

---

# **Anexo I: Modelización acústica submarina**

**PROYECTO MEDSALT2**

**VERSIÓN v2**

---

<b>1</b>	<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b><u>CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE RUIDO SUBMARINO</u></b>	<b>6</b>
2.1	ENMASCARAMIENTO AUDITIVO	8
2.2	CAMBIOS DE COMPORTAMIENTO	8
2.3	PÉRDIDA TEMPORAL DE AUDICIÓN (TTS) Y PÉRDIDA TOTAL DE AUDICIÓN (PTS)	11
2.4	DAÑOS A TEJIDOS DEL ANIMAL Y MORTALIDAD	12
<b>3</b>	<b><u>CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES</u></b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b><u>MODELADO DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA</u></b>	<b>19</b>
4.1	MARCO GENERAL	19
4.2	TRAYECTORIAS DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBACUÁTICA	19
4.3	MODELOS DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBACUÁTICA	21
4.4	MÉTRICAS DE RUIDO	23
4.4.1	NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA	23
4.4.2	NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA PICO	23
4.4.3	NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA RMS	23
4.4.4	NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA SEL	24
4.4.5	NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA ACUMULADA	24
4.4.6	PONDERACIÓN DE FRECUENCIA PARA MAMÍFEROS MARINOS	24
4.5	BATIMETRÍA	26
4.6	PERFIL DE VELOCIDAD DEL SONIDO	32
4.7	PROPIEDADES DEL AGUA	33
4.7.1	SUPERFICIE MARINA	33
4.7.2	ABSORCIÓN DEL AGUA	33
4.8	PARÁMETROS DEL FONDO MARINO	33
4.9	RUIDO DE FONDO	34
<b>5</b>	<b><u>RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN ACÚSTICA SUBACUÁTICA</u></b>	<b>38</b>



<b>5.1</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>38</b>
<b>5.2</b>	<b>CONSIDERACIONES PREVIAS</b>	<b>40</b>
5.2.1	ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DEL GROSOR DE LA CAPA DE SEDIMENTOS	40
5.2.2	COMPARACIÓN RANGOS EN PERFILES PROFUNDOS Y NO-PROFUNDOS	43
<b>5.3</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>RESUMEN Y CONCLUSIONES</b>	<b>52</b>
<hr/>		
<b>ANEXO A</b>		<b>54</b>
<hr/>		
<b>1.1</b>	<b>ZONA 1</b>	<b>54</b>
1.1.1	FUENTE 1 x 210 CU.IN. + 1 x 60 CU.IN.	54
1.1.2	FUENTE 1 x 60 CU.IN.	57
<b>1.2</b>	<b>ZONA 2</b>	<b>59</b>
1.2.1	FUENTE 1 x 210 CU.IN. + 1 x 60 CU.IN.	59
1.2.2	FUENTE 1 x 60 CU.IN.	62
<b>1.3</b>	<b>ZONA 3 Y ZONA 4</b>	<b>64</b>
1.3.1	FUENTE 4 x 250 CU.IN.	64
1.3.2	FUENTE 2 x 210 CU.IN.	67
<b>ANEXO B</b>		<b>71</b>
<hr/>		
<b>6.1</b>	<b>FUENTE 4x250 CU.IN. RMS</b>	<b>72</b>
<b>6.2</b>	<b>SEL_M</b>	<b>80</b>
<b>6.3</b>	<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>84</b>
<hr/>		

## 1 INTRODUCCIÓN

Este informe ha sido preparado por SUBMON® - *Serveis Ambientals Marins* con el fin de obtener unos valores modelizados del alcance del ruido producido por la campaña sísmica del OGS-Explora durante el proyecto científico internacional "Uncovering the Mediterranean Salt Giant (MEDSALT-2)"

El área de estudio, que se muestra en la Figura 1, se ubica en el mar Balear. En la misma figura se pueden observar los transectos objeto de estudio, a lo largo de los que se utilizará la sísmica submarina, empleando diversas fuentes a lo largo del estudio, compuestas por diferentes combinaciones de cañones de aire (*airguns*) (ver punto 3.)

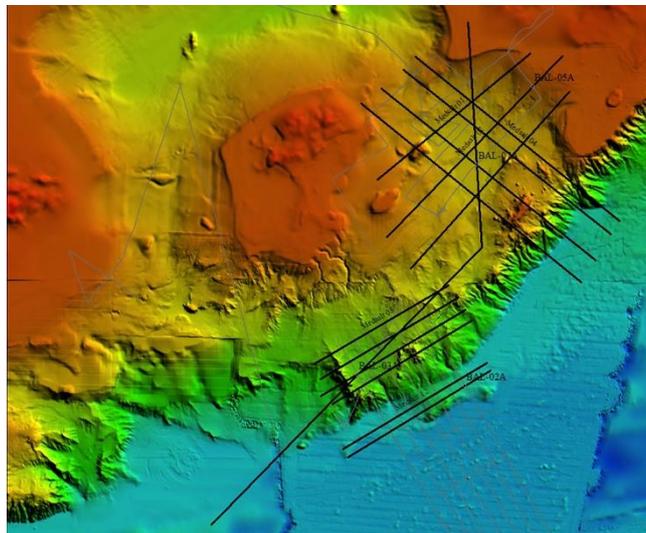


Figura 1 Área de estudio

El propósito del estudio es proporcionar suficientes datos para evaluar los impactos sobre los mamíferos marinos y tortugas debidos a los niveles de ruido producidos por dichas fuentes, y proponer las medidas de mitigación correctas, en caso necesario.

El estudio de impacto ambiental requiere de una modelización acústica de la propagación acústica subacuática, cuya finalidad es predecir el ruido submarino generado por la embarcación y el instrumental técnico propuesta para cada zona.

Siguiendo las recomendaciones de ACCOBAMS (Acuerdo sobre la Conservación de los Cetáceos del Mar Negro, el Mar Mediterráneo y la Zona Atlántica Contigua) y del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) se realiza una modelización que permita evaluar el impacto por zonas, fuentes y especies, así como establecer una zona de exclusión dinámica. Mediante los valores de la predicción en la propagación acústica, se definen unas distancias de seguridad a la fuente de ruido para garantizar el cumplimiento de los límites estándares y los criterios de respuesta de comportamiento de la fauna marina presentes en dicha área.

A continuación, el presente documento se centra en el criterio elegido para evaluar los impactos sobre cetáceos, seguido de una descripción de las fuentes de ruido utilizados en la campaña oceanográfica. En la sección 4, los parámetros del modelo de propagación de ruido bajo el agua se especifican, así como los modelos de propagación que se consideran adecuados. A continuación, en la sección 6, se detalla la metodología para obtener los niveles de presión de ruido, los estudios de sensibilidad y análisis de los resultados para la validación del modelo, y finalmente los resultados de la modelización acústica.

El documento finaliza con la presentación de las conclusiones y un anexo con los gráficos más representativos de la simulación acústica.

## 2 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE RUIDO SUBMARINO

A la hora de evaluar los efectos del ruido submarino sobre el ecosistema y los organismos que lo componen hay que tener en cuenta varios factores: el nivel sonoro sobre el receptor, tanto en valor total (banda ancha) como su distribución en frecuencias, su duración y frecuencia de repetición del sonido, o el ciclo de operación de la fuente sonora.

Los cetáceos son, en general de las especies más sensibles a los efectos del ruido artificial (Richardson *et al.* 1995), que se sabe les produce daños fisiológicos directos según se ha estudiado en diferentes especies y en relación a distintas fuentes de ruido (Nachtigall *et al.* 2004; Finneran *et al.* 2002; Schlundt *et al.* 2000). Además, el ruido artificial produce cambios en el umbral de detección, enmascaramiento de señales acústicas y cambios comportamentales (Richardson *et al.* 1995; Finneran 2000; McCauly *et al.* 2003; Southall 2007; Diederichs *et al.* 2008).

Aunque la mayoría de estudios de impacto de la contaminación acústica en el medio marino se centran en los cetáceos por el elevado uso que éstos hacen de las emisiones sonoras, se ha demostrado que el ruido también afecta a las tortugas marinas, aunque de un modo distinto, debido a las características anatómicas y fisiológicas de estos animales. McCauly *et al.* (2002) estudiaron la respuesta de tortugas verdes (*Chelonia mydas*) y bobas (*Caretta caretta*) en cautividad a pulsos sísmicos experimentales. Los resultados revelaron cambios significativos en el comportamiento de natación de las tortugas y crecientes movimientos de evitación desde niveles de 166 a 175 dB re 1  $\mu$ Pa RMS. Asimismo, cita también el resultado de análisis neurofisiológicos a tortugas bobas que indicaron daños fisiológicos temporales (TTS) hasta 2 semanas después de experimentos en los que los animales fueron sometidos a pulsos sísmicos de 175 a 179 dB re 1  $\mu$ Pa.

Una variable importante al evaluar los efectos del ruido es el umbral de audición de los organismos marinos, ya que hay algunos que aparentemente dependen del nivel de ruido recibido por encima del umbral de audición de la especie o grupo en concreto. Este nivel, llamado nivel percibido o dBht (especie) tiene como base metodológica que no todos los organismos son igualmente sensibles a diferentes niveles y diferentes frecuencias, y por tanto hay que evaluar especie por especie o grupo por grupo (Nedwell *et al.*, 2004). En la Figura 2 se pueden ver los audiogramas de diferentes especies de peces y mamíferos marinos con referencia al ruido ambiente.

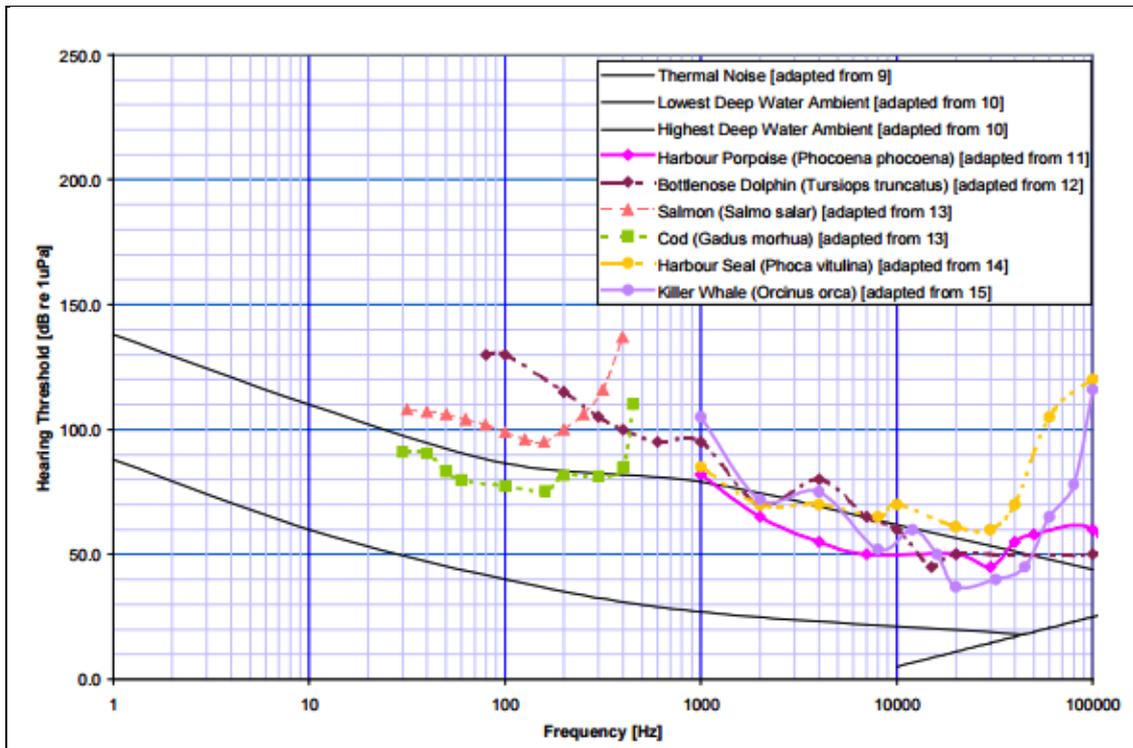


Figura 2 Audiogramas de diferentes especies de peces y mamíferos marinos con referencia al ruido ambiente (Fuente: Nedwell et al., 2004).

También se utiliza la variable de presión sonora recibida, SPL (Sound Pressure Level) a nivel de receptor, en dB re 1  $\mu$ Pa y en general integrado en banda ancha. Este criterio suele ser legislativo en algunos países y se usa sobre todo como umbral para la evaluación de los efectos del ruido en el comportamiento.

Otro criterio de uso común es el de Nivel de Exposición al Sonido (SEL) (Southall et al., 2007), que es una medida de la energía recibida por el receptor que integra intensidad recibida y tiempo. La base es que un mismo tipo de efecto puede ser producido por sonidos de intensidad y duración inversa, es decir alta intensidad en dB y baja duración de exposición o viceversa, concepto usado en higiene y salud industrial para seres humanos.

Los efectos que el ruido puede producir en los organismos marinos se pueden clasificar desde cambios de comportamiento (evitación, alimentación, reproducción, etc.), cambios fisiológicos temporales, enmascaramiento, pérdida temporal de audición (TTS, por sus siglas en inglés "Temporary Threshold Shifts"), daños permanentes a tejidos y/o pérdida permanente de audición (PTS, por sus siglas en inglés "Permanent Threshold Shifts") y mortalidad de los organismos.

## 2.1 ENMASCARAMIENTO AUDITIVO

El enmascaramiento auditivo, también llamada interferencia acústica, es la que mayor área teórica presenta alrededor de la fuente de sonido. Algunas especies utilizan el sonido para comunicarse, navegar o localizarse, encontrar y capturar presas, huir de predadores, etc., por lo que ruidos que tengan la misma potencia y/o firma espectral que los que utilizan estas especies pueden enmascarar los emitidos y percibidos por ellas y dificultarles alguna de estas actividades, con los posibles efectos secundarios de mayor gasto de energía, menor tasa de éxito reproductivo, etc.

El enmascaramiento sucede cuando las frecuencias de la fuente artificial y la natural son muy similares. Los pulsos sísmicos se encuentran generalmente en el ancho de banda de bajas frecuencias, por lo que los cetáceos que más empleen estas frecuencias, y que tengan en ellas una mejor audición, como los misticetos, serán previsiblemente los más afectados por este fenómeno (Gordon et. al 2003).

La mayoría de las vocalizaciones de los misticetos están por debajo 1 kHz y algunos, como la ballena azul (*Balaenoptera musculus*) y el rorcual común (*Balaenoptera physalus*) realizan predominantemente sus "llamadas" en este rango (Clark 1998).

Un reciente estudio realizado por Castellote et. al 2012 proporciona evidencia de que machos de rorcual común modifican las características del canto bajo condiciones de aumento de ruido de fondo, y que bajo condiciones de actividad sísmica pueden abandonar el área por un período prolongado.

Con respecto a los peces, parece que los efectos podrían ser más complejos que en los mamíferos, debido a la posibilidad de que estos organismos cuenten con sistemas de receptores múltiples de presión (línea lateral) (Popper y Fay, 1973). Además, los efectos del sonido antropogénico solo se ha estudiado en un pequeño grupo de peces en comparación con las miles de especies existentes de modo que la extrapolación de los resultados observados para otros grupos debe hacerse con prudencia, sobre todo al ser aplicados a especies distantes taxonómicamente (Popper y Hastings, 2009).

## 2.2 CAMBIOS DE COMPORTAMIENTO

Los cambios de comportamiento en general se consideran el siguiente nivel de efectos de ruido recibido, y consecuentemente la siguiente zona de menor radio de afección desde la fuente. Los cambios de comportamiento incluyen una variedad grande de fenómenos, tales como evitación de la fuente, aumento o disminución de las tasas de respiración, aumento o disminución de la velocidad de nado, cese de sus actividades actuales (alimentación, amamantamiento, cría), efectos indirectos sobre el metabolismo (stress, etc) , mayor gasto energético.

Muchos estudios han medido cambios en el comportamiento de los cetáceos en respuesta a una exposición a una fuente de prospección sísmica, demostrando reacciones muy diversas en diferentes especies, e incluso entre individuos diferentes de una misma especie.

El NMFS (1985) estableció el nivel de 160 dB  $1\mu\text{Pa}$  RMS como la zona de seguridad, en la que se enmarca un comportamiento de huida.

Ridgway (1997a,b; 1999); Schlundt et al. (2000) estudiaron el comportamiento de delfines mulares sometidos a diferentes frecuencias, localizándose los umbrales de cambios en el comportamiento entre 178 y 186 dB, dependiendo de la frecuencia, 175 dB a 75 kHz. Nowacek et al. (2004) constataron cambios en el comportamiento de misticetos, concretamente de ballenas francas del Atlántico (*Eubalaena glacialis*), frente a estímulos sónicos artificiales de frecuencias constantes y moduladas pero éstas ignoraron las reproducciones de sonidos de embarcaciones. Croll et al. (2006) estudió el comportamiento del rorcual común y la ballena azul dentro del área de ensonificación de 140 dB banda ancha, sesgados a bajas frecuencias, durante la transmisión de una fuente potente de sonido de baja frecuencia de la marina norteamericana (SURTASS LFA) y no se observó ningún cambio en el comportamiento estadísticamente significativo, incluidos los cambios en el volumen y ritmo de las vocalizaciones.

Carolyn et al. (2006) realizó un estudio etológico con 1.675 avistamientos de cetáceos realizados en las proximidades de una fuente sísmica. Los resultados demostraron un grado variable de perturbación de los cetáceos, indicando que los pequeños odontocetos (delfines, marsopas, calderones) mostraban una mayor evasión lateral mientras que los misticetos (ballenas) y las orcas mostraban alguna evasión espacial localizada. No se encontraron cambios en la orientación de los cachalotes, aunque el número de observaciones no fue suficiente para realizar un análisis estadístico fiable.

Goold (1996) hizo un seguimiento de la actividad acústica en una población de delfín común (*Delphinus delphis*) antes, durante y después de una prospección sísmica en la costa de Gales y observó que a en un área de 1 kilómetro de radio los delfines se comportaron de manera aversiva frente a las señales de una fuente sísmica.

En el caso de los cachalotes, los resultados de los estudios son controvertidos. Se cree que estos cetáceos tienen una audición de baja frecuencia muy superior a la de los odontocetos de menor tamaño (Gordon et al. 2003), por lo que serían más susceptibles a los pulsos sísmicos. Sin embargo, los estudios muestran diferencias. Mate et al. (1994) (citado en Gordon et al. 2003) registraron una reducción a aproximadamente un tercio en la densidad de cachalotes en un área preferente en el Norte del Golfo de México dos días después del inicio de una prospección sísmica. Cinco días después, la abundancia se había reducido a cero. Por su parte, Bowles et al. (1994) (citado en Gordon et al. 2003) observaron que los cachalotes cesaban de vocalizar durante algunos, pero no todos, los períodos en los que un buque de investigación sísmica fue oído disparando a un rango de 370 km. Sin embargo, y en contraste con estos informes, otras observaciones sugieren que los cachalotes

muestran poca respuesta por los estudios sísmicos y no son excluidos del hábitat por éstos (por ejemplo, Rankin & Evans, 1998; Swift 1998 citados en Gordon et al. 2003).

En tortugas marinas, McCauley et al. (2002) estudiaron las respuestas de tortuga boba (*Caretta caretta*) y tortuga verde (*Chelonia mydas*) mantenidas en cautividad, a pulsos sísmicos experimentales y los resultados mostraron cambios significativos en el comportamiento de natación de las tortugas y crecientes movimientos de probable evitación desde niveles de 166 a 175 dB re 1  $\mu$ Pa RMS. Otros estudios realizados durante campañas sísmicas (Weir, 2007; DeRuiter y Doukara, 2010) también observaron comportamientos evasivos por parte de las tortugas, pero no pudieron afirmar si dichos comportamientos respondían a la mera presencia del buque y la instrumentación largada por popa (Weir, 2007), o a los cañones de aire trabajando a plena potencia, ya que en este último caso si se comprobó una respuesta de sobresalto (inmersión rápida) pero no se pudo distinguir con claridad la fuente de estímulo, ya que no se realizó un control con los cañones de aire apagados (DeRuiter y Doukara, 2010).

En el caso de los peces se ha constatado que el ruido producido por las embarcaciones pesqueras ahuyentan a algunas especies, y que un ruido continuo de construcción submarina de 90 dB a 160 m de la fuente (unos 125 dB a 1 m) produce cierto tipo de reacciones de alejamiento no cuantificadas (Konagaya et al., 1980). Frente a los insuficientes datos de campo para documentar estos efectos, hay numerosos datos que muestran que los peces permanecen en zonas de altos niveles de ruido de fondo. También cabe destacar los resultados obtenidos en estudios de comportamiento realizados a peces enjaulados y a peces en libertad, determinan que los primeros no tienen por qué representar el comportamiento de los segundos, ya que no se puede observar los movimientos de los peces en libertad en sus zonas de alimentación y cría cuando son sometidos a sonidos antropogénicos como los de las prospecciones sísmicas (Popper y Hastings, 2009). Lo que sí se ha visto es que tras el uso de fuentes sísmicas, la tasa de captura de especies demersales, concretamente de abadejo *Melanogrammus aeglefinus* y de bacalao del Atlántico *Gadus morhua*, sufrió un descenso considerable durante 5 días tras el uso de la fuente sísmica, pero pasados estos días la tasa de capturas volvió a sus cuotas habituales (Engås et al., 1993), así como que fundamentalmente en las especies demersales y bentónicas, con poca capacidad de evitación de la perturbación sonora, los niveles y la duración de las exposiciones al sonido puede causar diversos efectos como una disminución o pérdida de la capacidad auditiva, que puede ser recuperada en periodos de tiempo que oscilan desde los pocos minutos hasta varios días, una vez finalizada la exposición (Popper y Hastings, 2009). Por otro lado, Wardle et al. (2001) constataron pequeños cambios de comportamiento en peces e invertebrados en zonas rocosas de Escocia tras la exposición a picos sonoros de 210 dB re 1  $\mu$ Pa a 16 m de la fuente sísmica y de 195 dB re 1  $\mu$ Pa a 109 m, pero estos cambios no fueron en ningún caso permanentes y los animales no sufrieron daños fisiológicos ni abandonaron el área de estudio.

En cuanto a los crustáceos son muy pocos los estudios realizados para observar el impacto del sonido emitido por fuentes sísmicas, en concreto por airguns. Entre 1978 y 2004 se realizó un estudio en Australia sobre la influencia de los airguns en langostas de roca determinándose que éstas causaban un pequeño efecto fisiológico reflejado en

una pequeña reducción de capturas (Parry y Gason 2006). Por otro lado, Legardère (1982) observó que el camarón *Crangon crangon* sufría una disminución del crecimiento y de la tasa de reproducción frente un aumento de 30 dB por encima del ruido ambiental durante tres meses.

### 2.3 PÉRDIDA TEMPORAL DE AUDICIÓN (TTS) Y PÉRDIDA TOTAL DE AUDICIÓN (PTS)

La pérdida temporal de audición (TTS) se presenta ante la exposición de los organismos a niveles altos o continuos de ruido, con una recuperación posterior de la audición en un tiempo variable. Igualmente se puede perder audición por exposición a niveles menores durante un tiempo mayor. La pérdida de audición, temporal o permanente, depende de la intensidad y duración del sonido (el concepto SEL anticipado en párrafos anteriores). Si las pérdidas temporales de audición son repetidas, el nivel de sonido que las produce constante, o se producen niveles puntuales excepcionalmente altos de ruido, la pérdida temporal de audición puede convertirse en permanente (PTS) parcial o total.

Los estudios y experimentos relacionados con la pérdida de audición temporal o permanente se han centrado en odontocetos y peces, debido a la posibilidad de experimentar en cautividad.

En el caso de los mamíferos marinos, por motivos éticos evidentes no se ha sometido a los animales a niveles de ruido que pudieran producir pérdida permanente del oído, por lo que los umbrales son extrapolaciones con los valores detectados en humanos (Southall, 2007).

Cualquier lesión física directa derivada del ruido y la vibración generados por una fuente de sonido está asociada a niveles de presiones o niveles de impulso máximos muy altos. Habitualmente, estos efectos tienen lugar durante operaciones con explosivos o en áreas muy cercanas a operaciones de pilotaje o perforación, donde los pilares se introducen en el lecho marino. Se ha observado que, a niveles de exposición elevados, tales como los típicos de operaciones de explosiones, se producen lesiones físicas cuando los niveles de presión sonora (peak-peak) superan los 220 dB re 1 $\mu$ Pa (Nedwell et al. 2007).

A nivel orientativo, se considera que las presiones sonoras RMS por encima de 180dB re 1 $\mu$ Pa pueden causar trastornos temporales (TTS) en cetáceos y 190 dB re 1 $\mu$ Pa en pinnípedos (NMFS 1985). Sin embargo, el RMS no considera la exposición a niveles sonoros pulsivos, como explosiones o cañones de aire.

Otros modelos han sido empleados para considerar los daños auditivos (NOAA 2006), como es el SEL (Nivel de Energía de exposición). En este caso se consideran que una exposición de 215 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s se encontraría en el umbral de daño auditivo permanente (PTS) y una exposición de 195 re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s se considera como el umbral de las lesiones de trastorno temporal (TTS).

Southall 2007 propone un criterio para cetáceos de nivel de pico de 230 dB re 1 $\mu$ Pa y de 218 dB re 1 $\mu$ Pa para pinnípedos para poder prevenir daños auditivos permanentes (PTS), así como un nivel de exposición sonora (SEL) de 198 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s para cetáceos y 186 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s para pinnípedos.

Para el TTS, Southall 2007 define niveles de pico de 224dB re 1 $\mu$ Pa para cetáceos y 212 dB re 1 $\mu$ Pa para pinnípedos, con el correspondiente nivel de exposición sonora (SEL) de 183 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s para cetáceos y 171 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s para pinnípedos.

En el estudio de Southall et al. 2007 se observaron varios grupos de mamíferos marinos y niveles de tipos de sonido por encima de los cuales hay base científica para pensar que la exposición podría producir lesiones auditivas. Los autores definieron cinco grupos de mamíferos marinos en función de las similitudes de sus capacidades auditivas, y desarrollaron una función generalizada de ponderación de frecuencia (denominada "Ponderación m") para los pinnípedos y los cetáceos a baja, media y alta frecuencia (ver punto 4.4.6 Ponderación M).

En el caso de peces, Nedwell et al. (2004, 2005) en sus experimentos con arenque, lubina, lenguado concluye que, en general para peces especialistas, niveles por debajo de 180 dB en banda ancha por periodos de minutos no producirían efectos.

## 2.4 DAÑOS A TEJIDOS DEL ANIMAL Y MORTALIDAD

Esta zona va más allá de la pérdida de audición. Los daños a tejidos y posible mortalidad posterior están ligados a ondas expansivas a partir de fuentes pulsátiles (no continuas) tales como explosiones o sonares de alta potencia, y han sido reportados sobre todo para peces y mamíferos marinos.

Aunque no existen evidencias de daños en los tejidos corporales de los mamíferos marinos causados por pulsos sísmicos, se ha calculado que exposiciones a sonidos de 500 Hz a niveles de presión sonora (PSL) de 210 dB re 1 $\mu$ Pa podrían causar un aumento de las burbujas de gas en los tejidos sobre-saturados de nitrógeno durante inmersiones largas y profundas, dañando los tejidos. No obstante, este efecto es improbable a niveles de presión sonora por debajo de 190 dB re 1 $\mu$ Pa (Crum & Mayo 1996 citado en Gordon et. al., 2003).

Por otra parte, una serie de incidentes en Grecia, Bahamas, Madeira y las Islas Canarias han demostrado que existía una relación entre el uso de sonares militares y episodios de varamientos masivos de algunos cetáceos, principalmente zifios.

Estudios llevados a cabo sobre calamares gigantes (*Archyteuctis dux*) muestran la existencia de daños fisiológicos directos e indirectos, en ejemplares varados simultáneamente a prospecciones sísmicas (Guerra et al., 2004, 2005). Las necropsias de algunos de los calamares en 2003 no mostraron lesiones externas, sin embargo, todos los calamares tenían daños severos en los oídos y uno sufrió grandes daños extensivos en los órganos internos (Guerra et al. 2004, 2005). La aparición de estos

varamientos durante dos salidas de exploración sísmica sugiere que los factores acústicos podrían haber causado o contribuido a las lesiones en los órganos y tejidos y probablemente causó la muerte de los calamares.

En el caso de peces, Abbott y Bing-Sawyer (2002) investigaron los efectos del sonido en el ciprínido *Orthodon microlepidotus*, y se comprobó que los individuos presentaron daños frente a sonidos con un pico de 193 dB re 1  $\mu$ Pa, pero frente a sonidos por debajo de picos de 183 dB re 1  $\mu$ Pa, no sufrían daño alguno (Popper y Hastings, 2009), lo que en parte confirma los estudios de Nedwell et al. (2004, 2005). Por otro lado, Ruggerone et al. (2008) investigaron el impacto de picos de sonido de 208 dB re 1  $\mu$ Pa y SEL de 179 dB re 1  $\mu$ Pa durante 3-4h sobre el salmón *Oncorhynchus kisutch* y no observaron casos de mortalidad ni de afecciones fisiológicas. Por otro lado, es importante no considerar solo a los peces adultos sino también a la posible afección sobre los huevos y larvas por la exposición a fuentes sísmicas, ya que los adultos poseen la capacidad de desplazarse fuera del área de actuación, mientras que los huevos y larvas carecen de esta capacidad quedando su pequeño movimiento a merced de las corrientes presentes (Popper y Hastings, 2009). Kostyuchenko (1973) estudió los efectos generados por los airguns sobre los huevos de peces y reportó daños en los mismos a una distancia de 20 m de la fuente sísmica. Así mismo, Booman et al. (1996) demostraron una mortalidad significativa en huevos y larvas de *Gadus morhua*, *Pollachius virens* y *Clupea harengus* localizados a 5 m de la fuente, aunque en este caso, al estar los individuos tan cerca de la fuente no se pudo asegurar que los efectos se debieran exclusivamente al sonido sino que también pudieron afectar parámetros como la variación en el movimiento oscilatorio del agua. Otros estudios realizados sobre huevos y larvas de diferentes especies (*Clupea harengus*, *Gadus morhua*, *Pollachius virens* y *Anarhichas minor* Olafsen) mostraron que una exposición a pulsos de sonar con SPL entre 150 y 189 dB re 1  $\mu$ Pa no supusieron cambios en el comportamiento de las larvas ni mortalidad de las mismas pasados 34 días tras la exposición, a excepción de *C. harengus* sometida a una SPL 189 dB re 1  $\mu$ Pa, que mostró una mortalidad del 20-30% (Jørgensen et al., 2005; Kvadsheim y Sevaldsen, 2005). En conclusión, los pocos estudios realizados sobre huevos y larvas en este sentido, son insuficientes para determinar la afección sobre los mismos y su capacidad de supervivencia (Popper y Hastings, 2009).

A continuación se presenta una tabla resumen (Tabla 1) con los valores máximos establecidos por los diferentes autores para diferentes impactos.

DAÑO	RMS	SEL	Niveles pico	Autor	ESPECIE
TTS	180dB re 1 $\mu$ Pa			NMFS 1985	CETÁCEOS
TTS	190 dB re 1 $\mu$ Pa			NMFS 1985	PIÍPEDOS
PTS		215 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s		NOAA 2006	CETÁCEOS
TTS		195 re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s		NOAA 2006	CETÁCEOS
PTS		198 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s M-Weighted	230 dB re 1 $\mu$ Pa	Southall 2007	CETÁCEOS
PTS		186 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s M-Weighted	218 dB re 1 $\mu$ Pa	Southall 2007	PINÍPEDOS
TTS		183 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s M-Weighted	224dB re 1 $\mu$ Pa	Southall 2007	CETÁCEOS
TTS		171 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s M-Weighted	212 dB re 1 $\mu$ Pa	Southall 2007	PINÍPEDOS
TTS	175-179 dB re 1 $\mu$ Pa			McCauley <i>et al.</i> (2002)	TORTUGAS
Cambio en el comportamiento	160 dB re 1 $\mu$ Pa			NMFS (1985)	CETÁCEOS
Cambio en el comportamiento	166-175 dB re 1 $\mu$ Pa			McCauley <i>et al.</i> (2002)	TORTUGAS

Tabla 1 Tabla resumen de las diferentes acuerdos y estudio sobre impactos

### 3 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES

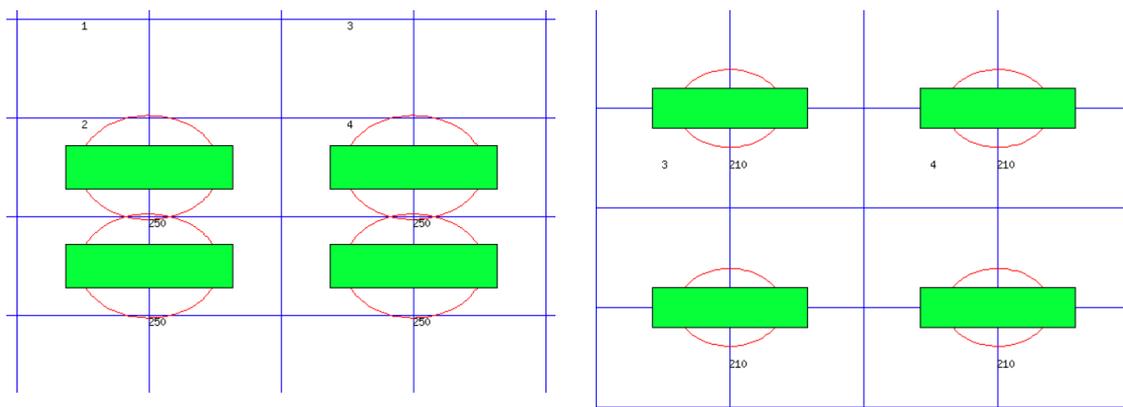
En el presente estudio, se han tenido en cuenta cuatro fuentes ruido en base a arrays. Los dispositivos utilizados como fuentes sonoras crean una burbuja de aire en el agua que se comprime y puede oscilar varias veces. Ello genera una señal acústica que es una secuencia de pulsos positivos y negativos proporcional a la frecuencia de cambio del volumen de las burbujas de aire.

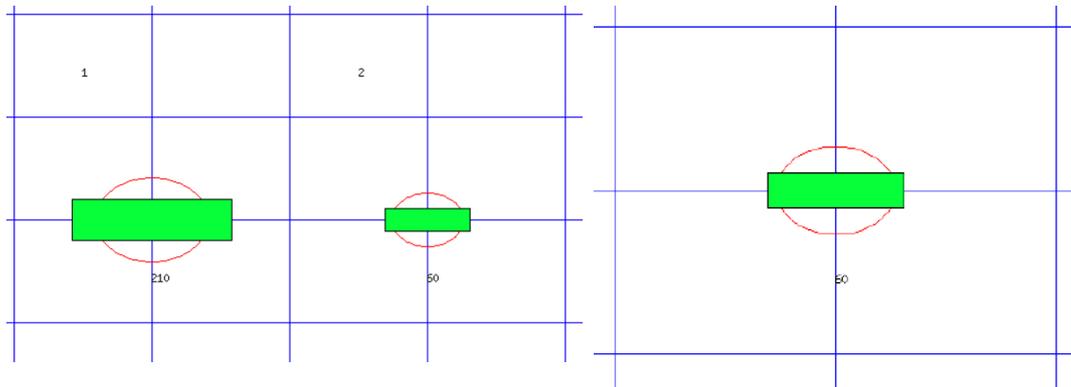
Cada fuente presenta una distribución espectral y valores RMS Y  $L_{zero-peak}$  determinados, y cada una se emplaza en una profundidad distinta: 1.5 m , 2 m, 4 m y 6 m.

La Tabla 2 presenta el volumen total y el número de *airguns* de cada fuente de ruido, y las Figura 4 (a), (b), (c) y (d) las correspondientes geometrías en planta de los *arrays*.

Fuente	Descripción
<b>4 x 250 cu.in.</b>	Volume 1000 cu.in. 4 airguns
<b>4 x 210 cu.in.</b>	Volume 840 cu.in. 4 airguns
<b>1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in.</b>	Volume 210 cu.in. 1 airgun + Volume 60 cu.in. 1 airgun
<b>1 x 60 cu.in.</b>	Volume 60 cu.in. 1 airgun

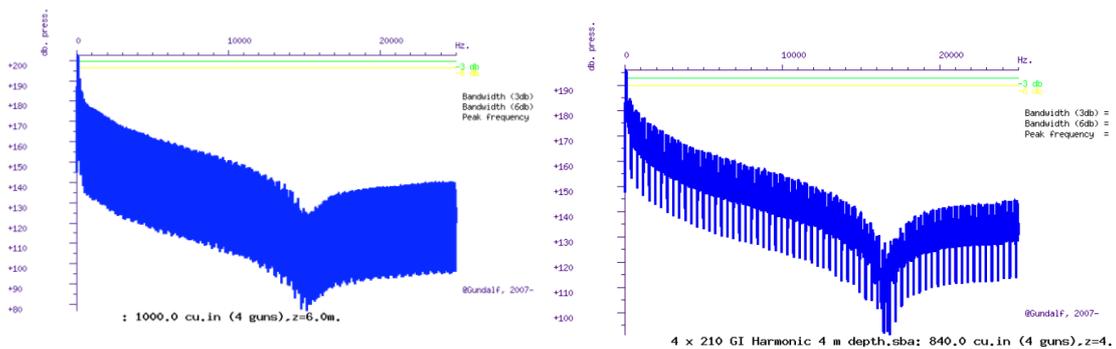
Tabla 2 Descripción de las fuentes de ruido

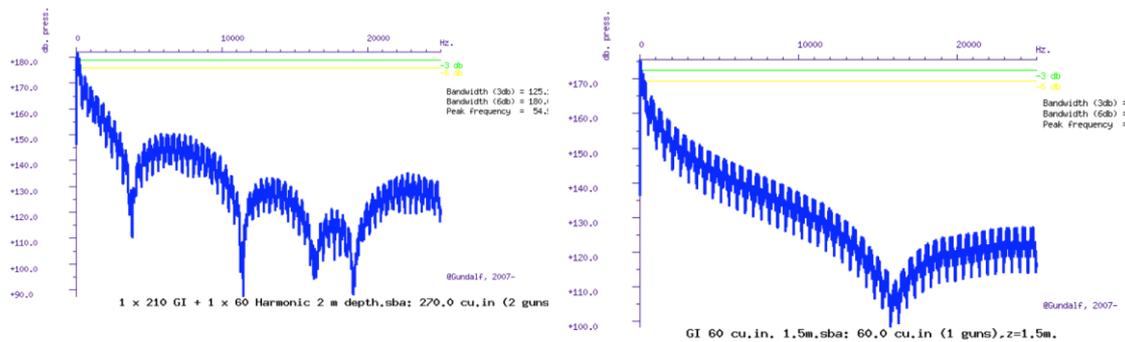




**Figura 3 Geometría de los arrays.** Cada cuadrícula tiene la distancia de 1 m, y la dirección del array es de izquierda a derecha. (a). Superior Izquierda: Fuente de 4 x 250 cu.in. cu.in. (b). Superior Derecha: Fuente de 4 x 210 cu.in. (c) Inferior izquierda: Fuente de 1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in. (d) Inferior derecha: Fuente de 1 x 60 cu.in.

Para realizar la modelización acústica se han tomado los datos de las fuentes acústicas proporcionadas por el Instituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, cuya signatura acústica viene caracterizada mediante la modelización Gundalf (Laws, Hatton i Haarsten) (Anexo 5). La Figura 4 muestra las densidades espectrales de potencia de los *airguns*, y la Tabla 3 los correspondientes valores globales RMS y Zero-Peak proporcionados por dicha modelización.





**Figura 4** Densidades espectrales de potencia de las fuentes de ruido (a). Superior Izquierda: Fuente de 4 x 250 cu.in. cu.in. (b). Superior Derecha: Fuente de 4 x 210 cu.in. (c) Inferior izquierda: Fuente de 1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in. (d) Inferior derecha: Fuente de 1 x 60 cu.in.

Fuente	Profundidad (m)	RMS (dB)	L <sub>Zero-Peak</sub> ( dB)
<b>4 x 250 cu.in.</b>	6	228	242
<b>4 x 210 cu.in.</b>	4	222	246
<b>1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in.</b>	2	212	239
<b>1 x 60 cu.in.</b>	1,5	205	233

**Tabla 3** Relación de las fuentes con las profundidades, valores RMS y  $L_{zero-peak}$

De la observación de las figuras anteriores, se extrae que las fuentes de ruido radian en un rango de frecuencias predominantemente bajas y su distribución espectral disminuye drásticamente con el incremento de la frecuencia. Atendiendo que la absorción acústica también se incrementa con la frecuencia, y que los mamíferos marinos residentes en esta región pueden sufrir un impacto generado por el ruido principalmente a frecuencias superiores a 20 Hz [Clarck 1998], se considera un ancho de banda de 10 Hz a 1000 Hz.

En el ANEXO B se presenta el estudio realizado para la nula afectación sobre los rangos de exclusión que aportan las bandas frecuenciales superiores a 500 Hz.

A partir de las densidades espectrales de potencia de 0 a 1000 Hz, (@ 1 m de la fuente de ruido), ver Figura 5, se han obtenido los niveles de presión sonora en bandas de octava. En la Tabla 4 se resumen todos los valores sin ponderación en frecuencia a las frecuencias centrales de octava de 16 Hz a 1 KHz.

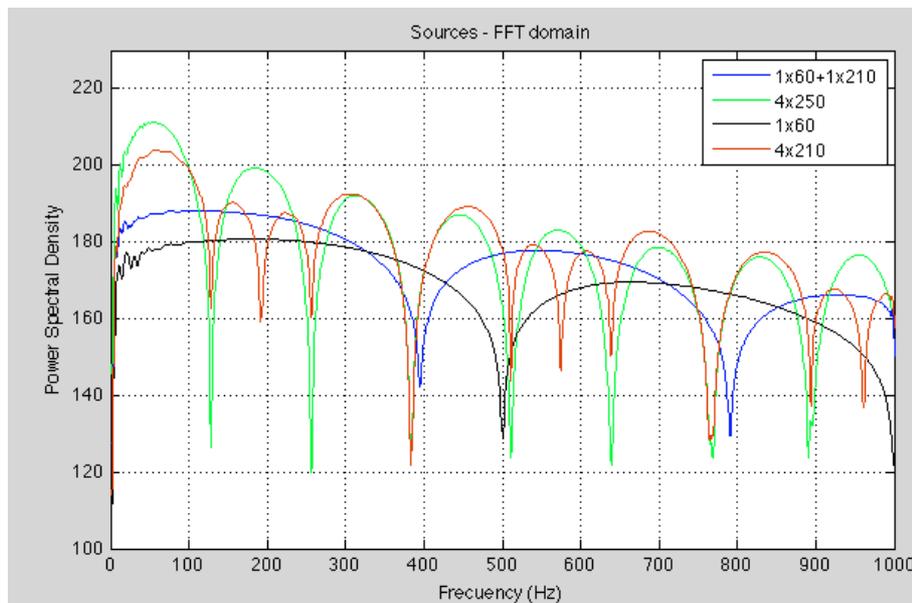


Figura 5 Comparación entre las densidades espectrales de potencia de las 4 fuentes de ruido (0-1000 Hz)

Frecuencia central de octava (Hz)	Niveles espectrales (dB)			
	4 x 250 cu.in.	4 x 220 cu.in.	1 x 210 xu.in + 1 x 60 cu.in.	1 x 60 cu.in.
16	212	204	194	185
31.5	222	214	199	189
63	226	220	204	195
125	216	214	207	200
250	216	211	207	202
500	206	208	200	195
1000	197	197	189	189

Tabla 4 Niveles RMS de las fuentes de ruido en bandas de octava

## 4 MODELADO DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA

### 4.1 MARCO GENERAL

El modelo de propagación acústica subacuática se utiliza para estimar el campo sonoro que generan las diferentes fuentes sonoras descritas en el apartado anterior. El objetivo de la modelación es determinar las distancias de impacto potencial de las fuentes sonoras en el área de vida marina estudiada. Para ello, se calcula la pérdida de transmisión de acústica subacuática y se aplica el nivel de fuente sonora obtenido con la modelización obtenida con el software Gundalf 8.1. Sin embargo, la pérdida de transmisión de acústica subacuática es una función de la profundidad, el rango, el ángulo de la fuente y las propiedades ambientales.

La distribución geométrica idealizada del sonido solo puede esperarse si la velocidad de propagación es constante, lo que no sucede en el entorno submarino, debido a que la temperatura varía con la profundidad. Además de los efectos de la velocidad del sonido, el volumen del océano es absorbente y produce una atenuación que se incrementa con la frecuencia. Asimismo, los contornos del medio (fondo y superficie oceánicos) afectan la intensidad del sonido debido a las reflexiones parciales de la energía acústica incidente.

Debido a la mencionada dependencia ambiental en la pérdida de transmisión acústica, la precisión del modelo depende de la precisión de los datos disponibles, como las condiciones de la superficie del mar, la profundidad de la columna de agua y el tipo de fondo marino. Nunca puede obtenerse la información exacta para todas las situaciones de modelado posibles, en especial para los transectos que abarcan centenares de kilómetros. En estos casos, es posible que el modelo de distribución geométrica no sea el más adecuado, y será preciso trabajar con algunas hipótesis sobre las medias de perfiles sonoros, las condiciones del fondo marino, etc.

Todos los métodos y las hipótesis utilizados en el presente informe se describen en este apartado. En primer lugar, se detallan los modelos y las vías de propagación acústica subacuática. A continuación, se proporciona una breve descripción de las métricas de ruido y de la ponderación utilizadas en los resultados. Por último, se presenta el entorno estudiado junto con las correspondientes hipótesis y consideraciones.

En este estudio se ha utilizado la interficie gráfica AcTup v2.2L (Acoustic Toolbox User Interface) que implementa los diferentes modelos de propagación considerados. Además, también se han simulado diferentes escenarios de batimetrías mediante el programa dBSEA® 1.3.8, ya que permite obtener análisis en 3D del terreno (n x 2D).

### 4.2 TRAYECTORIAS DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBACUÁTICA

Según la clasificación de (Dunn), la propagación acústica en el océano puede dividirse en tres clases: propagación a distancias cortas, propagación en aguas profundas y propagación en aguas poco profundas.

La propagación a distancias cortas se produce a consecuencia de la distribución geométrica del sonido. En ausencia de obstáculos, el nivel de presión acústica desde una fuente puntual decae con una relación de  $1/r^2$  (donde  $r$  es la distancia a la fuente de ruido). En este caso, las fuentes de ruido utilizadas se colocan muy cerca de la superficie, de modo que habrá dos trayectorias principales: la trayectoria directa y la trayectoria reflejada en superficie. La interferencia de estas dos trayectorias genera una distribución espacial característica del sonido, conocida como patrón Espejo Lloyd, que se ilustra en la Figura 6 (Dunn).

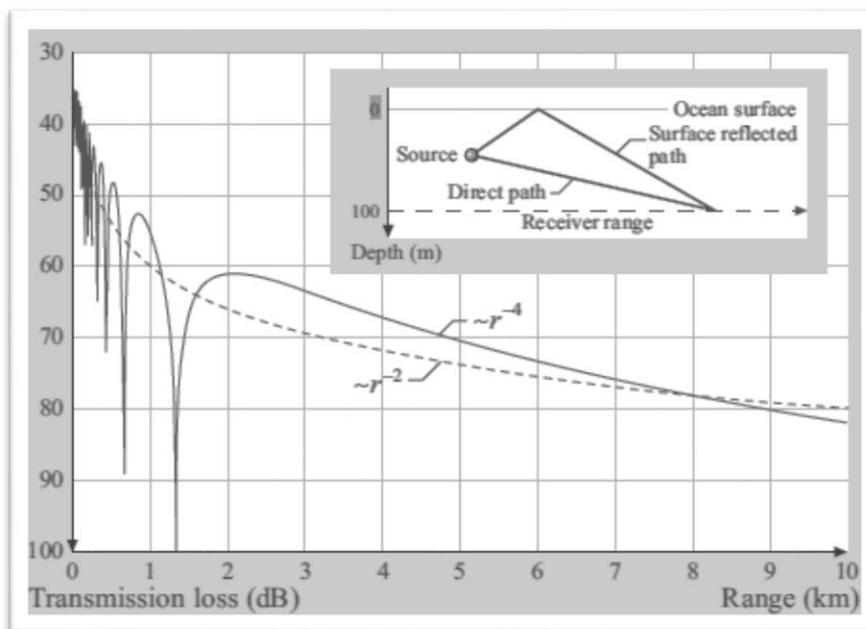


Figura 6 Efecto Espejo Lloyd

En las distancias largas, la velocidad es un parámetro determinante para la trayectoria de propagación. La reflexión que se produce a causa de la estratificación de la velocidad del sonido en el mar obedece a la ley de Snell:

$$\frac{\cos \theta(z)}{c(z)} = \text{constant}, \quad (1)$$

donde  $c(z)$  es la velocidad del sonido a la profundidad  $z$  y  $\theta(z)$  es el ángulo de propagación de la fuente sonora respecto de la horizontal.

La ley de Snell implica que la trayectoria de propagación acústica se curva hacia regiones donde la velocidad del sonido es baja. Esto es particularmente importante en las regiones en las que hay un mínimo local de velocidad del sonido. Si este mínimo está alejado de la superficie, el sonido puede propagarse a distancias de miles de kilómetros. Esta trayectoria de propagación se conoce como canal sonoro profundo.

Si se considera el fondo del océano como una superficie plana idealizada, se puede modelizar el océano como una guía de ondas acústicas. Esto es más evidente en aguas poco profundas, en las que la distancia entre la superficie y el fondo marino es de unos pocos cientos de metros. En este caso, las trayectorias de los rayos en el ángulo de incidencia crítico de  $2\theta_c$  se propagarán con una pérdida de distribución cuasi cilíndrica y el nivel de presión acústica decaerá en una ratio de  $1/\sqrt{r}$ .

### 4.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBACUÁTICA

Existen varios métodos numéricos para resolver el problema de la propagación acústica subacuática. Todos ellos se basan en modelos físicos y matemáticos, como la teoría de rayos, la ecuación parabólica y los modos normales, entre otros. Sin embargo, la aplicabilidad de todos estos modelos físicos y matemáticos presenta algunas limitaciones inherentes, que se manifiestan como restricciones en el rango de frecuencias o en la especificación de la geometría del problema.

El presente estudio se centra en los métodos que dependen del rango. La dependencia de rango indica que algunas propiedades del medio oceánico pueden variar en función del rango y de la profundidad (2D) y, en algunos casos, también en función del azimut (3D).

En la modelación utilizada en el presente estudio, se han considerado dos métodos distintos en función de la frecuencia de aplicación. Se ha optado por un modelo de ecuación parabólica para las frecuencias bajas, mientras que para las frecuencias altas se ha aplicado un método de rayos

#### MÉTODO DE LA ECUACIÓN PARABÓLICA (RAM)

En el rango de frecuencias bajas, se ha utilizado el método RAM (*Range-dependent Acoustic Model*), que se basa en la solución *Split-step Padé* y que permite utilizar un fondo marino con variaciones de profundidad. Este algoritmo es uno de los algoritmos más eficientes para resolver ecuaciones parabólicas.

Lejos de la fuente, la presión  $p$  cumple la siguiente ecuación del campo lejano:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k^2 p = 0. \quad (2)$$

El método de ecuación parabólica se basa en la hipótesis de que la energía emitida domina la energía retrodispersada. Partiendo de este supuesto, se obtiene la ecuación de onda emitida:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = ik_0(1 + X)^{1/2}p, \quad (3)$$

donde

$$X = k_0^{-2} \left( \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 - k_0^2 \right). \quad (4)$$

El método RAM se basa en una aproximación de la función racional de la solución de esta ecuación. Para consultar una completa descripción de este método, véase (Collins)

#### MODELO GAUSSIANO DE TRAZADO DE HACES (BELLHOP)

Bellhop es un modelo de trazado de haces acústicos que se utiliza para predecir los campos de presión acústica en entornos marinos. La teoría de rayos se basa en aplicar una solución de onda plana a la ecuación de Helmholtz y separarla en términos reales e imaginarios:

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0. \quad (5)$$

Esta aproximación solo puede realizarse si la amplitud varía más lentamente con la posición que la fase (aproximación acústica geométrica). En el presente estudio, la aproximación acústica geométrica establece que la frecuencia más baja aplicable es

$$f > 10 \frac{c}{H}, \quad (6)$$

donde  $c$  es la velocidad del sonido y  $H$  la profundidad del agua del mar.

Según esta aproximación, la ecuación de Helmholtz se reduce a

$$[\nabla P]^2 = k^2, \quad (7)$$

que se conoce como la ecuación de la *eikonal*.

El método Bellhop es un modelo gaussiano de trazado de haces acústicos que asocia un haz a cada rayo con un perfil gaussiano de intensidades normal al rayo. Esta

técnica evita que se produzcan ciertos artefactos de trazado de rayos. Para obtener más información sobre este método y su implementación, véase (Porter).

En el presente estudio, la frecuencia mínima usada en el método Bellhop es la de 250 Hz, lo que permite modelar correctamente transectos con poca profundidad.

## 4.4 MÉTRICAS DE RUIDO

### 4.4.1 NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA

El Nivel de Presión Acústica (SPL) es una medida logarítmica de la presión sonora relativa a un valor de referencia  $P_{ref}$ .

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_{ref}} \right), \quad (8)$$

donde  $P$  es la presión en Pascales y  $P_{ref}$  es una presión de referencia. En acústica subacuática,  $P_{ref} = 1 \mu Pa$ .

### 4.4.2 NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA PICO

Para los pulsos de presión transitorios, el nivel de presión acústica pico es el valor absoluto máximo de la presión acústica instantánea registrada en un determinado intervalo de tiempo.

$$L_{zero-peak} = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{peak}}{P_{ref}} \right). \quad (9)$$

Cuando las partes positiva y negativa del pulso son aproximadamente iguales a la forma de onda, el nivel pico a pico es igual al doble del nivel de pico o 6 dB superior.

### 4.4.3 NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA RMS

El Nivel de Presión Acústica RMS (Raíz Cuadrática Media), que se utiliza para cuantificar el ruido de naturaleza continua, es el nivel de presión cuadrática media medido durante un intervalo de tiempo  $T$ , y representa una medición del nivel medio de presión acústica en el tiempo.

Cuando hay un ruido transitorio, el periodo de tiempo durante el cual se calcula la media de las mediciones debe estar referenciado, ya que el valor RMS variará con el periodo de tiempo de cálculo de la media. En cambio, cuando el ruido es continuo, el

periodo de tiempo durante el cual se realizan las mediciones no es relevante, puesto que la medición dará siempre el mismo resultado.

$$L_{RMS} = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{RMS}}{P_{ref}} \right). \quad (10)$$

#### 4.4.4 NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA SEL

El Nivel de Exposición Sonora se utiliza para superar los problemas asociados con el periodo de tiempo durante el cual se calcula el Nivel medio de Presión Acústica. El Nivel de Exposición Sonora es la integral temporal del cuadrado de la presión acústica durante un periodo de tiempo lo suficientemente prolongado para que incluya el pulso de presión completo.

$$SEL = 10 \log_{10} \int_0^T \frac{p^2(t) dt}{P_{ref}^2}. \quad (11)$$

#### 4.4.5 NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA ACUMULADA

El Nivel de Exposición Sonora Acumulada de varios eventos puede calcularse sumando el Nivel de Exposición Sonora de una serie de eventos individuales.

#### 4.4.6 PONDERACIÓN DE FRECUENCIA PARA MAMÍFEROS MARINOS

Southall y sus colaboradores produjeron una revisión exhaustiva de los impactos del ruido submarino sobre los mamíferos marinos y los criterios propuestos para la prevención de lesiones basadas en niveles de pico (Peak) y niveles de exposición sonora (SEL). El criterio del nivel de exposición sonora se puede aplicar a un único pulso o al acumulado a partir de múltiples pulsos.

Para tener en cuenta la gran dependencia de la frecuencia en la respuesta auditiva de las especies marinas, funciones de frecuencia ponderada M (M-Weighting) para baja, media y alta frecuencia auditiva fueron propuestas para cetáceos y pinnípedos.

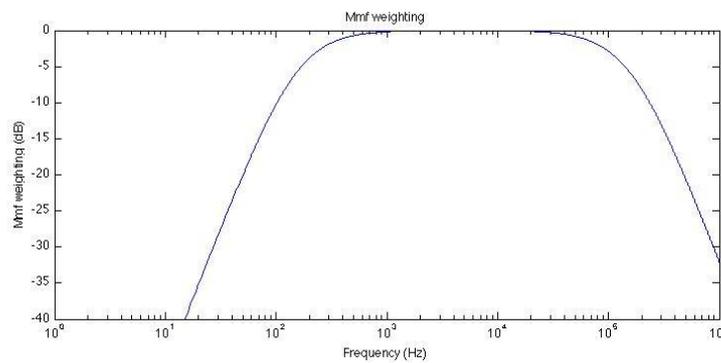
Las especies de mamíferos marinos fueron asignadas de uno a cinco grupos funcionales de frecuencia auditiva: cetáceos de baja frecuencia ( $M_{lf}$ ), cetáceos de

media frecuencia ( $M_{mf}$ ), cetáceos de alta frecuencia ( $M_{hf}$ ), pínipedos en el agua ( $M_{pw}$ ) y pínipedos fuera del agua ( $M_{pA}$ )

El estudio propone un criterio de nivel de pico de 230 dB re. 1 micropascal para cetáceos y 218 dB re. 1 micropascal para pinnípedos, para evitar lesiones auditivas y una exposición de nivel de sonido (SEL) de 198 dB re.1 micropascal M-ponderado para los cetáceos y 186 dB re.1 micropascal M-ponderado para los pinnípedos.

El TTS se define a un nivel de pico de 224 dB re. 1 micropascal para los cetáceos, y 212 dB re. 1 micropascal para los pinnípedos; y una exposición correspondiente nivel de sonido (SEL) de 183 dB re.1 micropascal M-ponderado para los cetáceos, y 171 dB re.1 micropascal M-ponderado para los pinnípedos.

Miller and Southall (Southall i al.) describen los filtros de ponderación-M para tener en cuenta los diferentes rangos de sensibilidad de cada uno de los cinco grupos. En el caso estudiado, y según los hábitats de los mamíferos marinos, la curva de ponderación-M que se aplica se denomina curva de ponderación-Mmf, representada en la Figura 7



**Figura 7 Función de ponderación-M para los cetáceos a frecuencia media**

Al aplicar la ponderación-Mmf a todas las fuentes, se obtiene la distribución espectral ponderada. Habida cuenta de que la principal información de las firmas de las fuentes se concentra en un rango de frecuencias muy bajas, la ponderación tiene un efecto notorio en la distribución espectral-

En la Tabla 5 se muestran los valores RMS en bandas de octava de las fuente acústicas en ponderación en frecuencia.

Frecuencia central de octava (Hz)	Niveles espectrales (dB con ponderación en frecuencia)			
	4 x 250 cu.in.	4 x 210 cu.in.	1 x 210 xu.in + 1 x 60 cu.in.	1 x 60 cu.in.
16	175	167	157	148
31.5	197	189	173	164

63	210	204	189	180
125	208	205	200	193
250	212	209	204	199
500	205	207	200	194
1000	197	197	189	189

Tabla 5 Niveles RMS de las fuentes de ruido en bandas de octava con ponderación en frecuencia Mmf

#### 4.5 BATIMETRÍA

Los modelos de propagación acústica subacuática para largas distancias no pueden ignorar las variaciones horizontales de la batimetría. En estos casos, es preciso contar con una fuente fiable de información para obtener los resultados con la precisión suficiente.

En este estudio, se han considerado todos los transectos representados en Figura 1. Las posiciones de cada transecto se han obtenido a partir de las coordenadas proporcionadas por Instituto Nazionale di ricerca Geofisica. La batimetría de cada uno de ellos se ha extraído utilizando geocontext (geocontext), una aplicación que permite crear perfiles topográficos a partir de datos GPS importados.

Tal y como queda documentado en la sección 5.2, se ha realizado un análisis de sensibilidad para determinar la importancia de la geometría y las propiedades del fondo marino. A partir de los resultados de este análisis, así como de la aplicación de las distintas fuentes en los distintos transectos, se ha dividido el área de estudio en las 4 zonas mostradas en la Figura 8:

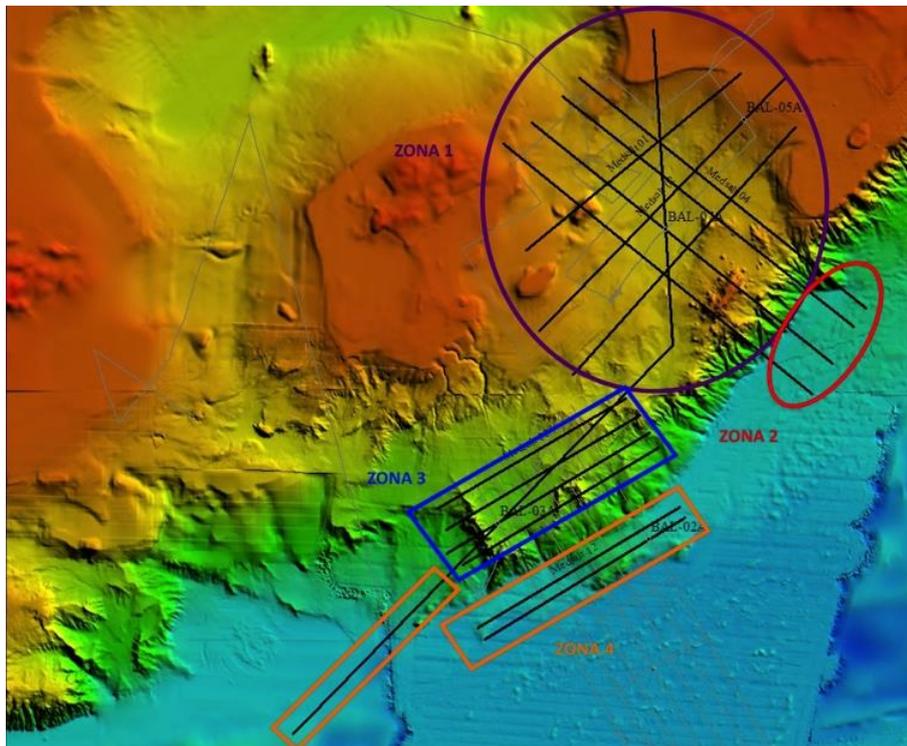


Figura 8 Zonas consideradas en el área de estudio

La región analizada comprende 13 transectos de alrededor de un centenar de kilómetros cada uno y un transecto de 250 kilómetros. Debido a la imposibilidad de modelar la propagación en toda el área, se identifican una serie de batimetrías representativas para cada zona bajo estudio.

El objetivo es obtener un número mínimo de batimetrías que sean suficientemente representativas de los 14 transectos incluidos en el área de estudio. En primer lugar se consideran dos tipos de profundidades:

- DEEP: más de 1000 metros de profundidad
- SHALLOW : menos de 1000 metros de profundidad

A continuación, para cada profundidad se consideran 5 tipos de perfiles:

- A: Perfil tipo pico
- D (Down): Pendiente negativa
- F (Flat): Llano
- U (Up): Pendiente positiva
- V: Perfil tipo valle

De la combinación de profundidades y perfiles, resultan un total de 10 batimetrías representativas, mostradas todas ellas en la Figura 9:

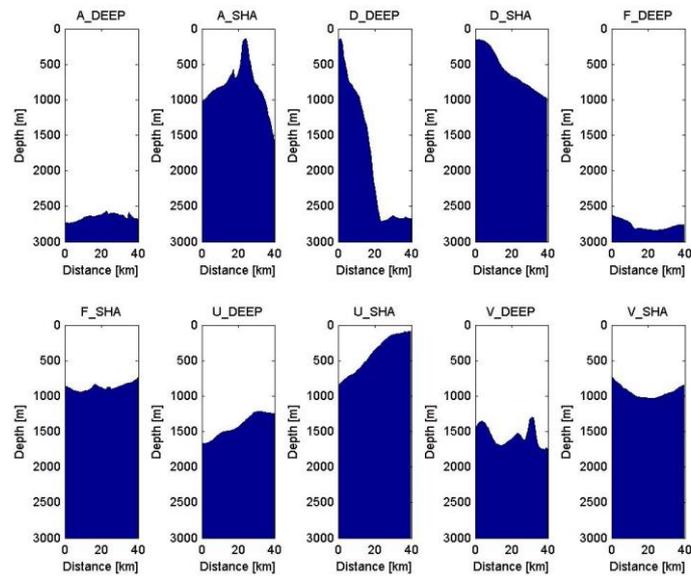


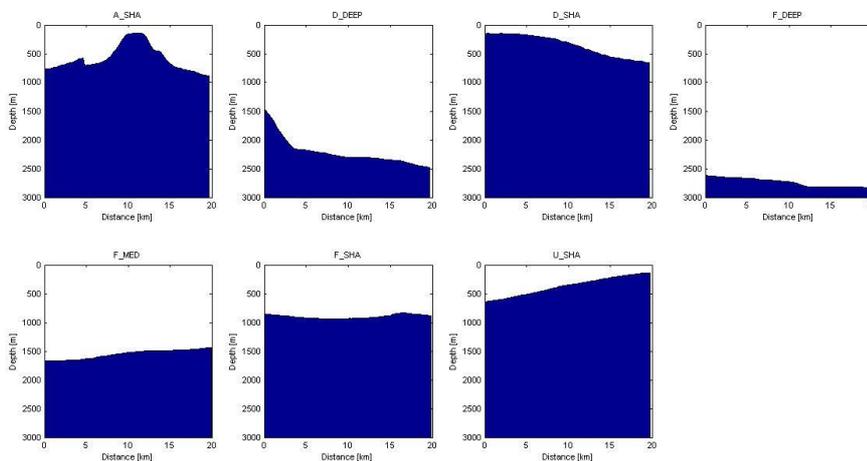
Figura 9 Batimetrías representativas iniciales

Tras diversas modelizaciones en las batimetrías representativas iniciales, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Hay varias tipologías con resultados muy parecidos (A\_DEEP y F\_DEEP, V\_SHA y F\_SHA, etc.) y se puede reducir el número de casos a estudiar. Como ejemplo, observar la similitud entre los rangos obtenidos en el estudio de sensibilidad (ver Tabla 10) para A\_DEEP y F\_DEEP.
- Se prefiere crear otra clasificación de batimetría (MED) para rangos entre 1000 y 2000m de profundidad, de tal forma que las batimetrías U\_DEEP y V\_DEEP quedan reemplazadas por F\_MED.
- La batimetría D\_DEEP escogida inicialmente no es apropiada porque empieza en profundidades muy someras y no permite la propagación del sonido para distancias profundas. No se puede considerar como una batimetría representativa de las zonas profundas. Este comportamiento se observa en la tabla de rangos obtenida durante el estudio de sensibilidad realizado previamente (ver Tabla 10). En esta tabla se puede observar que la batimetría D\_DEEP no tiene radio de exclusión para profundidades de 600 y 1500m. Así pues, se escoge otro tramo de transecto como batimetría representativa D\_DEEP.
- Los radios obtenidos en el estudio de sensibilidad son muy inferiores a 40 km. Así pues, para minimizar el tiempo de computación, se consideran batimetrías de únicamente 20 km de longitud.

Concluyendo, las batimetrías finalmente escogidas como batimetrías representativas para el estudio son las siguientes, y se muestran en la Figura 10:

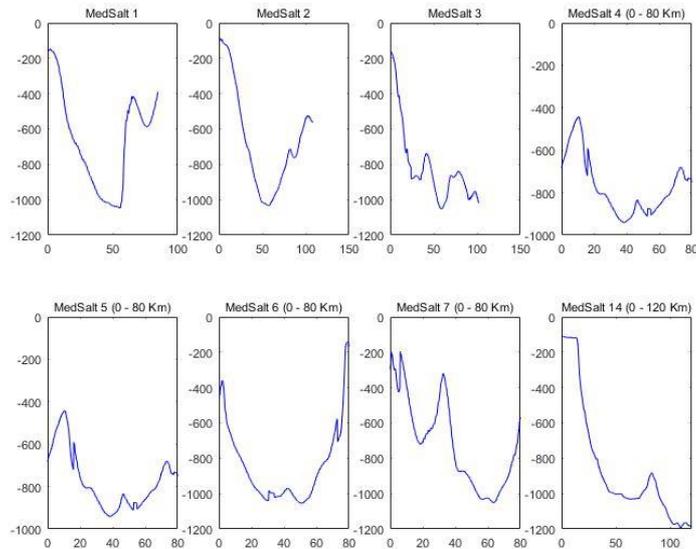
- DEEP (> 1000m)
  - D (Down): Pendiente negativa
  - F (Flat): Llano
- MEED (1000-2000m)
  - F (Flat): Llano
- SHA (<1000m)
  - F (Flat): Llano
  - D (Down): Pendiente negativa
  - A: Perfil tipo pico
  - U (Up): Pendiente positiva



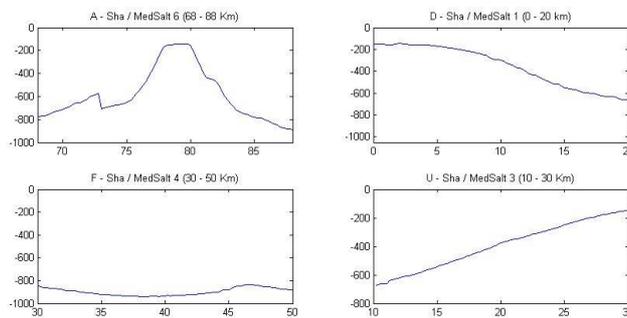
**Figura 10 Batimetrías representativas finales**

Una vez obtenidas las batimetrías representativas, se procede a identificar los transectos de cada zona con sus batimetrías representativas. Para ilustrar mejor este procedimiento, se detalla la identificación realizada en la Zona 1.

Todos los transectos contenidos en la Zona 1 presentan profundidades menores o iguales a 1000 metros (ver Figura 11). En este caso, las batimetrías representativas solo son las correspondientes a las zonas poco profundas (shallow) (ver Figura 12). Así pues, el modelo de propagación acústica se aplica sobre este set reducido de batimetrías y se considera que los resultados obtenidos son representativos del conjunto de transectos que conforman la Zona 1.



**Figura 11 Batimetrías de los transectos de la Zona 1**



**Figura 12 Batimetrías representativas para aguas poco profundas (SHALLOW). Estas batimetrías se han escogido como tramos representativos de la Zona 1.**

Del mismo modo se obtienen las batimetrías representativas para cada zona considerada. En la Tabla 6 se muestran las batimetrías representativas identificadas para cada transecto y cada zona. Hay que tener en cuenta que algunos transectos presentan tramos que encajan con más de una batimetría representativa, en cuyo caso se han considerado todas las posibles batimetrías representativas de cada tramo.

ZONA	Batimetría Id.	Profundidad mínima (m)	Profundidad máxima (m)	Tipos de batimetría
<b>ZONA 1</b>	MedSalt1	150	1050	D_SHA A_SHA

	MedSalt2	150	1000	D_SHA U_SHA
	MedSalt3	150	1000	D_SHA F_SHA
	MedSalt4 (0-80Km)	400	900	A_SHA F_SHA
	MedSalt5 (0-80 Km)	400	900	A_SHA F_SHA
	MedSalt6 (0-80 Km)	400	900	D_SHA U_SHA
	MedSalt7 (0-80 Km)	400	900	D_SHA A_SHA U_SHA
	MedSalt14(0-120 Km)	115	1100	D_SHA A_SHA
<b>ZONA 2</b>	MedSalt4(80-110 Km)	1000	2700	F_MED D_DEEP
	MedSalt5(80-110 Km)	1000	2700	F_MED D_DEEP
	MedSalt6(80-110 Km)	1000	2700	F_MED D_DEEP F_DEEP
	MedSalt7(80-110 Km)	1000	2700	F_MED D_DEEP F_DEEP
	MedSalt14(120-190 Km)	1150	2200	MED F
<b>ZONA 3</b>	MedSalt8	1200	1700	F_MED D_DEEP
	MedSalt9	1200	2200	F_MED D_DEEP
	MedSalt10	1400	2400	F_MED D_DEEP F_DEEP
	MedSalt11	1300	2400	F_MED D_DEEP F_DEEP
<b>ZONA 4</b>	MedSalt12	2550	2750	F_DEEP
	MedSalt13	2500	2750	F_DEEP
	MedSalt14 (190 – 250 Km)	2200	2800	D_DEEP F_DEEP

Tabla 6 Tabla de relación entre transectos, profundidades , zona y tipos de batimetría

La modelización de la propagación acústica en cada zona se realiza utilizando todas las batimetrías representativas incluidas en cada zona. Estas batimetrías se obtienen mediante la **unión de las batimetrías representativas de cada transecto incluido en la zona**, y se resumen en la Tabla 7:

ZONA	Tipos de batimetría
<b>ZONA 1</b>	D_SHA

	A_SHA
	U_SHA
	F_SHA
<b>ZONA 2</b>	F_MED
	D_DEEP
	F_DEEP
<b>ZONA 3</b>	F_MED
	D_DEEP
	F_DEEP
<b>ZONA 4</b>	F_DEEP
	D_DEEP

Tabla 7 Batimetrías representativas consideradas en cada Zona

#### 4.6 PERFIL DE VELOCIDAD DEL SONIDO

El perfil de velocidad varía según los perfiles de temperatura  $T$  ( $^{\circ}C$ ), salinidad  $S$  ( $psu$ ) y profundidad  $D$  ( $m$ ) y puede obtenerse a partir de la ecuación (12) (Mackenzies, 1981)

$$c = 1448,96 + 4,591 T - 5,304 \cdot 10^{-2} T^2 + 2,374 \cdot 10^{-4} T^3 + 1,340(S - 35) + 1,630 \cdot 10^{-2} \cdot D + 1,675 \cdot 10^{-7} D^2 - 1,025 \cdot 10^{-2} T(S - 35) - 7,139 \cdot 10^{-13} TD^2 \quad (12)$$

Como es lógico, estos datos varían según el punto de observación. En este estudio, se ha utilizado el perfil medio de velocidad representado en la Figura 13. Los datos para realizar el perfil de velocidad se han obtenido de las mediciones en campo del perfil de velocidad de sonido (SPV) que se hicieron en la zona el 2015 para la misma época del año y que han sido cedidas por el promotor OGS para el cálculo del perfil de velocidad.

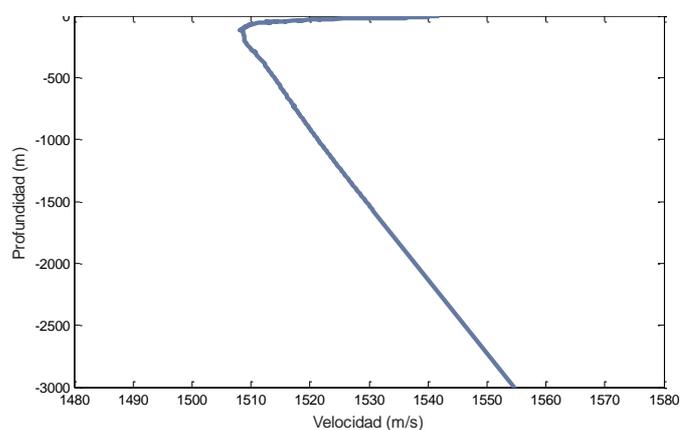


Figura 13 Velocidad promedio

## 4.7 PROPIEDADES DEL AGUA

Como se ha explicado anteriormente, la propagación acústica en el medio acuático no se puede considerar como una distribución geométrica idealizada debido a varios factores, como el perfil de velocidad, la reflexión en sus contornos y la conversión de la energía acústica en el proceso que se denomina "absorción".

### 4.7.1 SUPERFICIE MARINA

En el presente estudio, la superficie marina se modela como una capa lisa y plana. Esto significa que no se tiene en cuenta la rugosidad debido a la influencia del viento. En la literatura encontramos varias ecuaciones que permiten obtener una estimación de la altura del mar a partir de la velocidad del viento, véase (Etter). No obstante, dado que la condición de contorno plano es la situación más desfavorable, en este modelo no se ha considerado ninguna rugosidad en la capa de agua.

### 4.7.2 ABSORCIÓN DEL AGUA

La absorción del sonido en el agua del mar se produce debido a la viscosidad y a la relajación iónica de las sales disueltas en el agua. Ambos procesos contribuyen a la pérdida de energía de la señal acústica. Sin embargo, esta absorción solo es significativa a frecuencias altas, y en el rango de frecuencias en el que se centra el presente estudio, tiene un valor inferior o igual a 0,06 dB/km. Por consiguiente, en este estudio, no se ha tenido en cuenta la absorción acústica del agua.

La Tabla 8 muestra los parámetros de la columna de agua considerados en esta modelización acústica:

Medio	Profundidad (m)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad compresional del sonido (m/s)
Agua	Depende de la batimetría	1024	Perfil medio de velocidad

Tabla 8 Parámetros columna de agua

## 4.8 PARÁMETROS DEL FONDO MARINO

La modelación acústica subacuática debe tener en cuenta la naturaleza geoacústica del lugar de interés. En este informe, se ha considerado un modelo acústico de tres capas: columna de agua, sedimentos de fango, y basalto (ver Figura 14).



Figura 14 Modelo acústico de tres capas

La composición del lecho marino se obtiene del IEO (<http://www.ideo-base.ieo.es/>), de bibliografía (A.Costa et. Al, 2004; Camerlengui 2009) y de estudios previos realizados en el área en el proyecto anterior MEDSALT en el 2012 y en 2015. Las propiedades físicas de cada capa se describen en la Tabla 9:

Medio	Profundidad (m)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad de sonido compresional (m/s)	de	Absorción de onda compresional (dB/λ)
<b>Fango</b>	10 <sup>1</sup>	1500	1700		1
<b>Basalto</b>	Semi-infinita	2700	5250		0,1

Tabla 9 Parámetros de los sedimentos

En los dos modelos de acústica subacuática aplicados se considera la capa del fondo como una capa semi-infinita (sin reflexión acústica).

#### 4.9 RUIDO DE FONDO

El ruido de fondo, o ruido ambiente, es la suma del ruido procedente de fuentes naturales y del ruido generado por la actividad humana. Puede tener varias fuentes de origen, como el viento, la precipitación, el hielo, la actividad biológica, la actividad sísmica, la profundidad del área, la época del año, el transporte, dragados, perforaciones, obras, etc. Para algunas predicciones, es adecuado utilizar los espectros del ruido ambiental representativos de las diferentes condiciones. Estas curvas a veces se denominan "curvas de Wenz". En la Figura 15 se ilustran las curvas de Wenz para diferentes condiciones del tráfico de embarcaciones y la velocidad del viento en aguas profundas (obtenidas de (Etter)). Normalmente, por debajo de los 10

<sup>1</sup> Previamente se ha realizado un estudio de sensibilidad considerando diferentes espesores de fango debido a la importancia de este parámetro en los resultados. Véase sección 5.2

Hz solo domina el ruido natural (terremotos, explosiones, etc.), mientras que por encima de unos cientos de Hz, el estado del mar es la principal fuente de ruido ambiente. Por último, en la región intermedia, predomina el ruido de las embarcaciones.

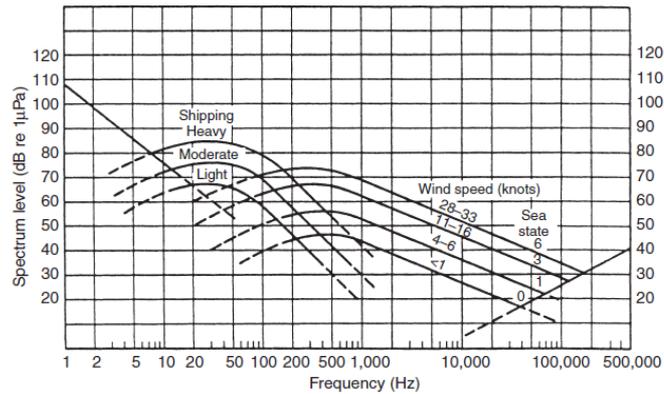


Figura 15 Curvas de Wenz en aguas profundas

En cuanto a la zona de interés analizada, en este caso, el Mar Mediterráneo, los diferentes valores de ruido ambiente registrados pueden consultarse en (R. J. Urick). Las curvas obtenidas se representan en la Figura 16, donde puede observarse que los datos se corresponden bastante con los de la figura anterior.

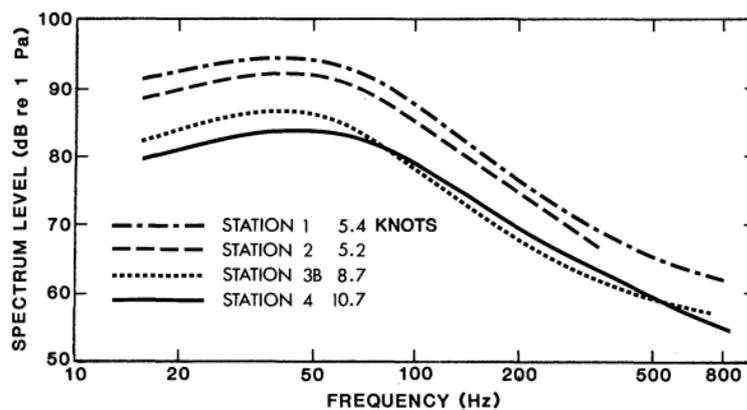


Figura 16 Ruido ambiente registrado en el mar Mediterráneo

El ruido generado por las embarcaciones y transmitido al medio acuático se llama firma sonora y es individual para cada embarcación y modo de operación, si bien hay unas características generales extrapolables a embarcaciones similares en tamaño,

potencia, distribución de propulsores, velocidad y modo de operación. El buque OGS Explora cuenta con una eslora 72.62 m y un registro bruto de unas 1408 Toneladas métricas (Tm) en órdenes de magnitud. Cuenta con una propulsión principal de 2 x 1294.5 Kw (1780 Hp) y una velocidad de tránsito de 10 nudos.

La ciencia acústica subacuática y las fuentes de ruido de las embarcaciones son muy complejas, variando los niveles de presión sonora en origen, totales y por frecuencias según origen concreto del ruido. Por ejemplo armónicos del motor transmitido a través del casco, reductor, resonancia del casco excitada por la hélice, "canto" de la hélice, cavitación. En la práctica, las investigaciones realizadas sobre niveles de ruido fuente de diversas embarcaciones han resultado en una serie de reglas generales.

Para embarcaciones en tránsito, el ruido radiado al agua, a igualdad de configuración de propulsores, edad, tipo de motorización etc., depende del tamaño del buque y su velocidad. Ross 2005 provee una fórmula de cálculo aproximado del nivel de ruido fuente a 1 m del casco del buque tal como:

$$L_s = 134 + 60 \log (U_a/10 \text{ nudos}) + 9 \log T_d$$

Siendo  $L_s$ = nivel ruido fuente total en banda ancha medido en dB re 1  $\mu\text{Pa}$  (en adelante dB)

$U_a$ = velocidad en nudos

$T_d$ =registro bruto o desplazamiento en Tm

Aplicando esta fórmula al buque OGS Explora en tránsito a 10 nudos, el nivel de radiación sonora en banda ancha es de 162 dB, lo cual es relativamente consistente con la literatura existente para barcos de ese tamaño (Richardson *et al.*, 1995; Bahtiarian M). Aplicando la misma fórmula a la velocidad de trabajo de 4,5 nudos, el nivel de radiación sonora de banda ancha es de 141,5 dB. En cuanto a la distribución espectral de este ruido radiado al agua, en sus diferentes rangos de frecuencia (octavas o tercios de octava), se ha identificado un espectrograma bastante común en embarcaciones en tránsito (ver Figura 17).

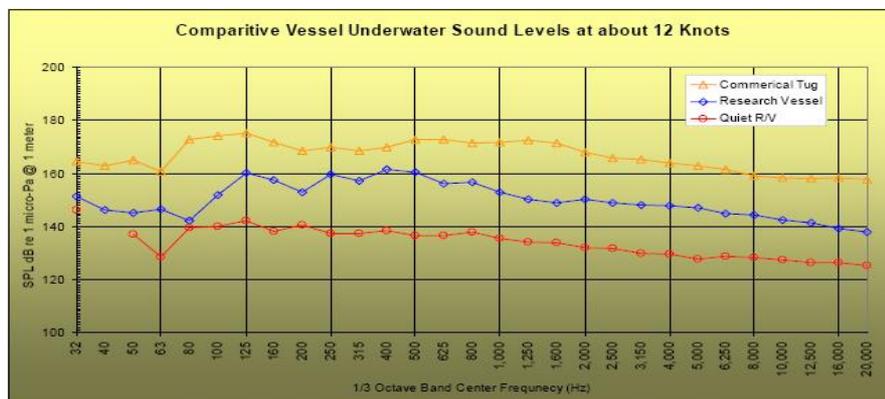


Figura 17 Niveles de sonido subacuáticos medido en embarcaciones (Fuente: Bahtiarian M., NOAA)

Symposium).

Los niveles de presión sonora de los airguns considerados en el presente informe son muy superiores al nivel de presión sonora del ruido ambiente obtenido de la bibliografía, y consecuentemente los resultados no se verán afectados por fuentes de ruido de naturaleza externa a la campaña oceanográfica.

Teniendo en cuenta que el nivel de presión sonora global del airgun más débil de la presente campaña oceanográfica es de 205 dB RMS, y que el valor de presión sonora del buque se estima en 140 dB, se puede afirmar que este último no influenciará a las distancias de seguridad objeto de esta modelización acústica.

## 5 RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN ACÚSTICA SUBACUÁTICA

En la modelización acústica se han realizado un conjunto de estudios exhaustivos con el fin de cuantificar su sensibilidad en relación a ciertos datos de entrada del modelo. En efecto, es conocida la sensibilidad de las modelizaciones acústicas subacuáticas por lo que se refiere a los datos oceanográficos, tanto el lecho marino y el perfil de batimetría, como las propiedades de la velocidad del sonido en la columna de agua. En este caso se ha considerado ausencia de actividad en la superficie marina que pudiera alterar las reflexiones producidas en este cambio de impedancia.

La modelización acústica se ha realizado con la *toolbox* ActUP v2.2L, y los resultados se han validado cualitativamente mediante el software comercial dBSea® 1.3.8 *Underwater Noise Modelling*.

Esta sección se inicia con el detalle de la metodología utilizada para la obtención de los radios de exclusión. Seguidamente se abordan las consideraciones previas relativas al estudio de sensibilidad y a la interpretación de los resultados. Dichos estudios previos se han realizado teniendo en cuenta la fuente acústica de mayor potencia, con el objetivo de estimar la afectación en los mayores rangos de impacto acústico. El estudio previo de sensibilidad se ha realizado sobre el grosor del lecho marino, básicamente de fango (dato obtenido en campo por OGS con la extracción de "cores" durante las estaciones de medición en 2015). Se analiza también la variación en los rangos de exclusión en función de la profundidad del perfil batimétrico.

Una vez analizados los resultados parciales, se procede a la presentación de los rangos de seguridad para todas las zonas y fuentes asociadas, relacionándolos con los índices acústicos y efectos sobre los mamíferos marinos

### 5.1 METODOLOGÍA

1. **La huella acústica de la fuente se obtiene mediante el programa de modelado Gundalf.** En el presente estudio, se han considerado cuatro fuentes distintas, cuyo nivel espectral se ha calculado en bandas de octava en un rango de 10 Hz a 1 kHz (véase la Tabla 4).
2. **Se ha creado una clasificación con diferentes batimetrías para evaluar todos los casos posibles.** Tal y como se explica en la sección 4.5, debido a la extensión del área de estudio, no es viable aplicar el modelo a toda la geometría. Para resolver este problema, se ha establecido una clasificación de todas las batimetrías posibles, que incluye todas las variaciones horizontales encontradas en el fondo analizado.

3. **Se calcula la pérdida de transmisión de cada batimetría.** Se aplican dos métodos de acústica subacuática *range-dependent* (RAM y BELLHOP) para obtener la pérdida de transmisión en bandas de octava en todo el espectro de frecuencias. La necesidad de aplicar dos métodos se debe al hecho de que cada uno es apropiado para un rango de frecuencias diferente. El método RAM, basado en la ecuación parabólica, se utiliza en el rango de frecuencias bajas, mientras que el método BELLHOP, que se basa en el trazado de rayos, se emplea en el rango de frecuencias más altas. La frecuencia a partir de la cual se puede aplicar el método BELLHOP se calcula mediante la ecuación 6 y varía con la profundidad de la batimetría considerada. En este estudio, se ha utilizado como frecuencia de corte 250 Hz. Se utiliza una resolución de 10 m y un rango máximo de 20000 m.
  
4. **El nivel de presión sonora de cada batimetría se obtiene restando la pérdida de transmisión acústica a la fuente de ruido.** Una vez que se dispone del nivel de presión sonora de cada fuente y de las pérdidas de transmisión en cada batimetría se calcula el nivel de presión sonora para diferentes profundidades en función de la distancia a la fuente. En el presente estudio, se han considerado las profundidades siguientes: 10, 250, 600 y 1500 metros.
  
5. **Las magnitudes acústicas globales se obtienen de las contribuciones de las bandas de frecuencias centrales de octava de 16 Hz a 1000 Hz.** Para cada profundidad estudiada, se calculan cinco índices distintos (RMS, RMS\_M, SEL, SEL\_M y PEAK), cuyo significado queda detallado en el apartado 4.4. Los cálculos de los anteriores índices se realizan mediante el modelado de propagación en bandas de octava. A continuación, los valores de las fuentes de ruido obtenidos se restan de la pérdida de transmisión en cada banda de octava de frecuencia de 16 Hz a 1000 Hz. Según estudios anteriores que validan la precisión del siguiente método con datos experimentales, la energía acústica total a cualquier distancia de la fuente se calcula sumando la energía de cada banda de octava.
  
6. **Se calcula el radio de seguridad de cada nivel de presión.** Finalmente, se calcula el radio de exposición acústica para todas las magnitudes acústicas y profundidades en cada zona de interés. Tal y como se ha especificado, se calculan los rangos de exclusión según los siguientes índices y límites: RMS=160 dB, RMS=180 dB, SEL=160 dB, SEL\_M=183 dB, y PEAK=224 dB. Por otro lado, como se ha explicado anteriormente, el modelo se aplica para varias batimetrías en cada zona. Para calcular el radio de seguridad de cada zona, en los resultados solo se ha tenido en cuenta el supuesto menos favorable (radio mayor) en cada zona.

## 5.2 CONSIDERACIONES PREVIAS

### 5.2.1 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DEL GROSOR DE LA CAPA DE SEDIMENTOS

Las propiedades de la capa de sedimentos, tanto el grosor como su composición, determinan múltiples efectos en la propagación de las ondas acústicas subacuáticas. La porosidad es la propiedad mecánica que, en mayor parte, define las propiedades acústicas de los sedimentos.

Los principales fenómenos función de la capa de sedimentos son: las reflexiones y dispersión hacia la columna de agua, la atenuación, y las transmisiones en su seno que se pueden transmitir, a su vez, hacia la columna de agua. Debido a la importancia del conjunto de efectos anteriores sobre los resultados finales del proyecto, se ha realizado un estudio de sensibilidad del grosor de la capa de sedimentos.

Se han considerado unos grosores de 10 m, 200 m y 1000 m en el conjunto de transectos representativos del área bajo análisis, cuya descripción se puede consultar en la Figura 18. Los transectos utilizados en este estudio de sensibilidad no son los transectos finalmente utilizados para la modelización acústica, sino que se escogen del set inicial de transectos (ver apartado 4.5). En este sentido, los rangos que se presentan no son los que se tendrán en cuenta a la hora de definir los radios de exclusión.

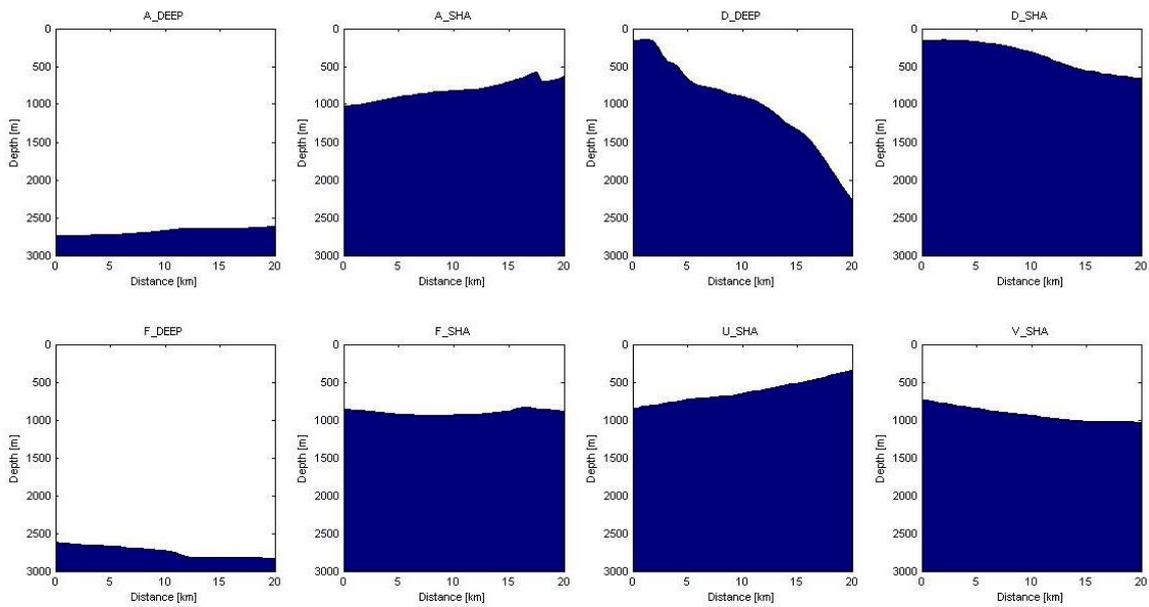


Figura 18 Clasificación de la batimetría del área en transectos representativos

La fuente de mayor potencia acústica, 4 x 250 cu.in. a 6 metros de profundidad, RMS=228 dB y  $L_{zero-peak}$ =242 dB, se ha tomado como fuente de referencia:

Una vez calculadas las pérdidas de transmisión para cada banda de frecuencia en las octavas de 16 Hz a 1000 Hz, se aplica el protocolo de cálculo según el apartado 5.1. Para cada transecto resultan los rangos de la Tabla 10, donde se alcanza un valor de presión sonora RMS referenciado a 1  $\mu$ Pa de 160 dB sin ponderación Mmf. Los rangos se proporcionan en las profundidades 10, 250, 600 y 1500 m para el modelo de fango 200-1000 m; y 10 y 1500 m de profundidad para el modelo de fango de 10m de grosor.

Fango 1000 m	A_deep	A_sha	D_deep	D_sha	F_deep	F_sha	U_sha	V_sha
<b>10 m</b>	340	4456	2291	3744	338	3753	3693	3628
<b>250 m</b>	1250	1340	720	706	1247	1412	1382	1388
<b>600 m</b>	2148	2326	-	405	2154	2874	2934	2836
<b>1500 m</b>	2963	-	-	-	2976	-	-	-

Fango 200 m	A_deep	A_sha	D_deep	D_sha	F_deep	F_sha	U_sha	V_sha
<b>10 m</b>	360	4456	2309	3744	357	3754	3708	3631
<b>250 m</b>	1249	1347	877	863	1248	1578	1406	1776
<b>600 m</b>	2181	2414	-	600	2184	3003	2939	2839
<b>1500 m</b>	2964	-	-	-	2974	-	-	-

Fango 10 m	A_deep	A_sha	D_deep	D_sha	F_deep	F_sha	U_sha	V_sha
<b>10 m</b>	4325	7581	2413	4389	4003	6154	5154	6602
<b>1500 m</b>	4118	-	-	-	4503	-	-	-

**Tabla 10 Rangos para SPL RMS ref 1 $\mu$ Pa = 160 dB (m)**

Como cabía esperar, el alcance de los 160 dB varía muy significativamente entre los modelos de 1000 m y 10 m de sedimentos de fango. Los valores del rango son mucho mayores para un grosor de 10 m en la totalidad de los transectos analizados y en la totalidad de las profundidades consideradas.

En la Figura 19 se muestra la evolución del nivel SPL RMS para un perfil profundo plano (F\_Deep 2500 - 3000 m) en modelos con grosor de fango distintos, comparados a una profundidad de 10 metros. Como puede observarse, el cambio de fondo marino afecta a la propagación de las ondas acústicas. A 10 metros de profundidad, las reflexiones de las ondas acústicas en el lecho marino son mucho más importantes con gruesos de 10 m que con gruesos de 200 o 1000 m. Las zonas de convergencia debidas a las reflexiones entre el lecho marino y la superficie del mar, así como la difracción de las ondas acústicas causadas por el perfil de velocidad son notorias con el modelo de 10 m de fango.

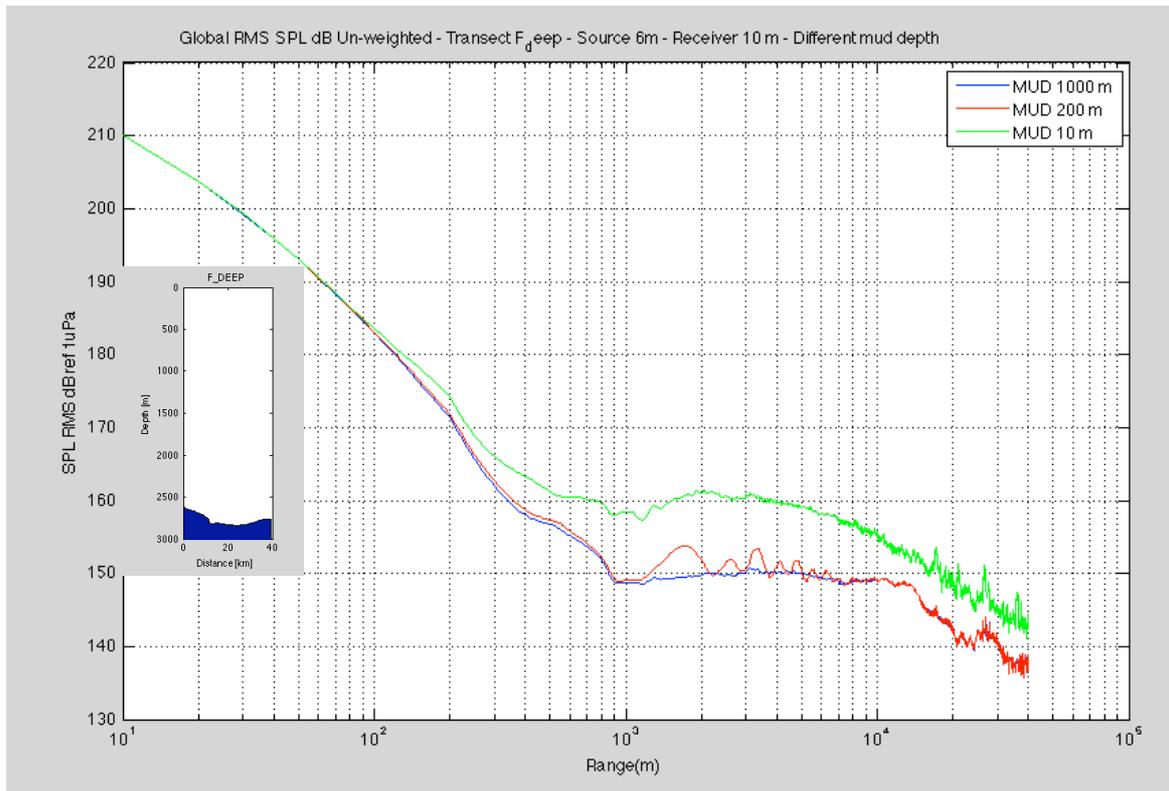


Figura 19 Evolución del nivel SPL RMS ref 1µPa en función de la distancia a la fuente

Las zonas de convergencia de energía propician valores de 160 dB a una profundidad de solamente 10 m para el modelo con 10 m de fango. Para el modelo de 200 m de fango los valores en las zonas de convergencia son menores, aproximadamente de 154 dB, mientras que para el modelo de 1000 m de fango se estabiliza alrededor de 150 dB.

Consecuentemente, los rangos para los modelos de 200 m y 1000 m de fango son mucho menores, 360 m y 340 m respectivamente, que el correspondiente al modelo de 10 m de fango: 4000 m.

Hay que tener presente que los rangos mostrados en esta sección se corresponden con el valor límite de 160 dB sobre el índice RMS. La combinación de fuente acústica, perfil batimétrico, índice RMS y límite considerado de 160 dB, determinan en gran proporción la variación del impacto acústico de los tres modelos de grosor de lecho marino considerado.

## 5.2.2 COMPARACIÓN RANGOS EN PERFILES PROFUNDOS Y NO-PROFUNDOS

Se observa que para los perfiles de menor profundidad (<1000 m) los rangos a una profundidad de 10 m son mucho más elevados que para los perfiles de mayor profundidad (>1000 m), en el caso del modelo con grosores de barro 200-1000 m.

Con el objetivo de explicar dicho comportamiento, se procede a considerar dos perfiles batimétricos característicos del área bajo estudio: profundo (>1000 m) y poco profundo (< 1000 m). En la Figura 20 se puede observar la posición de la fuente de ruido en la zona del transecto MedSalt\_12, correspondiente a una profundidad de aproximadamente 2700 m, y la fuente en una zona poco profunda (aproximadamente 1000 m) correspondiente a BAL04.



Figura 20 Fuente 4 x 250 cu.in. en (a) Izquierda: Zona 4 (b) Derecha: BAL4

La modelización acústica se ha realizado con el programa comercial dBSea ®. La Figura 21 (a) representa la evolución del nivel de presión sonora sin ponderación M, a 10 metros de profundidad, para la fuente de mayor potencia acústica, situada al extremo norte oriental del transecto MedSalt\_12, y (b) en la zona poco profunda BAL4. En ambos casos se han considerado modelos de 1000 m de fango en el lecho marino.

Se puede observar que en ambos casos los valores de presión sonora disminuyen a medida que aumenta la distancia de la fuente. En el caso profundo las confluencias de las vías de propagación de los rayos acústicos contribuyen a unos valores inferiores a los 160 dB en superficie a partir de los pocos centenares de metros de la fuente de ruido. Contrariamente, en el caso no-profundo, estas contribuciones sí que alcanzan los 160 dB en la superficie, hasta aproximadamente unos 4000 m de la fuente de ruido.

En consecuencia, tanto en el caso poco profundo como en el caso profundo, se validan los resultados de la Tabla 10.

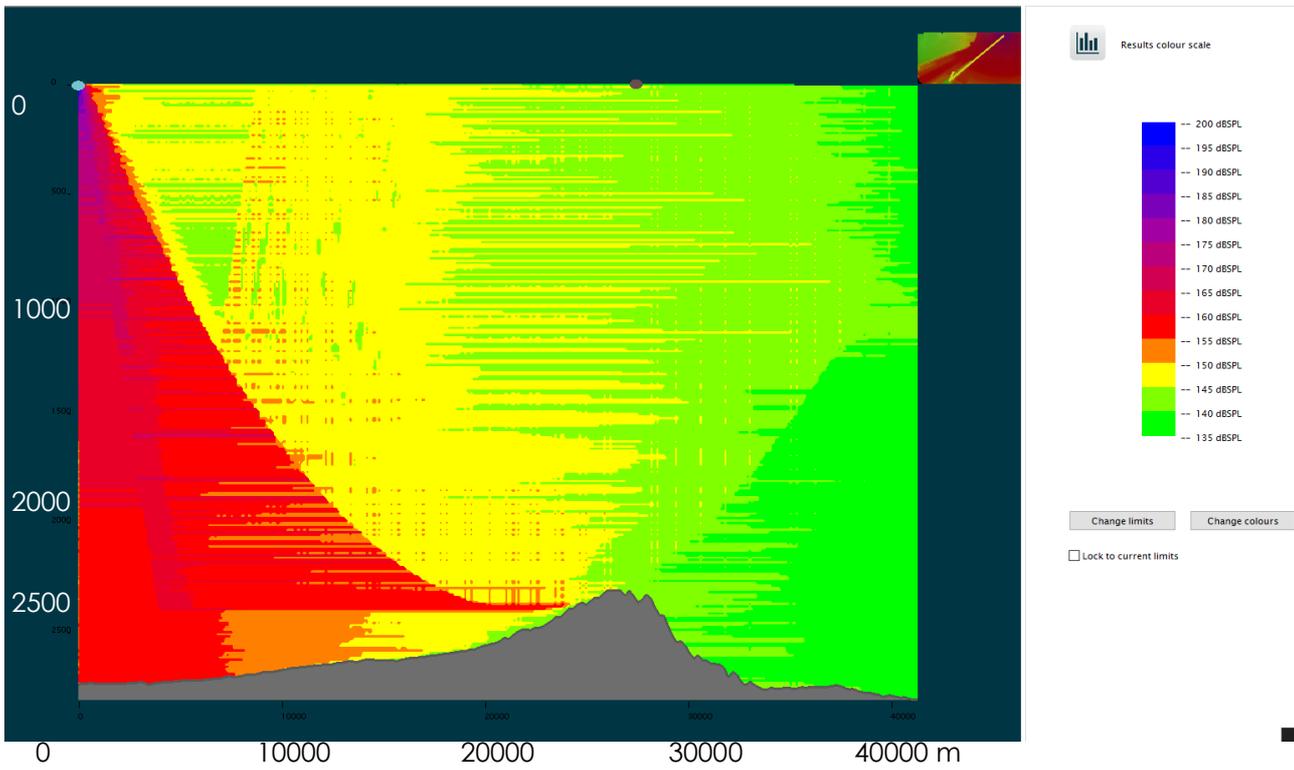
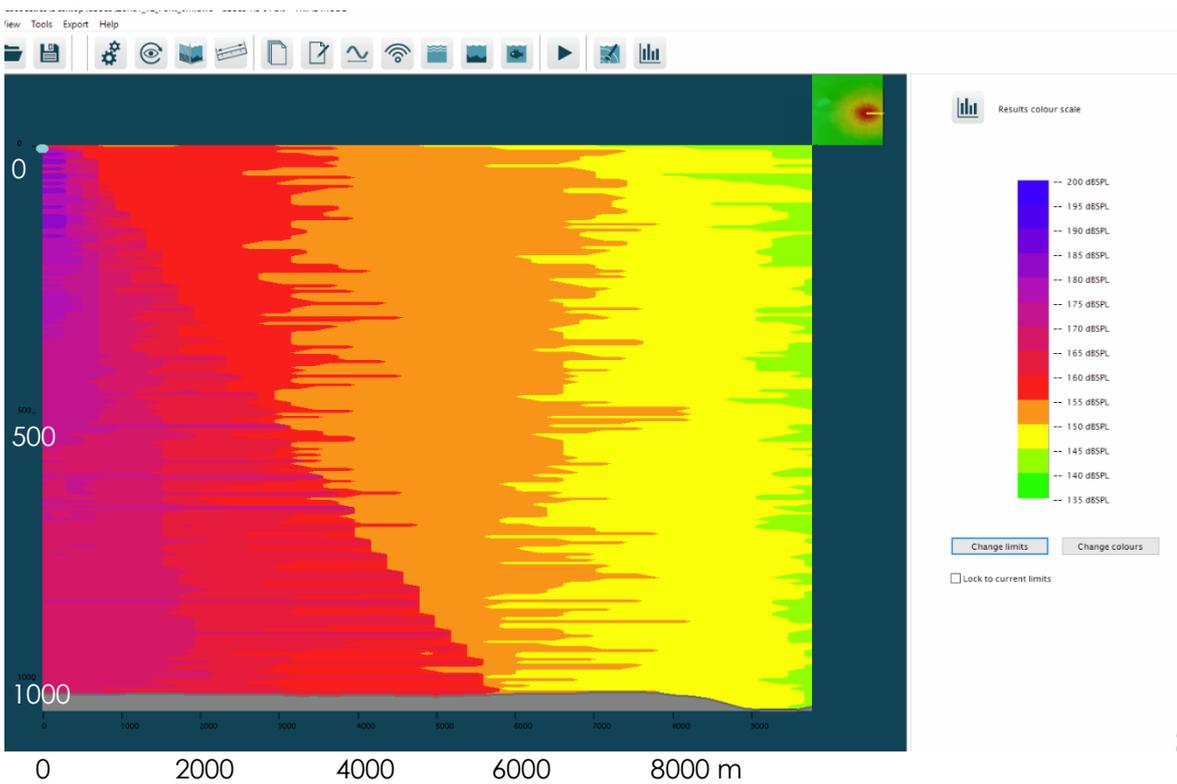


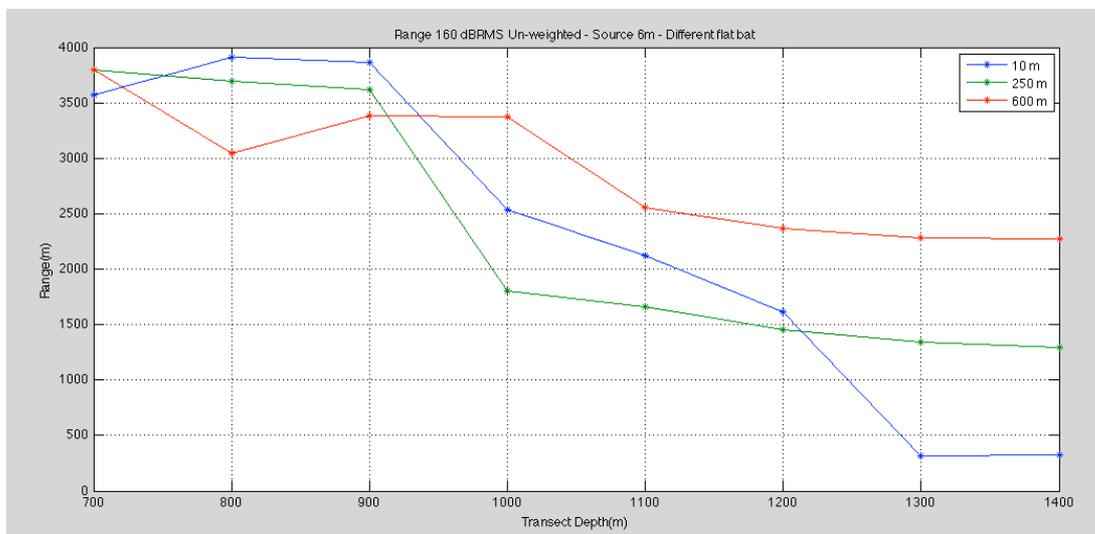
Figura 21 (a) Superior: Perfil para el transecto MedSalt\_12. (b) Inferior: Perfil para la zona BAL04



Debido a la combinación entre la potencia y la distribución espectral de la fuente acústica, y los parámetros oceanográficos, así como las propiedades del lecho marino, se confirma que los rangos a 160 dB son muy sensibles a la profundidad del área.

En efecto, en la Figura 22 se muestran dichos rangos para cada una de las profundidades consideradas a lo largo de todo el estudio (10, 250 y 600 m) para 8 batimetrías con un lecho marino de fango de 200 m de grosor, y considerando la fuente de referencia a 6 m de profundidad. Las batimetrías consideradas son planas de profundidades de 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300 y 1400 m.

De su inspección se extrae que a medida que la profundidad del transecto aumenta, la distancia a la fuente donde se estiman los valores RMS=160 dB, disminuye. En zonas de profundidades entre 700-900 m, el rango se sitúa en 3500-4000 m, mientras que en zonas de profundidades entre 1000-1200 m el rango disminuye considerablemente en 2500-1500 m. En zonas profundas, más de 1300 metros, el rango decae bruscamente hasta valores inferiores a 500 m.



**Figura 22 Rangos para SPL RMS ref 1 $\mu$ Pa = 160 dB (m) en función de la profundidad del transecto plano (700-1400 m) en las profundidades de 10, 250 y 600 m**

La evolución del valor global RMS desde la fuente hasta 10 Km, a la profundidad de 10 m, y para las batimetrías planas de profundidades de 700 a 1400 m se muestra a la Figura 23. Se observa que para distancias cercanas a la fuente, la propagación es básicamente el camino directo, siendo insensible a la profundidad del área hasta aproximadamente los 200 m. A partir de esta distancia se observan diferencias debidas a los efectos anteriormente mencionados. En los transectos con profundidades mayores a 1200 m, las zonas de concentración de energía

desaparecen en regiones más cercanas a la fuente, mientras que en transectos menos profundos tienen mayor amplitud y tardan más en extinguirse.

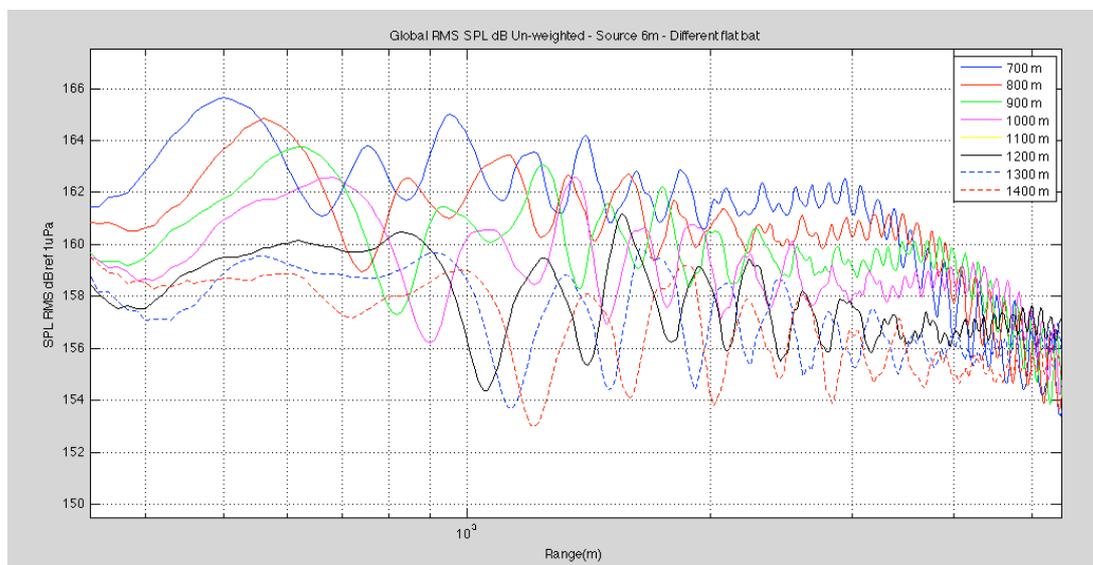
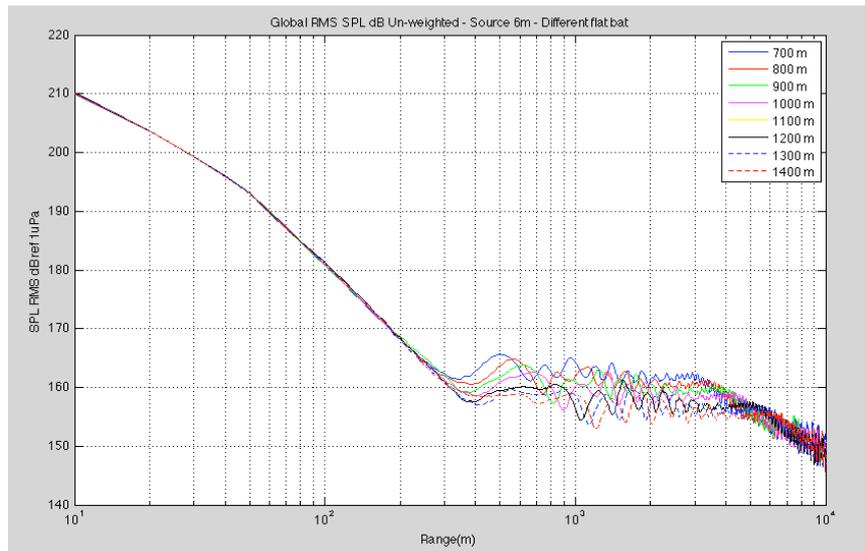


Figura 23 Evolución del nivel SPL RMS ref 1µPa , a 10 m de profundidad, en función de la distancia a la fuente por cada transecto de perfil plano de profundidades de 700 m a 1400 m. (a) Superior: rango completo. (b) inferior: detalle de la afectación en la zona de 160 dB

El comportamiento en la evolución de las zonas de concentración de energía en función de la profundidad del perfil, explica la variación de los rangos en que se alcanzan valores RMS=160 dB.

### 5.3 RESULTADOS

A partir de las simulaciones acústicas realizadas con el software Actup, la metodología y las consideraciones previas de las secciones anteriores, se han obtenido los límites de seguridad en cada una de las zonas de estudio considerando las batimetrías de la Tabla 7 y los parámetros de la Tabla 9.

En cada zona de estudio se ha considerado el caso más desfavorable tomando siempre el criterio más conservador. Esto significa que para cada profundidad se ha escogido como radio de seguridad el mayor de los distintos radios obtenidos para cada batimetría representativa de aquella zona en particular

A modo de ejemplo se detalla el procedimiento realizado para la obtención de los radios de seguridad para la Zona 3 con la fuente de 4 x 250 cu.in. La Zona 3 viene caracterizada por las batimetrías representativas DEEP\_D, DEEP\_F y MED\_F (ver Tabla 6). En este caso se realiza la simulación acústica para las tres batimetrías y se obtiene que para  $L_{RMS} = 160$  dB los radios mas desfavorables son:

- Profundidad 10 m: batimetría representativa D\_DEEP: 9623 m
- Profundidad 250 m: batimetría representativa D\_DEEP 8035 m
- Profundidad 600 m: batimetría representativa D\_DEEP 8035 m
- Profundidad 1500 m: batimetría representativa D\_DEEP 6214 m

La Tabla 11 presenta los radios de seguridad por  $L_{RMS} = 160$  dB. Los resultados completos en forma gráfica, por cada zona y por los índices RMS y SEL con y sin ponderación en frecuencia, y Peak, se pueden consultar en el ANEXO A.

Zona	Fuente	Profundidad			
		10 m	250 m	600 m	1500 m
Zona 1	1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in.	535 (D_SHA)	480 (U_SHA)	254 (U_SHA)	---
Zona 1	1 x 60 cu.in.	126 (D_SHA)	141 (A_SHA)	12 (D_SHA)	---
Zona 2	1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in.	126 (D_DEEP)	422 (D_DEEP)	117 (F_DEEP)	125 (D_DEEP)
Zona 2	1 x 60 cu.in.	89 (D_DEEP)	98 (F_MED)	0	28 (D_DEEP)
Zona 3	4 x 250 cu.in.	9623 (D_DEEP)	8035 (D_DEEP)	8035 (D_DEEP)	6214 (D_DEEP)
Zona 3	4 x 210 cu.in.	638 (D_DEEP)	1127 (D_DEEP)	1393 (D_DEEP)	1652 (D_DEEP)
Zona 4	4 x 250 cu.in.	9623 (D_DEEP)	8035 (D_DEEP)	8035 (D_DEEP)	6214 (D_DEEP)
Zona 4	4 x 210 cu.in.	638 (D_DEEP)	1127 (D_DEEP)	1393 (D_DEEP)	1652 (D_DEEP)

**Tabla 11 Rango de seguridad SPL RMS ref 1 $\mu$ Pa = 160 dB en cada zona de estudio y en las profundidades de 10, 250, 600 y 1500 m**

Se observa que las distancias de seguridad en las Zonas 1 y 2 son relativamente bajas, de cientos de metros, mientras que en la Zona 3 y 4 varían en función de la fuente que se tenga en cuenta.

Para la fuente 4 x 250 cu.in. los rangos se sitúan entre 6,2 y 9,6 Km, mientras que para la fuente de 4 x 210 cu.in. son mucho menores, de 600 a 1650 m. Dicha variación de debe principalmente a la distinta naturaleza de la fuente acústica

Conviene remarcar que las distancias de seguridad se han tomado considerando siempre el peor caso en cada zona, es decir la batimetría con mayor facilidad a la propagación de las ondas acústicas.

La siguiente tabla (Tabla 12) presenta las distancias obtenidas para los diferentes rangos de afección establecidos según los criterios internacionales para cada zona. Las gráficas que representan las distancias para cada nivel estudiado pueden verse en el ANEXO A. Para la determinación de los rangos de la Zona 1 y 2, se han cogido los rangos de la fuente de mayor potencia 1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in, igual que para las zonas 2 y 3 se han escogido la fuente de mayor potencia 4 x 250 cu.in.

LÍMITE DE EXPOSICIÓN	PROFUNDIDAD	EFEECTO	ZONA	RANGO (metros)
230 dB re $\mu$ l Pa (Peak)	10 250 600	PTS (Southall et al, 2007)	-	- - -
224 dB re 1 $\mu$ Pa (Peak)	10 250 600 1500	TTS (Southall et al, 2007)	ZONA 1 y 2	10 - - -
224 dB re 1 $\mu$ Pa (Peak)	10 250 600 1500	TTS (Southall et al, 2007)	ZONA 3 y 4	30 - - -
180 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600	TTS (NOAA, 2006)	ZONA 1	39 50 150
180 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600 1500	TTS (NOAA, 2006)	ZONA 2	35 400 250 125

180 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600 1500	TTS (NOAA, 2006)	ZONA 2 Y 3	120 300 100 100
183 dB re 1 $\mu$ Pa (SEL) CETÁCEOS MF (MEDIA FRECUENCIA)	10 250 600	CAMBIOS COMPORTAMIENTO (Southall et al, 2007)	ZONA 1 Y 2	30 - -
183 dB re 1 $\mu$ Pa (SEL) CETÁCEOS MF (MEDIA FRECUENCIA)	10 250 600 1500	CAMBIOS COMPORTAMIENTO (Southall et al, 2007)	ZONA 3 Y 4	120 240 63 90
160 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600	CAMBIO EN EL COMPORTAMIENTO (NMFS)	ZONA 1	535 480 254
160 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600 1500	CAMBIO EN EL COMPORTAMIENTO (NMFS)	ZONA 2	126 482 117 125
160 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600 1500	CAMBIO EN EL COMPORTAMIENTO (NMFS)	ZONA 3 y 4	9623 8035 8035 6214

Tabla 12 Resumen de los rangos de afección basados en la modelización acústica para las 4 fuentes (máx potencia 4x250 cu.in)

Dado que las distancias de afección para las zonas 3 y 4, cuando se use la fuente 4x250 cu.in alcanzan más de 9 km en algunos casos, se ha decidido desestimar esta fuente (4x250cu.in) y considerar solo la fuente de 4x210 para el proyecto MEDSALT-2. En la Tabla 13 pueden observarse los nuevos rangos, según el límite de exposición y la zona.

LÍMITE DE EXPOSICIÓN	DE PROFUNDIDAD	EFEECTO	ZONA	RANGO (metros)
----------------------	----------------	---------	------	----------------

230 dB re $\mu$ l Pa (Peak)	10 250 600	PTS (Southall et al, 2007)	-	- - -
224 dB re 1 $\mu$ Pa (Peak)	10 250 600 1500	TTS (Southall et al, 2007)	ZONA 1 y 2	10 - - -
224 dB re 1 $\mu$ Pa (Peak)	10 250 600 1500	TTS (Southall et al, 2007)	ZONA 3 y 4	40 - - -
180 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600	TTS (NOAA, 2006)	ZONA 1	39 50 150
180 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600 1500	TTS (NOAA, 2006)	ZONA 2	35 400 250 125
180 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600 1500	TTS (NOAA, 2006)	ZONA 3 Y 4	81 41 25 54
183 dB re 1 $\mu$ Pa (SEL) CETÁCEOS MF (MEDIA FRECUENCIA)	10 250 600	CAMBIOS COMPORTAMIENTO (Southall et al, 2007)	ZONA 1 Y 2	30 - -
183 dB re 1 $\mu$ Pa (SEL) CETÁCEOS MF (MEDIA FRECUENCIA)	10 250 600 1500	CAMBIOS COMPORTAMIENTO (Southall et al, 2007)	ZONA 3 Y 4	32 - - -
160 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600	CAMBIO EN EL COMPORTAMIENTO (NMFS)	ZONA 1	535 480 254
160 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600 1500	CAMBIO EN EL COMPORTAMIENTO (NMFS)	ZONA 2	126 482 117 125
160 dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10 250 600 1500	CAMBIO EN EL COMPORTAMIENTO (NMFS)	ZONA 3 y 4	638 1127 1393 1652

Tabla 13 Resumen de los rangos de afección basados en la modelización acústica para 3 fuentes (máx potencia 4x210 cu.in)

## 6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un estudio de modelización acústica para predecir la variación de nivel de ruido producida por el estudio de prospección sísmica de la campaña MEDSALT2 en la zona de el mar balear.

Varios modelos de propagación acústicas se han utilizado para estimar la pérdida de transmisión a frecuencias de banda de octava de 16 Hz a 1000 Hz: AcTup v2.2L (Acoustic Toolbox User Interface) que implementa los diferentes modelos de propagación considerados (BELLHOP y RAM). Además, también se han simulado diferentes escenarios de batimetrías mediante el programa dBSEA® 1.3.8 , ya que permite obtener análisis en 3D del terreno (n x 2D).

Pese a haberse realizados varias modelizaciones con diferentes gruesos de sedimento, solo se ha tenido en cuenta para los resultados el de 10 metros de grosor, por ser este el que presenta peores resultados en términos de dispersión del sonido.

Estos datos se han comparado con las afecciones propuestas y los criterios de respuesta de comportamiento de varios autores.

Sobre la base de un nivel de ruido cero a pico de la fuente de la matriz de cañones de aire máxima de 242 dB re  $\mu\text{Pa}$  @ 1 m, el modelo indica que a un disparo único, el nivel de pico de lesión auditiva permanente (PTS) según los criterios propuestos por Southall et al. (2007) para los cetáceos no se alcanzará en ninguna de las zonas.

Los valores de daño auditivo temporal (TTS) basados en nivel de pico no se extenderán más allá de los 40 metros de distancia de la fuente. Estos rangos se encuentran dentro del campo cercano a la fuente, por lo que dichos niveles probablemente no se alcanzarán.

Los valores de daño auditivo temporal (TTS) RMS propuestos por NOAA 2006, se alcanzarán en las Zonas 1 y 2, en un radio máximo de 400m y en las zonas 3 y 4 en un radio máximo de 81m.

El SEL ponderada Mmf para cetáceos de media frecuencia se ha calculado para cada caso y según los criterios propuesto por Southall 2007 de cambios en el comportamiento (183 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  (SEL) CETÁCEOS MF (MEDIA FRECUENCIA), los rangos se sitúan en las Zonas 1 y 2 en un máximo de 30m de distancia a la fuente y para las

zonas 3 y 4 de 32m. No se han tenido en cuenta para establecer la zona de exclusión los rangos ponderados y se ha decidido tener en cuenta otro límite más conservador.

Los cambios de comportamiento establecidos para 160dB RMS se alcanzarán en la zona 1 y 2 dentro de un máximo de 482m y para la zona 3 y 4 en un máximo de 1652m. Del presente valor se derivan los rangos de afección y por lo tanto, pueden ser establecidas las zonas de exclusión para cetáceos y tortugas. Por ejemplo, en el caso de las zonas donde pueden encontrarse buceadores profundos, como cachalotes o zifios, se toma el rango de afección de la modelización a grandes profundidades (entre 600-1500m) para esa zona, ya que en general se trata de las profundidades de alimentación de estos animales, por lo que para una misma zona podemos obtener dos zonas de exclusión o vigilancia, según exista la probabilidad de encontrar especies de buceo profundo o no.

Tomándose como referencia el valor más conservador de 160db re 1  $\mu$ Pa (RMS) Se establecen las siguientes zonas de exclusión (Tabla 14):

ZONA	ESPECIES	ZONA DE EXCLUSIÓN
<b>ZONA 1 Y 2</b>	TODAS	535
<b>ZONA 3 Y 4</b>	BUCEADORES PROFUNDOS y MISTICETOS	1652
<b>ZONA 3 Y 4</b>	RESTO DE ESPECIES	1652

Tabla 14 ZONAS DE EXCLUSIÓN PROPUESTAS

De la Tabla 14 se desprende que la zona de exclusión, que observaran los MMO y PAM puede establecerse para todas las especies y para todas las zonas en un **radio de 2km**, siendo conservadores.

## ANEXO A

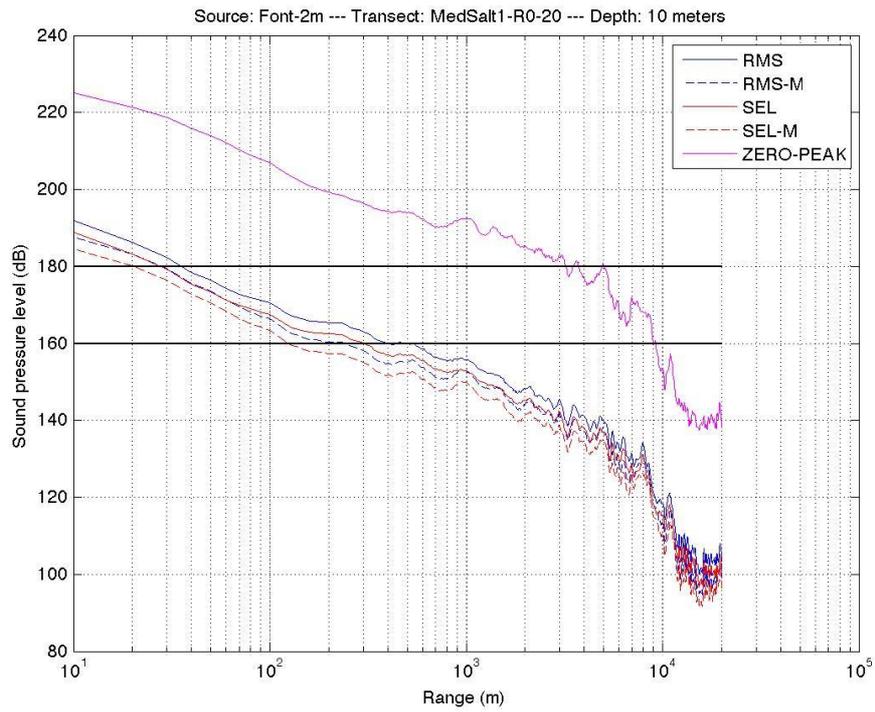
En este anexo, se trazan todos los gráficos obtenidos en cada zona por el perfil con mayor rango RMS=160 dB. Como se describe en la sección de metodología, el peor de los casos se considera de acuerdo con el tipo de fuente y a los perfiles batimétricas presentes en cada zona.

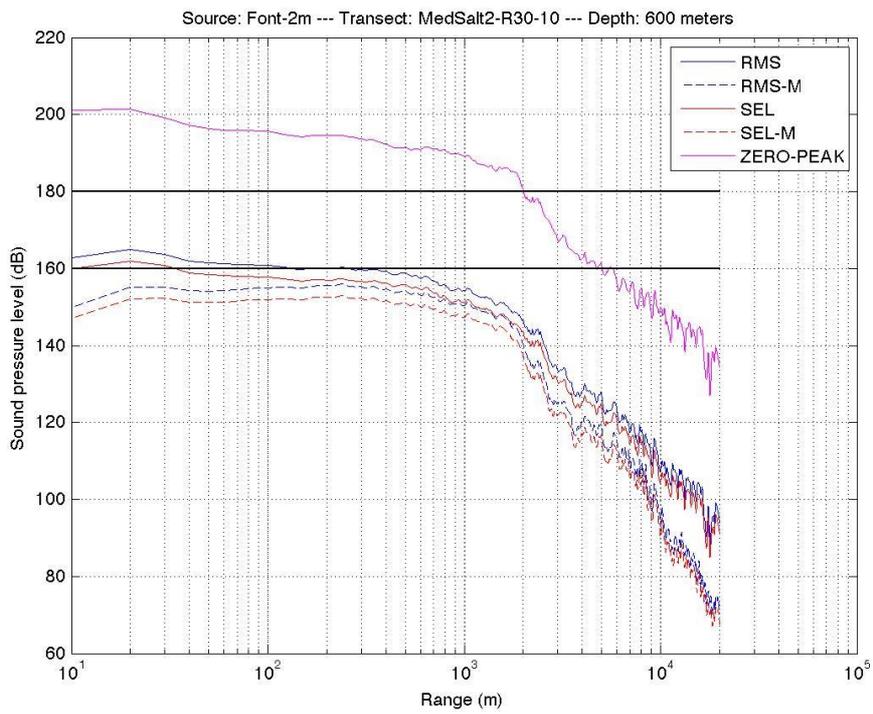
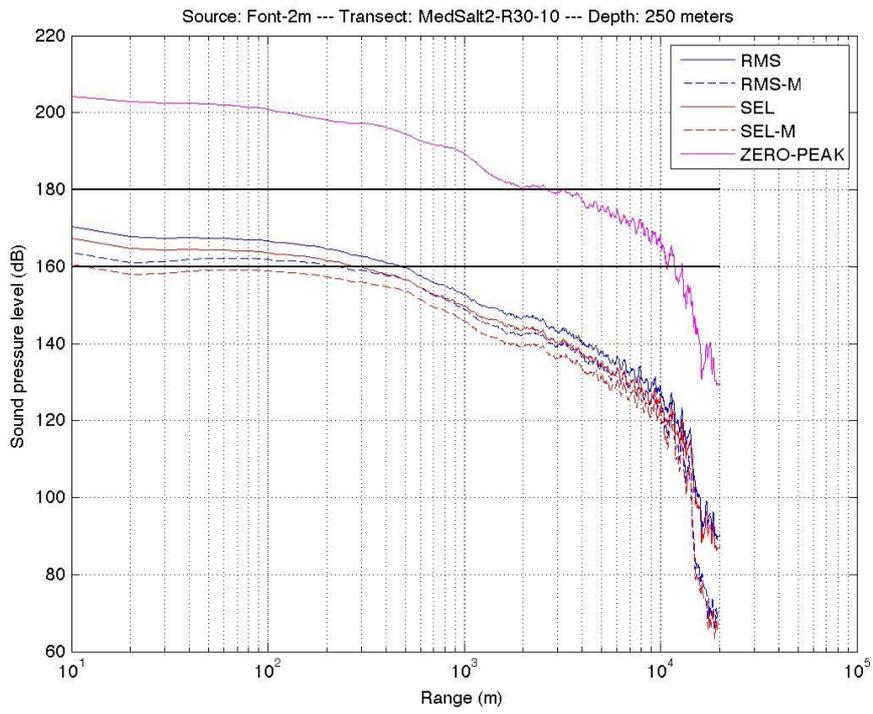
Se representa la evolución de la distancia fuente para todos los diferentes índices calculados. Los índices son: RMS, RMS con M-ponderación en frecuencia, SEL, SEL con M-ponderación en frecuencia, y Zero-Peak. Todos los índices se representan en las siguientes profundidades: 10, 250, 600, y 1500 m. En la Tabla 7 pueden consultar todas las batimetrías consideradas.

### 1.1 ZONA 1

#### 1.1.1 FUENTE 1 X 210 CU.IN. + 1 X 60 CU.IN.

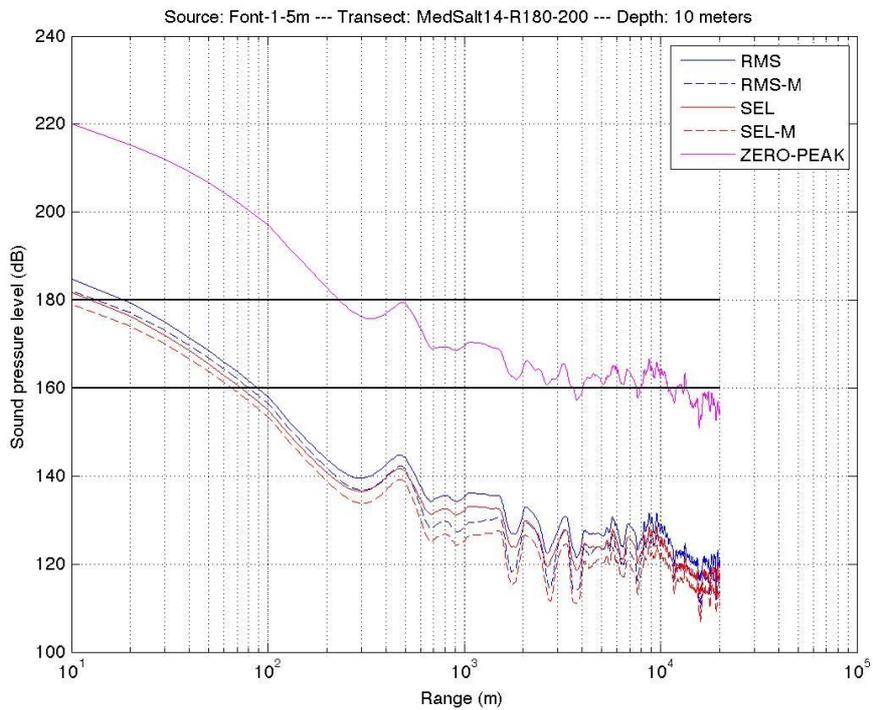
**Tipo de fuente** 1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in  
**Peor caso por cada profundidad (10, 250, 600 y 1500 m)** D-U-U Todos Shallow

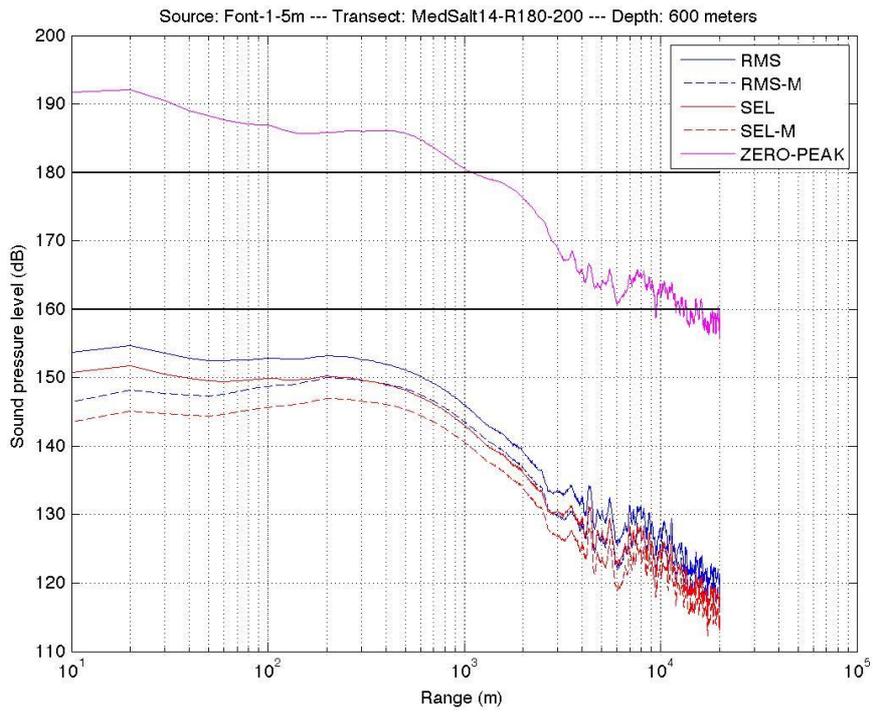
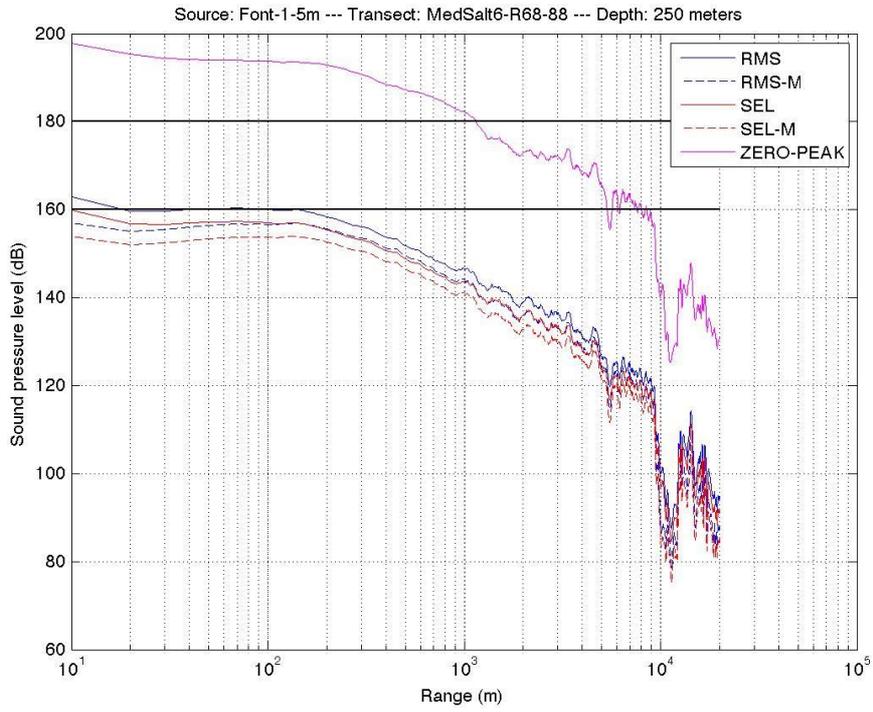




1.1.2 FUENTE 1 X 60 CU.IN.

**Tipo de fuente** 1 x 60 cu.in  
**Peor caso por cada profundidad (10, 250, 600 y 1500 m)** D-A-D Todos Shallow

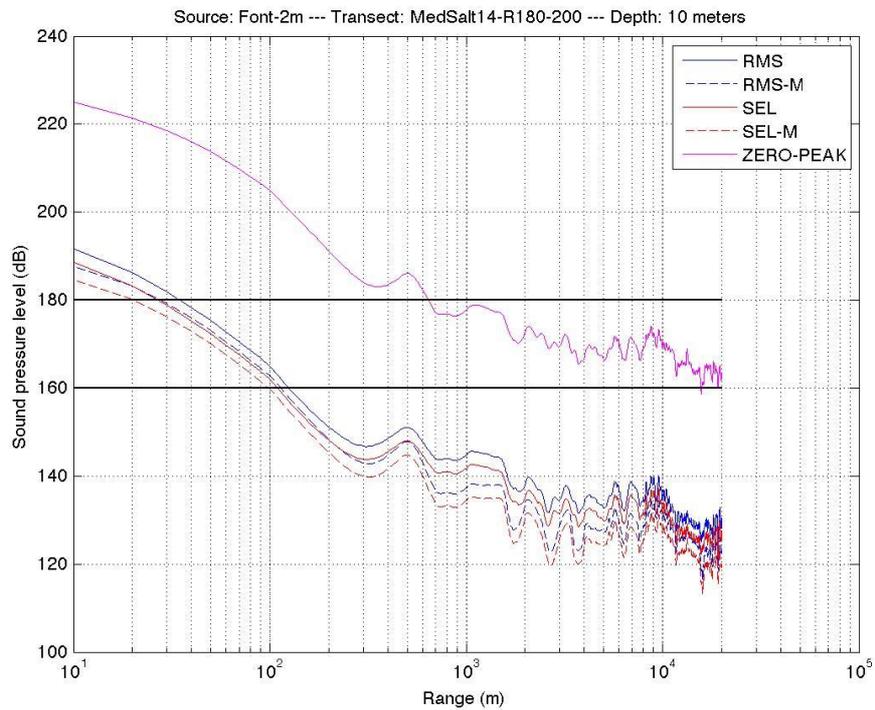


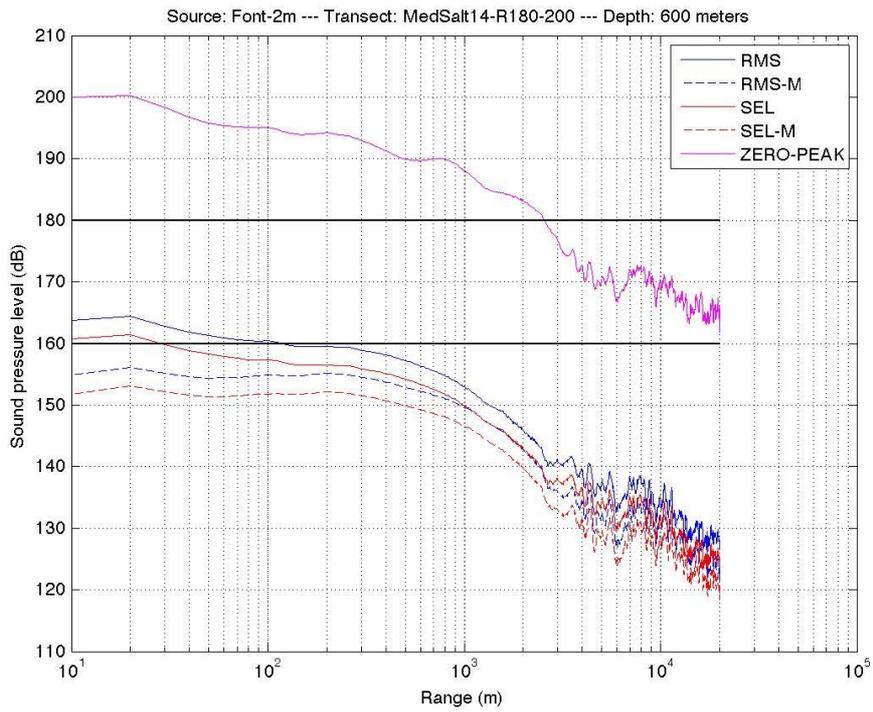
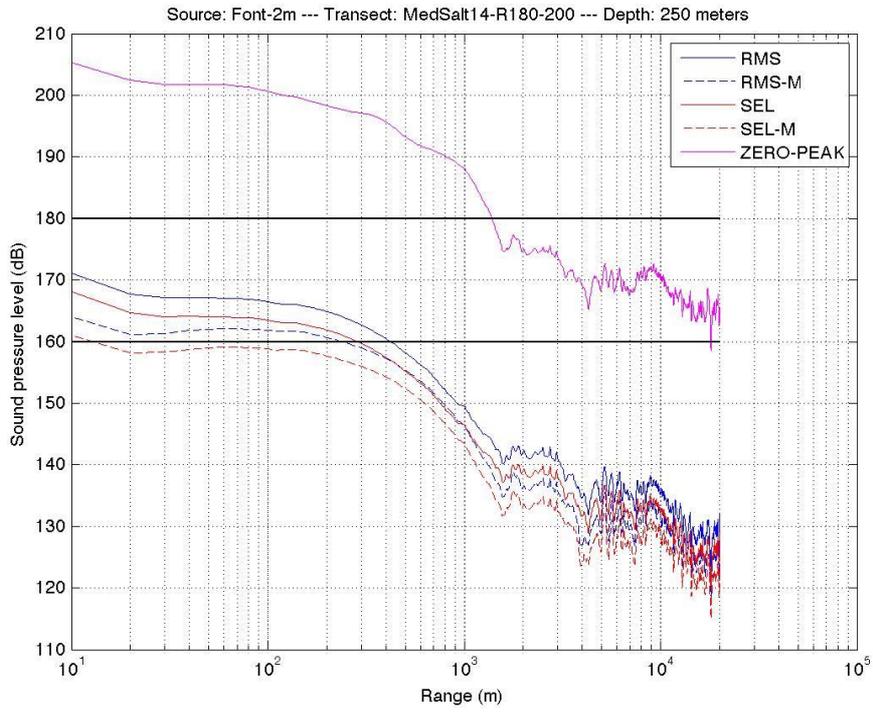


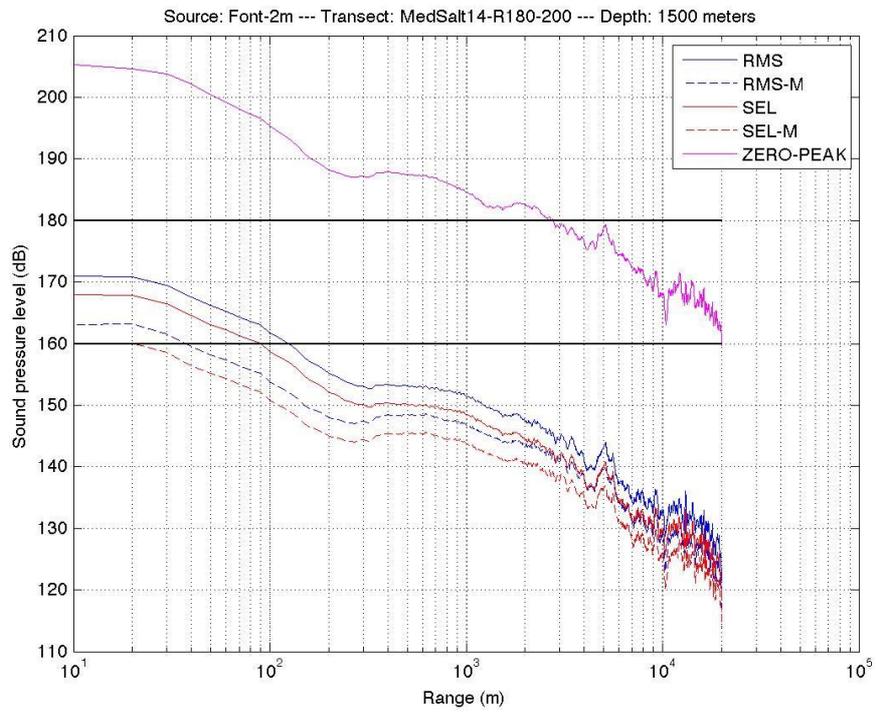
## 1.2 ZONA 2

### 1.2.1 FUENTE 1 X 210 CU.IN. + 1 X 60 CU.IN.

<b>Tipo de fuente</b>	<b>1 x 210 cu.in + 1 x 60 cu.in</b>
<b>Peor caso por cada profundidad (10, 250, 600 y 1500 m)</b>	<b>D-D-D-D Todos Deep</b>

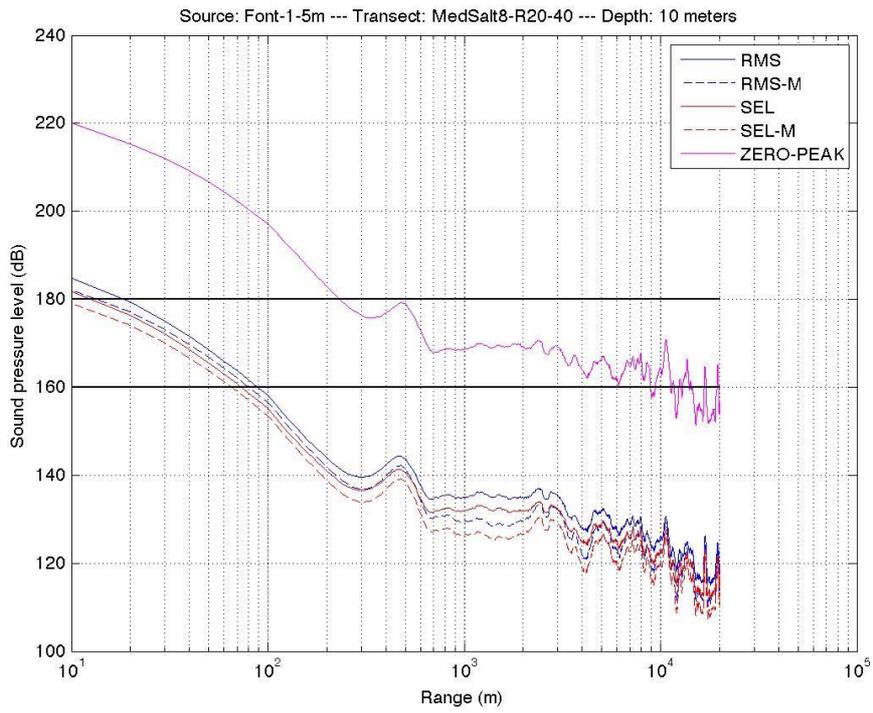


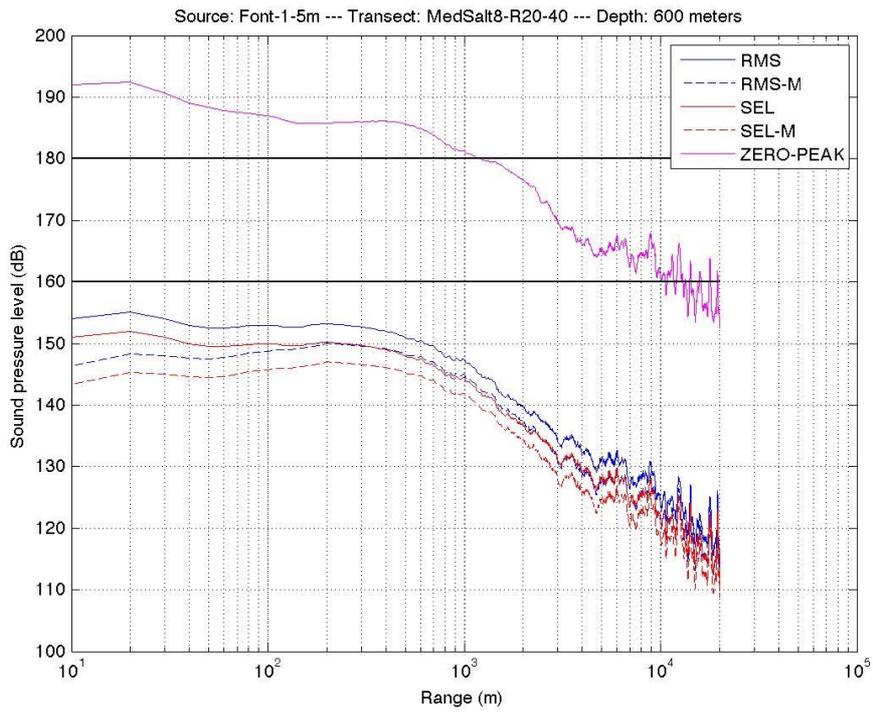
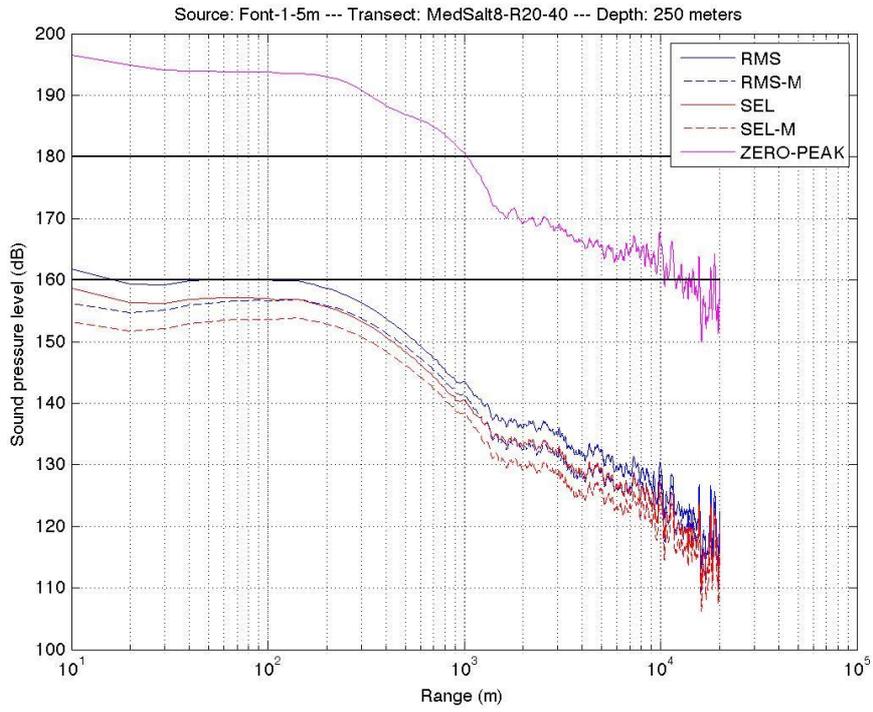


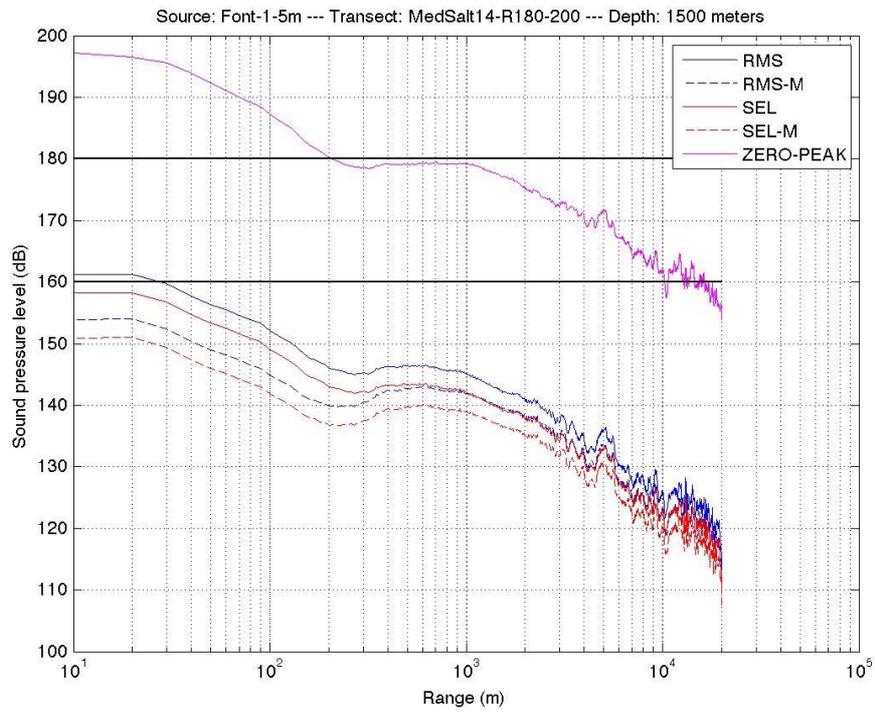


1.2.2 FUENTE 1 X 60 CU.IN.

**Tipo de fuente** 1 x 60 cu.in  
**Peor caso por cada profundidad (10, 250, 600 y 1500 m)** F\_Med-F\_Med- No se llega -D\_Deep



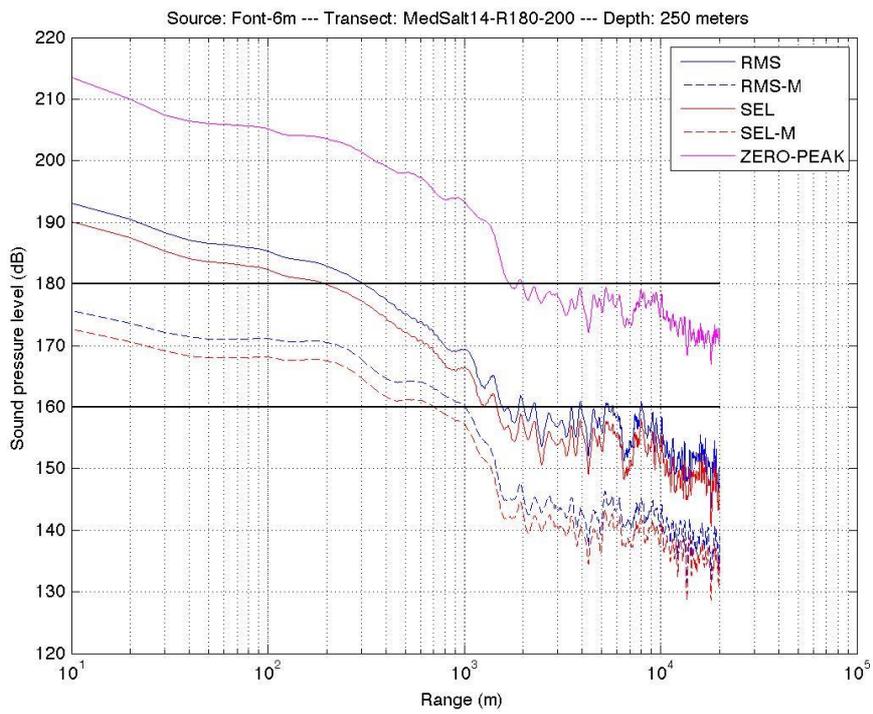
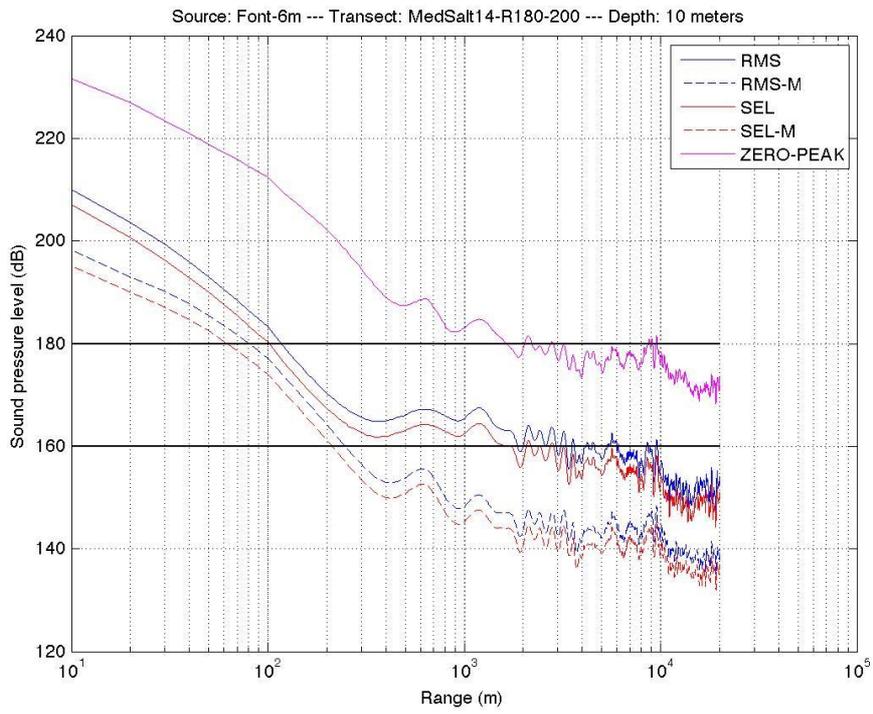


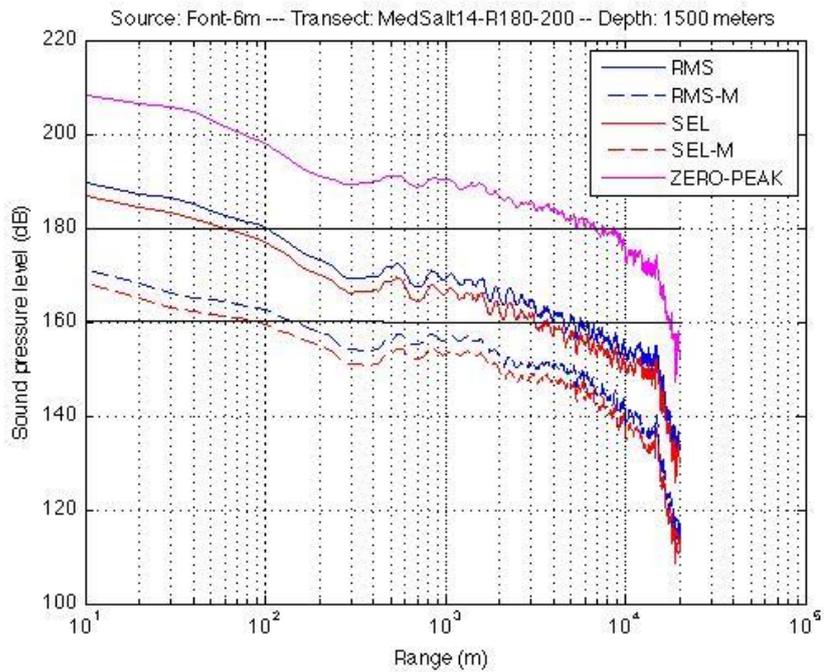
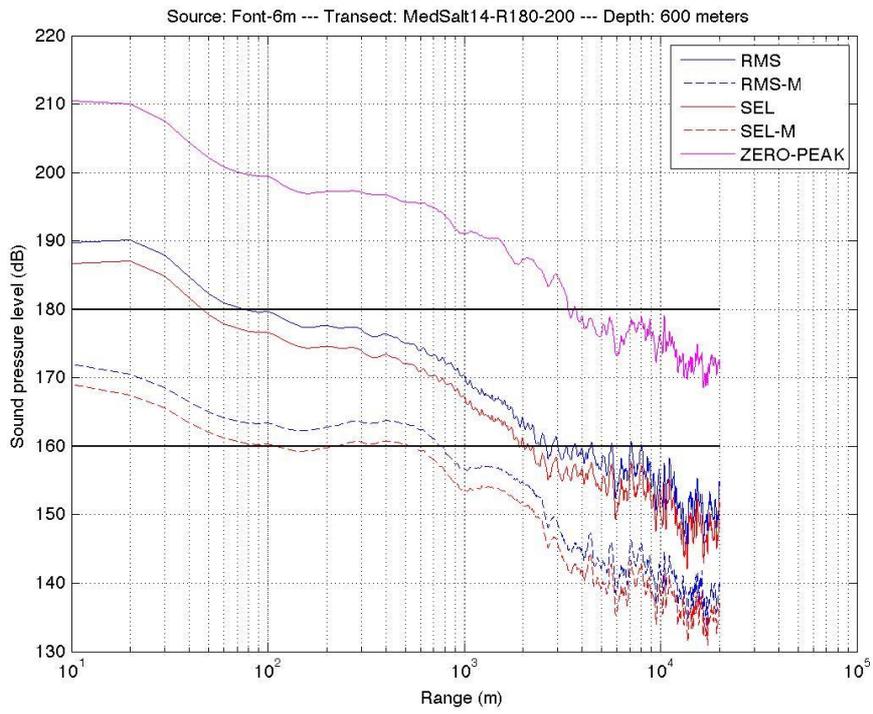


### 1.3 ZONA 3 Y ZONA 4

#### 1.3.1 FUENTE 4 X 250 CU.IN.

<b>Tipo de fuente</b>	<b>4 x 250 cu.in</b>
<b>Peor caso por cada profundidad (10, 250, 600 y 1500 m)</b>	<b>D-D-D-D Todos Deep</b>



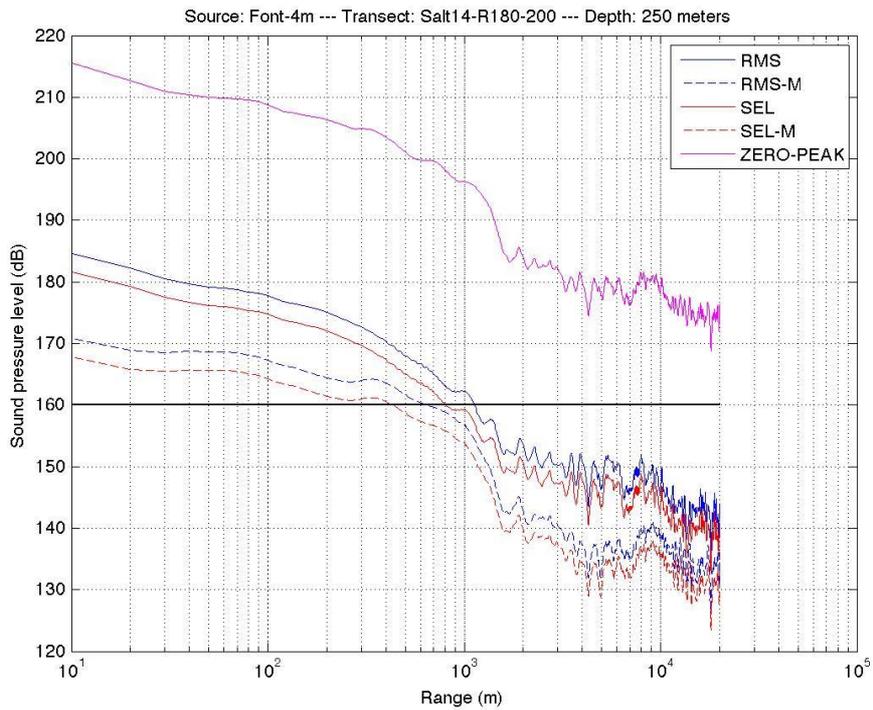
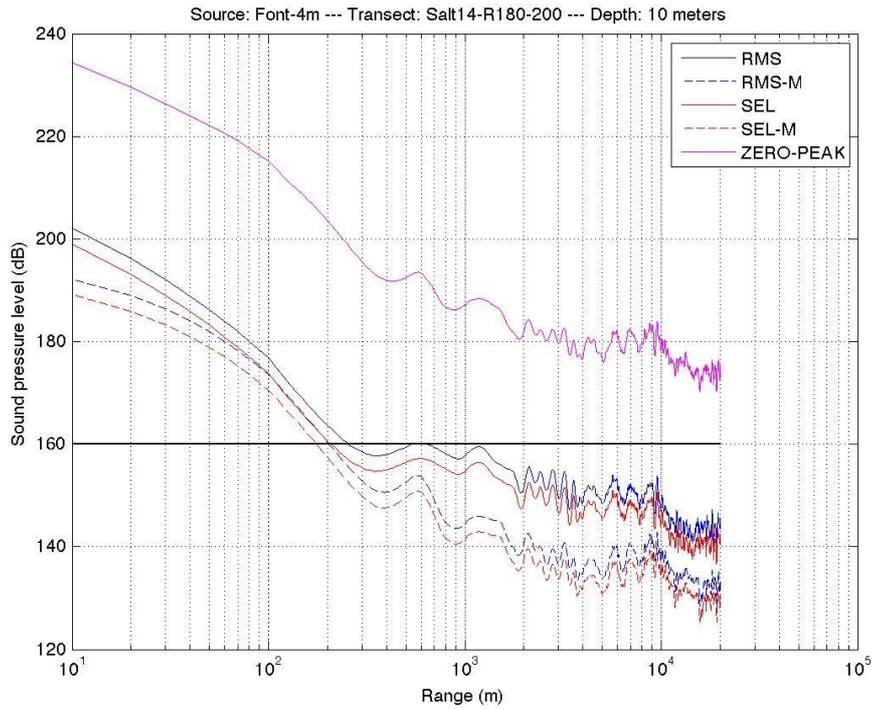


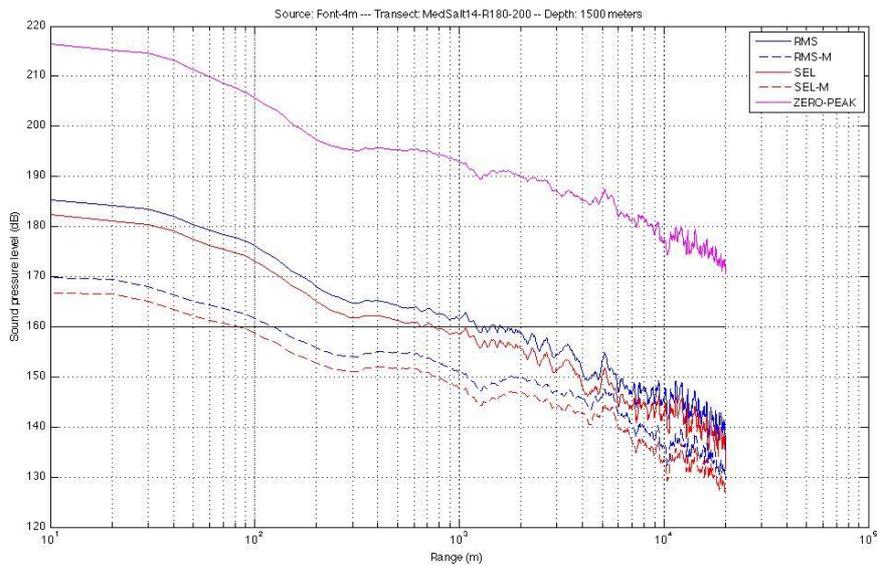
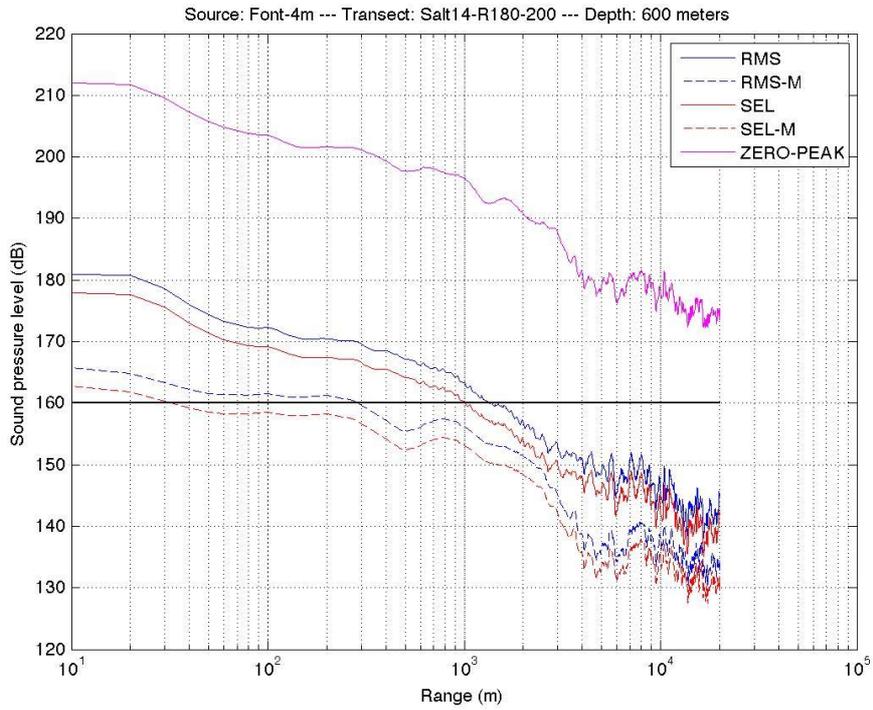


### 1.3.2 FUENTE 2 X 210 CU.IN.

---

<b>Tipo de fuente</b>	<b>2 x 210 cu.in</b>
<b>Peor caso por cada profundidad (10, 250, 600 y 1500 m)</b>	<b>D-D-D-D Todos Deep</b>







## ANEXO B

En relación con el rango frecuencial considerado en las simulaciones numéricas, se consideran dos factores para su justificación: (i) la distribución espectral de potencia acústica de las fuentes, (ii) y las contribuciones de cada banda espectral a los valores globales.

Por lo que se refiere a las fuentes acústicas consideradas, todas ellas presentan energía a baja frecuencia, como se desprende de la lectura de la Figura 5. Asimismo, de su observación se concluye que a medida que la frecuencia se incrementa (a partir de 500Hz) la energía decae.

En relación con las contribuciones de las componentes frecuenciales a los valores globales, son muy mayoritariamente debidos a las bandas de octava correspondientes a frecuencias inferiores a la banda de octava de 500 Hz, siendo las frecuencias iguales o superiores prácticamente irrelevantes por lo que se refiere a su contribución a los valores globales.

Con el fin de comprobar dicho comportamiento, se realiza un estudio detallado para cada distancia a la fuente. Se tienen en cuenta 2000 puntos distribuidos linealmente sobre los 20 km de rango considerando, lo que implica una resolución espacial de 10 m.

Para cada punto o distancia a la fuente se buscan las tres bandas de octava que mayor aporte de energía tienen al valor global. Se calcula la diferencia entre el valor global considerando todas las bandas frecuenciales y el valor global considerando únicamente las tres bandas anteriormente mencionadas.

Dado que la ponderación frecuencial puede jugar un papel importante en el cómputo de cada banda frecuencial al valor global de un índice ponderado, se realiza el estudio para un índice ponderado y para un índice no ponderado. Ciertamente, esta ponderación aplica mayormente a las bandas frecuenciales inferiores a 1000 Hz, precisamente en el rango frecuencial donde mayor potencia acústica presentan las fuentes consideradas. Se descarta que tras aplicar la ponderación, las frecuencias superiores a 500 Hz cojan mayor importancia a la contribución del valor global.

Dada la gran cantidad de casos bajo estudio: 112 (7 tipologías de transecto, 4 profundidades analizadas, y 4 fuentes distintas), e índices calculados, se procede al análisis de los rangos mayores según la Tabla 11 dado que pertenecen a los de mayor impacto acústico por lo que se refiere a los valores RMS.

Por lo que se refiere al análisis sobre el índice SEL<sub>M</sub>, se realizan los cálculos sobre el caso más desfavorable.

## 6.1 FUENTE 4X250 CU.IN. RMS

De acuerdo con la Tabla 11, el mayor rango para la fuente 4x250 cu.in. es para el transecto D\_DEEP, y la profundidad de 10 m. Para esta combinación fuente-transecto-profundidad, la Figura 24a muestra para cada distancia de la fuente las tres bandas frecuenciales con mayor energía del valor o índice global RMS.

Del análisis del histograma de apariciones de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS de la Figura 24b, se desprende que las aportaciones mayores se corresponden a las bandas de octava inferiores a 500 Hz. En el cómputo de todo el rango de 20 km con resolución espacial de 10 m, la banda de 1000 Hz no aparece.

En la Figura 24c se compara la evolución del valor RMS calculado como la suma de todas las componentes consideradas en dicho estudio (bandas de octava de 16 Hz a 1000 Hz) en función del rango (en azul), y la evolución del valor RMS fruto de considerar únicamente las tres componentes frecuenciales con mayor energía (en rojo)

En histograma de la Figura 24d se detalla la pequeña variación entre ambos valores, validada, pudiéndose apreciar que la gran mayoría de diferencias son menores que media décima de dB.

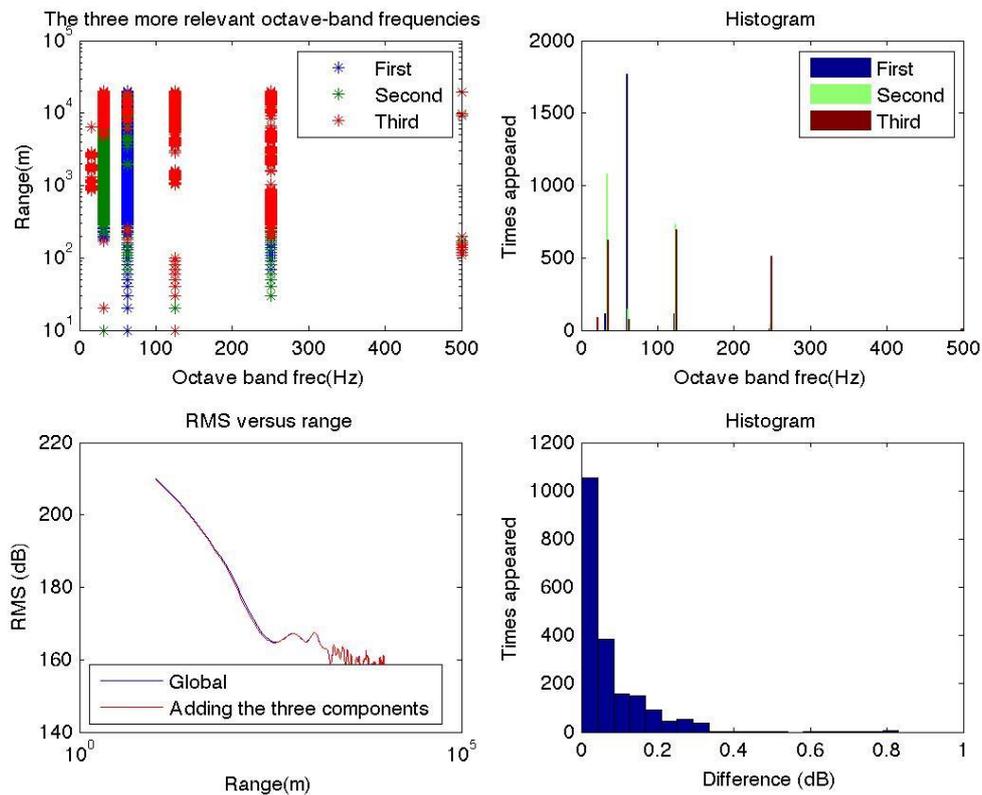


Figura 24 Análisis para el transecto D\_DEEP a una profundidad de 10 m, con fuente 4x250 cu.in.

- (a Superior Izquierda) Bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS, en función del rango
- (b Superior Derecha) Histograma de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS
- (c Inferior Izquierda) Evolución del valor RMS Global (azul) y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación (rojo)
- (d Inferior Derecha) Histograma de las diferencias entre el valor RMS Global y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación

El análisis pormenorizado de las otras dos profundidades estudiadas para este transecto (250, 600 y 1500 m), bajo la misma fuente acústica, conduce a las mismas conclusiones. Se pueden consultar los gráficos a continuación:

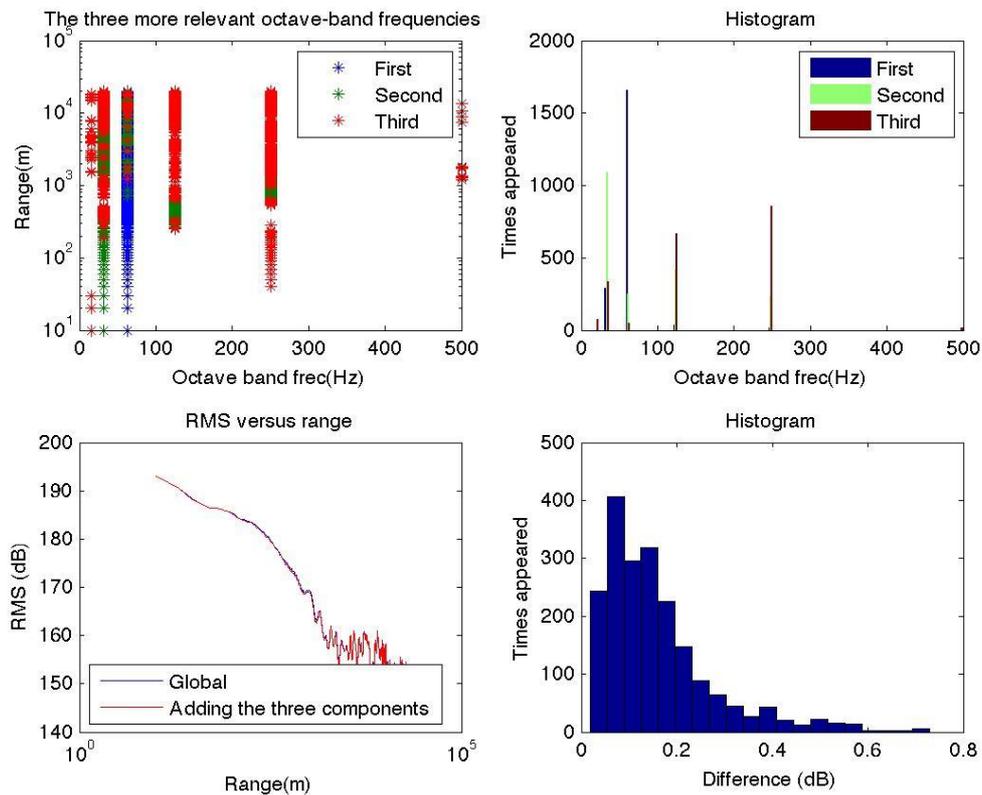


Figura 25 Análisis para el transecto D\_DEEP a una profundidad de 250 m, con fuente 4x250 cu.in.

- (a Superior Izquierda) Bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS, en función del rango
- (b Superior Derecha) Histograma de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS
- (c Inferior Izquierda) Evolución del valor RMS Global (azul) y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación (rojo)
- (d Inferior Derecha) Histograma de las diferencias entre el valor RMS Global y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación

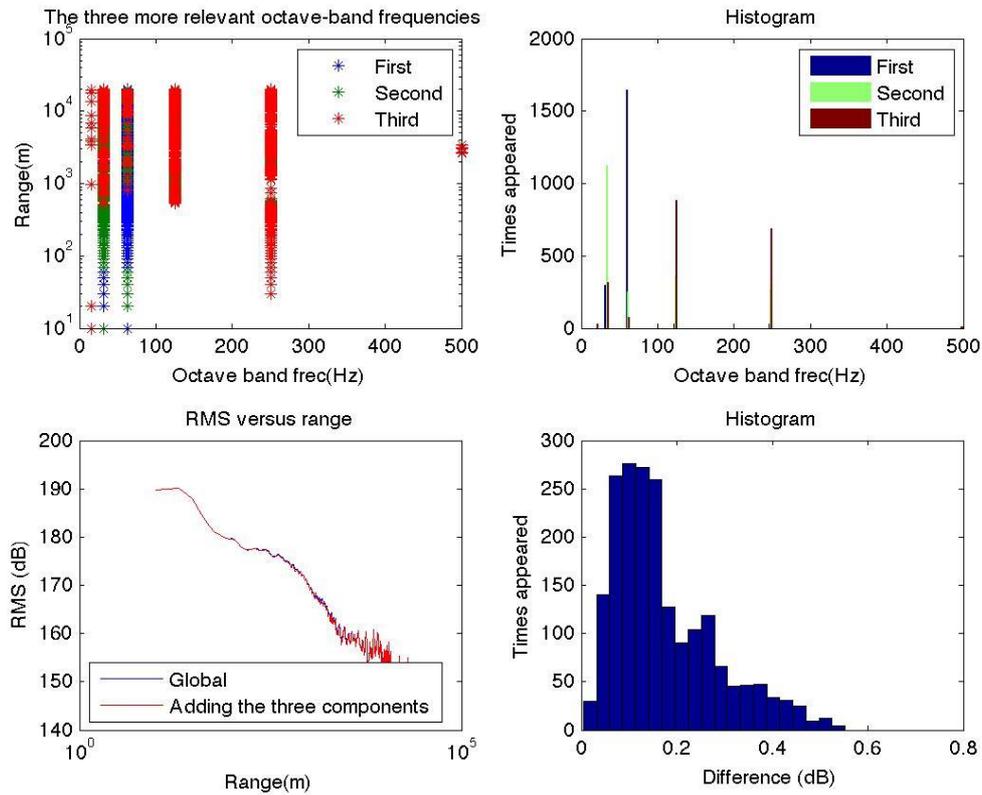


Figura 26 Análisis para el transecto D\_DEEP a una profundidad de 600 m, con fuente 4x250 cu.in.

- (a Superior Izquierda) Bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS, en función del rango
- (b Superior Derecha) Histograma de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS
- (c Inferior Izquierda) Evolución del valor RMS Global (azul) y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación (rojo)
- (d Inferior Derecha) Histograma de las diferencias entre el valor RMS Global y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación

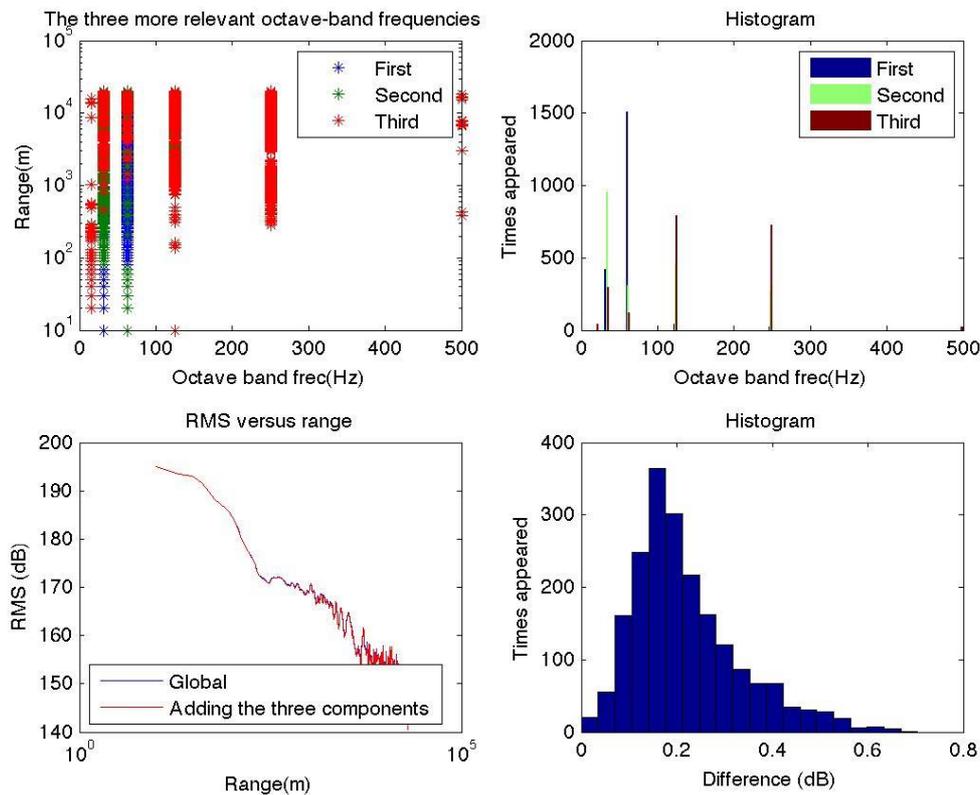


Figura 27 Análisis para el transecto D\_DEEP a una profundidad de 1500 m, con fuente 4x250 cu.in.

(a Superior Izquierda) Bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS, en función del rango

(b Superior Derecha) Histograma de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS

(c Inferior Izquierda) Evolución del valor RMS Global (azul) y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación (rojo)

(d Inferior Derecha) Histograma de las diferencias entre el valor RMS Global y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación

Este estudio se ha realizado por todos los transectos. A continuación se pueden consultar las gráficas correspondientes al transecto D\_SHA con la fuente 1x210 cu.in. + 1x60 cu.in. para un límite fijado en RMS=160 dB, correspondiente a la mayor zona de impacto acústico de las Zonas 1 y 2 de la campaña.

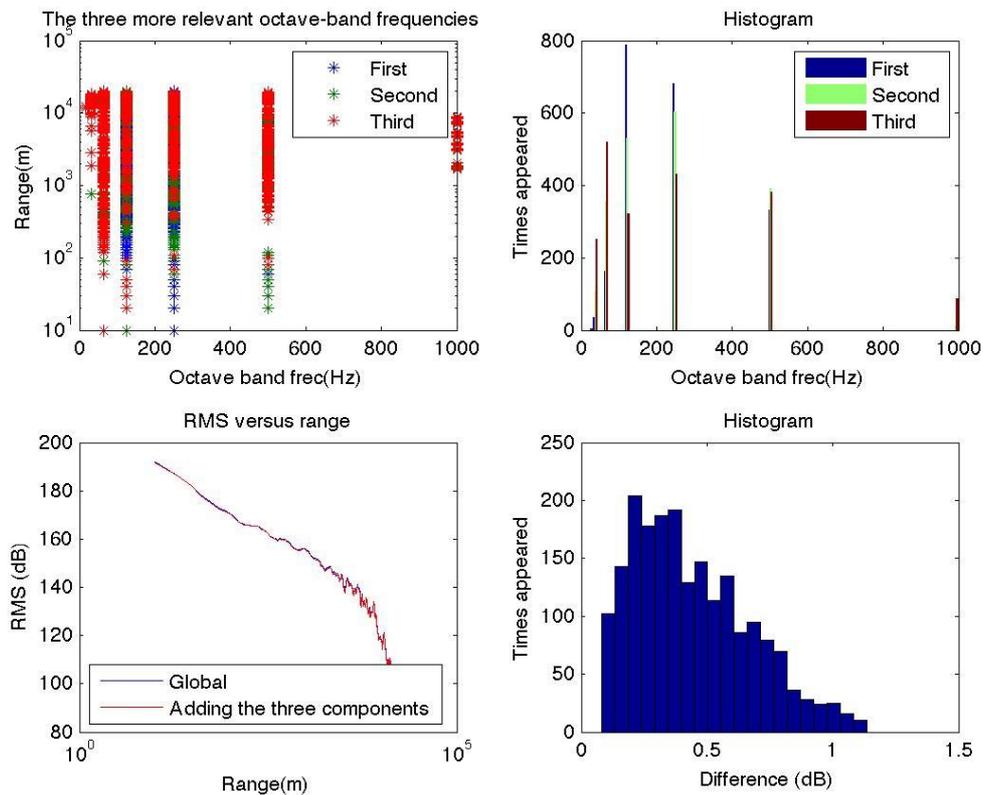


Figura 28 Análisis para el transecto D\_SHA a una profundidad de 10 m, con fuente 2x210 cu.in + 1x60 cu.in.

(a Superior Izquierda) Bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS, en función del rango

(b Superior Derecha) Histograma de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS

(c Inferior Izquierda) Evolución del valor RMS Global (azul) y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación (rojo)

(d Inferior Derecha) Histograma de las diferencias entre el valor RMS Global y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación

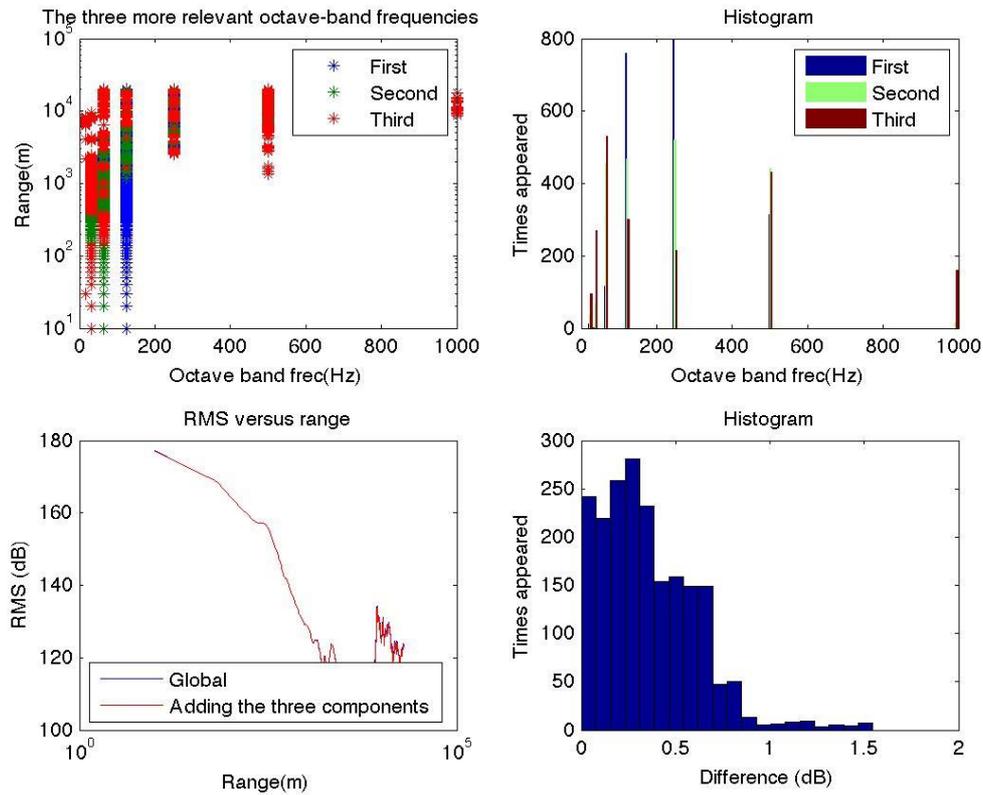


Figura 29 Análisis para el transecto D\_SHA a una profundidad de 250 m

- (a Superior Izquierda) Bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS, en función del rango
- (b Superior Derecha) Histograma de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS
- (c Inferior Izquierda) Evolución del valor RMS Global (azul) y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación (rojo)
- (d Inferior Derecha) Histograma de las diferencias entre el valor RMS Global y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación

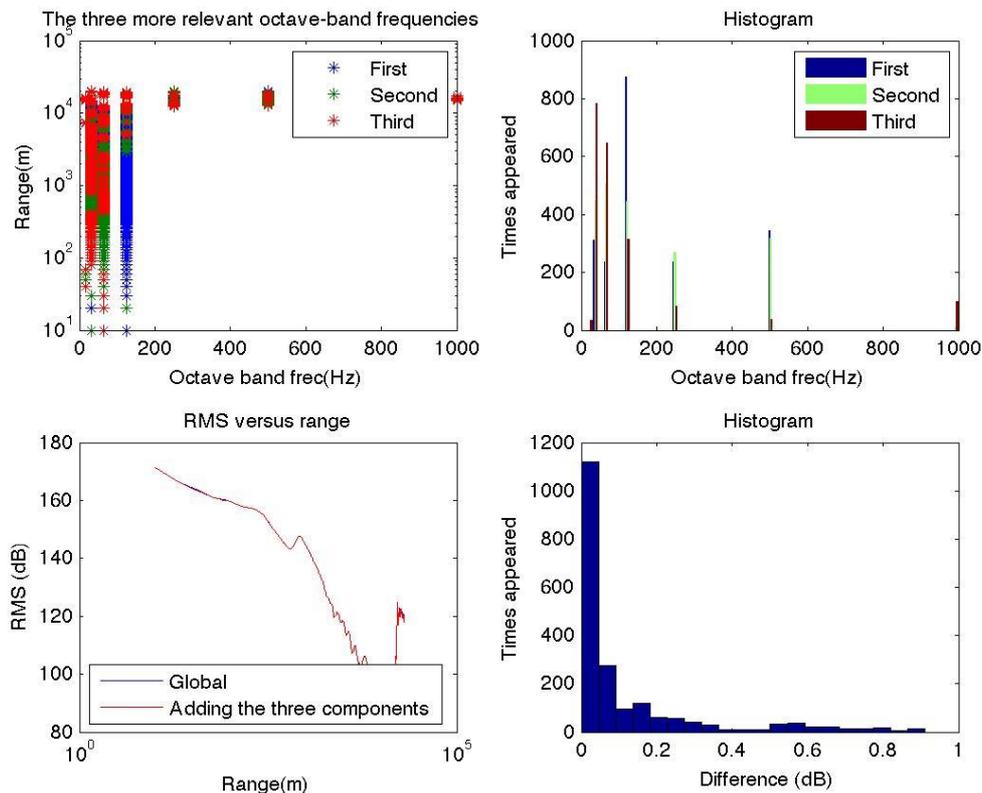


Figura 30 Análisis para el transecto D\_SHA a una profundidad de 600 m

- (a Superior Izquierda) Bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS, en función del rango
- (b Superior Derecha) Histograma de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global RMS
- (c Inferior Izquierda) Evolución del valor RMS Global (azul) y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación (rojo)
- (d Inferior Derecha) Histograma de las diferencias entre el valor RMS Global y RMS considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación

Con el fin de comprobar la baja afectación de esta variación sobre los rangos de exclusión sobre el índice RMS, la Tabla 15 indica los límites de exclusión específicos para el transecto de D\_DEEP para las profundidades de 10, 250, 600 y 1500 m, considerando todo el rango frecuencial bajo análisis, o únicamente el rango frecuencial correspondiente a la suma de las tres bandas de octava con más energía en cada distancia de la fuente, con una resolución espacial de 10 m.

Se puede comprobar que los límites de exclusión son prácticamente iguales, con mínimas variaciones entre ambos cálculos.

Profundidad (m)	160 dB sobre RMS GLOBAL (m)	160 dB sobre RMS 3 main octave bands (m)
<b>10</b>	9623	9622
<b>250</b>	8035	8035
<b>600</b>	8035	8029
<b>1500</b>	5292	5285

Tabla 15 Límites de exclusión para el transecto D\_DEEP con la fuente 4x250 cu.in. para RMS=160 dB

## 6.2SEL\_M

Atendiendo a las consideraciones iniciales de esta justificación, y con el objetivo de esclarecer el comportamiento de los límites de exclusión que consideran índices ponderados, se procede a la validación de la baja influencia de las bandas de octava superiores a 500 Hz para el caso del SEL\_M.

A dicho efecto, las tablas Tabla 16 y Tabla 17 muestran los límites de exclusión a 183 dB ponderados M considerando el índice global SEL\_M.

1x210 cu.in + 1x60 cu.in	A_sha	D_sha	F_sha	U_sha
<b>10</b>	14	14	14	14
<b>250</b>	0	0	0	0
<b>600</b>	0	0	0	0
<b>1500</b>	0	0	0	0

Tabla 16 Límites de exclusión para la zona 1 y 2 con la fuente 1x210 cu.in. + 1x60 cu.in. para SEL=183 dBM

fuelle 4x250 cu.in	D_deep	F_deep	F_med
<b>10</b>	48	48	48
<b>250</b>	0	0	0
<b>600</b>	0	0	0
<b>1500</b>	0	0	0

Tabla 17 Límites de exclusión para la zona 3 y 4 con la fuente 4x250 cu.in. para SEL=183 dBM

La Figura 31 muestra los resultados para el transecto D\_DEEP con la fuente 4x250 cu.in. a una profundidad de 10 m. Se puede apreciar que la banda de octava de 1000 Hz aparece muy poco en el cómputo de las tres bandas de mayor aporte de energía al valor global SEL<sub>M</sub> en todas las distancias de hasta 20 km de la fuente. Asimismo, se puede apreciar que la diferencia entre los valores SEL<sub>M</sub> globales y aquél considerando únicamente la suma de dichas bandas frecuenciales, es del orden de décimas de dB.

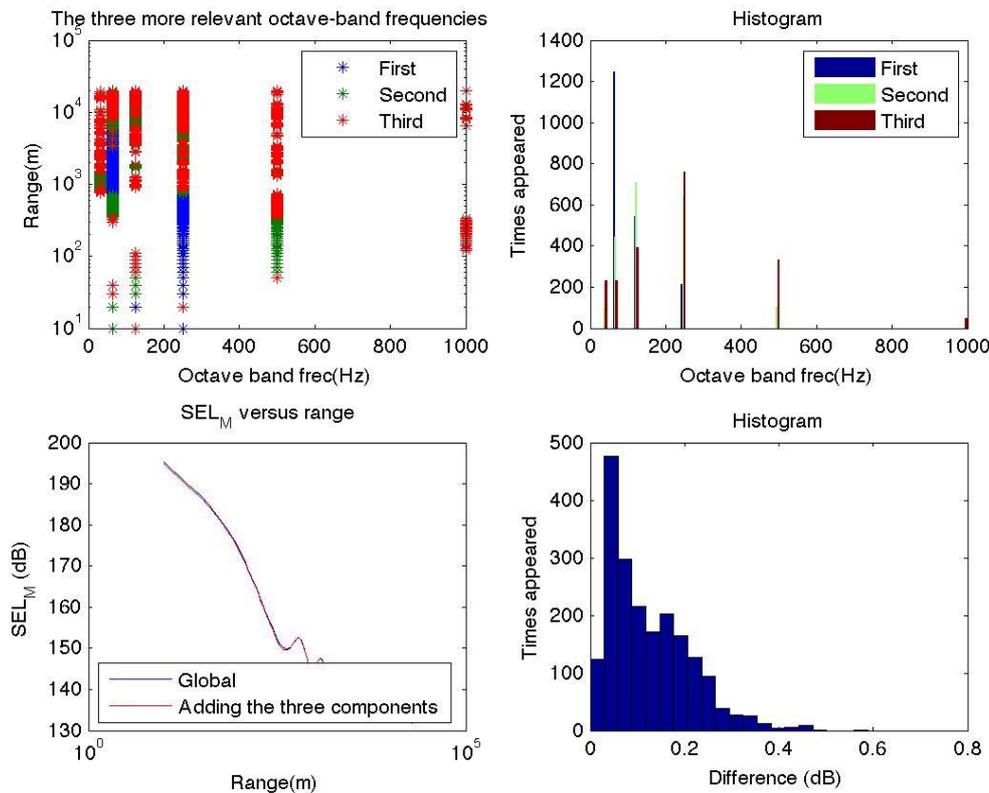


Figura 31 Análisis para el transecto D\_DEEP a una profundidad de 10 m, con fuente 4x250 cu.in.

(a Superior Izquierda) Bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global SEL<sub>M</sub>, en función del rango

(b Superior Derecha) Histograma de las tres bandas frecuenciales con mayor aportación al valor global SEL<sub>M</sub>

(c Inferior Izquierda) Evolución del valor SEL<sub>M</sub> Global (azul) y SEL<sub>M</sub> considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación (rojo)

(d Inferior Derecha) Histograma de las diferencias entre el valor SEL<sub>M</sub> Global y SEL<sub>M</sub> considerando las contribuciones de las tres bandas frecuenciales de mayor aportación

El cálculo de los rangos de exclusión considerando únicamente las tres bandas de octava más relevantes, se muestra a las tablas Tabla 18 y Tabla 19, donde se observa la nula influencia en despreciar las bandas frecuenciales superiores a 500 Hz.

1x210 cu.in + 1x60 cu.in	A_sha	D_sha	F_sha	U_sha
<b>10</b>	14	14	14	14
<b>250</b>	0	0	0	0
<b>600</b>	0	0	0	0
<b>1500</b>	0	0	0	0

**Tabla 18 Límites de exclusión para la zona 1 y 2 con la fuente 1x210 cu.in. + 1x60 cu.in. para SEL=183 dBM considerando las contribuciones de las tres bandas de octava más relevantes.**

fuelle 4x250 cu.in	D_deep	F_deep	F_med
<b>10</b>	46	46	46
<b>250</b>	0	0	0
<b>600</b>	0	0	0
<b>1500</b>	0	0	0

**Tabla 19 Límites de exclusión para la zona 3 y 4 con la fuente 4x250 cu.in. para SEL=183 dBM considerando las contribuciones de las tres bandas de octava más relevantes.**

### 6.3 CONCLUSIÓN

El análisis de los dos casos estudiados con anterioridad indica que la mayor aportación de energía, a los valores globales, ponderados o no, es de baja frecuencia. Las bandas frecuenciales de 500 Hz y 1000 Hz tienen un aporte de energía poco relevante.

Asimismo, se valida que las diferencias entre los valores globales calculados con todas las bandas frecuenciales, y únicamente las bandas frecuenciales con mayor aporte de energía al valor global, es del orden de décimas de dB.

Se ha comprobado que la variación de los rangos de exclusión, considerando ambos valores, es poco significativa.

Las anteriores consideraciones se han validado por el conjunto de transectos y profundidades consideradas en esta modelización acústica.



Atendiendo a las anteriores aseveraciones, y considerando que la fuente de ruido presenta una tendencia a disminuir su potencia acústica a partir de la banda de octava de 500 Hz, se puede afirmar que las bandas superiores a 1000 Hz no influyen en el cálculo de los rangos de exclusión.

## BIBLIOGRAFÍA

Abbott R. & Bing-Sawyer E., 2002. Assessment of pile driving impacts on the Sacramento blackfish (*Orthodon microlepidotus*). Draft report prepared for Caltrans District 4. San Francisco, CA: Caltrans.

Acosta J., Canals M., Carbó A., Muñoz A., Urgeles R., Muñoz- Martín A., Uchupi E., 2004. Seafloor morphology and Plio-Quaternary sedimentary cover of the Mallorca Channel, Balearic Islands, western Mediterranean. *Marine Geology* (in press).

Andriquetto-Filhoa J. M., Ostrenskya A., Pieb M. R., Silvac U. A. & Boeger W. A., 2005. Evaluating the impact of seismic prospecting on artisanal shrimp fisheries. *Continental Shelf Research* 25, 1720–1727.

Booman C., Dalen H., Heivestad H., Levsen A., van der Meeren T., Toklum K., 1996. Effekter av luftkanonskyting på egg, larver og ynell. Undersekkelser ved Hauforskningstutttet ogtoelgisk Laboratorium, Universitet; Bergen. *Fisken og Havet*, 3.

Boyd I., Brownell R., Cato D., Clark C., Costa D.P., Evans P., Gedamke J., Gentry R., Gisiner R., Gordon J., Jepson P., Miller P., Rendell L., Tasker M., Tyack P., Vos E., Whitehead H., Wartzok D., Zimmer W. 2008. The effects of anthropogenic sound on marine mammals: A draft research strategy. European Science Foundation Marine Board Position Paper 13. 24 pp.

Camerlenghi A., Accettella D., Costa S., Lastras G., Acosta J., Canals M., Wardell N., Morphogenesis of the SW Balearic continental slope and adjacent abyssal plain, Western Mediterranean Sea. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* (2009) 98:735–750

Carolyn J.S y Mark L.T. (2006). The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. *J. Cetacean Res. Manage.* 8(3):255–263

Castellote M., Christopher W. Clark , Lammers M.O (2012) Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation* 147 (2012) 115–122

Clark C.W., y Charif R.A. (1998). Acoustic monitoring of large whales to the west of Britain and Ireland using bottom-mounted hydrophone arrays, October 1996

September 1997. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.n.d.

Collins, Michael D. "Users guide for RAM versions 1.0 and 1.0p." Naval Research Lab, Washington DC (1995).

Dunn, F., et al. Handbook of acoustics. Ed. Thomas Rossing. Springer, 2015.

Etter, Paul C. Underwater acoustic modeling and simulation . CRC Press, 2013.

GEBCO. June 2015 <[www.gebco.net](http://www.gebco.net)>.

geocontext. June 2015 <[www.geocontext.org](http://www.geocontext.org)>.

J.J, Finneran and Dear R. , Carder S.H, Ridgway D.A Schlundt C.E. Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun. J. Acoust. Soc. Amer. 111: 2929-2940, 2002.

Laws, R.M., L. Hatton and M. Haarsten. "Computer modelling of clustered airguns." First Break (1990): 8.9.

Mackenzies, Kenneth V. "Nine - term equation for sound speed in the oceans." The journal of the acoustical society of america (1981): 807-812.

Porter, Michael B. "The Bellhop manual and user's guide: Preliminary Draft." Heat, Light and sound Reserch. Tech Rep (2011).

Salon, S. and et al. "Sound speed in the Mediterranean Sea: an analysis from a climatological data set." Annales Geophysicae (2003): Vol 21.

Southall, Brandon L and et al. "Marine mammal noise exposure criteri: Initial scientific recommendations." Aquatic mammals (n.d.): 411-509.

Urick, Robert J. Principles of underwater sound for engineers. Tata Mc Graw-Hill, 1967.

Urick, Robert J. Ambient noise in the sea. Catholic university of America, Washington DC, 1984.