar *et al.*, 2002).

Es importante que los conocimientos aportados por este trabajo acerca de la estructura poblacional del rorcual común en el mar Mediterráneo y el uso del estrecho de Gibraltar se incorporen en la gestión de conservación de las poblaciones mediterráneas con el fin de optimizar los esfuerzos dedicados a mantener la supervivencia de esta especie.

1.3 Sobre el efecto del ruido en el comportamiento del rorcual común

Las diferencias del nivel medio de ruido ambiente entre áreas de estudio han permitido evaluar el efecto del ruido del tráfico marítimo y de la exploración geofísica en el comportamiento acústico del rorcual común. Tanto los parámetros acústicos del dominio espectral (ancho de banda, frecuencia central y frecuencia de máxima energía) como los del dominio temporal (duración del pulso e intervalo entre pulsos) presentaron una correlación altamente significativa con el nivel de ruido ambiente: a mayor nivel de ruido, menores son las frecuencias y las duraciones. Los resultados de este trabajo indican que, como en el caso de la ballena franca (Parks *et al.*, 2007 y 2009), el rorcual común expuesto al ruido del tráfico marítimo también presenta un mecanismo de compensación para aumentar la detectabilidad de sus vocalizaciones en regiones o en horas de elevados niveles de ruido ambiente.

Este mecanismo implica un aumento del esfuerzo en el comportamiento acústico del canto y un considerable aumento del coste energético de la señalización, pudiendo generar efectos crónicos negativos puesto que especies de ciclos de vida largo, como los misticetos, muy probablemente no dispongan de la capacidad de adaptarse genéticamente a cambios rápidos de su hábitat (Rabin y Greene, 2002). Mayores niveles de ruido disminuyen el efecto atractor de las señales puesto que estas alcanzan a un menor número de individuos, se reduce el reconocimiento de las señales por sus congéneres y el número de animales en contacto acústico disminuye. Además, queda demostrado que los parámetros acústicos de significado reproductivo son sensibles a

incrementos de ruido ambiente pudiendo reducir o perder su función. Considerando la función propuesta para el canto del rorcual común y la posible incapacidad de adaptación al incremento del ruido, la consecuencia de este efecto podría ser una reducción de la tasa reproductiva (Payne y Webb, 1971; Croll et al., 2002) que sumándose a un efecto crónico por la constante presencia de ruido en su hábitat (NRC, 2005; Southall, 2007), podría tener fatales consecuencias para la supervivencia de las poblaciones afectadas.

El impacto agudo provocado por la campaña de exploración geofísica demuestra que esta población de rorcuales comunes probablemente ha sufrido un proceso de sensibilización a este tipo de perturbación en el mar de Alborán. El significado biológico de este efecto en parte depende de la importancia del comportamiento interrumpido que, en este caso, al tratarse de un área de invernada, muy probablemente fue el de la actividad de reproducción, siendo esta una actividad crítica para su supervivencia. Si este tipo de interrupciones es ocasionado recurrentemente, como parece ser el caso por el número de campañas geofísicas comerciales y científicas realizadas en esta cuenca, su efecto crónico muy probablemente genere un impacto de significado biológico en esta población.

Las diferencias observadas entre el impacto del ruido del tráfico marítimo y el de la campaña de exploración geofísica en el comportamiento del rorcual común podrían estar relacionadas con el efecto de habituación de un tipo de ruido y el de sensibilización de otro. La presencia de ruido generado por el tráfico marítimo es permanente en todo el mar Mediterráneo y gran parte del océano Atlántico norte, por lo que el hábitat de las dos poblaciones estudiadas está sometido a una perturbación continua y global. El nivel de tolerancia a esta perturbación ha de ser forzosamente elevado ya que, de lo contrario, no podrían mantener la ocupación del nicho disponible en estos ecosistemas. Siempre que este contaminante no genere consecuencias significativas para la supervivencia de las poblaciones, como un efecto crónico, estas podrían mantener un equilibrio entre el nivel de tolerancia y la permanencia en estos ecosistemas. Este razonamiento podría explicar por qué las áreas estudiadas en este trabajo con elevados niveles de ruido generado por el tráfico marítimo son utilizadas por el rorcual común.

1.4 Sobre la gestión y regulación del ruido como contaminante

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten definir áreas prioritarias y consideraciones acerca de la protección del rorcual común ante el ruido generado por el tráfico marítimo y la exploración geofísica marina en el mar Mediterráneo occidental.

Aunque es importante que se continúe estudiando el impacto de este contaminante en las poblaciones de mamíferos marinos aún es más importante que el problema se aborde de manera realista, puesto que no es viable identificar efectos negativos a nivel ecológico y asociarlos al impacto del ruido por el tráfico marítimo y/o la exploración geofísica marina a tiempo como para poder regular y remediar su efecto antes de que sea demasiado tarde. Siendo conscientes de las limitaciones actuales para poder abordar el problema de esta manera, es esencial aplicar el principio de precaución a la gestión medioambiental de este contaminante.

Con el fin de aplicar una gestión de conservación integral para el rorcual común en el mar Mediterráneo, el tráfico marítimo comercial ha de considerarse como una de las principales fuentes de ruido y la principal causa de mortandad por colisión. Por tanto, incluir esa actividad dentro de la regulación y control de la contaminación acústica contribuiría doblemente a los objetivos de conservación de esta especie. Los resultados de este trabajo demuestran que hay dos zonas críticas en este respecto, el estrecho de Gibraltar, como zona de migración e invernada de la población atlántica noreste, y la región occidental de la cuenca Catalano-Balear, como zona de migración de la población mediterránea. En la primera el nivel de tráfico marítimo es de los más elevados del planeta, implicando tanto un impacto acústico como un alto riesgo de colisión. En la segunda, el análisis de los desplazamientos de los rorcuales comunes en el área de las islas Columbretes demuestra que el movimiento de estos animales es perpendicular al del tráfico de los ferries que comunican las islas Baleares con la península, maximizando el riesgo de colisión.

Siendo el rorcual común un cetáceo especializado en la comunicación acústica de bajas frecuencias, las únicas medidas de mitigación del ruido potencialmente útiles son las restricciones temporales y espaciales de las actividades que lo producen. Para el caso del tráfico marítimo comercial, la mitigación de su impacto acústico debería implementarse por medio de la reducción de la velocidad por debajo de 14 nudos y vigilancia extrema en las épocas del año y en las áreas descritas. De esta manera no sólo se reduciría el nivel de ruido generado por los buques, sino también el riesgo de colisión. Además, en el caso de los ferries que transitan por ambas áreas, debería incorporarse la vigilancia por personal cualificado ya que estos buques cruzan las áreas críticas de colisión múltiples veces al día.

La regulación de la velocidad del tráfico marítimo comercial ya ha sido establecida para reducir el riesgo de colisión con cachalotes en el estrecho de Gibraltar (IHM, 2007; Tejedor, 2008), sin embargo, esta medida sólo tiene carácter de recomendación, dejando libre decisión a los navegantes sobre su velocidad de crucero. Teniendo en cuenta que, de todos los cetáceos que forman parte del ecosistema de la cuenca mediterránea, los rorcuales comunes son los que sufren mayor número de colisiones y son los más sensibles al ruido generado por el tráfico marítimo, y que estas poblaciones se encuentran en desventaja frente a la mayoría de las otras poblaciones de su especie, ya que una presenta un grado de aislamiento genético muy elevado y un tamaño de población muy reducido, y la otra ha sufrido la explotación ballenera más fructífera de la historia, se espera que sus cargas alostáticas reflejen la fuerte presión antrópica a la que están sometidas. Además, esta presión ocurre en un ecosistema parcialmente aislado y eutrofizado, cuyos recursos cada día son más limitados. A partir de estos resultados y teniendo en cuenta las medidas existentes sobre la protección de esta especie (UICN, convenio de Bonn, convenio de Barcelona, convenio de Berna, ACCOBAMS, CITES, etc.), parece lógico que la regulación y control del ruido, como uno de los principales impactos acústicos, y del riesgo de colisión, como principal causa de mortandad, se implemente de manera obligatoria para el sector de tráfico marítimo comercial.

El concepto de habituación al ruido del tráfico marítimo ha de valorarse para definir una estrategia de conservación efectiva, ya que uno de los principales problemas que derivan de esta perturbación es su posible efecto crónico que podría estar fácilmente ocurriendo en áreas donde se han identificado niveles de ruido especialmente elevados,

como en el estrecho de Gibraltar o en la cuenca provenzal. En estas regiones, la presencia de rorcuales comunes indica que se trata de áreas de importancia biológica para la especie, puesto que el nivel de tolerancia al ruido parece ser muy elevada. Habiéndose demostrado que la abundancia de animales en estas áreas es considerable, el posible efecto negativo puede estar afectando a una porción importante de la población. El carácter crónico y el considerable tamaño de población afectada son dos de las principales fuentes de preocupación de la comunidad científica sobre las consecuencias biológicas de este tipo de contaminante (ej. NRC 2005; Panigada *et al.*, 2005; MMC, 2007; Southall *et al.*, 2009).

Respecto a la exploración geofísica, un problema añadido es que no existen instrumentos legales que permitan, ya no regular, sino al menos conocer la situación de este contaminante en las regiones marinas de principal interés para su protección. Un ejemplo descrito en este trabajo es el caso del mar de Alborán, en el que de manera recurrente se realizan exploraciones geofísicas tanto comerciales como científicas, al menos por España, Francia y Marruecos solapando múltiples líneas sísmicas sobre un área crítica para la supervivencia del rorcual común. No existe un control coordinado, ni nacional, ni internacional, de las campañas realizadas en esta cuenca. En España, los archivos existentes acerca de esta materia son incompletos, tanto para las campañas españolas como para las extranjeras. La definición de una correcta regulación y el control de este tipo de contaminante es inviable sin contar con un conocimiento inicial general y completo de distribución temporal y espacial de las fuentes que lo generan.

La reacción a los disparos de cañones de aire comprimido documentada a 285 km de distancia de la fuente hace cuestionable la viabilidad de muchas de las medidas de mitigación del impacto acústico propuestas para la exploración geofísica marina, al menos para el rorcual común, puesto que el seguimiento de poblaciones de cetáceos en un radio de esta envergadura durante las campañas es actualmente inviable tanto logística como económicamente. Por otro lado, las medidas de mitigación actualmente aconsejadas por diferentes gobiernos y organizaciones contemplan campañas geofísicas comerciales, pero rara vez citan campañas científicas (ej. Weir y Dolman, 2007; Castellote, 2007). Teniendo en cuenta el grado de relación entre los objetivos de los dos tipos de campañas, el vínculo entre los dos sectores y el común impacto ecológico generado por esta actividad, parece lógico que las campañas de exploración geofísica de carácter científico se ciñan a la misma regulación que la aplicable a las campañas comerciales, al menos de cara a su carácter contaminante. Actualmente la exploración geofísica comercial y la explotación de hidrocarburos, a pesar de estar regulada por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo mediante un sistema de permisos, no requiere su evaluación ambiental. Parece sorprendente que una actividad cuya escala espacial y magnitud de impacto podría fácilmente cubrir la totalidad de la cuenca mediterránea no implique una estricta regulación de su impacto ambiental.

La exploración geofísica marina debería limitarse en la cuenca de Alborán exclusivamente a los meses de verano, fuera de la época de principal presencia del rorcual común. Además de esta regulación, la reincidencia de campañas tanto comerciales como científicas observadas en esta cuenca marina y el enorme solapamiento de las líneas sísmicas reclama la urgente necesidad de un esfuerzo de coordinación entre ambos sectores. El objetivo de este esfuerzo debe reflejarse en la minimización de la exploración de áreas ya prospectadas. La regulación y control de la exploración geofísica marina debería exigir esta coordinación con el fin de alcanzar una

reducción de la persistencia de disparos de cañones de aire y la consecuente sensibilización a este contaminante en una región crítica para la conservación del rorcual común en el mar Mediterráneo. Este problema identificado para el mar de Alborán probablemente ocurre en otras áreas importantes para el rorcual común, como puede ser la cuenca catalano-balear, por lo que sería muy conveniente realizar una revisión de las áreas de alta reincidencia de campañas de exploración y de importancia para el rorcual común. Dada la distancia a la que se ha documentado el desplazamiento de los rorcuales comunes en el mar de Alborán, así como las descripciones previas existentes en otras regiones oceánicas, la regulación de esta actividad ha de incorporar medidas de restricción temporal y espacial acordes con la escala de los efectos producidos. Esta condición implica que la evaluación del impacto de campañas que vayan a realizarse a distancias considerables del estrecho de Gibraltar tanto por la vertiente atlántica como por la mediterránea, fuera del periodo estival, ha de incorporar la importancia de esta área. El caso es el mismo para las otras dos áreas críticas descritas en este trabajo, el mar de Alborán y la región occidental de la cuenca catalano-balear durante sus respectivos periodos de presencia del rorcual común.

De las 84 especies de mamíferos marinos conocidos, sólo tenemos una estima de población de 5 o 6 de ellas sin incluir al rorcual común (Whitehead et al. 2000). Las consecuencias ecológicas de una perturbación de la magnitud descrita para las diferentes fuentes de ruido en el medio marino podría generar el declive de entre el 72 al 90 % de todas las especies de mamíferos marinos sin ser detectadas con las estimas poblacionales actuales (Taylor et al., 2007). Esperamos que el resultado del actual reto de regular, controlar y reducir el impacto del ruido en el rorcual común del mar Mediterráneo sirva en el futuro de ejemplo a seguir en las regiones oceánicas donde la presión antrópica es menos concentrada y las consecuencias ecológicas de este contaminante tardarán más en manifestarse.

2. Conclusiones generales

Las características de los parámetros acústicos estudiados en este trabajo y los resultados obtenidos a partir de su análisis sugieren que la señalización a larga distancia empleada por el rorcual común macho mantiene la identidad poblacional incluso en áreas en las que hay un solapamiento acústico y puede existir un solapamiento físico entre poblaciones. Este carácter del comportamiento acústico implica un sistema de comunicación honesta en el que los caracteres de identidad presentan alto significado reproductivo. Esta característica confiere mucha robustez al seguimiento acústico como marcador de poblaciones.

La utilización de técnicas acústicas en el mar Mediterráneo ha permitido obtener resultados novedosos e incluso contradictorios con algunos de los fundamentos clásicos sobre la ecología del rorcual común en el mar Mediterráneo, como es la presencia y permanencia de esta especie en el estrecho de Gibraltar durante el invierno. Este trabajo ha demostrado la utilidad de estas técnicas en la caracterización del patrón migratorio del rorcual común en el mar Mediterráneo y la definición de las poblaciones que ocupan de manera permanente o estacional la cuenca mediterránea.

La definición actual del stock de rorcuales comunes en el mar Mediterráneo tanto para la Comisión Ballenera Internacional (CBI), la Unión Internacional para la Conservación

de la Naturaleza (UICN), así como para el acuerdo para la Conservación de Cetáceos del Mar Negro y Mar Mediterráneo (ACCOBAMS), incluye sólo a una subpoblación demográficamente aislada del resto del Atlántico norte. Los resultados de este trabajo han demostrado que esta definición es incorrecta y sirven de base para una más precisa interpretación de la estructura poblacional de esta especie en el mar Mediterráneo: El área de distribución de la subpoblación mediterránea en la cuenca occidental es menor de lo actualmente considerado y el nicho ecológico que ocupa lo comparte con la población del Atlántico noreste. Estas son dos importantes implicaciones ecológicas para la conservación del rorcual común en el mar Mediterráneo.

La descripción del efecto del ruido de origen antropogénico sobre los organismos marinos es un nuevo campo de estudio. La preocupación por el posible efecto negativo en los organismos marinos compromete el uso del sonido en aplicaciones científicas, comerciales y militares en un contexto en el que los conocimientos científicos son escasos y en muchas ocasiones ambiguos. El balance entre el impacto medioambiental producido por la introducción de ruido al medio marino y los beneficios del comercio marítimo e investigación y explotación de recursos naturales depende de cómo regulemos y controlemos estas actividades. Sin los conocimientos que permitan justificar y definir de qué como estas actividades pueden estar generando un impacto significativamente negativo en la biodiversidad marina es difícil poder regularlas o controlarlas. Sin duda es necesario obtener más datos científicos acerca del efecto del ruido sobre los organismos marinos para poder abordar el problema correctamente, pero esto no impide que se inicien medidas como principio de precaución si existen motivos suficientes para ello. En función de los conocimientos actuales acerca de las funciones de la comunicación a larga distancia de los misticetos, está claro que el ruido sin duda está limitando las posibilidades de atraer a congéneres y agruparse para socializar, reproducirse, orientarse y mantener una cohesión durante las migraciones y localizar áreas de concentración de alimento. Los resultados de este trabajo son un ejemplo más de estos efectos, que han de ser urgentemente reducidos o evitados en áreas críticas para la supervivencia de las especies afectadas.

El contexto en el que se encuentra el único misticeto del mar Mediterráneo no lo favorece: su historial de caza, su aislamiento genético, su tamaño poblacional reducido, las limitaciones físicas y tróficas de su ecosistema, la presión antrópica sobre su hábitat y las colisiones con el tráfico marítimo componen un escenario poco optimista para la supervivencia de esta especie. El rorcual común es el cetáceo mediterráneo más sensible a la contaminación acústica producida por el tráfico marítimo y la exploración geofísica marina, por lo que debería considerarse prioritario en el esfuerzo de reducción del potencial impacto del ruido en los organismos marinos del mar Mediterráneo. Los resultados descritos en este trabajo demuestran que las alteraciones de su comportamiento acústico por el aumento de los niveles de ruido tienen el potencial de provocar consecuencias biológicas negativas en estas poblaciones mediante varios mecanismos y reiteran la necesidad del principio de precaución y el realismo en el análisis de este problema medioambiental.

Por último, este trabajo permite definir varias zonas y periodos como altamente prioritarios para su protección frente al ruido originado por el tráfico marítimo, la exploración geofísica y el riesgo de colisiones. Esperamos que esta información sirva de base para elaborar un programa de gestión y regulación eficiente que permita conservar el único misticeto del mar Mediterráneo mientras se desarrollen actividades

comerciales de manera sostenible en la cuenca Mediterránea. La manera en la que se defina esta gestión y el modo en que se regulen estas actividades en los próximos años tendrán profundas implicaciones para la futura supervivencia del rorcual común así como de muchos otros organismos marinos que dependen del sonido para sus funciones vitales.

Referencias bibliográficas

- Abdulla, A. y O. Linden (eds.). 2008. Maritime traffic effects on biodiversity in the Mediterranean Sea: Review of impacts, priority areas and mitigation measures. IUCN Centre for Mediterranean Cooperation. Malaga, Spain. 184 pp.
- Agler, B.A.; Beard, J.A.; Bowman, R.S.; Corbett, H.D.; Frohock, S.E.; Hawermale, M.P.; Katona, S.K.; Sadove, S.S. y I.E. Seipt. 1990. Fin whale (*Balaenoptera physalus*) photographic identification: methodology and preliminary results from the Western North Atlantic, pp. 349–356. En: Individual Recognition of Cetaceans: Use of Photo-Identification and Other Techniques to Estimate Population Parameters (Ed. P.S. Hammond, P.S.; Mizroch, S.A. y G.P. Donovan). Reports of the International Whaling Commission, Special Issue 12, Cambridge.
- Aguilar, A. 2008. Fin whale (*Balaenoptera physalus*). pp. 433-436. En Encyclopedia of marine mammals, Eds. Perrin, W.F.; Würsig, B. y J.G.M. Thewissen. Academic Press, 2nd Edition. 1382 p.
- Aguilar, A. 1985. Further information on the movements of the sperm whale (*Physeter macrocephalus*) in the North Atlantic. *Mammalia* 49:421–424.
- Aguilar, A. y A. Borrell. 2007. Open-boat whaling on the Straits of Gibraltar ground and adjacent waters. *Marine Mammal Science* 23(3):322-342.
- Aguilar, A.; Borrel, A. y P.J.H. Reijnders. 2002. Geographical and temporal variation in levels of organochlorine contaminants in marine mammals. *Marine Environmental Research* 53:425-452.
- Aïssi, M.; Celona, A.; Comparetto, G.; Mangano, R.; Würtz, M. y A. Moulins. 2008. Large-scale seasonal distribution of fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the central Mediterranean Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 88(6):1253-1261.
- André, M y C. Kamminga. 2000. Rhythmic dimension in the echolocation click trains of sperm whales: a possible function of identification and communication. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 80:163-169.
- Andrew, R.K.; Howe, B.M.; Mercer, J.A. y M. A. Dzieciush. 2002. Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustics Research Letters Online* 3(2):65-70.
- Au, D. y W. Perryman. 1982. Movement and speed of dolphin schools responding to an approaching ship. *Fish Bull* 80(2):371-379.
- Azzellino, A.; Gaspari, S.; Airoidi, S. y B. Nani. 2008. Habitat use and preferences of cetaceans along the continental slope and the adjacent pelagic waters in the western Ligurian Sea. *Deep Sea Research I* 55:296-323.

- Baptista, L.F. 1975. Song dialects and demes in sedentary populations of the white-crowned sparrow, *Zonotrichia leucophrys nuttalli*. University of California Publications in Zoology 105:1-52.
- Bass, A.H. y C.W. Clark. 2003. The physical acoustics of underwater sound communication. pp. 15-64. En Acoustic Communication (Eds. Simmons, A.M.; Popper, A.N. y R.R. Fay). Springer Handbook of Auditory Research. Springer-Verlag, Nueva York. 424 pp.
- Bayed, A. y P. Beaubrun. 1987. Les mammifères marins du Maroc: inventaire préliminaire. *Mammalia* 51:437-446.
- Beach, D.W. y M.T. Weinrich. 1989. Watching the whales: Is an educational adventure for humans turning out to be another threat for endangered species? *Oceanus* 32(1):84-88.
- Bearder, S. 1999. Physical and social diversity among nocturnal primates: a new view based on long term research. *Primates* 40(10):267-82.
- Bearzi, G. 2007. Marine conservation on paper. *Conservation Biology* 21(1):1-3.
- Bejder, L.; Samuels, A.; Whitehead, H. y S. Allen. 2009. An ethological framework for defining habituation, sensitisation and tolerance to anthropogenic stimuli. Paper SC/59/WW2 presented to the International Whaling Commission Scientific Committee, May 2009, Madeira, Portugal. 8 pp.
- Bérubé, M., Larsen, F., Notarbartolo di Sciara, G., Sears, R., Aguilar, A., Sigurjónsson, J., Urban-Ramirez, J., Dendanto, D. & Palsbøll, P.J. 1998. Population genetic structure of North Atlantic, Mediterranean Sea and Sea of Cortez fin whales, *Balaenoptera physalus* (Linnaeus, 1758); analysis of mitochondrial and nuclear loci. *Molecular Ecology* 7:585-599.
- Bettridge, S. y G.K. Silber. 2009. Update on the United States' Actions to Reduce the Threat of Ship Collisions with Large Whales. Paper IWC/61/CC14 presented to the International Whaling Commission Scientific Committee, May 2009, Madeira, Portugal. 4 pp.
- Blair, W.F. 1964. Isolating mechanisms and interspecies interactions in anuran Amphibians. *The Quarterly Review of Biology* 39:334-344.
- Borrell, A.; Aguilar, A.; Forcada, J.; Fernández, M.; Aznar, F.J. y J.A. Raga. 2000. Varamiento de cetáceos en las costas españolas del Mediterráneo durante el periodo 1989-2000. *Miscellània Zoològica* 23:1-17.
- Borri, C. 1927. Una notevole comparsa di grandi cetacei nell'Arcipelago Toscano. *Monitore Zoologico Italiano* 38:18-23.
- Boutiba, Z., Hamoutene, D., Merzoug, D., Bouderbala, M., Taleb, M.Z. y F. Abdelghani. 1996. Le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) dans le bassin sud de la Méditerranée occidentale: état actuel des observations, pp. 30-32. Proceedings of the 5th International Conference RIMMO, 15-17 November 1996. Antibes, France.

Boutiba Z. 1992. Les mammifères marins des côtes de l'Algérie: statut, répartition, écologie, biologie. Tesis doctoral de la Universidad de Orán. 575 pp.

Bowen, W.D. & Siniff, D.B., 1999. Distribution, population biology and feeding ecology of marine mammals. In Biology of marine mammals (ed. J.E. Reynolds III and S.A. Rommel), pp. 423-484. Washington: Smithsonian Institution Press.

Boyd, I.; Brownell, B.; Cato, D.; Clark, C.W.; Costa, D.; Evans, P.; Gedamke, J.; Gentry, R.; Gisiner, B.; Gordon, J.; Jepson, P.; Miller, P.; Rendell, L.; Tasker, M.; Tyack, P.; Vos, E.; Whitehead, H.; Wartzok, D. y W. Zimmer. 2008. The effects of anthropogenic sound on marine mammals: A draft research strategy. European Science Foundation Marine Board Position Paper 13. 24 pp.

Bradbury J.W. y S.L. Vehrencamp. 1998. Principles of Animal Communication. Sinauer Associates Inc., Maine. p. 882.

Braun, H.; Kaschny, P.; Schmidt, W.R. y H. Diehl. 2005. Synergistic effects of noise and organic solvents. Radiation and Environmental Biophysics 19(4):290.

Brodie, P.F. 1981. Energetic and behavioral considerations with respect to marine mammals and disturbance from underwater noise. P. 287-290. En: The question of sound from icebreaker operations. Proceedings of the workshop Arctic Pilot Project, Petro-Canada, Calgary. 350 pp.

Bryant, P.J.; Lafferty, C.M. y S.K. Lafferty. 1984. Reoccupation of Laguna Guerrero Negro, Baja California, Mexico, by gray whales. pp. 375-387. En: The Gray Whale *Eschrichtius robustus*. (Eds. Jones, M.L.; Swartz, S.L. y S. Leatherwood). Academic Press, San Diego, California. 624 pp.

Bryk, A. S., y S.W. Raudenbush. 1987. Application of hierarchical linear models to assessing change. Psychological Bulletin 101; 147-158.

Bryk, A. S., y S.W. Raudenbush. 1992. Hierarchical linear models: Applications and data analysis methods. Sage Publications, London. 512 p.

Cagnolaro, L. 1977. Lo scheletro di *Balaenoptera physalus* (L.) esposto al Museo Civico di Storia Naturale di Milano. Studio osteometrico. Natura 68:33-64.

Canese, S.; Cardinali, A.; Fortuna, C.M.; Giusti, M.; Lauriano, G.; Salvati, E. y S. Greco. 2006. The first identified winter feeding ground of fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the Mediterranean Sea. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 86: 903-907.

Cañadas, A.; Donovan, G. y C. Fortuna (eds.). 2005. Report of the Workshop on obtaining baseline cetacean abundance information for the ACCOBAMS area. Valsain, Spain, 17-19 December 2004.

Cañadas, A.; Sagarminaga, R.; Hernández-Falcón, L.; Fernández, E. y M. Fernández. 1999. Fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the northern part of the Alboran Sea and Strait of Gibraltar. (Abstract) European Research on Cetaceans, 13, 300–304.

Castellote, M. 2007. General Review of Protocols and Guidelines for Minimizing Acoustic Disturbance to Marine Mammals from Seismic Surveys. Journal of International Wildlife Law and Policy 10(3): 273 - 288

Catchpole, C.K. y P.J.B. Slater. 1995. Bird Song: Biological Themes and Variations. Cambridge University Press, Cambridge. 256 pp.

Cato, D.H. 2000. Ocean noise and the use of sound by marine mammals. Proceedings of Acoustics 2000. Joondalup, Western Australia. p. 241-244.

Cato, D.H. 2001. What can we learn about marine mammal acoustics from ambient sea noise? Proceedings of the International Congress on Acoustics, Kyoto IV: 2741-2742.

Cerchio, S., Jacobsen, J.K. y T.N. Norris. 2001. Temporal and geographical variation in songs of humpback whales, *Megaptera novaeangliae*: synchronous change in Hawaiian and Mexican breeding assemblages. Animal Behavior 62:313-29.

Charif, R.A.; Mellinger, D.K.; Dunsmore, K.J.; Fristrup, K.M. y C.W. Clark. 2002. Estimated source levels of fin whale (*Balaenoptera physalus*) vocalizations: Adjustments for surface interference. Marine Mammal Science 18:81-98.

Charif, R.A.; Clapham, P.J. y Clark, C.W. 2001. Acoustic Detections of Singing Humpback Whales in Deep Waters off the British Isles. Marine Mammal Science 17: 751-768.

Cheney, R.E. y R.A. Doblar. 1982. Structure and variability of the Alborán sea frontal system. Journal of Geophysics Research 94 (C9): 12667-12679.

Chevalier, C. 2005. Governance of the Mediterranean Sea: Outlook for the Legal Regime. IUCN Centre for Mediterranean Cooperation. Malaga, Spain. 36 pp.

Clapham, P.J.; Aguilar, A. y L.T. Hatch. 2008. Determining spatial and temporal scales for management: Lessons from whaling. Marine Mammal Science 24:183–201.

Clapham, P.J. y L.T. Hatch. 2000. Determining Spatial and Temporal Scales for Population Management Units: Lessons from Whaling. International Whaling Commission document SC/52/ID2, Adelaide, Australia.

Clapham, P.J.; Young, S.B. y R.L. Brownell Jr. 1999. Baleen whales: Conservation issues and the status of the most endangered populations. Mammal Review 29:35–60.

Clark, C.W. 1995. Application of U.S. Navy underwater hydrophone arrays for scientific research on whales. Report of the International Whaling Commission 45: 210–212.

Clark, C.W. 1990. Acoustic behavior of mysticete whales. En: Sensory Abilities of Cetaceans. (Eds. Thomas, J. y R. Kastelein). Plenum, New York. pp. 571-583.

Clark, C.W.; Ellison, W.T.; Southall, B.L.; Hatch, L.; VanParijs, S.; Fabel, A. y D. Ponirakis. En prensa. Acoustic Masking in Marine Ecosystems: Intuitions, Analysis, and Implications. Marine Ecology Progress Series.

Clark, C. W. y G.J. Gagnon 2004. Low-frequency Vocal Behaviors of Baleen Whales in the North Atlantic: Insights from Integrated Undersea Surveillance System Detections, Locations, and Tracking from 1992 to 1996. Journal of Underwater Acoustics (US Navy) 52(3).

Clark, C.W. y W.T. Ellison. 2004. Potential Use of Low-frequency Sounds by Baleen Whales for Probing the Environment: Evidence from Models and Empirical Measurements, en Advances in the Study of Echolocation in Bats and Dolphins, J.A. Thomas y R.A. Kastelein eds. The University of Chicago Press, Chicago, EEUU. pp. 564-582.

Clark, C.W.; Borsani, F. y G. Nortarbartolo di Sciara. 2002. Vocal activity of fin whales, *Balaenoptera physalus*, in the Ligurian Sea. Marine Mammal Science 18: 281–285.

Clark, C.W. y K.M. Fristrup. 1997. Whales'95: A Combined Visual and Acoustic Survey of Blue and Fin Whales off Southern California. Report of the International Whaling Commission 47: 583-600.

Cotté, C.; Guinet, C.; Taupier-Letage, I.; Mate, B. y E. Petiau. 2009. Scale dependent habitat use by a large free-ranging predator, the Mediterranean fin whale. 2009. Deep-Sea Research I 56:801-811.

Cooley, J.W. y J.W. Tukey. 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation 19:297-301.

Cox, T.M.; Ragen, T.J.; Read, A.J.; Vos, E.; Baird, R.W.; Balcomb, K.; Barlow, J.; Caldwell, J.; Cranford, T.; Crum, J.; D'Amico, A.; D'Spain, G.; Fernández, A.; Finneran, J.; Gentry, R.; Gerth, W.; Gulland, F.; Hildebrand, J.; Houser, D.; Hullar, T.; Jepson, P.D.; Ketten, D.; Macleod, C.D.; Miller, P.; Moore, S.; Mountain, D.C.; Palka, D.; Ponganis, P.; Rommel, S.; Rowles, T.; Taylor, B.; Tyack, P.; Wartzok, D.; Gisner, R.; Mead, J. y L. Benner. 2006. Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. Journal of Cetacean Research and Management 7:177-187.

Croll, D.A.; Clark, C.W.; Acevedo, A.; Tershy, B.; Flores, S.; Gedamke, J. y J. Urban. 2002. Only Fin Whale Males Sing Loud Songs. Nature 417 :809.

Croll, D.A.; Clark, C.W.; Calambokidis, J.; Ellison, T. y B.R. Tershy. 2001. Effect of anthropogenic low frequency noise on the foraging ecology of *Balaenoptera* whales. Animal Conservation 4:13-27.

Cummings, W.C.; Thompson, P.O. y S.J. Ha. 1986. Sounds from Bryde, *Balaenoptera edeni*, and finback, *B. physalus*, whales in the gulf of California. Fishery Bulletin 84:359-370.

Cummings, W.C. y P.O. Thompson. 1971 . Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*. Journal of the Acoustical Society of America 50:1193-1198.

Delarue, J.; Todd, S.K.; VanParijs, S.M.; L. Di Iorio. 2009. Geographic variation in Northwest Atlantic fin whale (*Balaenoptera physalus*) song: Implications for stock structure assessment. Journal of the Acoustical Society of America 125(3):1774-1782.

Di Natale, A. & Mangano, A. (1983) Presence and distribution of *Balaenoptera physalus* (L.) and *Balaenoptera spp.* in the Central Mediterranean Sea. Rapport de la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée 28 :185-187.

Dizon, A.E.; Lockyer, C.; Perrin, W.F.; Demaster, D.P. y J. Sisson. 1992. Rethinking the stock concept: A phylogeographic approach. Conservation Biology 6:24-36.

Duguy, R. y D. Vallon. 1976. Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) en Méditerranée occidentale: état actuel des observations. CIESM XXVe Congrès-Assemblée Plen. Split, 22–30 October. Comité Vertébrés Marins et Céphalopodes.

Dobler, J.P. 2002. Analyses of shipping patterns in the Mediterranean and Black seas. CIESM Workshop Monographs 20:19-28.

Dolman, S. 2007. Spatio-temporal restrictions as best practice precautionary response to ocean noise. Journal of International Wildlife Law and Policy 10:219-224.

Donovan, G.P. 1991. A review of IWC stock boundaries. Report of the International Whaling Commission 13:39-68.

Douglas, A.; Calambokidis, J.; Raverty, S.; Jeffries, S.J.; Lambourn, D.M. y S.A. Norman. 2008. Incidence of ship strikes of large whales in Washington State. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 88(6):1121–1132.

Duguy, R. 1989. Rapport annuel sur les cétacés et pinnipèdes trouvés sur les côtes de France. XVIII – Année 1988. Annales de la Société des Sciences Naturelles de la Charente-Maritime 7 :781–808.

Duguy, R. 1983. Rapport annuel sur les cétacés et pinnipèdes trouvés sur les côtes de France. XII – Année 1982. Annales de la Société des Sciences Naturelles de la Charente-Maritime 7 :121-135.

Duguy, R. 1989. Rapport annuel sur les cétacés et pinnipèdes trouvés sur les côtes de France. XVIII – Année 1988. Annales de la Société des Sciences Naturelles de la Charente-Maritime 7 :781–808.

Duguy, R. y D. Vallon. 1976. Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) en Méditerranée occidentale: état actuel des observations. CIESM XXVe Congrès-Assemblée Plen. Split, 22–30 October. Comité Vertébrés Marins et Céphalopodes.

- Dytham, C. 1999. Choosing and using statistics: A biologist's guide. 1999. Blackwell Science, Oxford. 218 pp.
- Edds, P.L. 1988. Characteristics of finback, *Balaenoptera physalus*, vocalizations in the St. Lawrence estuary. *Bioacoustics* 1:131-149.
- Ellers, J. y H. Slabbekoorn. 2003. Song divergence and male dispersal among bird populations: A spatially explicit model testing the role of vocal learning. *Animal Behavior* 65:671-681.
- Evans, P.G.H. 1987. The Natural History of Whales and Dolphins. Christopher Helm, London. 105 p.
- Evans, P.G.H., y H. Nice. 1996. Review of the effects of underwater sounds generated by seismic survey on cetaceans. Sea Watch Foundation, Oxford. 35 pp.
- Forcada, J., Aguilar, A., Hammond, P., Pastor, X. & Aguilar, R. 1996. Distribution and abundance of fin whales in the western Mediterranean during summer. *Journal of the Zoological Society of London* 238: 23-34.
- Forcada, J., Nortarbartolo di Sciara, G. & Fabbri, F. 1995. Abundance of Fin whales and striped dolphins summering in the Corso-Ligurian Basin. *Mammalia* 59 (1): 127-140.
- Forcada, J.; Aguilar, A.; Hammond, P.; Pastor, X. y R. Aguilar. 1993. Distribution and abundance of fin whales in the Western Mediterranean Sea during the summer. (Abstract) *European Research on Cetaceans -7:128-131* (Proceedings of the 7th Annual Conference of the European Cetacean Society. Inverness, Scotland).
- Ford, J.K.B. 1991. Vocal traditions among resident killer whales *Orcinus orca* in coastal waters of British Columbia. *Canadian Journal of Zoology* 69:1454-1483.
- Fossi, M.C., Casin, S. y L. Marsili. 2006. Endocrine Disruptors in Mediterranean Top Marine Predators. *Environmental Science and Pollution Research International* 13(3):204-207.
- Fossi, M.C.; Marsili, L.; Neri, G.; Natoli, A.; Politi, E.; y S. Panigada. 2003. The use of non-lethal tool for evaluating toxicological hazard of organochlorine contaminants in Mediterranean cetaceans: new data ten years after the first paper published in MPB. *Marine Pollution Bulletin* 46:964-971.
- Frid, A. y L. Dill. 2002. Human-caused disturbance stimuli as a form of predation risk. *Conservation Ecology* 6:11.
- Gambaiani, D.D.; Mayol, P.; Isaac, S.J. y M.P. Simmonds. 2009. Potential impacts of climate change and greenhouse gas emissions on Mediterranean marine ecosystems and cetaceans. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 89(1):179-201.

- Gambell, R. 1985. Fin whale, *Balaenoptera physalus* (Linnaeus, 1758), pp. 171–192. En: Handbook of Marine Mammals Vol. 3. The Sirenians and Baleen Whales (Eds. Ridgway S.H. y R. Harrison). Academic Press, Londres. 362 p.
- Gannier, A., 2002. Summer distribution of fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the northwestern Mediterranean Marine Mammals Sanctuary. *Revue d'Ecologie la Terre et la Vie* 57, 135–150.
- Gannier, A. y O. Gannier. 1997. New results on the seasonal variation of cetaceans in the Liguro-Provençal Basin. (Abstract) *European Research on Cetaceans* 11: 91–94 (Proceedings of the 11th Annual Conference of the European Cetacean Society. Kiel, Germany).
- Gannier, A. y O. Gannier. 1993. The winter presence of the fin whale in the liguro provençal basin: preliminary study. (Abstract) *European Research on Cetaceans* 7: 131–134 (Proceedings of the 7th Annual Conference of the European Cetacean Society. Inverness, Scotland).
- Garrett, C. 1996. The role of the Strait of Gibraltar in the evolution of the Mediterranean water, properties and circulation. *Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco*, n° spécial 17:1-18.
- Gauffier, P.; Verborgh, P.; Andreu, E.; Esteban, R.; Medina, B.; Gallego, P. y R. de Stephanis. 2009. An update on fin whales (*Balaenoptera physalus*) migration through intense maritime traffic in the Strait of Gibraltar. Paper SC/61/BC6 presented to the International Whaling Commission Scientific Committee, May 2009, Madeira, Portugal. 4p.
- Gautier, J.P. 1988. Interspecific affinities among guenons as deduced from vocalizations. En: *A Primate Radiation: Evolutionary Biology of the African Guenons*. (Eds. Gautier-Hion, A. Bourliere, F. Gautier J.P. y J. Kingdon). Cambridge University Press, Cambridge.
- Gedamke, J. 2009. Geographic variation in Southern Ocean fin whale song. Paper SC/61/SH16 presented to the International Whaling Commission Scientific Committee, May 2009, Madeira, Portugal. 8 pp.
- Gedamke, J., Gales, N., Hildebrand, J. and Wiggins, S. 2009. Seasonal occurrence of low frequency whale vocalisations across eastern Antarctic and southern Australian waters, February 2004 to February 2007. Paper SC/59/SH5 presented to the International Whaling Commission Scientific Committee, May 2009, Madeira, Portugal. 9pp.
- Gehhardt, H.C. 1994. The evolution of vocalization in frogs and toads. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 25:293-324.
- Gill, J.A.; Norris, K. y W.J. Sutherland. 2001. Why behavioural responses may not reflect the population consequences of human disturbance. *Biological Conservation* 97:265-268.

- Goldstein, H.; Rasbash, J.; Plewis, I.; Draper, D.; Browne, W.; Yang, M.; Woodhouse, G. y M. Healy. 1998. A user's guide to MlwiN. Multilevel models Project, Institute of education, University of London.
- Gordon, J.; Gillespie, D.; Potter, J.; Frantzis, A.; Simmonds, M. P.; Swift, R. y D. Thompson. 2004. A Review of the Effects of Seismic Surveys on Marine Mammals. *Marine Technology Society Journal* 37(4):16-34.
- Grant, B.R. y P.R. Grant. 1996. Cultural inheritance of song and its role in the evolution of Darwin's finches. *Evolution* 50:2471-2487.
- Grau, E.; Aguilar, A. S. Filella. 1980. Cetaceans stranded, captured or sighted in the Spanish coasts during 1976–79. *Bulletin Institució Catalana d'Historia Natural* 45(Seciò de Zoologia 3):167-179.
- Gray, D.A. y W.H. Cade. 2000. Sexual selection and speciation in field crickets. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97(26):14449-14454.
- Greene, C.H. y A.J. Pershing. 2000. The response of *Calanus finmarchicus* populations to climate variability in the Northwest Atlantic: Basin-scale forcing associated with the North Atlantic Oscillation (NAO). *ICES Journal of Marine Science* 57:1536-1544.
- Gregg, E.J.; Nichol, L.; Ford, J.K.B; Ellis, G. y A.W: Trites. 2000. Migration and population structure of northeastern pacific whales off coastal British Columbia: an analysis of commercial whaling records from 1908-1967. *Marine Mammal Science* 16(4):699-727.
- Grinstead, C.M. y J.L. Snell. 1997. Central Limit Theorem. En: *Introduction to Probability*. AMS Bookstore. pp. 325-360.
- Guinet, C.; Mate, B.; Bentaleb, I.; André, J.M.; Mayzard, P. y R. De Stephanis. 2005. Where are the Mediterranean Fin Whales when the summer is over?. *European Research on Cetaceans* 19:121-124. (Proceedings of the 19th Annual Conference of the European Cetacean Society. La Rochelle, France)
- Hafner, D.J. y K.E. Petersen. 1985. Song dialects and gene flow in the white-crowned sparrow, *Zonotrichia leucophrys nuttalli*. *Evolution* 39:687-694.
- Harvey, P.H. y M.D. Pagel. 1991. *The Comparative Method in Evolutionary Biology*. Oxford University Press, Oxford, UK. 248 pp.
- Hashmi, D.D.K. y B. Adloff. 1991. Surface frequency of cetaceans in the Strait of Gibraltar. (Abstract) *European Research on Cetaceans* 5:16–17.
- Hatch, L.; Clark, C.W.; Merrick R.; Van Parijs, S.; Ponirakis, D.; Schwehr, K.; Thompson, M. y D. Wiley. 2008. Characterizing the relative contributions of large vessels to total ocean noise fields: A case study using the Gerry E. Studds Stellwagen Bank National Marine Sanctuary. *Environmental Management* 42(5):735-752.

Hatch, L.T. y C.W. Clark. 2004. Acoustic differentiation between fin whales in both the North Atlantic and North Pacific Oceans, and integration with genetic estimates of divergence. International Whaling Commission document SC/56/SD6. Sorrento, Italy.

Heitmeyer, R. M., S. C. Wales, and L. A. Pflug. 2004. Shipping noise predictions: capabilities and limitations. *Marine Technology Society* 37:54-65.

Hey, E. 1991. The precautionary approach. Implications for the revision of the Oslo and Paris Conventions. *Marine Policy* 15(4): 244-255.

Hewitt, R.P. 1985. Reaction of dolphins to a survey vessel: Effects on census data. *Fishery Bulletin* 83(2):187-193.

Hildebrand, J.A. 2005. Impacts of anthropogenic sound. En: *Marine Mammal Research: Conservation beyond crisis*. pp. 101-124. (Eds. Reynolds III, J.E.; Perroin, W.F.; Reeves, R.R.; Montgomery, S. y T.J. Ragen). John Hopkins University Press, Baltimore. 240 pp.

Huntley, A.C.; Costa, D.P.; Worthy, G.A.J. y M.A. Castellini (Eds.). 1987. Approaches to marine mammal energetics. Special Publication 1. The Society for Marine Mammalogy. University Press of Kansas. 253 p.

Ingebrigtsen, A. 1929. Whales caught in the North Atlantic and other seas. Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer, Rapports et Procès-verbaux des Réunions 56 :3-26.

Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). 2009. Sección de Oceanografía. Anuario de mareas.

Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). 2008. Sección de Oceanografía. Anuario de mareas.

Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). 2007. Avisos a los navegantes. Publicación semanal. Grupo nº 5, 3 de febrero de 2007.

Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). 2006. Avisos a los navegantes. Publicación semanal. Grupo nº 44, 4 de noviembre de 2006.

Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). 1983. Sección de Cartografía. Carta náutica nº445 "Estrecho de Gibraltar". Publicación digital edición 2006.

International Maritime Organization (IMO). 1972. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs). Documento electrónico: http://www.imo.org/Conventions/mainframe.asp?topic_id=257&doc_id=649

International Whaling Commission (IWC). 2009. Report of the First Intersessional RMP Workshop on North Atlantic Fin Whales. Copenhague, 31 de Marzo a 4 de abril de 2008. *Journal of Cetacean Research and Management* 11(suppl):425-452.

International Whaling Commission (IWC). 2007. Report of the Joint NAMMCO/IWC Scientific Workshop on the Catch History, Stock Structure and Abundance of North Atlantic Fin Whales, Reykjavík, 23-26 Marzo de 2006. Journal of Cetacean Research and Management 9(suppl):451-468.

International Whaling Commission (IWC). 2005. Report of the Scientific Committee. Annex K. Report of the Standing Working Group on environmental concerns. Journal of Cetacean Research and Management 7(Supplement):267-305.

International Whaling Commission (IWC). 1997. Report of the IWC workshop on climate change and cetaceans. Report of the International Whaling Commission 47:293-313.

International Whaling Commission (IWC). 1992. Report of the Comprehensive Assessment Special Meeting on North Atlantic Fin Whales, Reykjavík, 25 February - 1 March 1991. Report of the International Whaling Commission 42:595-644.

Irvine, A.B. ; Scott, M.D. ; Wells, R.S. y J.F. Kaufmann. 1981. Movements and activities of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*, near Sarasota, Florida. Fishery Bulletin 79(4):671-688.

Irwin, D.E.; Alstrom, P.; Olsson, U. y Z.M. Benowitz-Fredericks. 2001. Cryptic species in the Genus *Phylloscopus* (Old World leaf warblers). Ibis 143:233-47.

Jacques, G. 1990. L'oligotrophie du milieu pélagique en Méditerranée occidentale: un paradigme qui s'estompe? Bulletin de la Société Zoologique de France 114:17-30.

Jahoda, M. y G. Notarbartolo di Sciara. 1993. Respiration patterns of fin whales summering in the Ligurian Sea. (Abstract) European Research on Cetaceans 7:237-240. (Proceedings of the 7th Annual Conference of the European Cetacean Society. Inverness, Scotland).

Jensen, A.S. y G.K. Silber. 2003. Large whale ship strike database. U.S. Dep. Commerce, NOAA Technical Memorandum NMFS-F/OPR-25, 37 p.

Johnson, S.R. 2002. Marine mammal mitigation and monitoring program for the 2001 Odoptu 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia: Executive summary. Informe técnico elaborado por: LGL Limited, Sidney, BC, Canada, para Exxon Neftegas Limited, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia. 49 pp.

Johnson, S.R.; Burns, J.J.; Malme, C.I. y R.A. Davis. 1989. Synthesis of information on the effects of noise and disturbance on major haulout concentrations of Bering Sea pinnipeds. OCS Study MMS 88-0092. Informe técnico elaborado por: LGL Alaska Res. Assoc. Inc., Anchorage, AK, para U.S. Minerals Management Service. Anchorage, EEUU. 267 p.

Johnson, B.W. 1977. The effects of human disturbance in a population of harbor seals. Environmental Assessment of the Alaskan Continental Shelf, Annual Report Principal Investment, NOAA, Boulder CO 1 :422-432. 708 p.

- Jones, M.L.; Swartz, S.L. y M.E. Dahlheim. 1994. Census of gray whales abundance in San Ignacio Lagoon: a follow-up study in response to low whale counts recorded during an acoustic playback study n noise effects on gray whales. Informe n° NTISPB94195062 de la U.S. Marine Mammal Commission. Washington.
- Jonsgård, Å. 1966. Biology of the North Atlantic fin whale *Balaenoptera physalus* (L.): taxonomy, distribution, migration and food. Hvalradets Skrifter 49: 1–62.
- Ketten, D.R. 2004. Marine Mammal Auditory Systems: A Summary of Audiometric and Anatomical Data and Implications for Underwater Acoustic Impacts. *Journal of Cetacean Research Management* 7(Suppl.): 286-289.
- Kingston, T. y S.J. Rossiter. 2004. Harmonic-hopping in Wallacea's bats. *Nature* 429:654-7.
- Krebs, J.R. y R. Dawkins. 1984. Animal signals: Mind-reading and manipulation. En: *Behavioral Ecology: An Evolutionary Approach*. (Eds. Krebs, J.R. y N.B. Davies). Blackwell Scientific Publications, Oxford. pp. 380-402.
- Laist, D.W.; Knowlton, A.R.; Mead, J.G.; Collet, A.S. y M. Podestà. 2001. Collisions between ships and whales. *Marine Mammal Science* 17:35-75.
- Laran, S. y A. Gannier. 2008. Spatial and temporal prediction of fin whale distribution in the northwestern Mediterranean Sea. *ICES Journal of Marine Science* 65: 1260–1269.
- Laran, S. y V. Drouot-Dulau. 2007. Seasonal variation of striped dolphins, fin- and sperm whales abundance in the Ligurian Sea(Mediterranean Sea). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 87:345-352.
- Larsen, F. y N. Øien. 1996. On the discreteness of stocks of minke whales at East and West Greenland. *Report of the international Whaling Commission* 38:251-255.
- Learmonth J.A.; Macleod, C.D.; Santos, M.B.; Pierce, J.G.; Crick, H.Q.P. y R.A. Robinson. 2006. Potential effects of climate change on marine mammals. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 44:431-464.
- Le Vourch, J.; Millot, C.; Castagne, N.; Le Borgne, P. y J.P. Olry. 1992. Atlas des fronts thermiques en Méditerranée d'après l'imagerie satellitaire. *Mémoires de l'Institut Océanographique Monaco* 16:1-160.
- Lien, J.; Todd, S.; Stevik, P.; Marques, S. y D. Ketten. 1993. The reaction of humpback whales to underwater explosions: Orientation, movements and behaviour. *Journal of the Acoustical Society of America* 94(3):1849.
- Littaye, A.; Laran, S.; Gannier, A. y J.P.F. Wilson. 2004 The relationship between summer aggregation of fin whales and satellite-derived environmental conditions in the northwestern Mediterranean Sea. *Remote Sensing of Environment* 90:44-52.

Ljungblad, D.K.; Clark, C.W. y H. Shimada. 1998. A Comparison of Sounds Attributed to Pygmy Blue Whales (*Balaenoptera musculus musculus*) Recorded South of the Madagascar Plateau and Those Attributed to “True” Blue Whales (*Balaenoptera musculus*) Recorded off Antarctica. Report of the International Whaling Commission 48: 439-442.

Lockyer, C.H. y S.G. Brown. 1981. The migration of whales. En Animal migration (ed. D.J. Aidley), pp. 105-107. Cambridge University Press. [SEB Seminar Series, no. 13.]

Macleod, K.; Simmonds, M.P. y E. Murray. 2006. Abundance of fin (*Balaenoptera physalus*) and sei whales (*B. borealis*) amid oil and gas exploration and development off northwest Scotland. Journal of Cetacean Research and Management 8(3): 247-254.

Maeda, T. y N. Matasaka. 1987. Locale-specific vocal behaviour of the tamarin (*Saguinus l. labiatus*). Ethology 75:25-30.

Malme, C.I.; Miles, P.R.; Clark, C.W.; Tyack, P. y J.E. Bird. 1984. Investigations of the potential effects of underwater noise from petroleum industry activities on migrating grey whale behaviour/Phase II: January 1984 migration. BBN Report 5366, Report from Bolt Beranek & Newman Inc., for US Minerals Management Service. NTIS PB86-174174.

Marine Mammal Commission (MMC). 2007. Marine Mammals and Noise: A Sound Approach to Research and Management. Informe técnico presentado al Congreso por la Marine Mammal Commission, EEUU. 370 p.

Marini, L., Villetti, G. y C. Consiglio. 1996a. Wintering areas of Fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the Mediterranean Sea, a preliminary survey. (Abstract) European Research on Cetaceans, 9:126-128 (Proceedings of the 9th Annual Conference of the European Cetacean Society. Paris, France).

Marini, L.; Consiglio, C.; Angradi, A.M.; Catalano, B.; Sanna, A.; Valentini, T.; Finoia, M.G. y G. Villetti. 1996b. Distribution, abundance and seasonality of cetaceans sighted during scheduled ferry crossings in the central Tyrrhenian Sea: 1989–1992. Italian Journal of Zoology 63:381–388.

Marini, L.; Carpentieri, P. y C. Consiglio. 1996c. Presence and distribution of the cetological fauna of the Aegean Sea: preliminary results. (Abstract) European Research on Cetaceans, 9: 99–101 (Proceedings of the 9th Annual Conference of the European Cetacean Society. Paris, France).

Marini, L.; Consiglio, C.; Sanna, A. y A.M. Angradi. 1992. Some notes on the fin whale (*Balaenoptera physalus*) in the Western Mediterranean Sea, pp. 63–71. Proceedings of the Symposium ‘Whales: Biology – Threats – Conservation’, Bruselas.

Marler, P. 1957. Species distinctiveness in the communication signals of birds. Behaviour 2:13-9.

Marsili, L. 2000. Lipophilic contaminants in marine mammals: review of the results of ten years work at the Department of Environmental Biology, Siena University (Italy).

- The Control of Marine Pollution: Current Status and Future Trends. *International Journal of Experimental Pathology* 13:416-452.
- Marsili, L. y S. Focardi. 1996. Organochlorine levels in subcutaneous blubber biopsies of fin whales (*Balaenoptera physalus*) and striped dolphins (*Stenella coeruleoalba*) from the Mediterranean Sea. *Environmental Pollution* 91: 1-9.
- Martens, J. 1996. Vocalizations and speciation of Palearctic birds. En: *Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds*. (Eds. Kroodsma, D.E. y E.H. Miller) Cornell U., NY. pp. 221-240.
- McCauley, R.D.; Jenner, C.; Bannister, J.L.; Burton, C.L.K; Kato D.H. y A. Duncan. 2001. Blue Whale Calling in the Rottneest Trench-2000. Western Australian Centre for Marine Science and Technology, Curtin University. Report n° R2001-6. 145 p.
- McCauley, R.D.; Jenner, M.N.; Jenner, C.; McCabe, K.A. y J. Murdoch,. 1998. The response of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) to offshore seismic survey: Preliminary results of observations about a working seismic vessel and experimental exposures. *APPEA Journal*: 692-706.
- McCracken, K.G. y F.H. Sheldon. 1997. Avian vocalizations and phylogenetic signal. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 94: 3833-3836.
- McDonald, M.A.: S.L. Mesnick, y J.A. Hildebrand. 2006. Biogeographic characterization of blue whale song worldwide: Using song to identify populations. *Journal of Cetacean Research and Management* 8:55-65.
- McDonald, M.A.; Hildebrand, J.A. y S.C. Webb. 1995. Blue and Fin Whales Observed on a Seafloor Array in the Northeast Pacific. *Journal of the Acoustical Society of America* 98: 712-721.
- McEwen, B. y J.C. Wingfield. 2003. The concept of allostasis in biology and biomedicine. *Hormones and Behavior* 43:2-15.
- Mellinger, D. K., J. Barlow. 2003. Future directions for acoustic marine mammal surveys: Stock assessment and habitat use. NOAA OAR, NOAA/PMEL Contribution 2557, pp. 1-37.
- Michelsen, A. 1992. Hearing and sound communication in small animals: Evolutionary adaptations to the laws of physics. p. 61-77. En: *The evolutionary biology of hearing* (Eds. Webster, D.B.; Fay, R.R. y A.N. Popper). Springer-Verlag, EEUU. 859 pp.
- Miles, P.R. 1984. Offshore seismic survey history in California and the migration of gray whales. Appendix A en *Investigations of the potential effects of underwater noise from petroleum industry activities on migrating gray whale behaviour. Phase II: January 1984 migration*. Informe tecnico n° 5586 preparado por Bolt Beranek y Newman Inc., Cambridge para U.S. Minerals and Management Service, Anchorage, AK.
- Mitchell, E.D. y L. Gahnimé. 1982. Evidence of whale vessel interaction north shore of the St. Lawrence estuary. Canadian Department of Fisheries and Oceans, Petro-Canada Arctic Pilot Project. 45 p.

Moore, S.; Watkins, W.A.; Davies, J.R. y Dahlheim, M.E. 2002. Blue Whale Habitat Associations in the Northwest Pacific: Analysis of Remotely-Sensed Data Using a Geographic Information System. *Oceanography* 14:20–25

Moore, S.E.; Stafford, K.M.; Dahlheim, M.E. Fox, C.G.; Braham, H.W.; Polovina, J. y D. Bain. 1998. Seasonal variation in reception of fin whale calls at five geographic areas in the North Pacific. *Marine Mammal Science* 14:617-627.

Moøers, A.Ø.; Vamosi, S.M. y D. Shluter. 1999. Using phylogenies to test macroevolutionary hipótesis of trait evolution in cranes (*Gruinae*). *American Naturalist* 154:249-259.

Morton, E.S.. 1975. On the occurrence and significance of motivational-structural rules in some bird and mammal sounds. *American Naturalist* 111:855-869.

Mizroch, S.A.; Rice, D.W. y J.M. Breiwick. 1984. The Fin Whale, *Balaenoptera physalus*. *Marine Fisheries Review* 46:20-24.

Mouillot, D. y D. Viale. 2001. Satellite tracking of a fin whale (*Balaenoptera physalus*) in the north-western Mediterranean Sea and fractal analysis of its trajectory. *Hydrobiologia* 452:163-171.

Moulins, A.; Rosso, M.; Ballardini, y M. Würtz. 2008. Partitioning of the Pelagos Sanctuary (north-western Mediterranean Sea) into hotspots and coldspots of cetacean distributions. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 88(6): 1273–1281.

Mussi, B.; Miragliuolo, A. y M. Battaglia. 1997. Osservazioni sul comportamento di *Stenella coeruleoalba* (Meyen, 1833) nell'arcipelago Pontino – Campano, Tirreno Centro Meridionale. 3° Convegno Nazionale sui cetacei, Abstracts. 5-6 Dicembre 1997, Napoli, Italia. Centro Studi cetacei della Società Italiana di Scienze Naturali.

Mussi, B.; Gabriele, R.; Miragliuolo, A. y M. Battaglia. 1998. Cetacean sightings and interactions with fisheries in the Archipelago Pontino Campano, South Tyrrhenian sea, 1991-1995. (Abstract) *European Research on Cetacean* 12:63-65 (Proceedings of the 12th Annual Conference of the European Cetacean Society, Monaco).

Mussi, B.; Miragliuolo, A.; Monzini, E.; Diaz Lopez, B. y M. Battaglia. 1999. Fin whale (*Balaenoptera physalus*) feeding ground in the coastal waters of Ischia (Archipelago Campano). (Abstract) *European Research on Cetaceans*, 13, 330–335 (Proceedings of the 13th Annual Conference of the European Cetacean Society. Valencia, Spain).

National Research Council (NRC). 2005. Marine mammal populations and ocean noise: Determining when noise causes biologically significant effects. National Academies Press, Washington, DC. 142 pp.

National Research Council (NRC). 2003. Ocean noise and marine mammals. National Academies Press, Washington, DC. 204 pp.

National Research Council (NRC). 2000. Marine mammals and low-frequency sound: Progress since 1994. National Academies Press, Washington, DC. 146 pp.

Nieukirk, S.L.; Stafford, K.M.; Mellinger, D.K.; Dziak, R.P. y C.G. Fox. 2004. Low frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. *Journal of Acoustical Society of America* 115(4):1832-1843.

Norris, K.S.; Stntz, W.E. y W. Rogers. 1978. The behavior of porpoises and tuna i nthe eastern tropical Pacific yellowfin tuna fishery – Preliminary studies. MMC-76/12. U.S. Marine Mammal Commission, Washington DC. 86 p.

North Atlantic Marine Mammal Commission (NAMMCO). 2003. Report of the 10th meeting of the Scientific Committee. *NAMMCO Annual Report 2002*. pp. 173-281.

North Atlantic Marine Mammal Commission, 2003. *NAMMCO Annual Report 2003*. North Atlantic Marine Mammal Commission, Tromsø, Norway, 373 pp.

Notarbartolo di Sciara, G. 1990. A note on the cetacean incidental catch in the Italian driftnet swordfish fishery, 1986–1988. Report of the International Whaling Commission, 40:459-460.

Notarbartolo di Sciara, G.; Agardy, T.; Hyerenbach, D.;, Scovazzi, T. y P. Van Klaveren. 2008. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 18: 367-391.

Notarbartolo di Sciara, G.; Zanardelli, M.; Jahoda, M.; Panigada, S. y S. Airoidi. 2003. The Fin whale *Balaenoptera physalus* (L. 1758) in the Mediterranean Sea. *Mammal Review* 33:105-150.

Notarbartolo di Sciara, G.; Clark, C.W.; Zanardelli, M. y S. Panigada. 1999. Migration patterns of fin whales, *Balaenoptera physalus*: shaky old paradigms and local anomalies. (Abstract) *European Research on Cetaceans* 12:118.

Notarbartolo di Sciara, G. y J. Gordon. 1997. Bioacoustics: a tool for the conservation of cetaceans in the Mediterranean Sea. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* 30:125–146.

Notarbartolo di Sciara, G.; Venturino, M.C.; Zanardelli, M.; Bearzi, G.; Borsani, J.F. y B. Cavalloni. 1993. Cetaceans in the Central Mediterranean Sea: distribution and sighting frequencies. *Italian Journal of Zoology* 60:131–138.

Nowacek, D.P.; Thorne, L.H.; Johnston, D.W: y and P.L. Tyack. 2007. Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* 37(2):81-115.

Nowacek, D.; Johnson, M.P. P.L. Tyack. 2004. North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) ignore ships but respond to alerting stimuli. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 271:227-231.

- Panigada, P.; Zanardelli, M.; Mackenzie, M.; Donovan, C.; Mélin, F. y P.S. Hammond. 2008. Modelling habitat preferences for fin whales and striped dolphins in the Pelagos Sanctuary (Western Mediterranean Sea) with physiographic and remote sensing variables. *Remote Sensing of Environment* 112:3400-3412.
- Panigada, S.; Pesante, G.; Zanardelli, M.; Capoulade, F.; Gannier, A. y M.T. Weinrich. 2006. Mediterranean fin whales at risk from fatal ship strikes. *Marine Pollution Bulletin* 52:1287-1298.
- Panigada, S., Donovan, G. y C. Guinet (eds.). 2005. Report of the Joint ACCOBAMS / Pelagos Workshop on Fin Whales in the Mediterranean Sea. Monaco 12-15 November.
- Palsbøll, P. J.; Bérubé, M.; Aguilar, A.; Notarbartolo-di-Sciara, G. y R. Nielsen. 2004. Discerning between recurrent gene flow and recent divergence under a finite-site mutation model applied to North Atlantic and Mediterranean fin whales *Balaenoptera physalus* populations. *Evolution* 58:670–675.
- Palumbi, S.R. y C.S. Baker. 1994. Contrasting population structure from nuclear intron sequences and mtDNA of humpback whales. *Molecular Biology and Evolution* 11:426-435.
- Parks, S.E.; Clark, C.W. y P.L. Tyack. 2007. Short and long-term changes in right whale calling behavior: The potential effects of noise on communication. *Journal of the Acoustical Society of America* 122:3725-3731.
- Parks, S.E.; Urazghildiiev, I. y C.W. Clark. 2009. Variability in ambient noise levels and call parameters of North Atlantic right whales in three habitat areas. *Journal of the Acoustical Society of America* 125(2): 1230-1239.
- Patterson, B. y G.R. Hamilton. 1964. Repetitive 20 cycle per second biological hydroacoustical signals at Bermuda. En: *Marine Bio-Acoustics*. (Eds. W.N. Tavolga). Pergamon, Oxford. pp. 125-145.
- Paulus, M. 1966. Les baleinoptères de la Méditerranée. *Bulletin du Muséum d'Histoire Naturelle du Marseille* 26-27:117-139.
- Payne, R. 2004. Long range communication in large whales, ocean noise and synergistic impacts. International Whaling Commission Report, Annex K, appendix 2. International Whaling Commission Meeting 56. 3 pp.
- Payne, R. B. 1982. Ecological consequences of song matching: Breeding success and intraspecific song mimicry in indigo buntings. *Ecology* 63:401-411.
- Payne, P.M.; Wiley, D.N.; Young, S.B.; Pittman, S.; Clapham, P.J. y J.W. Jossi. 1990. Recent fluctuations in the abundance of baleen whales in the southern Gulf of Maine in relation to changes in selected prey. *Fisheries Bulletin* 88:687-696.
- Payne, K. y R. Payne. 1985. Large scale changes over 17 years in songs of humpback whales in Bermuda. *Zeitschrift für Tierpsychologie* 68:89-114.

- Payne R. y D. Webb. 1971. Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales. *Annals of the New York Academy of Sciences* 188:110-142.
- Perkins, H. ; Kinder, T. y P. La Violette. 1990. The Atlantic inflow in the western Alborán sea. *Journal of Physical Oceanography* 27(8):1804-1810.
- Platz, J.E. 1989. Speciation within the chorus frog *Pseudacris triseriata*; morphometric and mating call analysis of the boreal and western subspecies. *Copeia* 3:704-712.
- Podestà, M. y L. Magnaghi. 1989. Unusual number of cetacean bycatches in the Ligurian Sea. (Abstract) *European Research on Cetaceans* 3:67-70. (Proceedings of the 3rd Annual Conference of the European Cetacean Society. Riccione, Italia).
- Prasher D.A.. 2000. European Concerted Action on Noise Pollution Health Effects Reduction. *Noise Health* 2:1-3.
- Puzzolo, V. y L.M. Tringali. 2001. Monitoring seasonal Mediterranean Fin whales, *Balaenoptera physalus*, passage through the Strait of Messina (Ionian Sea) using GIS techniques. (Abstract) *European Research on Cetaceans* 15 (Proceedings of the 15th Annual Conference of the European Cetacean Society. Rome, Italia).
- Rabin, L.A. y C.M. Greene. 2002. Changes in acoustic communications systems in human-altered environment. *Journal of Comparative Psychology* 116:137-141.
- Raga, J.A. y J. Pantoja (eds.). 2004. Proyecto Mediterráneo: Zonas de especial interés para la conservación de los cetáceos en el Mediterráneo español. Ministerio de Medio Ambiente. Naturaleza y Parques Nacionales. Serie Técnica. Madrid. 219 p.
- Reeves R., Notarbartolo di Sciara G. (eds). 2006. The status and distribution of cetaceans in the Black Sea and Mediterranean Sea. IUCN Centre for Mediterranean Cooperation, Malaga, Spain. 137 pp.
- Reilly, S.B.; Bannister, J.L.; Best, P.B.; Brown, M.; Brownell Jr. R.L.; Butterworth, D.S.; Clapham, P.J.; Cooke, J.; Donovan, G.P.; Urbán, J. y A.N. Zerbini. 2008. *Balaenoptera physalus*. En: IUCN 2009. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2009.1.
- Relini G. 1994. Gli ecosistemi e le risorse biologiche del Mar Ligure dopo il disastro della Haven. *Biologia Marina Mediterranea* 1: 3-42.
- Relini, G.; Orsi Relini, L.; Siccardi, A.; Fiorentino, F.; Palandri, G.; Torchia, G.; Relini, M.; Cima, C. y M. Cappello. 1994. Distribuzione di *Meganyctiphanes norvegica* e *Balaenoptera physalus* in Mar Ligure all'inizio della primavera. *Biologia Marina Mediterranea* 1:89-94.
- Relini, G.; Orsi Relini, L.; Cima, C.; Fasciana, C.; Fiorentino, F.; Palandri, G.; Relini, M.; Tartaglia, M.P.; Torchia, G. y A. Zamboni. 1992. Macroplankton, *Meganyctiphanes norvegica*, and fin whales, *Balaenoptera physalus*, along some transects in the Ligurian Sea. (Abstract) *European Research on Cetaceans*, 6:134-137 (Proceedings of the 6th Annual Conference of the European Cetacean Society. Roscof, France).

REMPEC (Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea). 2002. Protecting the Mediterranean against maritime accidents and illegal discharges from ships. REMPEC Technical Report. 36 pp.

Rendell, L. y H. Whitehead. 2001. Culture in whales and dolphins. *Behavioral and Brain Sciences* 24:309–382.

Reylea, R.A. 2003. Predator cues and pesticides: a double dose of danger for amphibians. *Ecol Appl.* 13:1515-1521.

Reylea, R.A. y N. Mills. 2001. Predator-induced stress makes the pesticide carbaryl more deadly to gray treefrog tadpoles (*Hyla versicolor*). *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 98:2491-2496.

Richardson, W.J., Miller, G.W. and Greene, C.R. 1999. Displacement of migrating bowhead whales by sounds from seismic surveys in shallow waters of the Beaufort Sea. *Journal of the Acoustical Society of America* 106:2281.

Richardson, W.J.; Greene, C.R.; Malme, C.I. y D.H. Thomson (eds.) 1995. *Marine mammals and noise*. Academic Press. 576 pp.

Richardson, W.J.; B. Würsig y C.R. Greene Jr. 1990 Reactions of bowhead whales, *Balaena mysticetus*, to drilling and dredging noise in the Canadian Beaufort Sea. *Marine Environmental Research* 29:139-160.

Richardson, W.J.; Davis, R.A.; Evans, C.R.; Ljungbald, D.K. y P. Norton. 1987. Summer distribution of Bowhead whales, *Balaena mysticetus*, relative to oil industry activities in the Canadian Beaufort Sea, 1980-1984. *Arctic* 40: 93-104.

Richardson, W.J.; Greene, C.R.; y B. Würsig. 1985. Behavior, disturbance responses and distribution of bowhead whales *Balaena mysticetus* in the eastern Beaufort Sea, 1980-84: Summary. Informe técnico preparado por: LGL Ecological Research Associates, Incorporated, Bryan, TX para U.S. Minerals Management Service. EEUU. 30 p.

Richiardi, S. 1874. Sulle variazioni individuali della *Balaenoptera musculus*. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali*, 1, 246–259.

Rio, M.H.; Poulain, P.M.; Pascual, A.; Mauri, E.; Larnicol, G. y R. Santoleri 2007. A mean dynamic topography of the Mediterranean Sea computed from altimetric data, in-situ measurements and a general circulation model. *Journal Marine Systems* 65:484-508.

Roman, J. y S.R. Palumbi. 2003. Whales before Whaling in the North Atlantic. *Science* 301(5632):508-510.

Ross, D. 005. Ship sources of ambient noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 30(2):257-261.

- Ross, D. G. 1993. On ocean underwater ambient noise. *Acoustics Bulletin* 18:5-8.
- Ross, D. 1976. *Mechanics of Underwater Noise*. Pergamon, Nueva York. 375 p.
- Rubín J.P. 1994. El ictioplacton y el medio marino en los sectores norte y sur del mar de Alborán, en junio de 1992. Informe Técnico del Instituto Español de Oceanografía nº 146, 92 p.
- Rubín, J.P.; Cano, N.; Arrate, P.; García Lafuente, J.; Escáñez, J.; Vargas, M., Alonso-Santos, J.C. y F. Hernández. 1997. El ictioplancton, el mesozooplancton y la hidrología en el Golfo de Cádiz, Estrecho de Gibraltar y sector Noroeste del Mar de Alborán. Informe Técnico 167. Instituto Español de Oceanografía. Madrid.
- Ryan, M.J. 1990. Signal, species and sexual selection. *American Scientist* 78:46-52.
- Ryan, M.J. ; Rand, A.S. y Weigt, L.A. 1996. Alozyme and advertisement call variation in the tungara frog *Physalaemus pustulosus*. *Evolution* 50:2435-2453.
- Ryan, M.J. y A. Keddy-Hector. 1992. Directional patterns of female mate choice and the role of sensory biases. *American Naturalist* 139:S4-S35.
- Ryan, M.J. y E.A. Brenowitz. 1985. The role of body size, phylogeny, and ambient noise in the evolution of bird song. *American Naturalist* 126:87-100.
- Salazar-Sierra, J., De Stephanis, R., Cañadas, A., Verborgh, P., Perez-Gimeno, N., Sagarminaga, R., Guinet, C. 2004 Evidences of exchanges of fin whales through the Strait of Gibraltar. (Abstract) Proceedings of the 18th Annual Conference of the European Cetacean Society. Kolmården, Sweden, 28-31 March.
- Sanpera, C. y A. Aguilar. 1992. Modern whaling off the Iberian Peninsula during the 20th Century. Report of the International Whaling Commission 42:723-730.
- Sergeant, D.E. 1977. Stocks of fin whales, *Balaenoptera physalus* L. in the North Atlantic Ocean. Report of the International Whaling Commission 27:460-473.
- Shannon, C.E. y W. Weaver. 1949. *A Mathematical Model of Communication*. University of Illinois Press, EEUU. 117 pp.
- Siemers, B.M. y H.U. Schnitzler. 2004. Echolocation signals reflect niche differentiation in five sympatric congeneric bat species. *Nature* 429:657-61.
- Sih, A.; Bell, A.M. y J.L. Kerby. 2004. Two stressors are far deadlier than one. *Trends in Ecology and Evolution* 19(6):274-276.
- Simmonds, M.P. y S.J. Isaac. 2007. The impacts of climate change on marine mammals: early signs of significant problems. *Oryx* 41:19-26.
- Širović, A.; Hildebrand, J.A. y S.M. Wiggins. 2007. Blue and fin whale call source levels and propagation range in the Southern Ocean. *Journal of the Acoustical Society of America* 122(2): 1208-1215.

Slabberkoorn, H. y T.B. Smith. 2002. Bird song, ecology and speciation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 357:493-503.

Snijders, T. A. B., y R.J. Bosker. 1999. *Multilevel analysis: An introduction to basic and advanced multilevel modelling*. Sage Publications, London.

Southall, B., Berkson, J., Bowen, D., Brake, R., Eckman, J., Field, J., Gisiner, R., Gregerson, S., Lang, W., Lewandoski, J., Wilson, J., and Winokur, R. 2009. *Addressing the Effects of Human-Generated Sound on Marine Life: An Integrated Research Plan for U.S. federal agencies*. Interagency Task Force on Anthropogenic Sound and the Marine Environment of the Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology. Washington, DC. 79 p.

Southall, B.L.; Bowles, A.E.; Ellison, W.T.; Finneran, J.J.; Gentry, R.L.; Greene Jr, C.R.; Kastak, D.; Ketten, D.R.; Miller, J.H.; Nachtigall, P.E.; Richardson, W.J.; Thomas, J.A. y P.L. Tyack. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals* 33:411-521.

Southall, B.L. 2005. Final report of the 2004 international symposium "Shipping noise and marine mammals: A forum for science, technology, and management." National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, DC. 40 pp.

Stafford, K.M.; Mellinger, D.K.; Moore, S.E.; C.G. Fox. 2007. Seasonal variability and detection range modeling of baleen whale calls in the Gulf of Alaska, 1999–2002. *Journal of the Acoustical Society of America* 122:3378–3390.

Stafford, K.M. y S.E. Moore. 2005. Atypical calling by a blue whale in the Gulf of Alaska. *Journal of the Acoustical Society of America* 117(5):2724–2727.

Stafford, K.M.; Nieukirk, S.L. y C.G. Fox. 1999. An Acoustic Link Between Blue Whales in the Eastern Tropical Pacific and the Northeast Pacific. *Marine Mammal Science* 15:1258-1268.

Stewart, B.S.; Clapham, P.J. y .A. Powell. 2002. *National Audubon Society Guide to Marine Mammals of the World*. National Audubon Society Field Guide Series. Knopf. 528 p.

Steyger, S. 2008. Synergistic Ototoxicity of Noise and Chemical Ototoxins. *Perspectives on Hearing and Hearing Disorders: Research and Diagnostics* 12:48-54

Stone, C.J. 1997. Cetacean observations during seismic surveys in 1996. Rep. No. 228. Joint Nature Conservation Committee, Reino Unido. 67 pp.

Stone, C.J. 1998. Cetacean observations during seismic surveys in 1997. Rep. No. 278. Joint Nature Conservation Committee, Reino Unido. 86 pp.

Stone, C.J. 2003. The effects if seismic activity on marine mammals in UK waters, 1998-2000, Rep. No. 323. Joint Nature Conservation Committee, Reino Unido. 78 pp.

- Stone, C.J y M.L. Tasker. 2006. The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. *Journal of Cetacean Research and Management* 8(3): 247-254.
- Taylor, B.L. 1999. Refining the definition of stocks: A discussion paper. Paper IWC/51/RMP23 presented to the International Whaling Commission Scientific Committee, Grenada. pp. 1-8.
- Taylor, B.L.; Martinez, M.; Gerrodette, T.; Barlow, J. y Y.N. Hrovat. 2007. Lessons from monitoring trends in abundance of marine mammals. *Marine Mammal Science* 23:157-175.
- Tejedor, A. 2008. Medidas para minimizar el riesgo de colisión con cetáceos. Casos de estudio españoles. Informe presentado en la sesión nº 58 de “Marine Environment Protection Committee” de la Organización Marítima Internacional. Londres. Documento nº MEPC 58/INF.15
- Thompson, P.O.; Findley, L.T. y O. Vidal. 1992. 20-Hz Pulses and Other Vocalizations of Fin Whales, *Balaenoptera physalus*, in the Gulf of California, Mexico. *Journal of the Acoustical Society of America* 92:3051-3057.
- Thompson, P.O. y W.A. Friedl. 1982. A Long-term Study of Low Frequency Sounds from Several Species of Whales off Oahu, Hawaii. *Cetology* 45:1-19.
- Thorpe, W.H. 1963. *Learning and instinct in animals*. 2ª Edición. Methuen, Londres. 558 p.
- Tintoré, J.; La Violette, P.E.; Blade, I. y A. Cruzado. 1988. A Study of an Intense Density Front in the Eastern Alboran Sea: The Almería-Oran Front. *Journal of Physical Oceanography* 18:1384-1397.
- Turnpenny, A.W.H. y J.R. Nedwell. 1994. The effects on marine fish, diving mammals and birds of underwater sound generated by seismic surveys. *Fawley Aquatic Research Laboratories Ltd., FCR 089/94: 1-40*.
- Tyack, P. 2008. Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment. *Journal of Mammalogy* 89(3):549-558.
- Tyack, P.; Gordon, J. y D. Thompson. 2004. Controlled exposure experiments to determine the effects of noise on large marine mammals. *Marine Technical Society Journal* 37:41-53.
- Urick, R. J. 1983. *Principles of Underwater Sound*. Ed. Peninsula, Los Altos, California, EEUU. 287p.
- Van Waerebeek, K.; Baker, A.B.; Félix, F.; Gedamke, J.; Iñiguez, M.; Sanino, G.P.; Secchi, E.; Sutaria, D.; Van Helden, A. y Y. Wang. 2007. Vessel collisions with small cetaceans Worldwide and with large whales in the southern hemisphere, an initial assessment. *Lajam* 6(1): 43-69.
- Viale, D. 1985. Cetaceans in the northwestern Mediterranean: their place in the ecosystem. *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 23:491–571.

- Viale, D. 1977. Contribution à l'étude des grands cétacés en Méditerranée et sur la côte atlantique d'Espagne. *Mammalia* 41:197-206.
- Viale, D. y S. Frontier. 1994. Surface megafauna related to western Mediterranean circulation. *Aquatic Living Resources* 7:105–126.
- Waage, J.K. 1979. Reproductive character displacement in *Calyptreryx*. *Evolution* 33:104-116.
- Walmsley, T. 1996 Cetacea survey around Gibraltar. (Abstrac) *European Research on Cetaceans* 10:130.
- Walker, L.W. 1949. Nursery of the gray whales. *Nat Hist* 58(6):248-256.
- Watkins, W.A. 1981. Activities and Underwater Sounds of Fin Whales. *The Scientific Reports of the Whales Research Institute* 33:83-117.
- Watkins W.A.; Daher, M.A.; Reppucci, G.M.; George, J.E.; Martin, D.L.; DiMarzio, N.A. y D. P. Gannon. 2000. Seasonality and distribution of whale calls in the North Pacific. *Oceanography* 13:62-67.
- Watkins, W.A.; Tyack, P.L.; Moore K.E. y J.E. Bird. 1987. The 20-Hz Signals of Finback Whales (*Balaenoptera physalus*). *Journal of the Acoustical Society of America* 82: 1901-1912.
- Weilgart, L. 2007. The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Canadian Journal of Zoology* 85:1091-1116.
- Weilgart, L. y H. Whitehead. 1997. Group-specific dialects and geographical variation in coda repertoire in South Pacific sperm whales. *Behavioral Ecology and Sociobiolog* 40:277-285.
- Weinrich, M.T., 2004. A review of worldwide collisions between whales and fast ferries. Paper SC/56/BC9 presented to the IWC Scientific Committee, July 2004, Sorrento, Italy, 8pp.
- Wells, M.M. y C.S. Henry. 1998. Songs, reproductive isolation and speciation in cryptic species of insects: a case study using green lacewings. En: *Endless Forms: Species and Speciation*. (Eds. Howard, D. y S. Berlocher). Oxford University Press, New York. West-Eberhard. pp. 217-33.
- Weir, C.R. y S.J. Dolman. 2007. Comparative Review of the Regional Marine Mammal Mitigation Guidelines Implemented During Industrial Seismic Surveys, and Guidance Towards a Worldwide Standard. *Journal of International Wildlife Law & Policy* 10(1);1-27.
- Wenz, G.M. 1962. Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *Journal of the Acoustical Society of America* 34(12):1936-1956.

Whitehead, H.; Reeves, R.R. y P.L. Tyack. 2000. Science and the conservation, protection and management of wild cetaceans, pp. 308-332. En *Cetacean Societies* (eds. Mann, J.; Connor, R.C.; Tyack, P.L. y H. Whitehead). University of Chicago Press, EEUU.

Winn, H.E. y L.K. Winn. 1978. The song of the humpback whale, *Megaptera novaeangliae*, in the West Indies. *Marine Biology* 47:92-114.

Woodley, T.H. y D.E. Gaskin. 1996. Environmental characteristics of North Atlantic right and fin whale habitat in the lower Bay of Fundy. Canada. *Canadian Journal of Zoology* 74:75-84.

Wright, T.F., Rodriguez, A.M. y R.C. Fleischer. 2005. Vocal dialects, sex-biased dispersal, and microsatellite population structure in the parrot *Amazona auropalliata*. *Molecular Ecology* 14:1197-1205.

Wright, T.F. y G.S. Wilkinson. 2001. Population genetic structure and vocal dialects in an amazon parrot. *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. B* 268:609-616.

Würsig, B.; Reeves, R.R. y J.G. Ortega-Ortiz. 2002. Global climate change and marine mammals. pp. 589–608. En *Marine mammals: biology and conservation*, Eds. Evans P.G.H. y J.A. Raga. Kluwer Academic/Plenum Publishers, Nueva York. 626 p.

Würsig, B.G., D.W. Weller, A.M. Burdin, S.H. Reeve, A.L Bradford, S.A. Blokhin, and R.L Brownell (Jr.). 1999. Gray whales summering off Sakhalin Island, Far East Russia: July- October 1997. A joint U.S.-Russian scientific investigation. Final Report by Texas A&M University, College Station, TX and Kamchatka Institute of Ecology and Nature Management, Russian Academy of Sciences, Kamchatka, Russia, for Sakhalin Energy Investment Company Limited and Exxon Nefteygaz Limited, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia. 101 pp.

Zanardelli, M.; Panigada, S.; Airoidi, S.; Borsani, J.F.; Jahoda, M.; Notarbartolo di Sciara, G. 1999. Site fidelity, seasonal residence and sex ratio of fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the Ligurian Sea feeding grounds. *European Research on Cetaceans* 12, 124 (abstract from the European Cetacean Society annual conference).

Zanardelli, M., Notarbartolo di Sciara, G. y M. Jahoda. 1992. Photo-identification and behavioural observations of fin whales summering in the Ligurian Sea. (Abstract) *European Research on Cetaceans* 6:86–89 (Proceedings of the 6th Annual Conference of the European Cetacean Society. Roscof, France).