



Puerto de Motril
GRANADA

Autoridad Portuaria de Motril

ESTUDIO AMBIENTAL ESTRATÉGICO DEL PLAN DIRECTOR DE INFRAESTRUCTURAS DEL PUERTO DE MOTRIL

**TRABAJO 3: ESTUDIO DEL IMPACTO DEL PDI SOBRE LOS MAMÍFEROS MARINOS Y
ESTUDIO DEL RUIDO SUBMARINO**



TECNOAMBIENTE

A TRADE COMPANY

Noviembre 2019

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	FUNDAMENTOS DE LA ACÚSTICA SUBMARINA	5
2.1	VELOCIDAD DEL SONIDO	6
2.2	PROPAGACIÓN DEL SONIDO	8
2.2.1	<i>Pérdidas por transmisión.....</i>	<i>9</i>
2.3	FRECUENCIA.....	10
3	LEGISLACIÓN	11
3.1	INTERNACIONAL.....	11
3.2	NACIONAL	14
4	PDI DEL PUERTO DE MOTRIL.....	15
4.1	ÁREA DE ESTUDIO	15
4.2	ÁREA DE ACTUACIÓN	16
4.3	FASE DE CONSTRUCCIÓN	19
4.4	FASE DE FUNCIONAMIENTO.....	21
4.4.1	<i>Tráfico marítimo actual</i>	<i>21</i>
4.4.2	<i>Previsión del tráfico marítimo futuro.....</i>	<i>23</i>
5	RECEPTORES: DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA.....	24
5.1	SENSIBILIDAD ACÚSTICA	27
6	METODOLOGÍA.....	29
6.1	DISEÑO DE CAMPAÑA	29
6.2	CONDICIONES METOCEÁNICAS.....	30
6.3	VELOCIDAD DEL SONIDO	31
6.4	OBTENCIÓN DE REGISTROS ACÚSTICOS	33
6.5	ANÁLISIS DE DATOS	35
6.5.1	<i>Preparación de los registros</i>	<i>35</i>
6.5.2	<i>Tratamiento de los datos.....</i>	<i>36</i>
6.5.3	<i>Preparación datos de verificación.....</i>	<i>39</i>
6.6	MODELO ACÚSTICO SUBMARINO	39
6.6.1	<i>Preparación datos de entrada</i>	<i>39</i>
6.6.2	<i>Modelo de propagación acústica submarina: fase funcionamiento, tráfico marítimo</i>	<i>40</i>
6.6.3	<i>Modelo de propagación acústica submarina: fase construcción.....</i>	<i>41</i>
6.6.4	<i>Datos acústicos</i>	<i>42</i>
6.6.5	<i>Consideraciones</i>	<i>43</i>
7	CRITERIO DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO ACÚSTICO SUBMARINO	44
7.1	LESIONES Y DAÑOS AUDITIVOS	45
7.2	COMPORTAMIENTO.....	45
8	RESULTADOS	47

8.1	MONITORIZACIÓN DEL RUIDO: ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE LA CAMPAÑA	47
8.2	ANÁLISIS TRÁFICO MARÍTIMO	53
8.3	MODELO DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA.....	54
8.3.1	<i>Fase construcción</i>	54
8.3.2	<i>Fase funcionamientos: tráfico marítimo</i>	56
9	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	57
9.1	MEDIDAS DE RUIDO AMBIENTE. CAMPAÑA DE MEDIDAS.....	57
9.2	MODELOS DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA	60
9.2.1	<i>Fase construcción</i>	60
9.2.2	<i>Fase de funcionamiento: tráfico marítimo</i>	61
10	CONCLUSIONES	62
10.1	RECOMENDACIONES	63
11	NOTAS FINALES Y FIRMAS	65
	ANEXO I: BIBLIOGRAFÍA	66
	ANEXO II: DESARROLLO MODELO PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA	70
13.1	TRÁFICO MARÍTIMO	70
13.1.1	<i>Exposición del problema</i>	70
13.1.2	<i>Desarrollo: Evolución del frente de ondas</i>	71
13.2	FASE DE CONSTRUCCIÓN	74
13.2.1	<i>Dragado en la bocana</i>	74
13.2.2	<i>Construcción dique de abrigo</i>	76

1 INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas generadoras de ruido submarino generan efectos adversos en la vida acuática (Slabbekoorn H. N., 2010) (Williams R. A.-S., 2015) Éstos varían desde efectos agudos tales como deficiencia auditiva permanente y/o temporal (Southall, 2007), a efectos crónicos, como pueden ser las alteraciones en el desarrollo (De Soto, 2003) (Nedelec, 2014), o fisiológicos debido al estrés (Wright A. A., 2007) (Rolland, 2012) e incluso la muerte.

Mientras que una parte del ruido antropogénico es producido intencionadamente (sonar naval, ecosondas, ...), la mayoría de las fuentes de ruido son un subproducto accidental de las propias actividades humanas (a través del tráfico marítimo, construcciones, etc.).

En general, las actividades ruidosas en el ámbito marino están sujetas a procesos regulatorios. Por ello, las Administraciones internacionales competentes de los países empiezan a requerir en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA en adelante), evaluaciones de impacto de ruido submarino con el fin de poder estimar el potencial impacto generado sobre especies clave.

Muestra de ello se ha reflejado en estos últimos años en países como España, donde la Administración está exigiendo a determinadas actividades marinas la realización de Estudios de Impacto Acústico Submarino para evaluar la compatibilidad de una actividad con la capacidad acústica del área y su sensibilidad, y así poder gestionar las posibles situaciones de afección.

La evaluación del posible alcance del impacto por ruido generado por una determinada actividad requerirá, por tanto, de la realización de una estimación de las emisiones acústicas y el análisis de los niveles de ruido que se producen en el entorno de los focos, de manera que se determinen las superaciones o no de límites establecidos legislativamente.

El presente documento constituye el *Estudio de impacto acústico submarino*, el cual incluye los resultados de las modelizaciones acústicas submarinas (fase de construcción y funcionamiento) del Plan Director de Infraestructuras del Puerto de Motril en el Término Municipal de Motril (Granada), realizado con el objeto de complementar el Estudio Ambiental Estratégico, y determinar la posible afección sobre el medio.

En cualquier caso, se ha mantenido el criterio acústicamente más desfavorable, es decir el escenario de máxima afección.

Este estudio comprende de dos partes bien diferenciadas que se ejecutarán consecutivamente:

- PARTE 1: Análisis de los registros acústicos realizados in situ.
 - Cuantificar los niveles de ruido natural y antropogénico según lo delineado por la Directiva 2008/56/CE, por la que se establece un marco de acción comunitaria para la política del medio marino (Directiva marco sobre la Estrategia Marina) y la consecuente Decisión 2010/477/EU que establece los criterios y estándares

metodológicos para conseguir el buen estado ambiental propuesto en la Directiva 2008/56/CE.

- Discriminar las fuentes de ruido de origen antropogénico registradas durante las campañas mediante técnicas de procesamiento de señal.
 - Cuantificar los diferentes tipos de ruido (impulsivo y continuo) presentes en el ámbito de actuación conforme a los requerimientos de la Directiva Marina (en adelante MSFD).
 - Establecer perfiles temporales de emisiones acústicas antropogénicas.
- PARTE 2: Modelizaciones acústicas de escenarios futuros para la obtención de los niveles de ruido propagados en la columna de agua:
 - Modelización acústica de la fase de construcción del puerto.
 - Modelización acústica del funcionamiento del puerto, una vez efectuada la ampliación

2 FUNDAMENTOS DE LA ACÚSTICA SUBMARINA

El sonido es una sensación que perciben muchas especies animales a través de órganos especializados (los órganos auditivos) que son capaces de detectar oscilaciones rápidas de presión del medio fluido en el que se encuentran y extraer parte de la energía contenida en dichas oscilaciones, las cuales constituyen, por tanto, la base física del sonido (CEDEX, Mayo 2015).

A medida que el sonido se propaga al exterior desde su emisión, la energía que contiene dicha onda disminuirá al ir aumentando la distancia con respecto a la fuente. Esto se denomina habitualmente atenuación. En el océano la atenuación depende de numerosos factores, como la profundidad del agua o el índice de absorción de sonido del agua (dependiendo, a su vez, de factores como la temperatura y la salinidad), etc.

Por tanto, la transmisión del sonido en el mar no se puede explicar con sencillez, debido a que existen muchos factores que influyen en este medio. Algunos de estos factores son:

- El mar no es un medio ilimitado, por lo que tanto la superficie como el fondo afectan a la transmisión. La superficie del mar produce una reflexión de las ondas, debido al cambio de impedancia acústica del agua al aire. Aunque el mar nunca está en reposo, con lo que la presencia de las olas dificulta la condición de superficie plana. Además, el fondo del mar introduce otra condición de límite, condicionada a la propia forma de dicho fondo.
- El mar no es un medio homogéneo ni isotrópico, hay tanto variaciones verticales como horizontales, siendo las más pronunciadas las verticales; dichas variaciones alteran la transmisión de la señal, básicamente se modifica la velocidad de transmisión del sonido. Estos fenómenos se deben a las variaciones de temperatura, densidad y presión que experimenta el agua del mar.

- Las diferentes moléculas disueltas en el mar varían de una zona a otra, alterando la capacidad de absorción del sonido.

Además de todo lo expuesto anteriormente, deben tenerse en cuenta posibles problemas de transmisión, el ruido producido por los organismos marinos, el generado por barcos, el de factores meteorológicos, aquellos debido a las corrientes y cambios de presión hidrostática, etc. (Recuero López, 1991).

2.1 VELOCIDAD DEL SONIDO

La velocidad del sonido en agua pura depende de la temperatura, pero en el mar deben tenerse en cuenta para la influencia en la velocidad del sonido dos factores adicionales, que son la salinidad y los cambios de presión asociados a los cambios en la profundidad. Cada uno de estos factores tiende a modificar la velocidad.

Existen varios modelos de velocidad del sonido (por ejemplo (Del Grosso, 1974); (Chen & Millero, 1977)). En este caso, se establecerá el valor de la velocidad del sonido empleando la siguiente ecuación empírica (CEDEX, Mayo 2015):

$$C = 1448,96 + 4,591T - 5,304 * 10^{-2}T^2 + 2,374 * 10^{-4}T^3 + 1,304(S - 35) + 1,630 * 10^{-2}Z + 1,675 * 10^{-7}Z^2 - 1,025 * 10^{-2}(S - 35) - 7,139 * 10^{-13}TZ^3$$

Ecuación 1. Velocidad del sonido

Fuente: Mackenzie, 1981

Donde:

- C velocidad del sonido en m/s,
- t temperatura del agua en 1°C ,
- S salinidad expresada en tantos por mil,
- d profundidad con relación a la superficie del mar en m.

La velocidad del sonido aumenta al aumentar cualquiera de estas tres variables. La velocidad del sonido en la superficie del mar, considerando un 35 por 1.000 de salinidad es de 1.449 m/s. En las siguientes figuras se muestran gráficamente las variaciones (aumento) de la velocidad del sonido según las variables de temperatura, salinidad y profundidad.

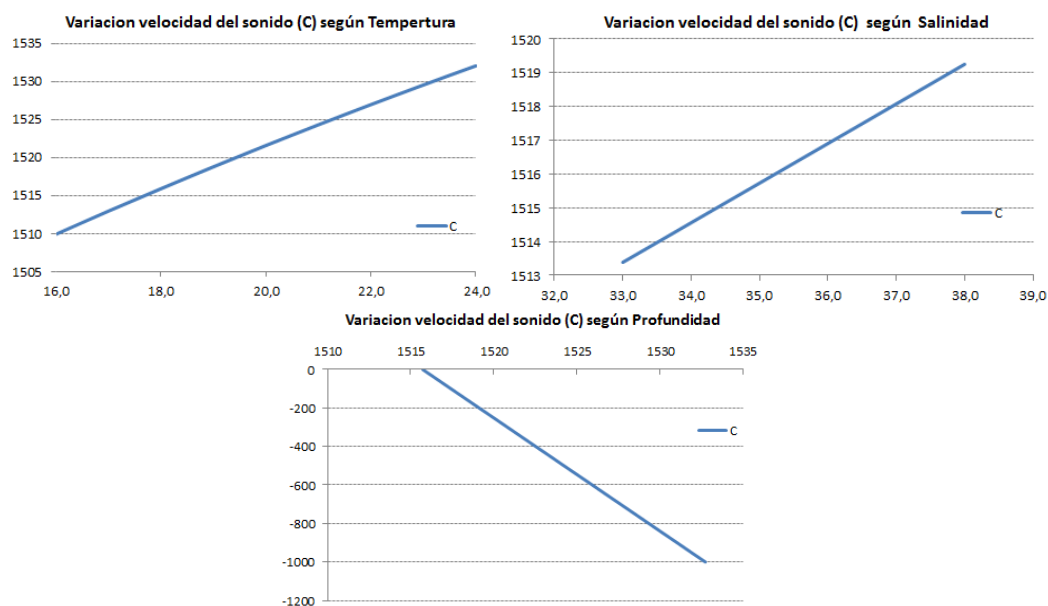


Ilustración 1 Descripción de la variación de la velocidad del sonido según las variables de temperatura, salinidad y profundidad

El agua de mar suele presentar estratificación de densidad, es decir, los gradientes horizontales de densidad son miles de veces más pequeños que los gradientes verticales. A su vez, la densidad está determinada por la salinidad y la temperatura de forma que distintas combinaciones de estas dos variables pueden dar lugar a la misma densidad.

En la siguiente ilustración se representan los rangos de variación de la velocidad del sonido para diferentes zonas marinas en los primeros 500 m desde la superficie. Puede apreciarse cómo en la superficie existe una gran variabilidad, que va decreciendo hasta anularse a una profundidad de unos 100 m. Esta variabilidad se debe fundamentalmente a las oscilaciones diarias y estacionales de temperatura en la atmósfera, que se van propagando hacia capas de mayor profundidad de una forma cada vez más atenuada. A partir de una cierta profundidad las condiciones de salinidad y temperatura son muy estables y la velocidad del sonido solo varía debido al incremento de profundidad, por lo que el gradiente de variación es constante.

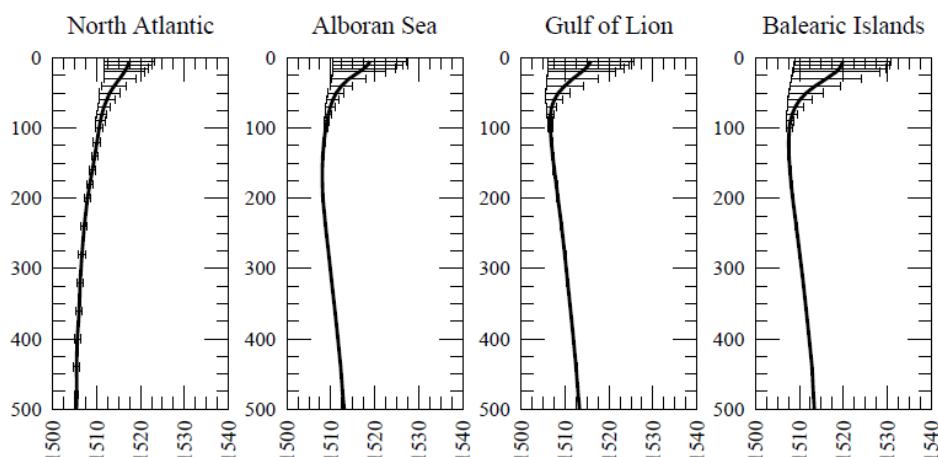


Ilustración 2. Variabilidad de los perfiles verticales de velocidad del sonido en el Golfo de Cádiz (North Atlantic) y en diversas zonas del Mediterráneo occidental.

Fuente: (CEDEX, Mayo 2015)

Por otro lado, la variación de velocidad origina fenómenos de refracción de las ondas, y esta desviación hace que las mismas no alcancen determinadas zonas (zonas de sombra). La trayectoria de una onda sonora a través de un medio en el que la velocidad varía con la profundidad se puede calcular mediante la aplicación de la ley de Snell. Esta ley se puede poner de tal forma que

$$\frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} = \frac{c}{c_0}$$

Ecuación 2.

Donde,

- θ es el ángulo que forma el rayo con la horizontal a una profundidad donde la velocidad del sonido es C ,
- y C_0 es la velocidad a una profundidad donde el rayo forma un ángulo θ_0 .

Además, recordar que a su vez dependerá de la velocidad de la onda en el medio (C), y de su frecuencia (longitud de onda, λ), expresado en metros por ciclo de la onda, siendo $\lambda=C/f$.

2.2 PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Las ondas acústicas en el agua se producen, transmiten y detectan dentro de una gama muy amplia de frecuencias, que van aproximadamente de unos 2 Hz a unos 50 MHz. El flujo de energía de una onda esférica, en ausencia de disipación, decrece inversamente con el cuadrado de la distancia a la fuente (divergencia geométrica).

La atenuación en condiciones submarinas es mayor que en el aire, y esto se debe principalmente a los cambios de densidad del agua. La atenuación del sonido en agua es muy

difícil de medir. El valor de la atenuación anómala depende de las condiciones del agua y su inhomogeneidad, decayendo respecto a la distancia a la fuente.

A modo explicativo, aunque la onda sonora es inicialmente de naturaleza esférica puede deformarse por diferentes motivos. A continuación, se destacan las principales asunciones teóricas (Etter, 2013):

- Los cambios de velocidad del sonido pueden llevar a que en determinadas profundidades se transmita como una onda plana en cuyo caso la atenuación con respecto a la distancia es lineal y no cuadrática.
- La onda se puede confinar entre la superficie y el fondo en cuyo caso la propagación es parecida a la de una onda cilíndrica.

Bajo estas condiciones, en ausencia de disipación, la energía disminuye generalmente con la distancia, pudiendo alcanzarse (a bajas frecuencias) transmisión a grandes distancias, influyendo a su vez, las características del fondo (arena, fango, roca, etc.) debido a los factores de absorción y reflexión.

2.2.1 Pérdidas por transmisión

Si el agua del mar se considerase como un medio homogéneo, el nivel de presión de un sonido que se propaga a partir de una fuente decrecería con sólo la contribución de los fenómenos de divergencia y absorción.

Generalmente las pérdidas por transmisión se dan a una distancia r con relación al nivel de presión que existe a la distancia de 1 m desde el centro efectivo de la fuente sonora (r_1), por lo que usando esta distancia de referencia los cálculos de las pérdidas por transmisión quedarían simplificados en la siguiente fórmula:

$$TL = 20 * \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + a(r_2 - r_1)$$

Ecuación 3.

Donde r_1 es a 1 m (valor de referencia 1 m de la fuente sonora) y r_2 es la distancia desde el centro aparente de la fuente sonora al punto de evaluación, y a la constante de absorción en dB/m (Recuero López, 1991).

Generalmente las pérdidas por transmisión (TL) se dan a una distancia r con relación al nivel de presión que existe a la distancia de 1 m desde el centro efectivo de la fuente sonora, por lo que usando esta distancia de referencia la expresión (Ecuación 3. puede ponerse, suponiendo una propagación esférica, de la siguiente forma:

$$TL = 20 * \log(r) + a(r)$$

Ecuación 4.

En el caso de la propagación cilíndrica, la Ecuación 3 quedaría:

$$TL = 10 * \log(r) + a(r)$$

Ecuación 5.

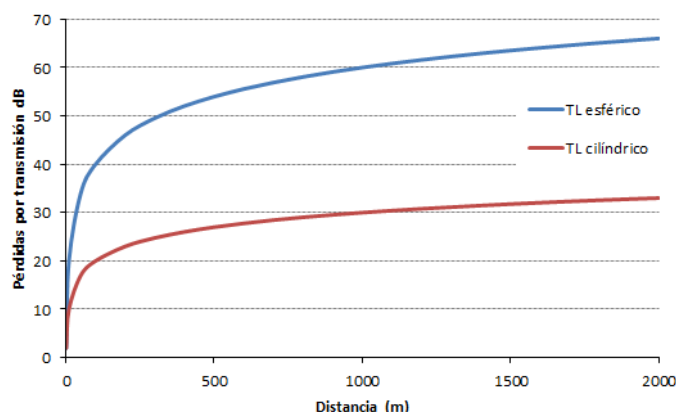


Ilustración 3. Descripción de la caída de niveles sonoros según distancia al foco emisor para una propagación esférica (azul) y cilíndrica (rojo)

Por otro lado, cuando las pérdidas por transmisión se miden en el océano, se observa frecuentemente un valor que varía sensiblemente del obtenido por la Ecuación 3. Los factores que contribuyen a las variaciones son una divergencia adicional debida a la refracción, interferencias constructivas y destructivas asociadas con múltiples tipos de propagación, incluyendo reflexiones en la superficie y el fondo del mar, difracción y scattering causados por la presencia de inhomogeneidades en el agua, etc.

Resulta imposible encontrar expresiones y valores precisos para calcular la pérdida por transmisión asociada con cada uno de estos factores. Todas estas pérdidas adicionales se representan mediante el término A que se llama anomalías de transmisión dado en dB (CEDEX, Mayo 2015), por consiguiente, la pérdida total por transmisión en dB está dada por:

$$TL = 20 * \log(r) + a(r) + A$$

Ecuación 6.

2.3 FRECUENCIA

Hay que recordar que la frecuencia es el número de veces que una onda completa un ciclo en un segundo. Sus unidades son ciclos por segundo o Hertzios (Hz).

Una fuente sonora puede estar compuesta de una superposición de frecuencias diferentes. Los sonidos que abarcan un rango pequeño de frecuencias se denominan de banda estrecha (narrow band). Otras fuentes acústicas, como golpes o muchos de los ruidos ambientales, están compuestas de muchas frecuencias, es decir, cubren un gran espectro sonoro, son de banda ancha (broadband). Así mismo, los análisis de un sonido pueden cuantificar la energía

comprendida en todas las frecuencias para dar un nivel de banda ancha, o filtrar sólo la energía contenida en una parte determinada del espectro. Se pueden por tanto medir niveles de banda estrecha y debe especificarse siempre qué frecuencias se están considerando (MAGRAMA, 2012).

Es común presentar la energía contenida en bandas de 1 Hz, para un análisis detallado de la señal (en este caso se expresan como dB re 1 μ Pa/Hz), así como en bandas de octava o de tercio de octava. Una octava es una banda cuyo límite superior es el doble de la frecuencia del límite inferior, por lo que el ancho de las bandas de octava se incrementa al hacerlo la frecuencia. Cada octava se divide en tres bandas de tercio de octava. El análisis en tercios de octava es frecuente porque se aproxima al procesado espectral del oído humano, ampliamente conocido y ofrece una idea del funcionamiento del oído de otros mamíferos (MAGRAMA, 2012). Consecuentemente, el análisis frecuencial será relevante a la hora determinar la afección del sonido en animales (mamíferos marinos).

3 LEGISLACIÓN

3.1 INTERNACIONAL

La contaminación acústica marina está contemplada en el marco del Derecho Internacional, tanto a través de instrumentos normativos como a través de resoluciones, procedentes de diferentes instituciones. En particular, son varios los convenios que están trabajando en el desarrollo y adopción de medidas específicas de protección contra la contaminación acústica. Destacando:

- Convención de las Naciones Unidas sobre Derecho del Mar (UNCLOS)
- Convenio OSPAR para la protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico del Nordeste. En 2009 aprobó un documento base de evaluación de los impactos del ruido submarino en el medio marino (OSPAR 2009a&b). Y en el 2015, OSPAR adoptó la estrategia de monitoreo o seguimiento del ruido ambiental (Agreement 2015-051).
- Actualmente, desde los diferentes grupos de trabajo ICG-NOISE de OSPAR, se están estudiando y proponiendo indicadores tanto para ruido impulsivo como de fondo. Ejemplo de ello se refleja en EIHA 2017, ICG-Noise donde se empezó a desarrollar un indicador común para evaluar el riesgo del impacto ambiental debido al ruido impulsivo en el Área Marítima OSPAR.
- El Convenio de Barcelona para la Protección del Medio Marino y de la Región Costera del Mediterráneo cuenta con diferentes provisiones en las que las Partes Contratantes se comprometen a reducir y mitigar los impactos de la contaminación en el medio marino [artículos 4 (1) y 2(a)]. A su vez, establece que todas las actividades que puedan

¹ Agreement 2015-05 OSPAR Monitoring Strategy for Ambient Underwater Noise.

afectar al medio ambiente marino, y que están sujetas a autorización por las autoridades nacionales competentes, requieren una evaluación de impacto ambiental.

Por otra parte, el Convenio de Barcelona aprobó en la Conferencia de las Partes (CoP) de 2008 la Decisión IG 17/6 para aplicar el enfoque ecosistémico en la gestión de las actividades humanas que puedan afectar a la región mediterránea. Y hace referencia, en uno de los once objetivos ecológicos, a la introducción de energía en el medio marino, con especial atención al ruido submarino.

- Convenio de Bonn sobre Especies Migratorias de Animales Silvestres (CMS). Concretamente mediante la reciente Resolución 9.19 sobre Impactos Antropogénicos adversos por ruido en el medio marino y oceánico sobre los cetáceos y sobre otras biotas de 2008, las Partes Contratantes se comprometen controlar el impacto de la contaminación sonora antropogénica en el hábitat de especies vulnerables; a adoptar medidas de reducción del uso de sónares navales de alta intensidad; a seguir desarrollando trabajos y estudios relativos al ruido submarino y aportar información relevante sobre el ruido submarino; y examinar la posibilidad de introducir “zonas protegidas de los ruidos”.
- Acuerdo para la Conservación de los Cetáceos del mar Negro, el mar Mediterráneo y el Área Atlántica Vecina (ACCOBAMS). Varias Resoluciones han sido aprobadas bajo el marco de ACCOBAMS en materia de ruido antropogénico. Destacar la Resolución 4.17 Directrices para tratar el impacto del Ruido Antropogénico sobre los Mamíferos Marinos en el área de ACCOBAMS. Mediante la Resolución, se pide a las Partes:
 - Asumir el ruido submarino en el medio marino, incluyendo los efectos acumulativos y teniendo en consideración la legislación aplicable, en particular lo referente a la necesidad de llevar a cabo Evaluación de Impacto Ambiental antes de autorizar las actividades productoras de ruido submarino.
 - Integrar las cuestiones asociadas al ruido submarino en los planes de gestión de las Áreas Marinas Protegidas.
 - Evitar o minimizar la producción de ruido en Áreas Marinas Protegidas y en Áreas que contengan hábitats críticos de cetáceos que puedan ser afectados por ruido antropogénico.
- Acuerdo para la conservación de los pequeños cetáceos del mar Báltico, el nordeste Atlántico, el mar de Irlanda y el mar del Norte (ASCOBANS). Destaca Resolución 6.2 del 2009 acerca de los efectos adversos del ruido submarino sobre los mamíferos marinos durante las actividades de construcción marinas para la producción de energías renovables.
- Organización Marítima Internacional (OMI)
- Comisión Ballenera Internacional (CBI)

Además, la Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 17 de junio de 2008 por la que se establece un marco de acción comunitaria para la política del medio marino (Directiva marco sobre la estrategia marina, MSFD en adelante) establece que los Estados

miembros deben adoptar las medidas necesarias para lograr o mantener un buen estado medioambiental del medio marino a más tardar en el año 2020. Para esto cada Estado miembro debe elaborar una estrategia marina para cada región o subregión marina (o subdivisión menor que cada estado pueda determinar).

La Comisión aprobó la Decisión de la Comisión 2010/477/UE, sobre los criterios y las normas aplicables al buen estado ambiental de las aguas marinas. Dicha Decisión contiene los criterios e indicadores asociados que permiten evaluar el buen estado ambiental, en relación a los 11 descriptores recogidos en el Anexo I de la Directiva, entre los que se encuentra “D11. Energía, incluido ruido submarino” (Descriptor nº 11).

Concretamente, el Descriptor 11 se define como “La introducción de energía, incluido el ruido subacuático, se sitúa en niveles que no afectan de manera adversa al medio marino”. Y para abordar este descriptor se establecen en la Decisión (UE) 2017/848 de la Comisión dos criterios:

- 1) D11C1: Distribución en el tiempo y el espacio de impulsos sonoros elevados, de frecuencia media y baja. Este criterio pretende evaluar la presión en el medio marino causada por fuentes puntuales (estudios sísmicos, explosiones, obras submarinas) que emiten ruidos impulsivos de elevada intensidad, susceptibles de producir impactos en el medio marino, principalmente en mamíferos marinos.
- 2) D11C2: Sonido continuo de baja frecuencia. Este segundo criterio se basa en la detección de tendencias, es decir cambios de año a año o a más largo plazo, en el ruido ambiente submarino. La principal fuente de ruido continuo de baja frecuencia en el medio marino es el tráfico marítimo.

En este sentido, el proyecto *quietMED*, responsable de la implementación de la segunda fase de la Directiva (MSFD), Descriptor 11, en el Mediterráneo fomenta la cooperación entre los Estados miembros. *quietMED*.

A través del proyecto *quietMED* se ha revisado la coherencia de la evaluación inicial del Buen Estado Ambiental (BEA en adelante) entre los Estados que participan en el proyecto (Estados del Mediterráneo) y la principal conclusión fue que existen grandes disparidades entre los enfoques de los diferentes países. Han aportado recomendaciones para mejorar la coherencia en las definiciones nacionales de los BEA y los objetivos ambientales.

En definitiva, España y el resto de los Estados miembros han establecido programas para conocer el estado de estos dos criterios.

Por otro lado, se están elaborando y aprobando recomendaciones de la Unión Europea e UNE-ISO, tales como:

- *“Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part I: physical quantities and their units”²*
- *“Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II: procedures for measuring underwater noise in connection with offshore wind farm licensing”³*

3.2 NACIONAL

Actualmente, en España, la transposición de la Directiva marco (Directiva 2008/56/CE) sobre la estrategia marina se ha llevado a cabo a través de la Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino (BOE nº 317, 30 de diciembre de 2010). La ley es fiel al texto europeo e incluye, además, otros aspectos de protección del medio marino previamente no desarrollados en la legislación española, como la Red de Áreas Marinas Protegidas de España y la regulación de los vertidos en el mar.

Concretamente, en materia de ruidos a nivel nacional se dispone de la Ley 37/2003 del Ruido y sus desarrollos, no obstante, su aplicación se enfoca al medio terrestre, requiriendo de un establecimiento formal para el control real de la contaminación acústica marina. Por tanto, no existe en nuestro país ninguna norma legal que determine las actividades marinas sujetas a evaluación ni umbrales cuantitativos de ruido subacuático como criterios de evaluación de impactos (CEDEX, Mayo 2015).

En España, los Estudio de Impacto Acústico Submarino se realizan para dar respuesta a requisitos administrativos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (en adelante, MAGRAMA), ya que puede exigir que se incluya en los EsIA estos estudios. Solicitando además que se “calculen los niveles de presión sonora a diferentes distancias con tal de permitir realizar una predicción de la extensión superficial de los potenciales impactos”, y/o presentando los resultados de determinados indicadores (SPL_{0-p}, SPL_{RMS}, SEL, SEL_{24h}, etc.). Solicitando en todos los casos la justificación de las fuentes de ruido consideradas, descripción tanto de los niveles de presión sonora utilizados como de las especies marinas bajo estudio, características y premisas realizadas para ejecutar el modelo, rangos de afección, resultados y conclusiones (contenidos mínimos de los estudios)

Concretamente, una de las aplicaciones para el MAGRAMA de los criterios de evaluación es la de identificar zonas de exclusión y de seguridad, determinando las áreas donde los umbrales son sobrepasados. En estas zonas y en función de la actividad, se proponen medidas de mitigación tales como las propuestas en el Documento Técnico (MAGRAMA, 2012).

² Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part I: physical quantities and their units, Ainslie, M. A., TNO Report TNO-DV 2011 C235, (2011)

³ Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II: procedures for measuring underwater noise in connection with offshore wind farm licensing. de Jong C.A.F., Ainslie, M. A. and Blacquièrre G, TNO Report TNO-DV 2011 C251 (2011)

No existe un listado oficial que determine aquellas actividades sujetas a Estudios de Impacto Acústico, sin embargo, en el Documento Técnico¹³ clasifican distintas actividades generadoras de contaminación acústica marina, donde se recomienda la implantación de medidas de mitigación y, consecuentemente susceptibles a quedar sometidas a procedimientos de evaluación de impacto acústico. Dichas actividades se resumen a continuación:

- Sónares y detonaciones militares: Ejercicios navales y sónares militares tácticos (principalmente el sónar activo de frecuencias bajas, medias y alta intensidad).
- Exploración y explotación de hidrocarburos: Engloban las campañas sísmicas para el conocimiento de las estructuras geológicas del subsuelo marino (exploración), la perforación del fondo marino, instalación de la estructura de explotación y su desmantelamiento.
- Construcciones: anclado de pilotes para diversas infraestructuras (aerogeneradores, pantalanés, etc.), dragados, explosiones (para romper sustratos, desinstalación de plataformas, etc.) y funcionamiento de parques eólicos marinos.
- Tráfico marítimo, fundamentalmente de grandes buques.
- Dispositivos de evitación acústica: instrumentos acústicos que alertan o ahuyentan con sonidos a animales marinos con tal de que eviten las artes de pesca o jaulas de maricultura.
- Investigación: las actividades de investigación que incluyen el uso de instrumentos acústicos incluso de alta intensidad (seguimiento de equipos, localización, etc.).

4 PDI DEL PUERTO DE MOTRIL

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

Está situado en el centro del Mar de Alborán lo que le ofrece una conexión privilegiada con los puertos del Norte de África Occidental. En particular, Nador y Melilla se encuentran a 90 mn y 4,5 h de navegación, Alhucemas a 85 mn y 4,25 h de navegación y finalmente Tánger Med se encuentra a 110 mn y 5,5 h de navegación

El Mar de Alborán es la parte más occidental del Mar Mediterráneo; limita al norte con la costa española, al Sur con las costas marroquí y argelina, y al Oeste con el Estrecho de Gibraltar. El Mar de Alborán y sus aguas adyacentes del Golfo de Cádiz y Golfo de Vera constituyen la única puerta entre el Mar Mediterráneo y el Océano Atlántico.



Ilustración 4. Mar de Alborán.

Tiene una profundidad máxima de unos 1500 m en la parte más occidental, y más de 2000 m en la cuenca oriental, con una topografía compleja. La plataforma continental es muy estrecha, entre 2 y 10 km en la costa española, y su profundidad límite varía entre los 100 y los 150 m. Los fondos son muy accidentados y están caracterizados por cañones, cordilleras y bancos de diversos tamaños y profundidades.

Se trata de una zona de transición entre los dos mares, siendo una mezcla de ambos ecosistemas. Es una región de gran importancia por su diversidad de cetáceos (Cañadas A. S. R., 2000), (Cañadas A, 2002) (Cañadas A. S. R., 2005).

En cuanto a fuentes antropogénicas presentes en esta área, la mayor contribución es del tráfico marítimo, el cual es muy intenso. Más de 50.000 barcos de gran tonelaje navegan en sentido E-W, y atraviesan todo el mar de Alborán. Según datos de la Torre de Control de Tráfico de Almería, en la franja de 24 millas desde el Cabo de Gata hacia alta mar transitan unos 35.000 buques cada año.

4.2 ÁREA DE ACTUACIÓN

Como se ha dicho anteriormente, este documento constituye el *Estudio de impacto acústico submarino* de las fases de construcción y funcionamiento del Plan Director de Infraestructuras (PDI en adelante) del Puerto de Motril.

El Puerto de Motril se encuentra al Sur de la Península Ibérica. Como tal, forma parte de los puertos del Mediterráneo Occidental en la orilla europea. Su posición geográfica es Longitud 3º 31' 30" Oeste y Latitud 36º 43' 06" Norte.

El Puerto de Motril está constituido por tres dársenas: la Dársena Interior dedicada a tráfico de graneles, mercancía general y pasajeros con los muelles de Graneles, Poniente, Costa y Levante. En la parte occidental de la Dársena se encuentran las instalaciones deportivas.

En segundo lugar, la Dársena Pesquera con una línea de atraque de 410 m, incluidos los muelles de estancia, descarga, combustible y hielo.

Finalmente, la Dársena de las Azucenas, es la más grande de todas. Incluye el Muelle de la Azucenas, que es el mayor del puerto. En él se mueven tráfico variado: graneles, contenedores, mercancía general y cruceros. Existe una rampa Ro-Ro en la parte de Poniente. En el extremo levante se encuentra el Muelle-Contradique que está especializado en la carga/descarga de graneles líquidos.

En el año 2010 fue aprobado el Plan Estratégico del Puerto de Motril, donde, a su vez, se aprobó la redacción del *"Plan Director de Infraestructuras del Puerto de Motril"* (en adelante PDIPM).



Ilustración 5. Puerto de Motril. Imagen izquierda, situación actual. Imagen derecha, actuación futura
Fuente: elaboración propia, 2019.

Tal y como la anterior imagen muestra, el PDI es del 2011, la situación actual presenta ya ejecutados la prolongación del dique y el espigón de la playa. La alternativa seleccionada, la cual será evaluada, conlleva la creación de la dársena mixta-pesquera y la apertura de una nueva bocana (información aportada por el cliente).



Ilustración 6. Batimetría del área de estudio.
Fuente: elaboración propia, 2019.

Una descripción más detallada se efectúa en otros documentos.

4.3 FASE DE CONSTRUCCIÓN

La fase de construcción contemplará la ubicación de la Dársena Pesquero-Deportiva en la zona de Poniente del Puerto de Motril y la creación de una nueva bocana para estos tráficos.

Se formará a poniente del puerto, respetándose rigurosamente el perímetro del actual límite de la zona de servicio, incluso en el dique de abrigo que sirve para la formación de la nueva bocana y canal de acceso. Es decir, el arranque del dique se mantiene el actual de Poniente, hasta que alcanza la curva del Muelle de Graneles, en que continua la dirección hacia al mar, buscando mayor calado, hasta la batimétrica -7,00 m.; aquí cambia de rumbo hacia Levante hasta la batimétrica -12,00 m.

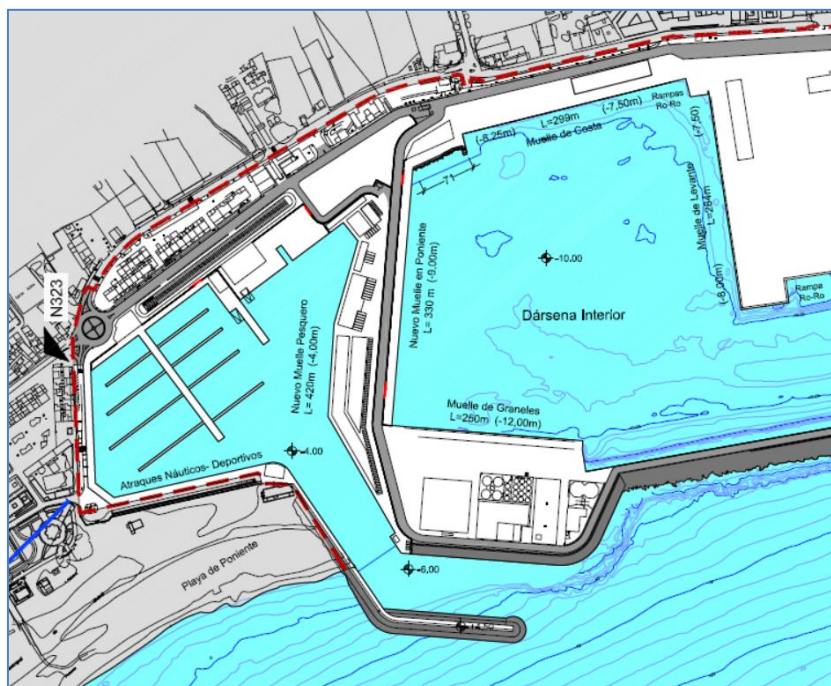


Ilustración 7. Configuración final del Puerto de Motril

Fuente: Plan director de Infraestructuras del Puerto de Motril (PDIPM).

El canal de acceso se compone de dos alineaciones, la más exterior de 177 m. de longitud con la bocana hacia levante y paralela al inicio del dique actual. Tiene una profundidad de 6 m. y un ancho variable con la profundidad: 71 m a nivel del cero del puerto y 50 m en la base del canal.

El PDIPM prevé un dragado localizado y de relativa poca entidad ($\cong 80.000 \text{ m}^3$) de la Dársena Interior a la cota -10 m. Y, la ejecución de un muelle de gravedad previsto con hormigón sumergido.

La cimentación se llevará a cabo por debajo de la cota -10,00 (profundidad de la dársena), en función de las características de terreno. Para ello es necesario dragar una parte de la dársena interior a la cota -10 m que actualmente se encuentra a una cota media de 5 m.

Construido el muro de muelle se procederá a ejecutar el pedraplén de trasdós con material granular y a efectuar el resto del relleno necesario, para poder efectuar los muros pantalla y la excavación de la dársena desde tierra.

La relativa poca profundidad necesaria para la dársena pesquero-deportiva (-4,00 m.), permite su realización desde tierra **mediante retroexcavadores convencionales o en su caso, de brazo largo.**

En el caso del canal de acceso, **se formará excavando desde tierra** hasta la cota -4,00 m. Previamente será necesario extraer los bloques existentes y demoler el espaldón del actual Dique de Poniente.

Una vez realizada la excavación se procederá a la construcción de los muros de ambos lados, mediante una base de hormigón sumergido “in situ”, con su cimientado de escollera y la colocación de bloques antirreflexivos en su parte superior.

Según el PDIPM, la alternativa elegida representa el modelo de desarrollo previsto para el PM en los próximos 15 años. No obstante, este plazo contemplaba más actuaciones que ya se han ejecutado a lo largo de estos años, por ello este estudio evalúa las actuaciones pendientes, véase la creación de la dársena mixta-pesquera y la apertura de una nueva bocana.

Tabla 1. Características de los muelles por tipo de tráfico principal propuestos en el Plan Director.

Muelle	Longitud (m)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Tráficos
Nuevo Muelle en Poniente	330	9	12	Cruceros
Muelle Costa	299	7,5 a 8,25	40	Pasajeros/Ro-Ro
Terminal Ro-Ro/pasajeros				
Muelle de Levante	284	7,5 a 8	250	Ro-Ro
Nuevo Muelle en la Canal	225	10	250	
Muelle Azucenas	260	14(1)	250	Graneles
	325	14(1)	250	Mercancía General Contenedores
Muelle Graneles	250	12(2)	135	Graneles
Muelle Contradique				
Atraque actual	252	12	12	Graneles líquidos
Atraque barcazas (Bunkering)	125	5,5	12	Bunkering
Muelle Dique	750	10,90 a 14	15	Cruceros/Bunkering
Muelle pesquero	420	4	Variable	Pesca
Atraques náutico-deportivos	431 amarres			Náutico-Deportivo

Fuente: Memoria Plan Director Puerto de Motril, 2011

4.4 FASE DE FUNCIONAMIENTO

La actividad de la ampliación del puerto será la misma que la actual, sólo que con un aumento progresivo de embarcaciones.

4.4.1 Tráfico marítimo actual

En las siguientes tablas se muestra el tráfico marítimo actual del Puerto de Motril.

Tabla 2. Tráfico marítimo de buques del puerto de Motril, años 2016 y 2017.

TIPO		2016		2017	
		GT	Escalas	GT	Escalas
CARGA	GENERAL	888.753	151	1.097.919	169
GRANELEROS	LIQUIDOS	1.146.840	85	1.031.498	84
GRANELEROS	SOLIDOS	328.936	25	195.466	21
OTROS	BUQUES	34.387	3	22.505	3

TIPO		2016		2017	
		GT	Escalas	GT	Escalas
PASAJE	CRUCERO	205.838	21	150.412	31
PESQUEROS DE ALTURA		105	1	3.107	13
PORTACONTENEDORES		374.648	48	223.856	29
RORO	MERCANCIAS			1.872.732	95
RORO	MIXTOS	18.934.201	941	16.781.046	885
TOTAL		21.378.541	1.330	21.913.708	1.275

Fuente: Memoria Anual 2017 A.P. Motril

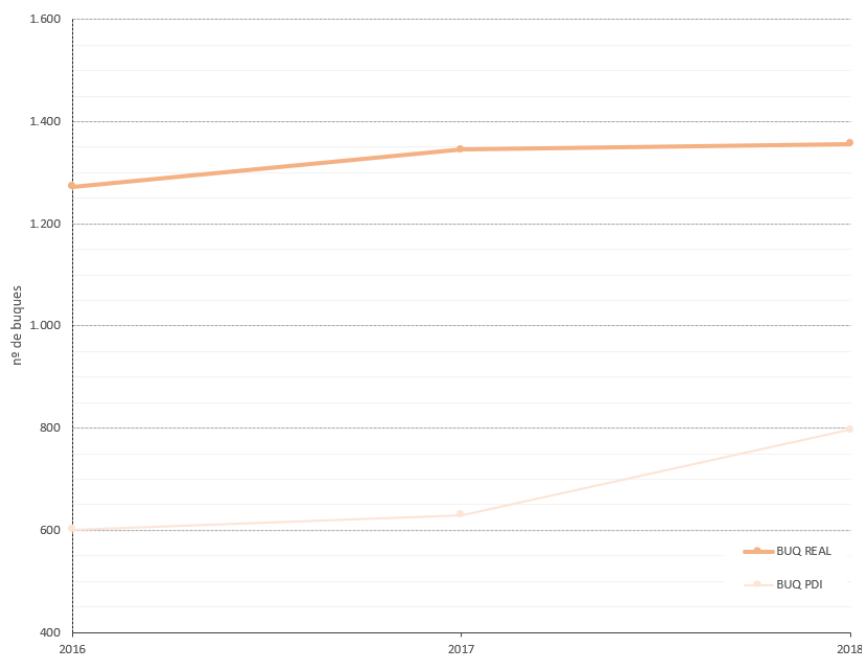


Ilustración 8. Evolución del número de buques desde el 2016 hasta el 2018 en el Puerto de Motril.

Fuente: Puerto de Motril

Tabla 3. Tráfico marítimo de pasaje y vehículos del puerto de Motril, años 2016 y 2017.

TIPO	2016	2017
Autocares	242	181
Motocicletas	1.192	1.663
Turismos	93.441	76.329
TOTAL Vehículos	94.875	78.173
TOTAL Pasajeros	414.096	348.762

Fuente: Memoria Anual 2017 A.P. Motril

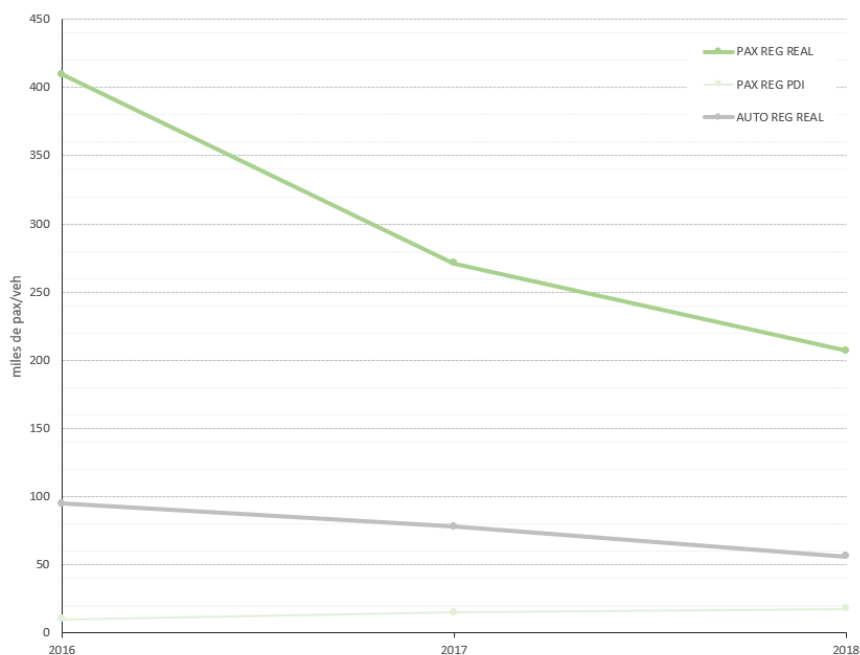


Ilustración 9. Evolución del pasaje regular desde el 2016 hasta el 2018 en el Puerto de Motril.

Fuente: Puerto de Motril.

4.4.2 Previsión del tráfico marítimo futuro

En la siguiente tabla se resume la previsión de crecimiento del tráfico marítimo que el propio Puerto de Motril ha realizado:

Tabla 4. Previsiones de crecimiento del tráfico marítimo del puerto de Motril.

TIPO		2019	2020	2021	2022	2023
Graneles líquidos	Tanker	1375	1409	1445	1481	1518
Graneles sólidos	Cargo	575	593	610	629	647
Mercancía en general	Mercante	969	1020	1075	1132	1193
Pesca	Pesquero	2	2	2	2	2
Tráfico total		2921	3024	3131	3243	3360
Líneas regulares	Miles pasajeros	212	218	223	229	234
Cruceros	Miles pasajeros	8	8	9	9	10
		2024	2025	2026		
Graneles líquidos	Tanker	1556	1595	1634		
Graneles sólidos	Cargo	667	687	707		
Mercancía en general	Mercante	1257	1325	1397		
Pesca	Pesquero	2	2	2		
Tráfico total		3481	3608	3741		
Líneas regulares	Miles pasajeros	240	246	252		
Cruceros	Miles pasajeros	10	11	11		

Fuente: Memoria Anual 2017 A.P. Motril

A su vez, se describe un escenario acústicamente más desfavorable que radicaría en previsiones de tráfico marítimo más optimista, es decir, más intensidad de tráfico marítimo. De igual manera, la previsión de a continuación presenta el crecimiento del tráfico marítimo desde el punto de vista más optimista, que el propio Puerto de Motril ha realizado:

Tabla 5. Previsiones de crecimiento del tráfico marítimo del puerto de Motril.

TIPO		2019	2020	2021	2022	2023
Graneles líquidos	Tanker	1408	1479	1553	1631	1712
Graneles sólidos	Cargo	592	628	665	705	747
Mercancía en general	Mercante	1001	1089	1186	1317	1458
Pesca	Pesquero	2	2	2	2	2
Tráfico total		3003	3197	3405	3654	3919
Líneas regulares	Miles pasajeros	227	239	251	264	278
Cruceros	Miles pasajeros	217	228	240	252	264
		2024	2025	2026		
Graneles líquidos	Tanker	1798	1888	1982		
Graneles sólidos	Cargo	792	840	890		
Mercancía en general	Mercante	1585	1725	1878		
Pesca	Pesquero	2	2	2		
Tráfico total		4177	4454	4752		
Líneas regulares	Miles pasajeros	293	308	325		
Cruceros	Miles pasajeros	278	291	306		

Fuente: Memoria Anual 2017 A.P. Motril

5 RECEPTORES: DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA

Los receptores marinos considerados en el presente estudio serán aquellas especies que por su sensibilidad acústica y grado de protección requieren especial atención: cetáceos.

A continuación, se describen las especies de cetáceos presentes en el entorno del área de estudio; información aportada por el cliente y Proyecto Mediterráneo (Raga J.A., 2004), que, a su vez, serán sujetas a un análisis de posible afección acústica.

DELFIN LISTADO (*Stenella coeruleoalba*) Y DELFIN COMÚN (*Delphinus delphis*)

Los delfines listados y comunes tienen una distribución bastante amplia; y se sitúan los primeros, sobre todo, en zonas de aguas profundas y los delfines comunes en zonas con mucha pendiente, compartiendo ambas especies su distribución.

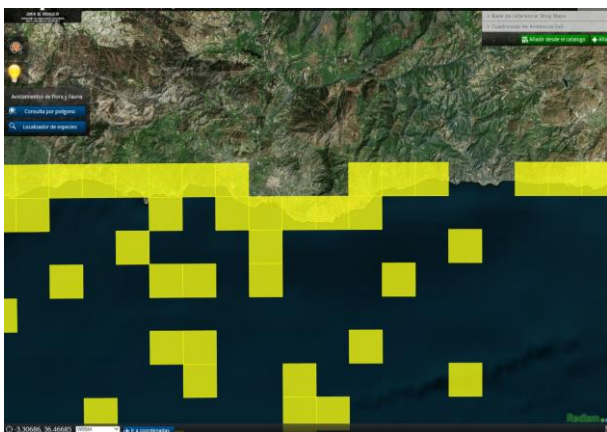


Ilustración 10. Distribución de *Stenella coeruleoalba* (delfín listado)

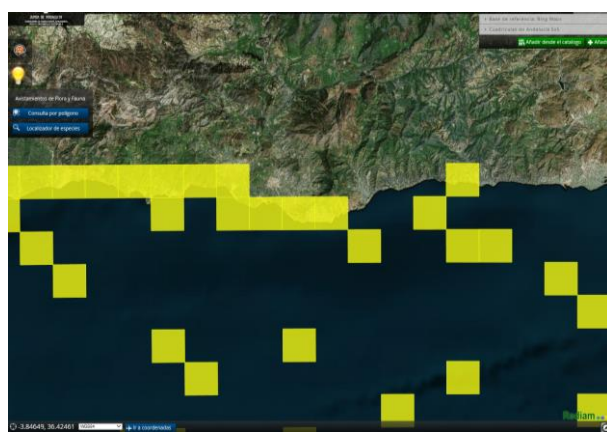


Ilustración 11. Distribución de *Delphinus delphis* (delfín común)

Fuente: Visor de Especies Protegidas. REDIAM, 2019.

DELFIN MULAR (*Tursiops truncatus*) Y CALDERÓN COMÚN (*Globicephala melas*)

El delfín mular es una especie costera que también se encuentran en aguas abiertas, mientras que los calderones comunes (*Globicephala melas*) se consideran de aguas profundas.

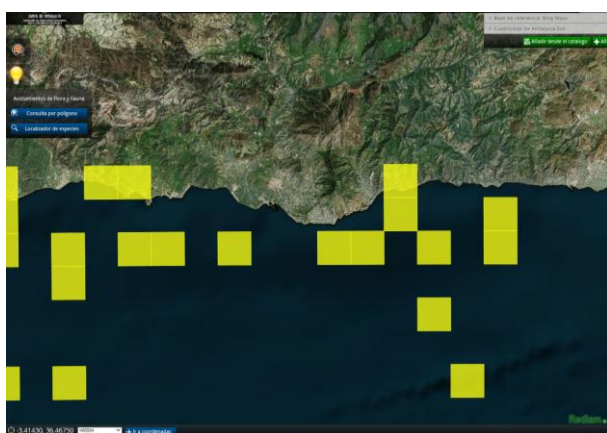


Ilustración 12. Distribución de *Tursiops truncatus* (delfín mular)



Ilustración 13. Distribución de *Globicephala melas* (calderón común)

Fuente: Visor de Especies Protegidas. REDIAM, 2019.

Tanto el delfín mular (*Tursiops truncatus*) como el delfín común (*Delphinus delphis*), delfín listado (*Stenella coeruleoalba*) y calderón común (*Globicephala melas*), se encuentran a lo largo de la costa andaluza y en las distintas estaciones del año (Raga J.A., 2004).

CACHALOTE (*Physeter macrocephalus*)

Entre los grandes cetáceos, el cachalote (*Physeter macrocephalus*) se encuentra presente en todo el Mediterráneo Occidental, aunque no se distribuye de manera uniforme. Se encuentra sobre todo en las aguas profundas del talud continental.

Esta especie se considera de hábitos migratorios, especialmente entre primavera y otoño. No obstante, hay autores que lo consideran residente, al menos durante el periodo estival, en las zonas de cotas profundas en Almería y el Estrecho de Gibraltar.

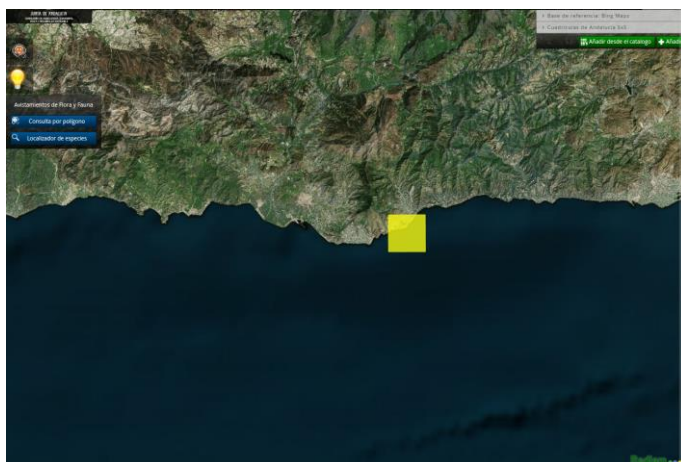


Ilustración 14. Distribución de *Physeter macrocephalus* (cachalote)
Fuente: Visor de Especies Protegidas. REDIAM, 2019.

CALDERÓN GRIS (*Grampus griseus*) Y ZIFIO DE CUVIER (*Ziphius cavirostris*)

El delfín de Risso o calderón gris (*Grampus griseus*) suele mostrar una distribución limitada principalmente a la mitad oriental del Mar de Alborán (provincia de Almería) y Golfo de Vera a lo largo del año. Siendo las áreas de mayor importancia para estas especies aquellas aguas profundas con más de 600 m de profundidad.

Al igual el calderón gris, las ballenas picudas (familia Ziphiidae) muestran una distribución más limitada y confinada a aguas profundas del sur de Almería con avistamientos esporádicos en la zona de estudio.

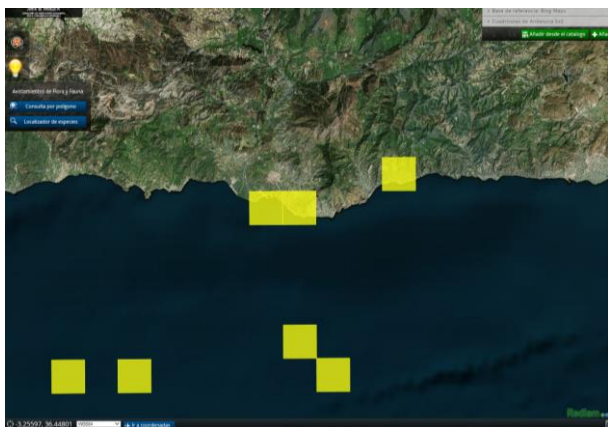


Ilustración 15. Distribución de *Grampus griseus* (calderón gris)

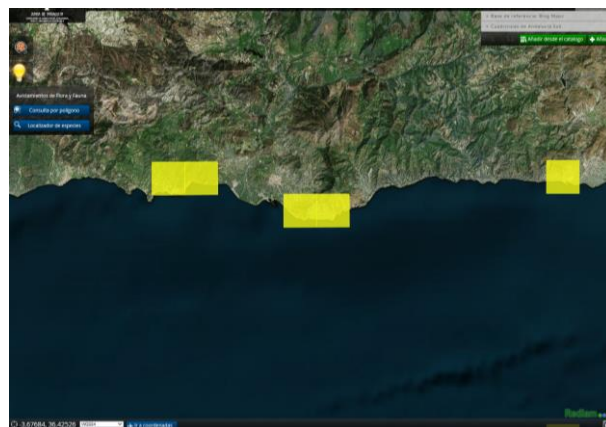


Ilustración 16. Distribución de *Ziphius cavirostris* (Zifio de Cuvier)

Fuente: Visor de Especies Protegidas. REDIAM, 2019.

Comentar que podrían también producirse avistamientos de rorcual común (*Balaenoptera physalus*), ya que trata de una especie puramente migratoria. La presencia del rorcual común (*Balaenoptera physalus*) se debe al paso migratorio entre áreas de reproducción y alimentación, que tienen lugar desde primavera a otoño. Estos animales suelen habitar en aguas oceánicas lejos de la costa, fuera de la plataforma continental en zonas de gran profundidad (400- 2500 m). Por tanto, aunque el movimiento de estos cetáceos se produzca normalmente en zonas más profundas y alejadas, no se puede descartar la potencial presencia de estas ballenas en zonas cercanas al proyecto.

5.1 SENSIBILIDAD ACÚSTICA

El repertorio acústico de los mamíferos marinos se divide en dos tipos de emisiones: clicks o tipo pulso, y silbidos o tipo continuo.

Si nos atenemos a los espectros de las emisiones de tipo pulso, destaca que suelen extenderse en rangos espectrales bastante anchos. Se debe tener en cuenta la utilidad de estos pulsos, la ecolocalización. Por lo general, estas emisiones sirven para dar información sobre el entorno del animal. La ecolocalización se fundamenta en la emisión de ondas sonoras en el agua, las cuales rebotan sobre los objetos y superficies en su camino formándose un eco. Estas ondas son emitidas por los animales que, al volver reflejada al cetáceo, éste obtendrá información del entorno, analizando tanto la frecuencia como la amplitud recibida (Evans P. , 1987), (Martin, 1990).

El segundo tipo de emisión del repertorio acústico de los odontocetos, son los silbidos de banda variable. Este tipo de silbidos tienen una función social y de comunicación en odontocetos (Evans W. , 1973) (K.S., 1969).

A modo de resumen, se exponen los distintos rangos de frecuencia que cada una de las especies de cetáceos de la zona de estudio emiten según bibliografía¹⁸. En la siguiente tabla se aprecian cuáles son estos rangos.

Tabla 6. Rango de frecuencia utilizado por diferentes especies de cetáceos.

Especie	Tipo de sonido	Rango de frecuencias (Hz)	Energía máxima (Hz)
MISTICETOS			
Rorcual común (<i>Balaenoptera physalus</i>)	Continuo	6-95	18-23
ODONTOCETOS			
Delfín mular (<i>Tursiops truncatus</i>)	Continuo Pulso	200-20000 100-300000	
Delfín común (<i>Delphinus delphis</i>)	Continuo Pulso	4000-16000	4000-9000
Calderón común o negro (<i>Globicephala melas</i>)	Continuos	2000-12000	3400-4700
Cachalote (<i>Physeter macrocephalus</i>)	Pulsos	<100-30000	1000-16000
Delfín mular (<i>Tursiops truncatus</i>)	Continuo Pulso	200-20000 100-300000+	

Fuente: (LIFE02/NAT/E/8610, 2006)

Un importante factor para determinar la respuesta de un animal expuesto a un sonido de determinadas frecuencias es su sensibilidad a esa frecuencia. Un animal puede mostrar una respuesta comportamental solamente si puede detectar ese sonido, estando estrechamente correlacionada la afección en su sistema auditivo con su sensibilidad a la frecuencia.

Los oídos están adaptados para ser muy sensibles al sonido, haciéndoles más vulnerables a mostrar daños físicos con sonidos persistentes o agudos (Gordon J., 1996). Los datos sobre la sensibilidad en el sistema auditivo de los cetáceos son escasos y se basan en experimentos con animales en cautividad. Los estudios sobre los rangos auditivos de pequeños cetáceos se exponen a través de audiogramas, donde se representa la presión acústica que puede detectar un animal.

El ruido reduce la habilidad de un animal a detectar otros sonidos de frecuencias similares. Generalmente, el enmascaramiento solamente tiene lugar si el espectro del ruido se solapa con la banda crítica que se presenta alrededor de la frecuencia de la señal (Fletcher, 1940).

Para aquellos animales de orientación acústica, hay muchos ruidos biológicos significativos que pueden ser enmascarados por el aumento de los niveles de ruido ambiental. Esto incluye, por ejemplo, las herramientas acústicas utilizadas para cazar de forma pasiva; para esquivar depredadores y navegar; para vocalizaciones relacionadas con la migración, segregación y distribución; y para la ecolocalización (Damon P., 2005).

Una estrategia para suavizar el efecto del enmascaramiento es cambiar la frecuencia de la señal del ruido de fondo e incrementar la intensidad de las señales. Ya que algunos cetáceos pueden adaptarse modificando sus vocalizaciones para suavizar el efecto del ruido ambiental (Au, 1985).

En cuanto a los misticetos o ballenas, su estructura de oídos es diferente a los odontocetos, presentando sensibilidad a bajas frecuencias (Gordon J., 1996) siendo especialistas en comunicaciones a bajas frecuencias ((NRC), 2003).

6 METODOLOGÍA

6.1 DISEÑO DE CAMPAÑA

Para dar cumplimiento a las exigencias administrativas, se planteó una campaña de larga duración consistente en la obtención de registros acústicos mediante equipos PAM.

La campaña de toma de registros acústicos tuvo una duración de dos semanas, desde el 18 de septiembre de 2019 hasta el 3 de octubre de 2019.

Se distribuyeron tres sensores acústicos alrededor del área de estudio, de forma que se tuviera una mayor información del escenario acústico actual.



Ilustración 17. Ubicación de los tres puntos de medidas.
Fuente: elaboración propia, 2019.

El rango de detección de cetáceos de los equipos utilizados depende de los niveles de ruido de fondo, de las propiedades de propagación del entorno de las especies a detectar y del ángulo entre el sonido emitido por el cetáceo (en el caso de los clics es muy direccional) y el equipo (si la emisión del cetáceo es en la dirección del equipo la intensidad recibida será máxima y, por lo tanto, se podrá detectar desde más lejos). Es decir, que no hay una distancia de detección fija, sino que va cambiando según los factores detallados.

Por otro lado, el hecho de limitar el número de equipos a 3 (y de tipo autónomo, es decir, no conectados entre sí) supone que no se ha podido desarrollar con detalle un diagrama de directividad de las fuentes sonoras en el área de estudio, ya que para ello es necesario saber con extrema precisión la diferencia de tiempo entre que los diferentes hidrófonos han captado un ruido y solo se puede hacer con equipos conectados entre sí.

6.2 CONDICIONES METOCEÁNICAS

La consideración de las condiciones meteorológicas y de la columna de agua es importante en el campo de la acústica submarina puesto que variables como el viento, el oleaje o la velocidad de la corriente pueden alterar el ruido de fondo de una zona.

Estos datos han sido extraídos de la página web de Puertos del Estado:

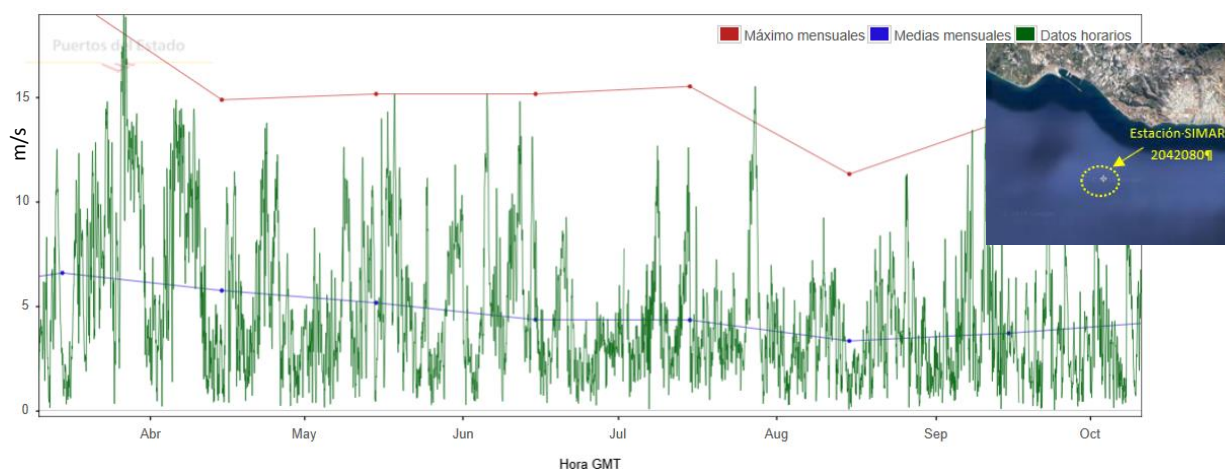


Ilustración 18. Velocidad media del viento.
Fuente: Puertos del Estado. Estación SIMAR 2042080

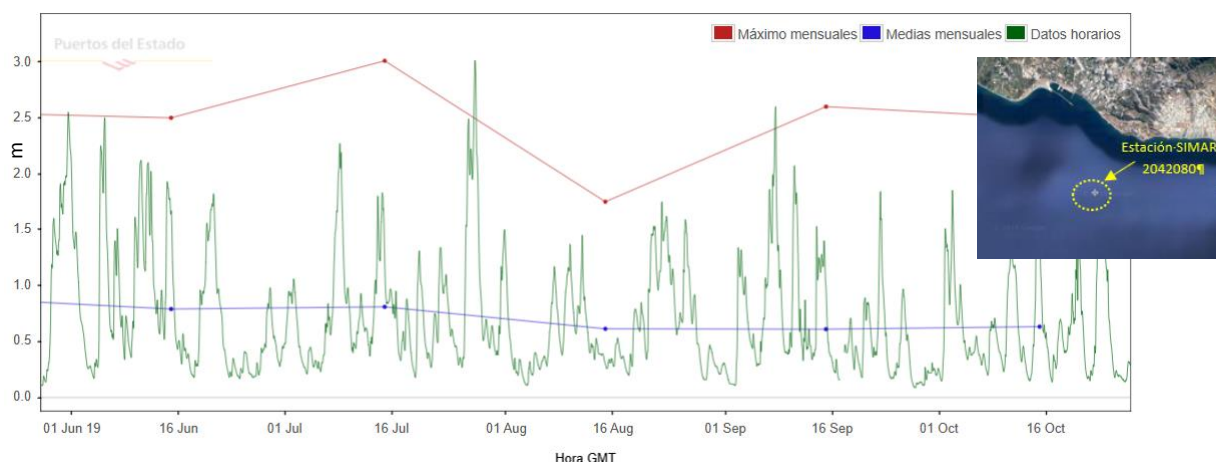


Ilustración 19. Parámetros de oleaje según meses, 2019

Fuente: Puertos del Estado. Estación SIMAR 2042080

- Datos de oleaje: Altura significativa espectral y periodo medio espectral.
- Dirección Media del Oleaje.
- Datos meteorológicos: Velocidad media del Viento y Dirección media de procedencia del Viento.

Como se puede observar en las figuras anteriores, la velocidad del viento ha mostrado muchas oscilaciones con picos que alcanzan los 1 m/s y con valores medios entre 5 y 6 m/s. Igualmente, el oleaje ha sido variable, con una media de 0,3 m y máximos que alcanzaron los 1,8 m.

6.3 VELOCIDAD DEL SONIDO

Los parámetros oceanográficos son imprescindibles para estimar el perfil de la velocidad del sonido.

En cuanto a los datos de temperatura y salinidad, la información de partida ofrecida por el Instituto Español de Oceanografía (IEO en adelante) trataba de perfiles según profundidad en determinados puntos que no cubrían toda el área de estudio. Concretamente, se han empleado los datos procedentes de la estación 20190226 (ver Ilustración 20). Con estos datos se han obtenido los perfiles promedios de velocidad del sonido.

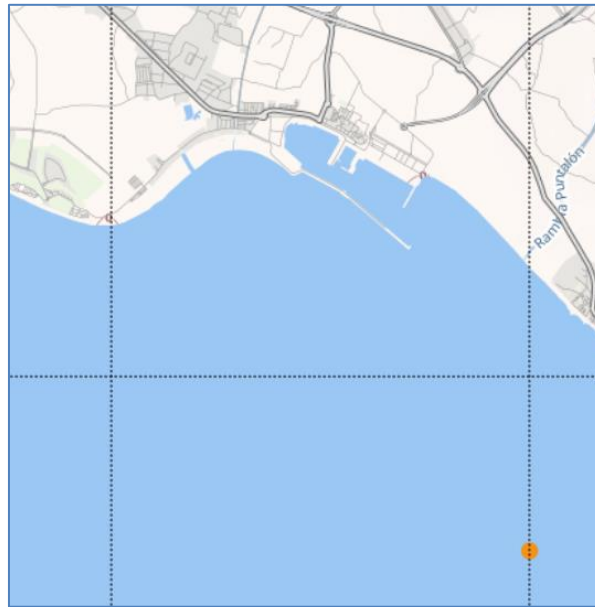


Ilustración 20. Punto perfiles de CTD. Estación 20190226
Fuente: MEDATLAS, IEO

Seguidamente se muestran los perfiles de temperatura y salinidad obtenidos, así como los perfiles de velocidad del sonido calculados según la ecuación de Mackenzie.

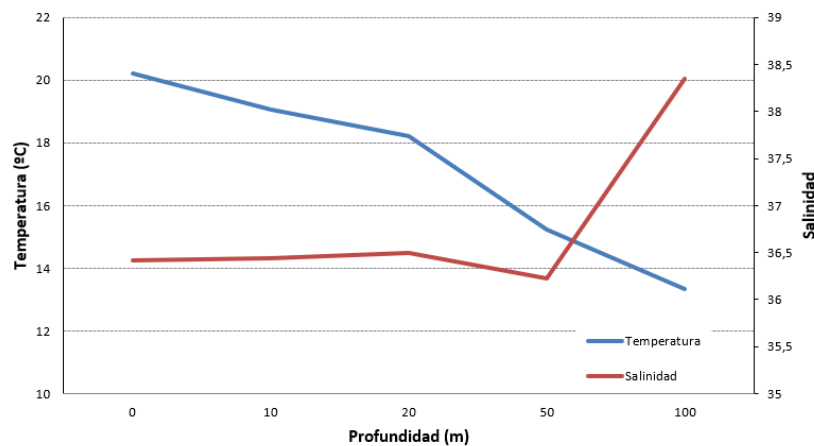


Ilustración 21. Perfil de temperatura y salinidad de la estación 20190226
Fuente: MEDATLAS, IEO

Para poder trabajar con los modelos, es preciso estimar el perfil de velocidad a través de los datos de temperatura y salinidad tomados in situ y extrapolarlos a diferentes profundidades de manera que se cubra toda la columna de agua. Tras la depuración y suavizado de las curvas de temperatura y salinidad, se ha calculado la velocidad del sonido empleando la ecuación de Mackenzie

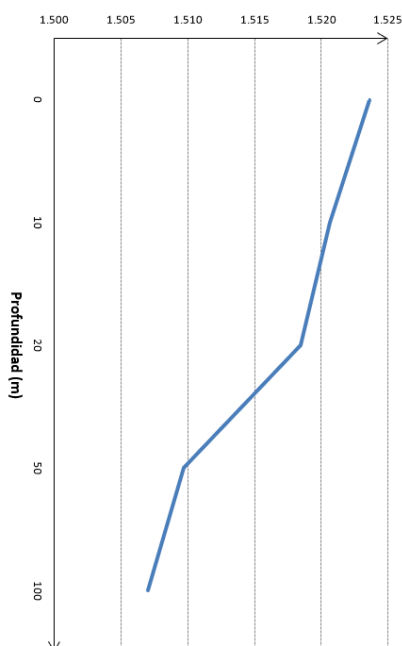


Ilustración 22. Velocidad del sonido (según ecuación Mackenzie) en el área de estudio

En la figura se aprecia como los valores de la velocidad del sonido (fuertemente dependientes de la temperatura) descienden suavemente los primeros metros de profundidad, mientras que, a partir de los 20 metros la variación es más marcada (varía entre 1507 y 1523 m/s).

6.4 OBTENCIÓN DE REGISTROS ACÚSTICOS

Para la obtención de mediciones de ruido se fondearon tres sistemas autónomos de monitorización acústica pasiva (PAM). Uno, Wildlife Acoustics SM3M y los otros dos son Ocean Instruments, SoundTrap ST300 STD. Los equipos PAM se instalaron mediante líneas de fondeo formadas por un muerto (con un peso de 90 kg aprox.), un liberador acústico, el propio equipo PAM y una boya para sustentar el sistema. El esquema de la instalación se muestra en la figura siguiente.

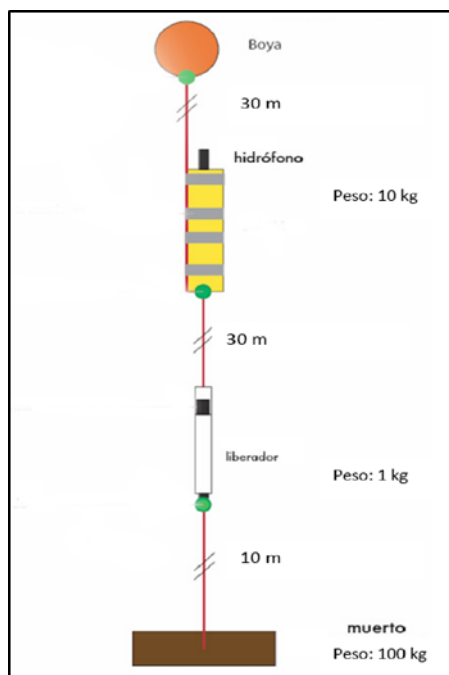


Ilustración 23. Esquema de los PAMs utilizados.

Fuente: elaboración propia, 2019.

La tabla siguiente muestra las características de los equipos instalados, así como su posición y otros datos de interés. Así mismo se resume el esfuerzo de muestreo realizado para la presente campaña de monitorización. Debido a que se trata de un fondeo de larga duración, no se pudo registrar el sonido de forma continua e ininterrumpida (ni las baterías ni la memoria de los equipos lo permiten) por lo que la aproximación a este tipo de mediciones con equipos autónomos habitualmente se aborda con ciclos de trabajo interrumpidos (grabando 3 minutos de cada 22 como muestra la tabla en la casilla de “frecuencia de grabación”).

Los equipos se fondearon en las inmediaciones del Puerto de Motril, ver Ilustración 17.

Durante los registros acústicos, los tres hidrófonos se sincronizan captando la señal simultáneamente. Como las medidas de 3 minutos, se efectúan cada 22 minutos, el ciclo de medidas se repite cada 11 horas y, por tanto, varía según los días. Estos ciclos de grabación se aceptan como significativos e incluso son superiores al 10% recomendado en la literatura científica para campañas de larga duración⁴.

Tabla 7. Características de los PAM instalados y esfuerzo de muestreo.

Equipo	H1 (PAM 1)	H2 (PAM 2)	H3 (PAM 3)
Marca y modelo	ST300 STD	ST300 STD	Wildlife Acoustics SM3M
	Frecuencias analizadas 20-60.000 Hz	Frecuencias analizadas 20-60.000 Hz	Frecuencias analizadas 2-48.000 Hz

⁴ Merchant et al., «Monitoring Ship Noise to Assess the Impact of Coastal Developments on Marine Mammals»

Equipo	H1 (PAM 1)	H2 (PAM 2)	H3 (PAM 3)
Posición	(30S) 452921mE 4063460 m N	(30S) 453747 mE 4063050 m N	(30S) 452998 mE 4062849 m N
Frecuencia de grabación	3 min cada 22	3 min cada 22	3 min cada 22
% de tiempo registrado	14	14	14
Frecuencia de muestreo (KHz)	96	96	96
Fecha fondeo	23/09/2019 – 03/10/19	23/09/2019 – 03/10/19	23/09/2019 – 03/10/19
Horas grabadas	49	49	49

Fuente: elaboración propia, 2019.

En definitiva, se considera que los registros obtenidos (más de 147 horas) son suficientes para representar el ambiente sonoro actual en el área de estudio.

6.5 ANÁLISIS DE DATOS

Tras la toma de datos, se han analizado las grabaciones. Los cálculos realizados se han determinado en base a las recomendaciones de los subgrupos técnicos de la Unión Europea propuestas en *“Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part I: physical quantities and their units”*, Ainslie, M. A., TNO Report TNO-DV 2011 C235, 2011.

6.5.1 Preparación de los registros

Se han estudiado los siguientes parámetros:

6.5.1.1 Banda ancha

El nivel de presión sonora de banda ancha (Sound Pressure Level o SPL) expresa la amplitud media cuadrada (Root Mean Square o RMS) dentro de una ventana de tiempo y rango de frecuencias dados, aportando un único nivel de decibelios (dB).

En este estudio se ha obtenido el Nivel de Presión Sonora o acústica promediado en el tiempo (Sound pressure level o SPLt), medido en dB re $1\mu\text{Pa}^2$, estimándose:

- Media aritmética (sensible tanto al ruido puntual como al persistente).
- Mediana aritmética (poco sensible al ruido puntual y mucho al ruido persistente).
- Percentiles 5% (SPL que se superan un 5% del tiempo, correspondiente a los valores máximos de ruido).
- Percentil 95% (SPL que se superan el 95% del tiempo, correspondientes a niveles de fondo).

6.5.1.2 Tercios de octava

El sistema auditivo de los mamíferos (incluidos los mamíferos marinos) es sensible a bandas de un ancho determinado muy cercano al tercio de octava, por ello el tercio de octava es un ancho de banda que se utiliza habitualmente para el análisis de la evaluación del posible impacto acústico sobre especies marinas.

En este proyecto se ha utilizado la división por tercios de octava, filtros según el estándar 1/3-octave band filters [IEC 61260:1995] que permite diferenciar la distribución de la energía acústica en las diferentes bandas de frecuencias calculadas de modo estandarizado.

Los parámetros estudiados son los siguientes:

- Niveles SPL_L promediados por cada banda de tercio de octava en intervalos de 1h y 24h (Evolución del paisaje acústico).
- Evolución de los niveles de las bandas 63Hz y 125Hz, tal como determina el indicador 11.2 de la Decisión de la Comisión Europea de 1 de septiembre de 2010 sobre los criterios y las normas metodológicas aplicables al buen estado medioambiental de las aguas marinas.

El período de tiempo elegido, por tanto, repercutirá en los valores finales obtenidos. Los períodos temporales que se representan en este informe son de 1h y 24h (diarios).

El análisis cada 1h permite distinguir eventos sonoros de duración corta, discernir la evolución según intervalos día/noche y eventos meteorológicos de relevancia, mientras que el análisis cada 24h (diarios) permite observar cambios relativamente lentos debidos a la meteorología o diferencias en el tránsito de embarcaciones. En todos los casos la presión de referencia se supone $1\mu Pa$.

6.5.2 *Tratamiento de los datos*

Con tal de poder identificar las aportaciones de cada foco (fundamentalmente tráfico marítimo) en los registros sonoros, se prepararon los registros acústicos (PAM), se analizaron los datos densidad del tráfico en el área de estudio aportados por el Puerto de Motril y se compararon con datos de “AIS Marine Traffic” (fuentes de datos propia) con tal obtener su distribución. Todo ello se empleó para estimar los niveles sonoros atribuibles al tráfico.

6.5.2.1 *Asignación temporal de la señal de los hidrófonos*

A la hora de establecer una relación de los diferentes focos sonoros presentes en el área con los registros acústicos realizados, es preciso vincular en cada medida, los tiempos en los que se produce cada evento. Pero como no se disponían datos de los eventos acaecidos durante las medidas, se trabajó con promedios temporales más amplios, pudiendo comparar los datos de los pasos de las embarcaciones con los resultados de las medidas.

De igual manera, se caracterizó el tráfico marítimo con tal de poder establecer emisiones sonoras de las diferentes embarcaciones, siendo imprescindible identificar qué tipo de embarcaciones (junto su velocidad y distancia) suelen transitar por el área de estudio.

Debido a la falta de datos no se ha podido efectuar una estimación del tráfico acaecido durante las medidas, no obstante, con la información ofrecida por el cliente (datos aportados

por el Puerto de Motril, ver Tabla 2 y Tabla 3), se ha realizado una estimación del tráfico promedio anual para incluir las potencias sonoras en los modelos

A la hora de identificar distribución del tráfico marítimo, no se dispuso de la información de las rutas de tráfico marítimo, debiendo considerar focos sin movimiento definido. En cualquier caso, los diferentes canales de tráfico marítimos se definen en zonas mucho más alejadas de costa, pudiéndose representar la distribución en una única zona de paso entre la bocana del puerto de Motril hacia el exterior.

Todo ello con tal de poder tanto modelizar la situación actual y futura (ver Tabla 4) del tráfico marítimo como asignar la aportación de cada tipo de embarcación al conjunto del nivel sonoro generado por el tráfico marítimo.

En definitiva, se estima el nivel sonoro global considerando cada una de las aportaciones de las embarcaciones. Y con ello, se predice la aportación de cada tipo de embarcación al nivel global. Sin embargo, debido a las lagunas de información, no se puede calcular teóricamente el nivel recibido en cada hidrófono, y consecuentemente, no se puede realizar la verificación.

6.5.2.2 Emisiones acústicas del tráfico marítimo

Tras la tipificación del tráfico marítimo del área de estudio, se asignaron las potencias acústicas que serían consideradas para cada foco (para cada barco).

Debido a que resulta imposible disponer de medidas de todas las embarcaciones que surcan el área de estudio, para poder establecer dichas potencias acústicas, se efectuó una investigación bibliográfica recopilando la información de la emisión de los diferentes tipos de embarcaciones. Efectuándose una serie de consideraciones:

- A pesar de que las características de emisión de grandes embarcaciones comerciales dependen del tipo de barco, tamaño y modo de funcionamiento, la mayor parte de la energía sonora se centra por debajo de 1000Hz (MMO, 2015).
- Excepto las pequeñas embarcaciones (fuera bordas, zodiacs, recreativas, etc.) producen niveles sonoros (75- 159 dB 1μPa m) y sus características son fuertemente dependientes de la velocidad y otras características de funcionamiento de Richardson (Richardson W.J, 1995), citado en OSPAR 2009). Muchas de estas fuentes contienen la energía sonora en frecuencias más altas que las grandes embarcaciones (por encima de los 1000 Hz).
- Las potencias acústicas de los barcos se establecen en función del tipo de barco (relacionado a su vez con su eslora).
- La información de las potencias acústicas, finalmente se extraen de: (MMO, 2015), (Mckenna, 2012), y (Richardson W.J, 1995).

A continuación, se resume la información recopilada según bibliografía:

Tabla 8. Recopilación de información de niveles sonoros extraída de MMO.

TIPOS EMBARCACIONES SEGÚN BIBLIOGRAFÍA	NIVEL SONORO (dB 1μPa m)	Media (dB 1μPa m)	Mediana (dB 1μPa m)
Jet ski (moto acuática)	75 - 125	119	119
Recreation (embarcación rápida)	110 - 156	147	130
Boat (embarcación)	157 - 164	161	160
Cargo Bulk (carguero)	175 - 192	186	184
Container (contenedor)	169 - 198	186	181
Fishing (boat/trawler) (pesquero)	110 - 158	150	143
Offshore oil production vessel	174 - 183	180	180
Passenger (pasajeros)	154 - 155	155	155
Mechant vessel	160 - 191	185	181
Supertanker (superpetrolero)	180 - 190	188	189
Tanker (petrolero- cargador)	169 - 185	179	178
Remolcador y barcaza (Tug and barge)	161 - 171	167	166
Vehicle carrier (ro ro)	178 - 182	180	180
Workboat	159	159	159

Fuente: (MMO, 2015)

Tabla 9. Recopilación de información de niveles sonoros extraída de Mckenna.

TIPOS EMBARCACIONES SEGÚN BIBLIOGRAFÍA	Niveles sonoros (dB 1μPa m) de embarcaciones	Esloras de embarcaciones muestreadas (m)	Promedio eslora (m)
Container (contenedor)	184 - 188	294	295
Vehicle carrier (ro ro)	178 - 182	173 - 199	182
Cargo Bulk (carguero)	184 - 187	189 - 229	200
Openn Hatch Cargo ships	179 - 184	190 - 213	200
Chemical products tankers	177 - 185	148 - 182	165
Crude oil tankers	179 - 182	229 - 243	238
Product tankers	178 - 183	180 - 228	197

Fuente: (Mckenna, 2012)

Caso concreto de grandes embarcaciones:

Tabla 10. Recopilación de información de niveles sonoros de grandes embarcaciones.

TIPOS EMBARCACIONES SEGÚN BIBLIOGRAFÍA	Frec. dominante (Hz)	SOURCE LEVEL (dB 1μPa m)	Eslora (m)
Carguero	41	172	135
Tanker (petrolero)	428	169	135
Tanker (petrolero)	60	180	179
Container (contenedor)	33	181	219
Bulk carrier (carguero)	28	180	-
Supertanker (superpetrolero)	6,8	190	340
Supertanker (superpetrolero)	7,6	187	266
Supertanker (superpetrolero)	7,2	185	337
Container (contenedor)	7,7	181	274

Fuente: (Richardson W.J, 1995)

Una vez identificado cada tipo de embarcación se efectuó el cruce de información de las potencias acústicas obtenidas según bibliografía y el tipo de barco, de esta manera se establecieron las emisiones sonoras globales del tráfico marítimo del área de estudio.

6.5.3 Preparación datos de verificación

La verificación consiste en estimar el error cometido en las simulaciones de la propagación del sonido (modelos o estimaciones teóricas) con los niveles encontrados in situ; es decir, calcular la diferencia de niveles entre lo esperado y lo observado.

Los datos para la verificación se han extraído de los registros obtenidos durante la campaña de medidas realizada por Tecnoambiente. Se prepararon, trataron y analizaron los datos estimando niveles promedios para emplearlos en la verificación.

Concretamente, el tratamiento de los datos consistió en estimar los niveles sonoros promedios (SPL_{Medio}) y mediana de niveles sonoros ($SPL_{Mediana}$).

Para la verificación, se ejecutaron los cálculos con el modelo empleando las mismas condiciones en las que se habían producido las medidas. Por tanto, los cálculos realizados en la modelización se diseñaron con las condiciones iniciales y de contorno acaecidas durante ese periodo.

6.6 MODELO ACÚSTICO SUBMARINO

Existen numerosos modelos informáticos disponibles (Buckingham, 1992) (Etter, 2013) (Jensen F. K., 2011), para predecir la propagación acústica en el medio marino. Cada uno de ellos posee sus propias ventajas e inconvenientes respecto a los datos de entrada y los métodos de cálculo, pero todos incluyen algún tipo de descripción de varios parámetros oceanográficos tales como el perfil de velocidad del sonido en la columna de agua y las propiedades acústicas de los sedimentos.

Los modelos se basan en técnicas de trazado de rayos acústicos, modos normales, ecuaciones parabólicas, entre otras. El modelo acústico utilizado en el presente informe se basa en la propagación de ondas acústicas y depende en gran medida de la calidad de los datos oceanográficos específicos del emplazamiento (especialmente de la profundidad, temperatura y salinidad).

6.6.1 Preparación datos de entrada

Los datos de entrada al modelo han ido siendo detallados a lo largo de este documento. Para un mejor seguimiento, se realiza un resumen de los parámetros utilizados en la entrada al modelo.

Los parámetros introducidos fueron:

- Perfil de velocidad del sonido (ver apartado 6.3).
- Superficie de la mar plana.
- Batimetría con curvas topográficas y fondo arenoso (ver Ilustración 6).

Para ambas modelizaciones (fase de construcción y de funcionamiento) se estimaron las curvas de pérdidas de niveles sonoros y, consecuentemente, de la propagación del sonido. Y, se asume que es posible introducir de manera acertada los parámetros oceanográficos de partida para los cálculos de la velocidad del sonido.

6.6.2 Modelo de propagación acústica submarina: fase funcionamiento, tráfico marítimo

El modelo de propagación sonora para el tráfico marítimo se basa en un modelo de pérdida de propagación del sonido, una aproximación que aporta predicciones razonables y permite estimar distancias de afección o alcance de determinados niveles sonoros.

Se debe tener en cuenta que la propagación del sonido en el agua origina una disminución de nivel al aumentar la distancia entre fuente y receptor. Esta atenuación es el resultado de varios mecanismos, principalmente la divergencia geométrica desde la fuente de sonido, la absorción de la energía acústica por el agua a través de la que se propagan las ondas sonoras y el efecto de propagación en las distintas profundidades del fondo marino, entre otros.

Por ello, se deberían hacer una serie de consideraciones en el cálculo de las pérdidas por transmisión de la energía acústica. Aunque generalmente se asume que la intensidad sonora se reduce con la distancia, en los cálculos también se considerarán las pérdidas por la absorción del agua de mar, por las reflexiones y las producidas en la interacción con la superficie marina.

En este caso, los focos móviles se representarán en puntos de líneas de navegación (rutas). Además, el nivel sonoro de estos focos móviles, a distancia r de la ruta de navegación, no es homogéneo y varía debido a varios aspectos:

- Se pueden producir cambios en el tipo de propagación (esférica y semicilíndrica) si hay puntos en los que $d > d_c$ (distancia en la que se inicia la propagación horizontal)
- Aun manteniéndose la propagación, el nivel sonoro de los focos móviles en una misma recta también varía.
- La atenuación del nivel sonoro al ser función de la distancia también varía

En definitiva, se considera que se inicia con una propagación semiesférica y cuando alcanza distancias superiores a d_c pasa a una propagación horizontal.

La descripción de la metodología de cálculo de la propagación del modelo se expone en Capítulo 13 (Anexo II).

6.6.3 *Modelo de propagación acústica submarina: fase construcción.*

Al igual que el modelo anterior, se parte de una emisión esférica de niveles sonoros en decibelios.

Esta señal viaja hacia el fondo acumulando una pérdida por transmisión. A su vez, la fracción de la señal rebotada en la superficie marina se refleja de nuevo hacia el fondo.

De igual manera, el modelo considera que la emisión parte como onda semiesférica pero conforme se propaga, se va deformando debido a las pequeñas variaciones de la velocidad del sonido, a una propagación horizontal.

La señal es la energía acústica que se origina en dos puntos diferentes del puerto:

- La nueva bocana de tareas con la retroexcavadora.
- Tareas de vertido, colocación de bloques y excavación de la dársena mixta-pesquera.

Esta señal viaja hacia el fondo acumulando una pérdida por transmisión. A su vez, la fracción de la señal rebotada en la superficie marina se refleja de nuevo hacia el fondo.

De igual manera, el modelo considera que la emisión parte como onda semiesférica pero conforme se propaga, se va deformando debido a las pequeñas variaciones de la velocidad del sonido, a una propagación horizontal. Este efecto se produce a distancias superiores a d_c ($d > d_c$) y se genera principalmente por los cambios de temperatura y, consecuentemente, los cambios en la velocidad del sonido.

En todo caso, las componentes consideradas son el rayo directo del foco al punto, rayo rebotado en la superficie y la atenuación. Y las actividades modelizadas se han centrado en: dragado en la nueva bocana (tareas ejecutadas con retroexcavadora) y construcción dique (tareas ejecutadas principalmente con gánguil)

Se sitúa un punto a una distancia d del foco emisor y se asumen las siguientes consideraciones:

- Se mantiene el criterio acústicamente más desfavorable, la maquinaria está funcionando continuamente. El gánguil está permanentemente arrojando al mar, material (durante las 8 horas diarias).
- La construcción del dique se divide en dos partes, correspondientes a dos segmentos rectilíneos (según información aportada por el cliente).
- La construcción se realiza de forma uniforme durante 1 año.

En cualquier caso, la descripción de la metodología de cálculo de la propagación del modelo se detalla en el Capítulo 13, ANEXO II: METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA LA MODELIZACIÓN.

6.6.4 Datos acústicos

6.6.4.1 Emisiones acústicas tráfico marítimo

La caracterización del tráfico marítimo consiste en poder establecer emisiones sonoras de las diferentes embarcaciones, identificando qué tipo de embarcaciones y velocidad transitarán por el área de estudio (ver 6.5.2.2).

La información relativa al tránsito de embarcaciones por el área de estudio se puede extraer de la información aportada por el cliente (Puerto de Motril).

Tras la tipificación del tráfico marítimo del área de estudio (ver Tabla 2 y Tabla 3), se asignan las potencias acústicas para cada barco descritas en el apartado 6.5.2.2.

6.6.4.2 Emisiones acústicas durante la construcción

Debido a que no se dispone de la información de cómo se efectuará la construcción del dique (vertido de material, colocación de bloques y excavación), se ha considerado el escenario acústico más desfavorable, es decir, que se trabajará con un gánguil.

Un gánguil es una embarcación plana, con la proa y la popa de igual forma, que se utiliza para depositar bloques de escollera dentro del mar. La forma de vaciado es por gravedad.

Para establecer la emisión sonora de dicha actividad se asume que la fuente de emisión principal será la propia de una “embarcación de trabajo”. Por ello, la potencia acústica empleada en el modelo se ha extraído de la información detallada en el apartado anterior (Tabla 8)

Tabla 11. Potencia acústica para caracterizar las tareas de vertido de material, colocación de bloques y excavación.

TIPOS EMBARCACIONES SEGÚN BIBLIOGRAFÍA	NIVEL SONORO (dB 1μPa m)	Media (dB 1μPa m)	Mediana (dB 1μPa m)
Workboat	159	159	159

Fuente: (MMO, 2015)

En cuanto al dragado, emite durante las operaciones un sonido continuo de banda ancha, principalmente de baja frecuencia. Se usa, por ejemplo, para extraer recursos geológicos tales como arena y grava, mantener las rutas del tráfico marítimo o construcciones portuarias.

En el “Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina” (MAGRAMA, 2012), se citan niveles de emisión de banda ancha de 185 y 172 dB re 1 μPa @ 1 m, matizando que se registraron niveles de fuente de casi 180 dB re 1 μPa @ 1 m para las bandas de tercio de octava alrededor de los 100 Hz.

Finalmente se ha considerado que en ningún momento se efectuarán explosiones (información aportada por el cliente).

En definitiva, los parámetros escogidos, para describir la emisión de la fase de construcción, se diferencian según labores de dragado y actividad de vertidos de material:

- DRAGADO: niveles de banda ancha con un promedio de **180 dB re 1 μ Pa @ 1 m**, emitiendo de forma continuada 8 horas diarias.
- VERTIDO MATERIALES: banda ancha de **159 dB re 1 μ Pa @ 1 m** Nivel promediado ya que supuestamente la actividad se desarrolla de forma discontinua durante 1 año.

Los resultados de los cálculos quedan representados en tablas de distancia de las afecciones, tanto distancia desde el foco emisor como distancia desde el eje del centro emisor.

6.6.5 Consideraciones

- La modelización no se efectúa dentro del puerto, sino a una cierta distancia de la línea de costa.
- La complejidad del medio marino es mucho mayor al crearse canales de transmisión, pudiéndose derivar zonas de concentración de la energía acústica (donde las ondas coinciden) y, contrariamente, de menor energía o zonas de sombra (donde los ecos no alcanzan). Esto origina fenómenos poco intuitivos en los que un receptor puede recibir mayor nivel a mayor distancia del barco sísmico que otro situado más cerca del barco (sería el caso en el que el primero se situase en una zona de concentración). Estos fenómenos teóricos son complejos de modelar y se necesitaría conocer las propiedades de las masas de agua (corrientes y mareas) y del fondo marino en el área de estudio con complejos análisis matemáticos. Por ello, no se estimarán las zonas de concentración o de sombra.
- Hay que recordar que, si el agua del mar se considerase como un medio homogéneo, sólo los fenómenos de divergencia y absorción contribuirían al decrecimiento del nivel de presión de un sonido que se propaga a partir de una fuente. En el presente estudio, se considera el agua de mar como un medio heterogéneo con variación de temperatura, salinidad y profundidad; sin embargo, se asume que dichas variaciones se presentan en toda la masa de agua. Es decir, la variación de la velocidad del sonido en el área de estudio mantiene el mismo patrón en todos los puntos.
- Otros factores que contribuyen también en la pérdida por transmisión como son la refracción, interferencias constructivas y destructivas asociadas con múltiples tipos de propagación (por ejemplo, difracción y scattering causados por la presencia de inhomogeneidades en el agua), etc; no se han considerado. Resulta imposible encontrar expresiones y valores precisos para calcular la pérdida por transmisión asociada con cada uno de estos factores adicionales. Con lo que a la hora de realizar los cálculos se han tenido en cuenta las pérdidas por divergencia geométrica, por absorción en la columna de agua, y aquellas debidas a las reflexiones e interfaz agua-sedimento.

7 CRITERIO DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO ACÚSTICO SUBMARINO

La definición de un umbral único para las exposiciones al sonido que abarque todas las formas de emisiones acústicas antropogénicas, todas las situaciones medioambientales y todas las especies marinas no es posible, debido a la complejidad de los parámetros que deben evaluarse y las diferencias implicadas en la gama de posibles impactos. Por ello, para establecer los límites umbral adecuados para la evaluación de la afección del sonido, se debe examinar caso por caso.

La cuantificación de los efectos, sobre la audición, de la exposición al ruido es uno de los campos de investigación que mayor interés ha despertado. El efecto del ruido sobre la capacidad auditiva de animales marinos se valora a través de la superación del umbral de audición, cambio que puede ser temporal (TTS, "*Temporal Threshold Shift*"), o permanente, (PTS, "*Permanent Threshold Shift*") (Finneran, 2005). La siguiente figura presenta, los niveles de presión sonora, SPL, capaz de provocar TTS en especies concretas: delfines mulares, y para distintas fuentes: cañones de aire, ruido de banda limitada, onda continua, etc. La duración de las señales se representa en el eje de abscisas. Asimismo, a la derecha de dicha figura aparecen las curvas de umbral de audición para algunos mamíferos marinos.

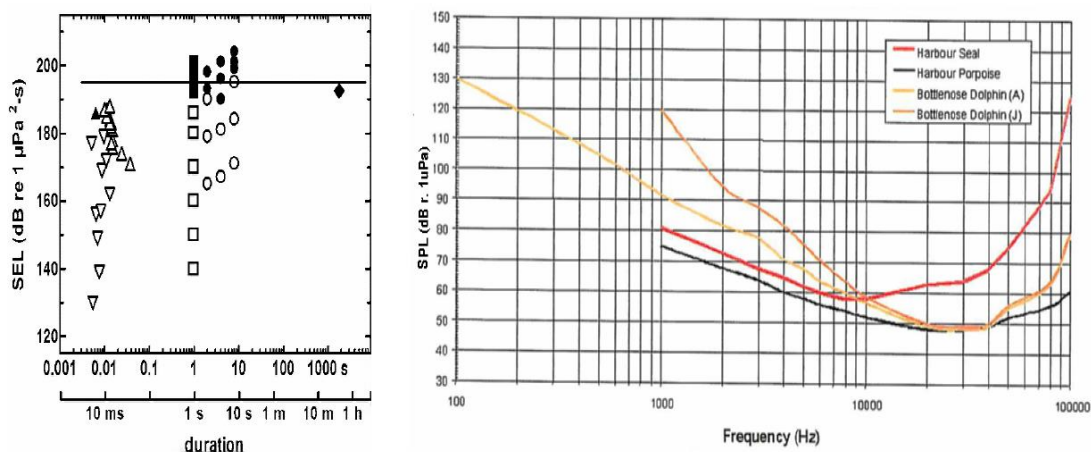


Ilustración 24. Esquema Nivel de exposición sonora SEL, capaz de originar TTS (en negro), en delfines mulares, marsopas comunes y focas comunes.

Fuente: (Hastings, April, 2008)

El nivel de sensibilidad al sonido de una especie depende, principalmente, de su capacidad auditiva. A partir de investigaciones se han establecido umbrales de audición para diversas especies de cetáceos.

Seguidamente, se describen los criterios de impacto acústico y potenciales impactos en materia de contaminación acústica sobre aquellas especies de cetáceos con mayor probabilidad de encontrarse en el área.

7.1 LESIONES Y DAÑOS AUDITIVOS

No existen umbrales de exposición sonora universales que reflejen adecuadamente las complejas relaciones entre los parámetros físicos, ambientales y biológicos, así como la variabilidad en la sensibilidad de cada especie e intra-específica, servirán de referencia a la hora de evaluar el impacto acústico marino (NMFS, 1995) (NOAA, 2006) (HESS, 1999).

Con el objetivo de establecer un criterio de evaluación, se ha realizado una investigación bibliográfica que aúna las diferentes consideraciones establecidas a nivel internacional, comparándolas; para finalmente seleccionar los criterios que se adaptan mejor a este estudio en función de las especies objetivo, presentes en el área de estudio, de la información disponible y el diseño modelo de distribución de los niveles sonoros.

En 1995, las agencias US National Marine Fisheries Service (NMFS, 1995) y National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA, 2006), emplearon la presión sonora RMS (Raíz Media Cuadrada) para determinar las zonas de impacto acústico submarino para mamíferos marinos. NMFS considera, a modo orientativo, que las **presiones sonoras RMS por encima de 180 dB re 1 μ Pa** pueden causar **trastornos temporales (TTS)** en cetáceos. En cuanto al criterio de molestia, establece que presiones sonoras **RMS mayores de 160 dB re 1 μ Pa representan zonas de comportamiento de huida**. Estos parámetros son conservativos desde el punto de vista de prevención de daños auditivos.

Southall y sus colaboradores (Southall, 2007) realizaron una revisión de los impactos del ruido submarino en mamíferos marinos e incluyeron la evaluación tanto de los niveles de pico como en los niveles de exposición sonora. Además, Southall propone un criterio para cetáceos de nivel de pico de 230 dB re 1 μ Pa para poder prevenir daños auditivos (umbral PTS). El umbral de TTS para cetáceos quedaría en este caso a su vez definido por el criterio de nivel de pico de 224 dB re 1 μ Pa para cetáceos.

7.2 COMPORTAMIENTO

En el caso de poder establecer los criterios para los cambios comportamentales generados por focos de ruido submarinos es más complicado. Además, estos cambios dependen de otros factores y existe gran variedad de respuestas según cada grupo de animales marinos cuando están expuestos a sonidos.

Nedwell et al. (Nedwell J R, 2007) y Parvin et al. (Parvin S. J., 2006) compararon el ruido submarino con la capacidad auditiva del receptor, de la misma manera que se emplea la ponderación frecuencial A, para estimar los efectos del ruido sobre seres humanos. Los niveles sonoros recibidos que superaban en 90 dB el rango de escucha (comparable a los 90 dBA en el aire) se consideraba que causaba un fuerte cambio comportamental, mientras los niveles que superaban en 80 dB el rango de escucha generaban una suave respuesta comportamental.

Se desconocen muchos rangos de escucha de cetáceos, de manera que se han considerado los audiogramas, presentados en la ver Ilustración 25 (Nedwell J R, 2007), que contemplan distintas especies de cetáceos. En caso de analizarse una especie, de la que se desconoce su sensibilidad auditiva, se usa el audiograma de una especie similar sustituta. En el caso de cetáceos de pequeño tamaño, se emplea el audiograma del delfín listado (*Stenella coeruleoalba*); para delfínidos medianos el del delfín mular (*Tursiops truncatus*) y para grandes odontocetos el de la orca (*Orcinus orca*).

Estos valores indican que estos animales son más sensibles en los rangos comprendidos entre 4 y 140 KHz, al presentar una capacidad de detectar sonidos a menos decibelios.

Las capacidades auditivas de las especies objeto de estudio se detallan a continuación a través de sus audiogramas.

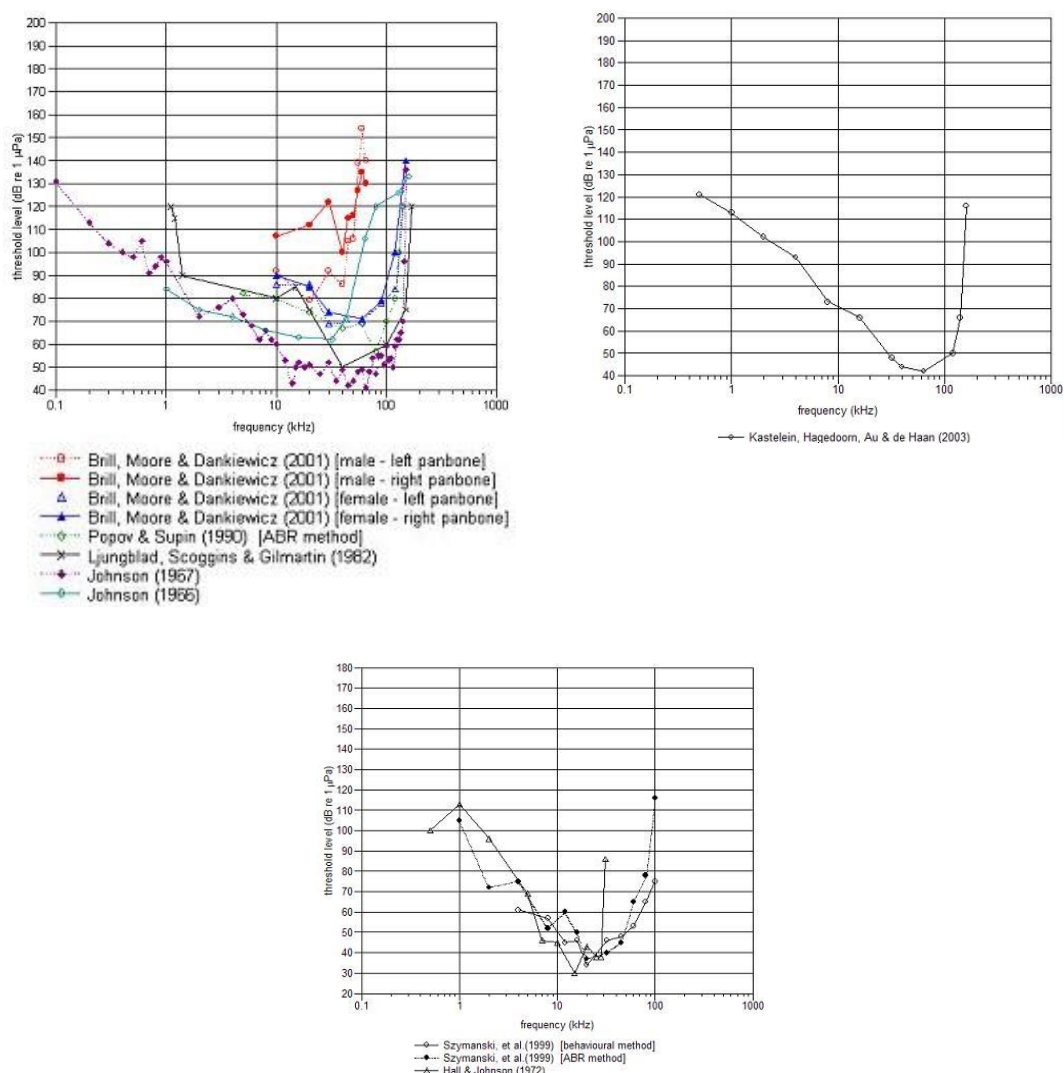


Ilustración 25. Umbrales audición de diversas especies de cetáceos.

Fuente: (Nedwell J R, 2007)

Por otro lado, según señala el “*Documento Nacional de Referencia (DNR) sobre Impactos y Mitigación de la contaminación Acústica Marina*” (MAGRAMA, 2012), el nivel de seguridad más aceptado para reducir el impacto en la fauna marina es de **180 re 1 μ Pa**.

A modo de resumen, a la hora de realizar la evaluación del impacto en cetáceos se establecerá un criterio múltiple. No se puede proponer ningún umbral o criterio para rorcuales debido a la falta de información de la sensibilidad acústica de estos animales. Por tanto, para el caso de los cetáceos, se analizará la presión sonora en RMS, los niveles máximos o de pico serán tenidos en cuenta:

Tabla 12. Resumen de los criterios de impacto acústico seleccionados para el análisis de las afecciones acústicas en cetáceos.

Indicador	Nivel límite	Efecto	Referencia
Nivel pico	230 dB re 1 μ Pa	Umbral de daño auditivo permanente (PTS)	(Southall, 2007)
Nivel pico	224 dB re 1 μ Pa	Umbral de las lesiones con trastorno temporal (TTS)	(Southall, 2007)
Nivel sonoro RMS (SPL)	180 dB re 1 μ Pa	Comportamiento de huida	(NMFS, 1995) (MAGRAMA, 2012)
Nivel sonoro RMS (SPL)	160 dB re 1 μ Pa	Comportamiento de huida	(NMFS, 1995) (MAGRAMA, 2012)

A pesar de que las ballenas presentan sensibilidad a bajas frecuencias, no se han encontrado niveles umbrales específicos.

Fuente: varias. Elaboración propia, 2019.

8 RESULTADOS

8.1 MONITORIZACIÓN DEL RUIDO: ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE LA CAMPAÑA

El objetivo de la monitorización del ruido consistió en realizar el registro acústico, durante dos semanas, en el entorno de la futura ampliación del puerto de Motril. En él, se registraron más de 147 horas de grabaciones.

Para poder llevar a cabo los registros acústicos, se fondearon, tres equipos PAM (Passive Acoustic Monitoring) consistentes en uno o varios hidrófonos más sistemas de registro del sonido (ver Ilustración 17). Los PAM se programaron para registrar el sonido en ciclos periódicos de manera que se grabara un 14% del tiempo (superior al 10% que es lo que recomiendan para estudios similares). Una vez recuperadas las grabaciones, los registros de sonido fueron procesados y analizados para su caracterización.

Paralelamente se recogieron una serie de datos no acústicos de aquellas variables que podían tener influencia sobre el ruido: movimiento de barcos, datos meteorológicos de la zona, etc.

En la siguiente tabla se resumen los niveles sonoros resultantes de cada uno de los hidrófonos (PAM) de la campaña de septiembre y octubre de 2019.

Tabla 13. Resumen niveles sonoros (dB re $1\mu\text{Pa}^2$) obtenido de la campaña de medidas.

Equipo PAM	SPL _{Min}	SPL _{Max}	SPL _{Media}	SPL _{Mediana}	P ₉₅ SPL	P ₅ SPL
H1 (PAM 1) ST300 STD	85	124	93	90	87	110
H2 (PAM 2) ST300 STD	87	146	96	94	91	112
H3 (PAM 3) SM3M	110	143	111	110	110	120

Fuente: elaboración propia, 2019.

A su vez, se han estimado las aportaciones de frecuencias concretas, la de 63 Hz y 125 Hz.

Tabla 14. Resumen niveles sonoros (dB re $1\mu\text{Pa}^2$) para las frecuencias de 63 Hz y 125 Hz obtenidos de la campaña de medidas.

Equipo PAM	SPL _{Media} (63 Hz)	SPL _{Media} (125 Hz)
H1 (PAM 1) ST300 STD	81	76
H2 (PAM 2) ST300 STD	82	78
H3 (PAM 3) SM3M	84	83

Fuente: elaboración propia, 2019.

En las siguientes figuras se exponen los resultados de la campaña septiembre y octubre de 2019 para cada uno de los hidrófonos (PAM):

Punto H1 (PAM 1) ST300 STD:



Ilustración 26. Nivel presión sonora medio (RMS_{medio}) de 24 horas del punto H1.

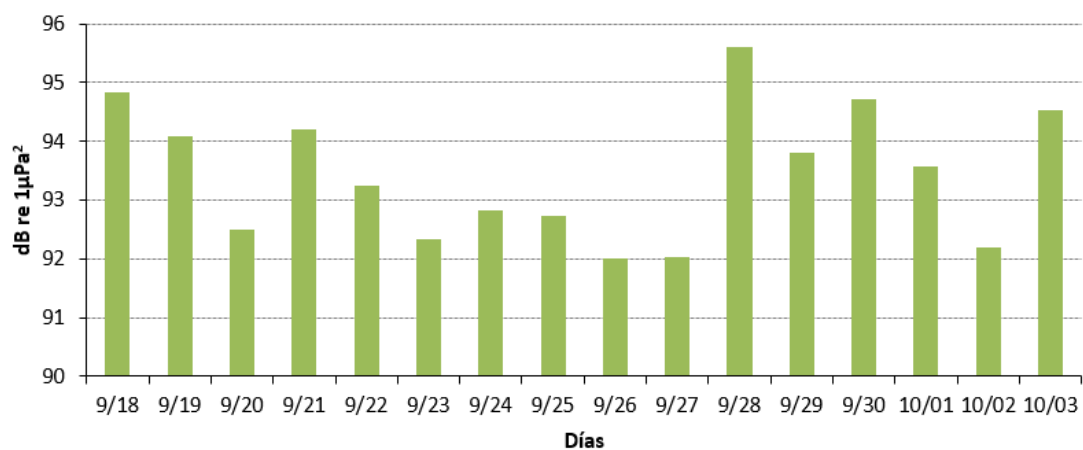


Ilustración 27. Nivel presión sonora medio diario (RMS_{medio}) del punto H1.

Los resultados en tercios de octava se presentan resumidos según la aportación porcentual de las medias por cada frecuencia. De manera que se muestran las aportaciones de las principales frecuencias.

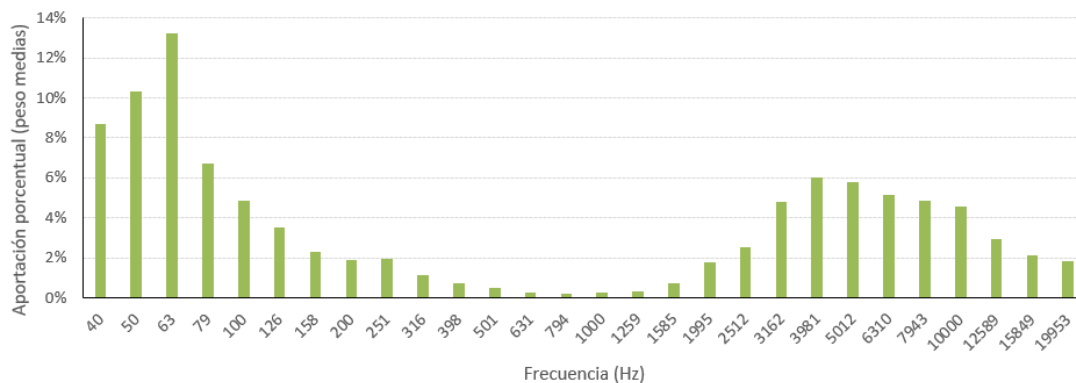


Ilustración 28. Aportación porcentual de cada tercio de octava a la banda ancha (RMS_{medio} / frecuencia) del punto H1.

Punto H2 (PAM 2) ST300 STD:



Ilustración 29. Nivel presión sonora medio (RMS_{medio}) de 24 horas del punto H2.

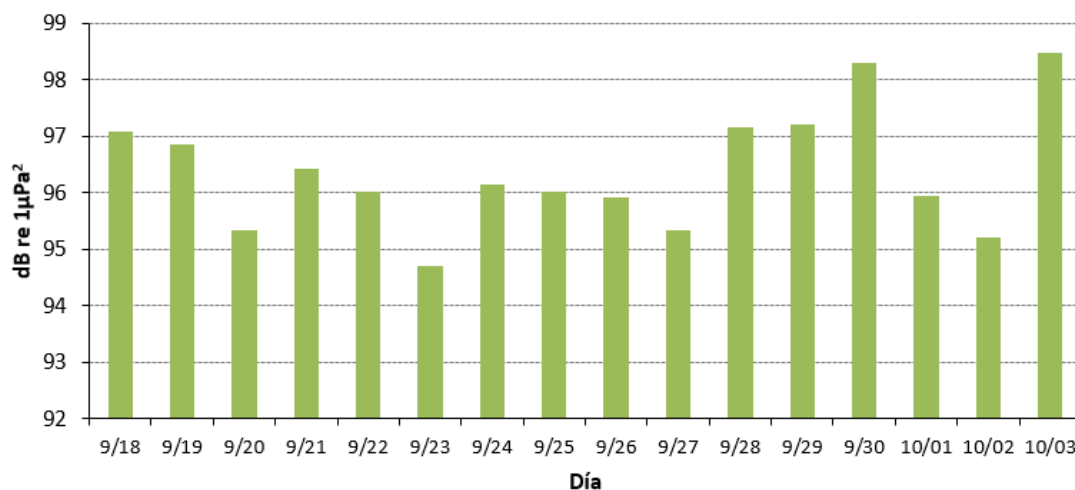


Ilustración 30. Nivel presión sonora medio diario (RMS_{medio}) del punto H2.

De igual manera, se exponen los resultados en tercios de octava según la aportación porcentual de las medias por cada frecuencia.

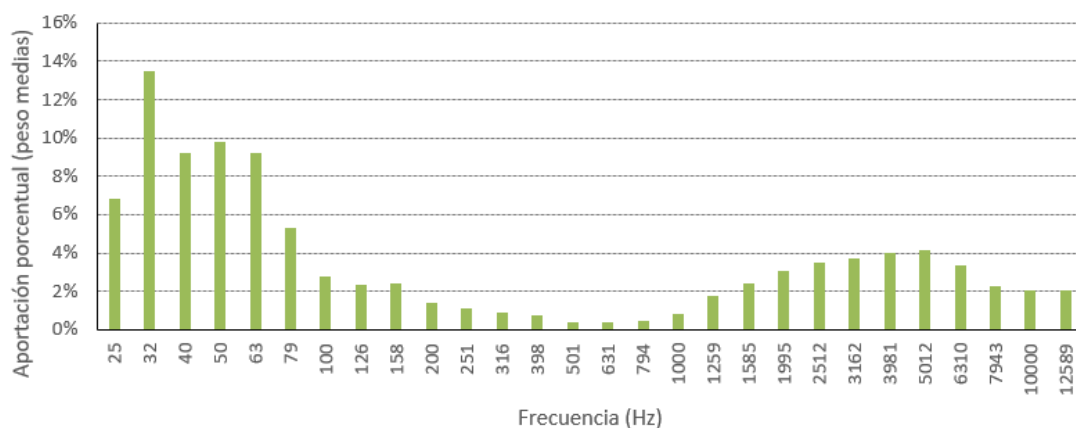


Ilustración 31. Aportación porcentual de cada tercio de octava a la banda ancha (RMS_{medio} / frecuencia) del punto H2.

Punto H3 (PAM 3) SM3M:

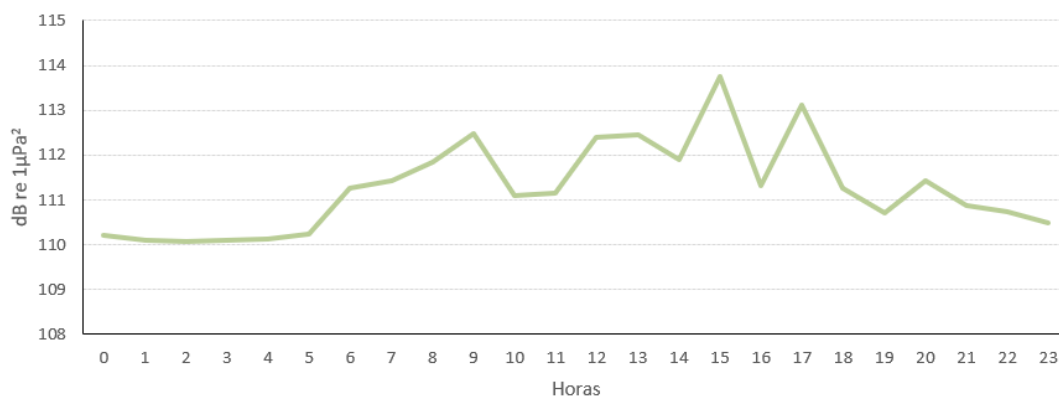


Ilustración 32. Nivel presión sonora medio (RMS_{medio}) de 24 horas del punto HID 3.

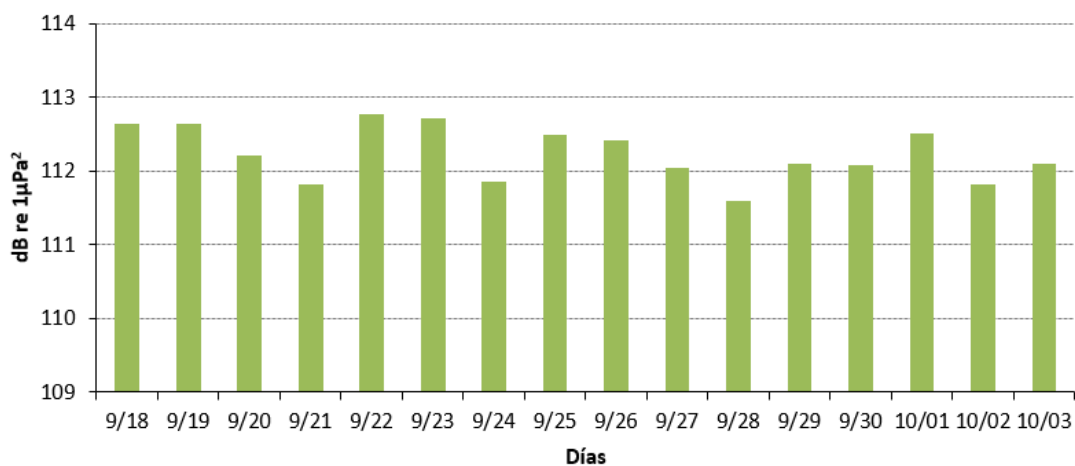


Ilustración 33. Nivel presión sonora medio diario (RMS_{medio}) del punto HID 3.

A continuación, se resumen las aportaciones de las principales frecuencias.

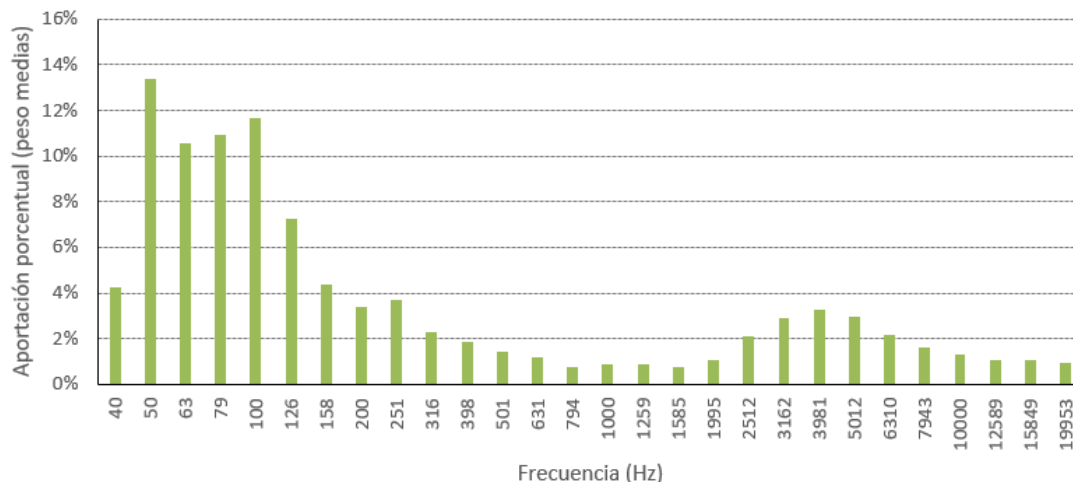


Ilustración 34. Aportación porcentual de cada tercio de octava a la banda ancha (RMS_{medio} / frecuencia) del punto H3.

Las gráficas de los promedios por horas (Ilustración 26, Ilustración 29 e Ilustración 32), muestran unos niveles sonoros medios mayores en periodos diurnos, entre las 7:00 y las 19:00, cayendo durante las horas nocturnas. Mientras que la variación de los niveles sonoros promediados por días es suavizada, presentando el punto H2 una diferencia que no alcanza los 4 dB entre el día con menores niveles sonoros medios y el día de máximos niveles medios (ver Ilustración 27, Ilustración 30 e Ilustración 33).

Por otro lado, el punto H3 es el que muestra mayores diferencias respecto a los otros dos puntos. Esto puede ser debido a la propia ubicación del punto de medida que, a pesar de encontrarse cerca de la bocana del puerto, está más alejado de la costa y próximo a la ruta de tráfico marítimo (mayor concentración de tráfico marítimo).

En definitiva:

- No se deduce una direccionalidad relevante al detectarse niveles sonoros parecidos en los puntos H1 y H2.
- El sonido del área de estudio oscila mayoritariamente entre niveles de ruido de fondo (equivalentes al percentil 95) de 89 - 100 dB re 1uPa y niveles máximos (equivalente al Percentil 5) de 111 dB re 1uPa, con picos que alcanzan los 146 dB re 1uPa.
- El tráfico marítimo se identifica por la frecuencia de 63 Hz y 125 Hz, aunque el rango frecuencial atribuible al tráfico alcanza los 1000 Hz. Por encima de la frecuencia de 10 kHz el sonido detectado corresponde básicamente a fuentes naturales (olas y viento entre 10-15 kHz) y sonidos emitidos por delfines.

Los resultados del análisis de los registros se emplearon tanto para verificar los modelos como para describir el escenario acústico encontrado en el área de estudio.

8.2 ANÁLISIS TRÁFICO MARÍTIMO

La caracterización del tráfico marítimo consiste en poder establecer emisiones sonoras de las diferentes embarcaciones, siendo imprescindible identificar qué tipo de embarcaciones (ver apartado 6.5.2)

Como se ha comentado anteriormente, el nivel de ruido generado por el tráfico marítimo introducido en los modelos se calcula estimando las potencias sonoras según la aportación de cada tipo de barco. Al desconocer la distribución de los barcos y disponer de datos anuales de cada tipo de embarcación, no es posible trabajar con segmentos de las trayectorias de cada embarcación. De manera que se deberá estimar la aportación del tráfico marítimo a través de niveles sonoros globales.

En la Tabla 2 se resumen la situación actual, embarcaciones que transitaron hacia o desde el Puerto de Motril durante el 2016 y 2017. Además, se calcularon las aportaciones de cada tipo de barco y la potencia de emisión de cada una de ellas (ver Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10).

Seguidamente se resume las principales aportaciones de cada tipo de barco en el Puerto de Motril.

Tabla 15. Resumen aportaciones de principales embarcaciones sobre el área de estudio.

TIPO	2017	Potencia teórica (dB 1μPa m)
Cargo	18%	182
Pesquero	1%	150
Pasajeros	74%	155
Tanker	7%	179
Mercante	0%	161

Fuente: Tabla 8

De igual manera, se estimó la situación

Tabla 16. Tasas de aumentos de las principales embarcaciones sobre el área de estudio.

TIPO	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Cargo	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Pesquero	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Pasajeros	3,7%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%
Tanker	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
Mercante	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,4%	5,4%	5,4%	5,4%

Fuente: Puerto de Motril

8.3 MODELO DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA

El presente informe aborda la modelización de dos situaciones: fase de construcción del puerto y fase de funcionamiento (tráfico marítimo). En ambos casos, se han empleado los niveles de presión sonora (SPL_{1s}) y los niveles máximos o de pico generados por la actividad.

A continuación, se muestran los resultados de los cálculos de los niveles sonoros, considerando que la emisión parte como onda semiesférica pero conforme se propaga, se va deformando debido a las pequeñas variaciones de la velocidad del sonido, a una propagación más horizontal (ver apartado 6.6). El análisis de las posibles afecciones en animales por la superación de los umbrales de daños o molestias como consecuencia de la exposición al ruido generado por el aumento de tráfico marítimo se muestra en el Capítulo 7.

Se han diseñado dos estimaciones, fase de construcción y fase de funcionamiento. La modelización de la fase de construcción se centra en calcular las distancias de alcance de los niveles sonoros de los diferentes índices acústicos: SPL_{1s} , promedio diario (SPL_{1s_DIA}). Mientras que la modelización del tráfico marítimo muestra los niveles globales que se encontrarán en el área.

Por otro lado, hay que comentar que, debido a la falta de información, no se ha podido efectuar una verificación del modelo puesto que no se han podido reproducir las mismas condiciones oceanográficas y presencia de focos sonoros acaecidas durante las medidas. Por el mismo motivo, tampoco se ha podido plantear comparar resultados promedios (globales) donde analizar la representatividad de los resultados teóricos promedios ya que se precisaría calcular teóricamente el nivel recibido en cada hidrófono en función de la ubicación de cada foco (barcos) o ruta marítima.

A pesar de todo, se ha efectuado una estimación del nivel sonoro global considerando cada una de las aportaciones de las embarcaciones, prediciendo la aportación de cada tipo de embarcación al nivel global.

8.3.1 Fase construcción

DRAGADO

Se considera que se trabaja una retroexcavadora, el foco se encuentra en el lecho marino (6 metros de profundidad) y la actividad trabaja durante 8 horas diarias a lo largo de varios meses. Como se desconoce la duración estimada de la construcción, se presenta un nivel promedio diario.

Tabla 17. Niveles pico (SPL_{1s}) durante las tareas de dragado según distancias del centro emisor.

Distancia al centro emisor (m)	Nivel pico, SPL_{1s} (dB $1\mu Pa$)
100	162
200	156
300	153
400	150
500	148
1000	142
2000	136
3000	133

Fuente: elaboración propia, 2019.

Tabla 18. Niveles pico (SPL_{1s_DIA}) durante las tareas de dragado según distancias del centro emisor.

Distancia al centro emisor (m)	Nivel pico, SPL_{1s_DIA} (dB $1\mu Pa$)
100	133
200	127
300	124
400	122
500	120
1000	114
2000	108
3000	104

Fuente: elaboración propia, 2019.

DIQUE DÁRSENA PESQUERO-DEPORTIVA

Se considera que se trabaja con un gánguil. Así mismo, el foco se encuentra en el lecho marino (6 metros de profundidad) y la actividad trabaja durante 8 horas diarias, presentando los promedios diarios.

Tabla 19. Niveles pico (SPL_{1s}) durante las tareas de dragado según distancias del centro emisor.

Distancia al centro emisor (m)	Nivel pico, SPL_{1s} (dB $1\mu Pa$)
100	141
200	135
300	132
400	129
500	127
1000	121
2000	115
3000	112

Fuente: elaboración propia, 2019.

Tabla 20. Niveles pico (SPL_{1s_DIA}) durante las tareas de dragado según distancias del centro emisor.

Distancia al centro emisor (m)	Nivel pico, SPL_{1s_DIA} (dB $1\mu Pa$)
100	115
200	109
300	106
400	103
500	102
1000	96
2000	90
3000	86

Fuente: elaboración propia, 2019.

8.3.2 Fase funcionamientos: tráfico marítimo

Como se ha comentado anteriormente, el modelo se enfoca en estimar la evolución del frente de ondas, de manera que se pueda calcular la densidad de energía que pasa por la superficie del frente de onda. El modelo se ha construido teniendo en cuenta la aportación de las reflexiones generadas en la superficie marina.

Las rutinas de cálculo (algoritmos) se programan en lenguaje Visual Basic, obteniendo los cálculos a diferentes distancias.

Seguidamente se muestran las estimaciones realizadas con el modelo de propagación. Los datos introducidos han sido detallados en el apartado anterior (sección 8.2 de este documento). Se estima la variación en los niveles globales del área de estudio debido a la aportación del tráfico marítimo.

Tabla 21. Resultados del modelo de propagación acústica submarina para el tráfico marítimo. Situación futura: incremento en dB debido al tráfico marítimo (evolución anual).

Año	Incremento niveles sonoros anuales (dB $1\mu Pa$)	Incremento niveles sonoros acumulados (dB $1\mu Pa$)
ESCENARIO PROMEDIO		
2019	1,3	1,3
2020	0,1	1,4
2021	0,1	1,5
2022	0,1	1,6
2023	0,1	1,7
2024	0,1	1,8
2025	0,1	1,9
2026	0,1	2,0
ESCENARIO OPTIMISTA		
2019	1,3	1,3
2020	0,1	1,4
2021	0,2	1,6
2022	0,2	1,8
2023	0,2	2,0
2024	0,2	2,2

Año	Incremento niveles sonoros anuales (dB 1μPa)	Incremento niveles sonoros acumulados (dB 1μPa)
2025	0,2	2,3
2026	0,2	2,5

Fuente: elaboración propia, 2019.

Al promediarse los niveles sonoros con escenarios acústicos donde los focos sonoros son móviles y constantes, prácticamente, la variación espacial es mínima. Por otro lado, a pesar de que se produce un aumento del tráfico marítimo, la aportación futura no será relevante en comparación con la situación actual; es decir, aumento de un dB en los niveles globales con la ampliación y de décimas año tras año.

A pesar de considerar un escenario de máxima aportación del tráfico marítimo, los niveles sonoros prácticamente no variarán.

9 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se procede a identificar la afección del funcionamiento de la futura ampliación del puerto de Motril, en su entorno a través de la evaluación de las posibles molestias generadas en los distintos grupos de receptores marinos (cetáceos).

Los receptores marinos considerados en el presente estudio han sido definidos en el Capítulo 5. Y los rangos a los que se pueden observar daños letales, físicos, auditivos o cambios comportamentales como consecuencia de la exposición al ruido generado por la actividad se han detallado en el Capítulo 7.

A continuación, se discuten los resultados obtenidos a lo largo del estudio para su posterior análisis de posible afección en cetáceos.

9.1 MEDIDAS DE RUIDO AMBIENTE. CAMPAÑA DE MEDIDAS

Se realizaron registros acústicos de forma continua (sonoboyas) desde el 18 de septiembre de 2019 hasta el 3 de octubre de 2019, obteniéndose así los niveles de ruido.

No obstante, según lo propuesto por la Directiva 2008/56/CE, por la que se establece un marco de acción comunitaria para la política del medio marino (Directiva marco sobre la Estrategia Marina) y la consecuente Decisión 2010/477/EU que establece los criterios y estándares metodológicos para conseguir el buen estado ambiental propuesto en la Directiva 2008/56/CE, se recomienda cuantificar los niveles de ruido natural y el antropogénico. Resulta imposible discernir entre natural y antropogénico puesto que prácticamente toda la contribución al ruido ambiental proviene del tráfico marítimo.

Las gráficas de los promedios por horas (Ilustración 26, Ilustración 29 e Ilustración 32), muestran unos niveles sonoros medios mayores en periodos diurnos, entre las 7:00 y las 19:00, cayendo durante las horas nocturnas. Mientras que la variación de los niveles sonoros

promediados por días es suavizada, presentando el punto H2 una diferencia que no alcanza los 4 dB entre el día con menores niveles sonoros medios y el día de máximos niveles medios (ver Ilustración 27, Ilustración 30 e Ilustración 33).

En general, los registros recopilados durante la campaña permiten caracterizar el ruido procedente del tráfico marítimo actual.

El tratamiento de los datos de las medidas consistió en estimar los niveles sonoros promedios (SPL_{Medio}), mediana de niveles sonoros ($SPL_{Mediana}$), percentil 5% (SPL_{p5}) y percentil 95% (SPL_{p95}). Y se estimó que los niveles de ruido de fondo (equivalentes al percentil 95) oscilan entorno a los 90-100 dB re 1uPa y niveles máximos (equivalente al Percentil 5) de 111 dB re 1uPa, con picos que alcanzan los 146 dB re 1uPa

El tráfico marítimo contribuye significativamente, en bajas frecuencias (hasta los 1000 Hz), al ruido de fondo y se mantiene constante durante todos los días. Por encima de la frecuencia de 10 kHz el sonido detectado corresponde básicamente a fuentes naturales (olas y viento entre 10-15 kHz) y sonidos emitidos por delfines.

Estos datos aportaron información del ambiente sonoro existente en la Bahía de Algeciras, es decir, el ruido ambiental el área de estudio.

Uno de los mayores inconvenientes a la hora de asignar o estimar el ruido de fondo presente en el área de estudio es que son pocos los estudios de ruido ambiente marino (y pocos los realizados en la zona), quedando muy limitada la opción de comparar los resultados con otros estudios. Sin embargo, se procede a exponer información de ruido ambiental con tal de ofrecer una mayor perspectiva de la situación acústica del área.

Hay que comentar que el ruido ambiente es la suma del ruido de fondo más el ruido generado por la actividad humana. Su origen se sitúa, por lo tanto, en muy diversas fuentes: viento (altura de ola), lluvia, hielo, vida marina, profundidad de la zona, hora del día, época del año, a las que se añaden las fuentes de origen humano: transporte marítimo, aéreo, dragado, perforación, trabajo civil, exploración y explotación de recursos, emisiones de sonar, comunicaciones, alarmas, etc. La siguiente ilustración presenta el ruido ambiente en tres tipos de zonas. Los datos de aguas profundas y poco profundas son de Urick (Urick R. J., 1983) los datos en verde (aguas muy poco profundas) son medidas reales llevadas a cabo en España (Cobo, July 2007).

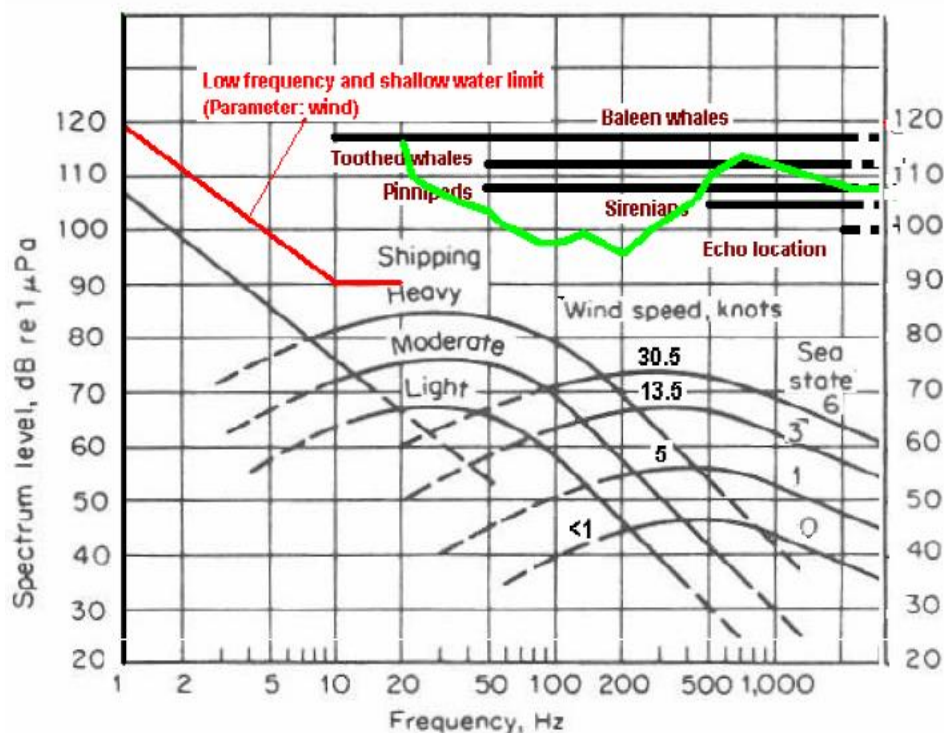


Ilustración 35. Ruido ambiente en aguas profundas (negro), aguas poco profundas (rojo) y aguas muy poco profundas (verde)

Como se puede observar en la Ilustración 35 a frecuencias más bajas (desde los 20 a los 1000 Hz) la mayor contribución al ruido ambiental es causada por los barcos. A mayor tránsito de barcos, mayor nivel de ruido ambiental. Obviamente, en el caso de la zona del puerto de Motril, se considera que el ruido de los barcos es constante, integrado en el ruido de fondo.

Según las curvas de referencia utilizadas actualmente para representar el ruido ambiente marino (Urick R. J., 1983), los niveles de ruido aportados sólo por un tráfico marítimo elevado no superan los 90 dB, mientras que las medidas de ruido de fondo para áreas poco profundas se encuentran entorno a los 100 dB.

Los valores obtenidos en la campaña de medidas son superiores a los valores teóricos. Estas diferencias se deben, por un lado, a que el aumento de los niveles sonoros en las frecuencias bajas responde acorde a la evolución ascendente de las actividades humanas en el medio marino de las últimas décadas ((NRC), 2003), y concretamente al aumento del tráfico marítimo. Y, por otro lado, que las medidas in situ, contemplan el conjunto de las aportaciones, incluyendo factores meteorológicos o movimiento de embarcaciones fuera de canales de tráfico establecidos.

Consecuentemente, los niveles sonoros promedios obtenidos entorno a los 90 - 100 dB se considera que responden a la realidad.

9.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA

Las características del emplazamiento o la propia emisión de la actividad a modelizar (tráfico marítimo y fase construcción) condicionan tanto el diseño como la selección del modelo de propagación de acústica submarina.

El modelo que se presenta trata de una herramienta de cálculo de la propagación de la onda, de elaboración propia; un modelo computacional híbrido basado en modelos físicos y resueltos a través de métodos numéricos.

Debido a la falta de información, no se ha podido efectuar una verificación del modelo para la fase de construcción ni de funcionamiento. No obstante, se puede asumir que existe una sobreestimación de los niveles en la modelización ya que se trabaja con datos promediados de presencia constante de tráfico marítimo; y, por tanto, considera la situación acústicamente más desfavorable. A la hora de simular, no es posible tener en cuenta aquellas disminuciones del tráfico debido al mal tiempo o movimientos aleatorios.

9.2.1 Fase construcción

A la hora de analizar la posible afección de los niveles sonoros generados sobre el medio, se ha realizado una comparación entre los rangos de afección para cetáceos establecidos en el capítulo 7 y los resultados de la predicción de los niveles obtenidos.

Resumen de los rangos de afección para cetáceos según los cálculos de predicción de los niveles pico, niveles sonoros a un segundo y niveles sonoros promedios diarios durante la fase de construcción.

Tabla 22. Resumen comparativo entre resultados obtenidos del modelo y los niveles límite de afección en cetáceos durante la fase de construcción

Indicador	Nivel límite	Efecto	AFECCIÓN
DRAGADO BOCANA DEL PUERTO			
SPL_{1s}	180 dB re 1 μ Pa	Comportamiento de huida	NO SE ALCANZA
SPL_{1s}	160 dB re 1 μ Pa	Posible respuesta comportamental	NO SE ALCANZA
SPL_{1s-DIA}	180 dB re 1 μ Pa	Comportamiento de huida	NO SE ALCANZA
SPL_{1s-DIA}	160 dB re 1 μ Pa	Posible respuesta comportamental	NO SE ALCANZA
DIQUE DE ABRIGO			
SPL_{1s}	180 dB re 1 μ Pa	Comportamiento de huida	NO SE ALCANZA
SPL_{1s}	160 dB re 1 μ Pa	Posible respuesta comportamental	NO SE ALCANZA
SPL_{1s-DIA}	180 dB re 1 μ Pa	Comportamiento de huida	NO SE ALCANZA
SPL_{1s-DIA}	160 dB re 1 μ Pa	Posible respuesta comportamental	NO SE ALCANZA

Fuente: elaboración propia, 2019.

Los niveles de presión sonora procedentes de la actividad de la draga en la fase de construcción no muestran niveles superiores a 122 dB re 1 μ Pa a 100 metros de distancia del emisor; consecuentemente, no se alcanzarán aquellos niveles que pueden producir el

desplazamiento permanente del umbral de audición (PTS) o la pérdida temporal de audición (TTS).

9.2.2 Fase de funcionamiento: tráfico marítimo

En cuanto a la prognosis futura del tráfico marítimo, al promediarse los niveles sonoros con escenarios acústicos donde los focos sonoros son móviles y constantes, prácticamente, la variación espacial es mínima. Además, a pesar de que se produce un aumento del tráfico marítimo, la aportación de la ampliación del puerto no será relevante en comparación con la situación actual (aumento de poco más de **1 dB** en los niveles globales).

Este pequeño incremento de niveles sonoros **no genera una modificación del escenario acústico existente**, lo que no implica que, ante una situación acústicamente ya desfavorable, no se deba mejorar, proteger, prevenir y proponer planes de actuación enfocados a una mejora acústica.

Considerando que el escenario acústico actual presenta unos niveles sonoros globales entorno a los 90 – 100 dB re 1uPa y niveles máximos de 111 dB re 1uPa, y que en el 2026 aumentará 2 dB re 1uPa (2,5 dB re 1uPa para el escenario más desfavorable), la aportación sonora del tráfico marítimo de la ampliación del puerto de Motril no es significativa.

De todas formas, se resumen las estimaciones de los rangos de afección obtenidos de los cálculos predictivos

Tabla 23. Resumen comparativo entre resultados obtenidos del modelo y los niveles límite de afección en cetáceos durante la fase de funcionamiento, tráfico marítimo

Indicador	Nivel límite	Efecto	AFECCIÓN
TRÁFICO MARÍTIMO			
SPL_{1s}	180 dB re 1 µPa	Comportamiento de huida	NO SE ALCANZA
SPL_{1s}	160 dB re 1 µPa	Posible respuesta comportamental	NO SE ALCANZA
SPL_{1s-DIA}	180 dB re 1 µPa	Comportamiento de huida	NO SE ALCANZA
SPL_{1s-DIA}	160 dB re 1 µPa	Posible respuesta comportamental	NO SE ALCANZA

Fuente: elaboración propia, 2019.

Por tanto, evaluando **los niveles sonoros globales**, es de esperar que **no se genere nuevas afecciones sobre las poblaciones de cetáceos**, en concreto odontocetos, ya que en ninguno de los casos se alcanzan niveles de 180 dB.

Por otro lado, la percepción del sonido se caracteriza a través del umbral de audición de los cetáceos, y en este caso, las frecuencias principales son las de 63 Hz y 125 Hz, sería recomendable definir el umbral auditivo a dichas frecuencia. En los audiogramas (ver Capítulo 7) se observa que la sensibilidad auditiva entre los 50 y 150 Hz se puede establecer en los 110 dB. A través de las curvas de sensibilidad auditiva o percepción del sonido, se determinaría la reacción de los cetáceos (son sensibles a su escucha).

La situación actual en ese concreto rango frecuencial (entre 50-150 Hz) se encuentra en todos los casos, por debajo de los 90 dB, no alcanzándose los niveles de afección.

En cuanto al enmascaramiento, se considera que solo tiene lugar si el espectro del ruido se solapa con la banda crítica que se presenta alrededor de la frecuencia de la señal (Fletcher, 1940). Igualmente, la banda crítica se establece a través del umbral de audición de los cetáceos en el rango frecuencial de 50-150 Hz, estableciéndose la no superación.

No obstante, como ya se ha comentado, para la situación futura no se prevén cambios en los niveles sonoros (aumento de 2 dB). Aunque no se genera una modificación del escenario acústico existente, la situación acústica actual debería mantenerse. Por tanto, es preciso establecer actuaciones para mejorar, conservar, proteger y prevenir el ambiente acústico del área de estudio.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, los datos sobre la sensibilidad en el sistema auditivo de los cetáceos (empleados en el análisis de este estudio) se basan en experimentos con animales en cautividad, limitando en todos los casos su capacidad de huida. Así que se debe tener en cuenta que algunas especies podrían presentar una sensibilidad distinta que la que predecirían los rangos de audición estimados con animales en cautividad (Finley, 1990), (Evans W. , 1973).

En cuanto a los mysticetos, no se dispone de datos de sensibilidad acústica de los rorcuales o umbrales críticos (Castellote M. C., 2011), no siendo posible llevar a cabo un análisis directo de la afección a los mismos.

10 CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de los registros obtenidos de la campaña de medidas describen el escenario acústico encontrado en el área de estudio durante septiembre y octubre.

Es preciso recordar que no se dispone de información necesaria de la emisión inicial esperada durante una construcción de un puerto con estas características. Se han trabajado con datos teóricos extraídos de bibliografía.

Durante la fase de construcción, los niveles sonoros máximos esperados se encontrarán en las inmediaciones del puerto, escasos metros de los focos sonoros, y no se superarán los 160 dB 1μPa m. Estos niveles caerán rápidamente en los primeros 100 metros de distancia del foco. Por ello, no se superará los umbrales teóricos de daños o lesiones en cetáceos.

En el caso de la fase de funcionamiento, tráfico marítimo, el aumento de tráfico marítimo se espera que aumente el ruido de fondo existente en 2 dB. Este incremento de niveles sonoros **no genera una modificación del escenario acústico existente.**

No se ha dispuesto de toda la información precisa para poder efectuar la verificación de los cálculos ni modelizaciones más precisas. Hay pocos datos de distribución, abundancia o rutas de paso de cetáceos en el área de estudio; datos de condiciones oceanográficas, de emisión durante la construcción o datos del propio tráfico marítimo del área. Esta falta de información se ha completado con datos teóricos obtenidos de la investigación bibliográfica. Por todo ello, se recomienda establecer una serie de medidas complementarias, correctoras o minimizantes, concretamente para la fase de construcción.

En cuanto a la evaluación de la posible afección de los niveles sonoros globales en cetáceos es de esperar que **no se genere nuevas afecciones sobre las poblaciones de odontocetos** ya que no se alcanzan niveles de 180 dB.

10.1 RECOMENDACIONES

Finalmente, se recomienda establecer zonas de seguridad, por ejemplo, de exclusión o de mitigación durante la fase de construcción. Éstas se definen en relación a la posición de la fuente de sonido, independientemente de si son fijas o en movimiento.

Aunque es de esperar que no se superen los niveles, debido a esta falta de información en las emisiones, al tratarse de zonas con presencia de cetáceos sensibles es recomendable aplicar una zona de exclusión de un radio mínimo. Dicho rango podría establecerse según recomendaciones del protocolo de la JNCC, de **500 metros**, donde se requiera parar la actividad si se avista cualquier cetáceo.

Por tanto, en esta zona de exclusión serán necesarios observadores para detectar la presencia de cetáceos, utilizando métodos acústicos (PAM) o visuales, y en ese caso retrasar el comienzo de las actividades productoras de ruido (MMS, 2004); (JNCC, 2003) o interrumpirlas (AUSTRALIA, Oct. 2001).

Los observadores efectuarían Monitoreo Acústico Pasivo (PAM) y / o de Observación de Mamíferos Marinos (MMO) durante las operaciones de dragado, para evaluar el posible efecto ambiental de las actividades durante la fase de construcción en especies y hábitats sensibles en el área.

Los servicios de PAM y MMO consisten en un control visual (búsqueda previa al inicio de las actividades) para la fauna marina dentro de una zona de exclusión de 500 metros de la fuente sonora durante (por ejemplo) 30 minutos antes de comenzar las operaciones de construcción. Si no se observan mamíferos marinos dentro de la zona de exclusión durante la búsqueda previa, se realizará un inicio suave, aumentando gradualmente la actividad o frecuencia para permitir suficiente tiempo para que la fauna marina pueda abandonar el área. Si se observan mamíferos marinos dentro de la zona de exclusión durante la

búsqueda previa, el inicio debe retrasarse hasta que su paso haga que se encuentren fuera de la zona de exclusión.

11 NOTAS FINALES Y FIRMAS

El presente Trabajo se ha realizado en el seno del Estudio Ambiental Estratégico del Plan Director de Infraestructuras del Puerto de Motril, bajo la dirección de D^a Mercedes García Barroso. La autora es la abajo firmante.

En Jerez de la Frontera, a 13 de noviembre de 2019



Fdo.: Neus Pérez
DBA Servicios Integrales Acústicos



TECNOAMBIENTE
TECNOAMBIENTE, S.L.
Calle Newton nº 15 E Tel. 956 302 488
Parque Empresarial Fax 956 310 139
11407 JEREZ DE LA FRONTERA
tecnoambiente@tecnoambiente.com
NIF B06724247

Fdo.: Mercedes García Barroso
TECNOAMBIENTE S.L.U.

12 ANEXO I: BIBLIOGRAFÍA

- (NRC), T. N. (2003). Ocean Noise and Marine Mammals. *National Academies Press*. 92 pp.
- Au, W. L. (1985). Demonstration of adaptation in beluga whale echolocation signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77: 726- 730.
- AUSTRALIA, E. (Oct. 2001). Guidelines on the application of the Environment Protection and Biodiversity Conservation Act to interactions between offshore seismic operations and larger cetaceans. *ISBN 064254784X*.
- Buckingham, M. (1992). Ocean-acoustic propagation models". *Journal d'Acoustique*, 223-287.
- Cañadas A, S. R.-T. (2002). Cetacean distribution related with depth and slope in the Mediterranean waters off southern Spain. *Deep Sea Research*, 49(11): 2053–2073.
- Cañadas A., S. R. (2000). The northeastern Alboran Sea, an important breeding and feeding ground for the long finned pilot whale (*Globicephala melas*) in the Mediterranean Sea. 1-15.
- Cañadas A., S. R. (2005). Habitat preference modelling as a conservation tool: proposals for marine protected areas for cetaceans in southern Spanish waters. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.*, 15: 495–521.
- Castellote, M. C. (2011). Fin whale (*Balaenoptera physalus*) population identity in the western Mediterranean Sea. *Publications, Agencies and Staff of the U.S. Department of Commerce.*, Paper 250.
- CEDEX, C. d. (Mayo 2015). *Informe Específico del Estado Actual del Conocimiento sobre Fuentes, Efectos y Modelos de Propagación del Ruido Subacuático Generado por los Trabajos de Geosísmica Marina en relación con los Procedimientos de Evaluación Ambiental*. 173 pp: A6-T1-CA-3.
- Chen, C.-T., & Millero, F. J. (1977). Speed of Sound in Seawater at High Pressures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 32, 1357.
- Cobo, P. K. (July 2007). " Underwater noise impact of offshore wind farms during construction and operation phases. *International Congress on Sound and Vibration. ICSV14. Cairns.* .
- Damon P., G. N. (2005). Prey detection by bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*: an experimental test of the passive listening hypothesis. *In Animal Behaviour*.
- De Soto, N. D. (203). Anthropogenic noise causes bodymalformations and delays development inmarine larvae. *Sci. Rep.*, 3, 2831.

- Del Grosso, V. (1974). New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *J. Acoust. Soc. Am.*, 56, 1084-1091.
- Etter, P. (2013). *Underwater acoustic modeling and simulation* (4th ed.). London: Spon Press.
- Evans, P. (1987). *The natural History of Whales and Dolphins*. London: Christopher Helm .
- Evans, W. (1973). Echolocation by marine delphinids and one species of freshwater dolphin. *J. Acoust. Soc. Am.*, 54:191-199.
- Finley, K. J. (1990). *Reactions of belugas, Delphinapterus leucas, and narwhals, Monodon monoceros, to icebreaking ships in the Canadian High Arctic*. Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, 1123, pp. 57.
- Finneran, J. e. (2005). Temporary Threshold Shift (TTS) in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) exposed to mid-frequency tones. *J. Acoust. Soc. Am.* , 118, pp 2696-2705.
- Fletcher, H. (1940). Auditory patterns. *Review of Modern Physics* , 12: 47- 65.
- Gordon J., M. A. (1996). Underwater noise pollution and its significance for whales and dolphins. *The Conservation of Whales and Dolphins* (Ed. By M.P. Simmonds & J.D. Hutchinson), pp. 281- 319.
- Hastings, M. C. (April, 2008). Coming in terms with the effects of Ocean Noise on Marine Animals. *Acoustics Today*, Vol. 4, Nº 2.
- HESS, H. E. (1999). *Interim operational guidelines for high energy seismic surveys offshore Southern California*. . Report for the California State Lands Commission and the US Minerals Management Service.
- Jensen, F. K. (2011). Computational ocean acoustics: Advances in 3D ocean acoustic modeling. *ADVANCES IN OCEAN ACOUSTICS*. New York: Springer.
- JNCC, J. N. (2003). *The Effects of Seismic Activity on Marine Mammals in UK Waters, 1998-2000* (2003). JNCC Report No. 323.
- K.S., N. (1969). *The echolocation of marine mammals*. New York, NY: In Anderson H.T. The Biology of Marine Mammals, Academic Press.
- LIFE02/NAT/E/8610. (2006). *Conservación de cetáceos y tortugas marinas en Andalucía y Murcia*. Proyecto Life Naturaleza.
- MAGRAMA. (2012). *Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Martin, A. (1990). *Whales, Dolphins and Porpoises*. London: Salamander Press.

- Mckenna, M. R. (2012). Underwater radiated noise for modern commercial ships. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(1): 92-103.
- MMO. (2015). *Modelled Mapping of Continuous Underwater Noise Generated by Activities*. A report produced for the Marine Management Organisation: MMO Project No: 1097. ISBN: 978-1-909452-87-9.
- MMS, U. S. (2004). *Notice to Lessees and Operators of Federal Oil, Gas, and Sulphur Leases In the Outer Continental Shelf, Gulf of Mexico OCS Region*. Minerals Management Service NTL No. 2004-G01.
- Nedelec, S. R. (2014). Anthropogenic noise playback impairs embryonic development and increases mortality in a marine invertebrate. *Sci. Rep.*, 4, 5891.
- Nedwell J R, T. A. (2007). *A validation of the dBht as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise*. Subacoustech Report Reference: 534R1231, Publisehd by Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform.
- NMFS. (1995). *Small takes of marine mammals incidental to specified activities; offshore seismic activities in southern California*. . Fed. Regist. 60(200, 17 Oct.):53753-53760.
- NOAA. (2006). *Small Takes of Marine Mammals Incidental to Specified Activities*; . Rim of the Pacific (RIMPAC) Antisubmarine Warfare (ASW) Exercise Training Events Within the Hawaiian Islands Operating Area (OpArea). : Federal Register 71 (No.78).
- Parvin S. J., N. J. (2006). *Underwater noise impact modelling in support of the London Array, Greater Gabbard and Thanet offshore wind farm developments*. Report to CORE Ltd by Subacoustech Ltd Report No. 710R0517.
- Raga J.A., P. J. (2004). *Proyecto Mediterráneo. Zonas de especial interés para la conservación de los cetáceos en el Mediterráneo español*. Naturaleza y Parques Nacionales. Serie técnica.
- Recuero López, M. (1991). *Ingeniería acústica*. Madrid: Paraninfo.
- Richardson W.J. (1995). *Marine Mammals and Noise*. New York: Academic Press.
- Rolland, R. P. (2012). Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, 279, 2363–2368.
- Slabbekoorn, H. N. (2010). *A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish* (Vols. 25, 419–42). Trends Ecol.
- Southall, B. B. (2007). Marine mammal noise-exposure criteria: initial scientific recommendations. *Aquat. Mamm.*, 37, 411–521.

Urlick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound*. McGraw Hill Book Co. New York. Pp, 86-97.

Williams, R. A.-S. (2015). *Impacts of anthropogenic noise on marine life: publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management* (Vols. 115, 17–24). Ocean Coast. Manag.

Wright, A. A. (2007). *Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise?* (Vols. 20, 274–316). Int. J. Comp. Psychol.

13 ANEXO II: DESARROLLO MODELO PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA

13.1 TRÁFICO MARÍTIMO

El modelo consistió en asignar a cada centroide de cada celda una potencia acústica en función del tipo y del número de embarcaciones que habían cruzado dicha celda. Se estimó la atenuación en función de la distancia a la emisión considerando una propagación semiesférica a un determinado ángulo de incidencia y profundidad. Este ángulo de incidencia y la distancia a la que se propagaba el sonido fue determinado teniendo en cuenta los perfiles de velocidad del sonido.

13.1.1 Exposición del problema

A modo de recordatorio, el objetivo es obtener el nivel sonoro en un punto determinado (un transecto es el plano vertical a la superficie del mar).

El frente de ondas se compone del desarrollo del frente inicial con la interacción con los rebotes de superficie y del suelo marino. Por tanto, para cada frente se consideran las pérdidas del nivel sonoro:

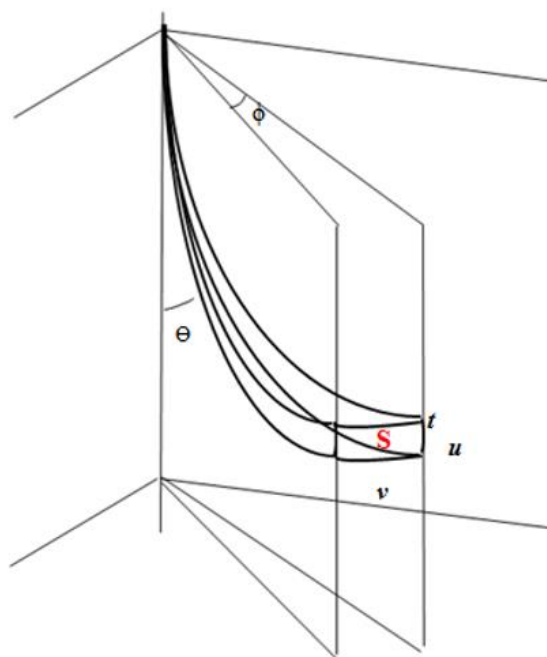
- Por divergencia geométrica
- Por transmisión

A continuación, se desarrolla el cálculo por divergencia geométrica

DIVERGENCIA GEOMÉTRICA

El problema se enfoca en determinar la densidad de energía que pasa por la superficie S correspondiente al frente de onda.

Partiendo del principio de conservación de energía, la densidad de energía (intensidad del sonido) decae proporcionalmente a la superficie.



$$S = \int_S d(u)d(v)$$

con $d(v) = r * d(\phi)$

$$\iint_{\theta\phi} d(u)rd(\phi) = \int_{\theta} d(u) \int_{\phi} rd(\phi)$$

La integral $\int_{\phi} rd(\phi)$ corresponde al arco formado por los dos planos con el eje común en z.

Dado un ángulo Θ , si tomamos el ángulo ϕ lo suficientemente pequeño (al trabajar con transectos se puede hacer ϕ tan pequeño como se quiera, siempre que $\phi > 0$), se puede considerar que no hay diferencias oceanográficas entre los dos haces que conforman el ángulo ϕ , y por tanto la r se mantiene fija:

$$\int_{\phi} rd(\phi) = r \int_{\phi} d(\phi) = d(v) = r * \phi$$

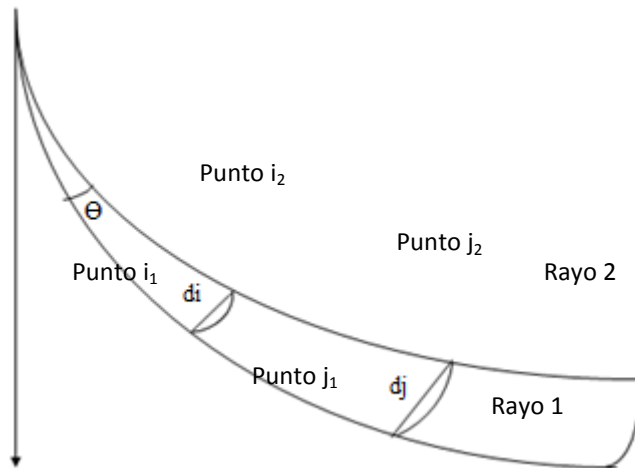
Como ϕ se mantiene constante a lo largo del desplazamiento de la onda, la caída debida a este factor será proporcional a r .

Y $S = r\phi \int_{\theta} d(u)$ donde $\int_{\theta} d(u)$ es la longitud del arco formado por los dos rayos del transecto. Siendo este es el problema que se pretende resolver.

13.1.2 Desarrollo: Evolución del frente de ondas

El objetivo es calcular la longitud del arco del frente de onda. Para ello se genera una malla delimitada por dos rayos (1 y 2), separados por un pequeño ángulo (Θ) y por dos instantes de tiempo t (cuyos puntos quedan designados por i) y $t + \delta t$ (identificados los puntos con j). Es decir, la malla quedaría delimitada entre los puntos i_1 , i_2 , j_1 y j_2 (ver Figura 1). El problema consiste en determinar j_1 y j_2 a partir de los puntos i_1 y i_2 .

Se toma Θ lo suficientemente pequeño para que la diferencia relativa entre seno y ángulo sea inferior a la precisión con la que se quiera trabajar. Es decir, se generan pequeños haces lo suficientemente pequeños como para realizar una aproximación de arcos a cuerdas.



En cada paso se incrementará el ángulo que forma el rayo con el eje Z en Θ radianes.

Figura 1. Esquema de la aproximación de arcos a cuerdas

Sea θ_0 el ángulo inicial (salida de la fuente) del rayo, θ_i el ángulo en el punto i , z la profundidad, x la distancia a la vertical que pasa por la fuente y r la distancia recorrida.

Según la Ley de Snell $\sin \theta_0 / c_0 = \sin \theta_i / c$. Por tanto, $\sin \theta_i = k_0 * c$

Y como,

$d(r) = c * d(t)$, se tiene

$$d(z) = \cos(\theta_i) * d(r) = \cos(\theta_i) * c * d(t) = c_z * d(t) \quad (1)$$

$$d(x) = \sin(\theta_i) * d(r) = \sin(\theta_i) * c * d(t) = c_x * d(t)$$

A partir de estas ecuaciones y mediante un proceso iterativo, se pueden obtener los puntos j_1 y j_2 correspondientes al avance de la onda en un incremento de tiempo τ .

PRIMERA ESTIMACIÓN DE Z:

Aproximación lineal: $c_z = c_{zi} + m_z * (z - z_i)$

De (1) se obtiene

$$d(z) / c_z = d(t)$$

E integrando

$$\ln(c_{zi} + m_z * (z - z_i)) = m_z * t + k$$

$$c_{zi} + m_z * (z - z_i) = k * e^{m_z * t}$$

Si se toma como origen de tiempo ($t=0$) el punto $i \Rightarrow k = c_{zi}$ y para $t = \tau$ se alcanza el punto j ($z = z_j$)

$$\text{Rayo 1} \Rightarrow c_{zi} + m_z * (z - z_i) = c_{zi} * e^{m_z * t} \text{ y } \ln \left[(c_{zi} + m_z * (z - z_i)) / c_{zi} \right] = m_z * t$$

$$\Rightarrow m_z * (z - z_i) = c_{zi} * (e^{m_z * t} - 1)$$

$$\Rightarrow z = z_{zi} + c_{zi} * (e^{m_z * t} - 1) / m_z \Rightarrow z = z_i + c_{zi} * (e^{m_z * \tau} - 1) / m_z$$

Para que se cumpla el supuesto de la aproximación lineal, se tomarán incrementos de tiempo (τ) suficientemente pequeños.

PRIMERA ESTIMACIÓN DE X:

De forma análoga se tiene:

$$x = x_i + c_{xi} * (e^{m_x * t} - 1) / m_x \text{ y } \ln \left[(c_{xi} + m_x * (x - x_i)) / c_{xi} \right] = m_x * t$$

Proceso:

Se parte de los gradientes de c en el punto i (m_x y m_z). Con ellos se evalúan los primeros valores de x_j e y_j (x_{j1} y z_{j1})

A partir de x_{j1} y z_{j1} se obtiene una nueva c (según las funciones de c respecto z y x). Con este valor de c se estiman los nuevos valores de m_x y m_z .

Seguidamente, se evalúan los nuevos valores de x_j e y_j (identificados como x_{j2} y z_{j2}).

Se efectúa el proceso iterativo hasta que $|x_{j1} - x_{j2}| + |z_{j1} - z_{j2}| < [\text{precisión}]$

Se toma como valores definitivos los promedios de los últimos valores:

$$x_j = (x_{j1} + x_{j2}) / 2$$

$$z_j = (z_{j1} + z_{j2}) / 2$$

Finalmente se obtiene la longitud de la cuerda (arco) entre los puntos j_1 y j_2 con un determinado nivel de precisión.

13.2 FASE DE CONSTRUCCIÓN

13.2.1 Dragado en la bocana

Dragado en la bocana del puerto: tareas ejecutadas con retroexcavadora. La potencia acústica considerada es nivel máximo o pico.

La fase de construcción será descrita por el nivel sonoro a 1 segundo (SPL_{1s}) y nivel sonoro promedio a un segundo durante la construcción (SPL_{1s_DIA}). Se sitúa un punto a una distancia d del foco emisor.

Estimación del rayo directo del foco al punto.

$$SPL_{pico} = I_0 - 10 * \log_{10}(d * d_c) - d * a \quad \text{si } d_c > d$$

$$SPL_{pico} = I_0 - 20 * \log_{10}(d) - d * a$$

Siendo, I_0 la potencia sonora de la fuente.

d , distancia al foco

d_c , distancia a la que se inicia la propagación horizontal

a , Coeficiente de atenuación

$I_{1s} = \left(\int_0^1 I(t)^2 d(t) \right)^{1/2}$ si se considera una frecuencia elemental con frecuencia f , se

tiene $I(t)^2 = I^2 * \cos^2(\omega t)$, como $\cos^2(\omega t) = \frac{(1 + \cos(2\omega t))}{2}$ y $\omega = 2\pi f$.

Entonces:

$$I_{1s} = \left(\int_0^1 I^2 * \left(\frac{(1 + \cos(2\omega t))}{2} \right) d(t) \right)^{1/2} = \left(I * \left| \frac{t}{2} + \frac{\sin(2\omega t)}{4\omega} \right|_0^1 \right)^{1/2}$$

Para $t = 0$, (1) = 0

Para $t = 1$, la expresión (1) se convierte en $\left(\frac{1}{2} + \frac{\sin(\omega)}{4\omega} \right)$

$\frac{\sin(\omega)}{4\omega}$ puede oscilar entre $\frac{(-1,1)}{2\pi f}$. Para valores enteros de f , $\sin(2\pi f) = 0$.

Por ello, a la hora de trabajar con banda ancha, se toma el valor de $\frac{\sin(\omega)}{4\omega} = 0$

En decibelios (dB):

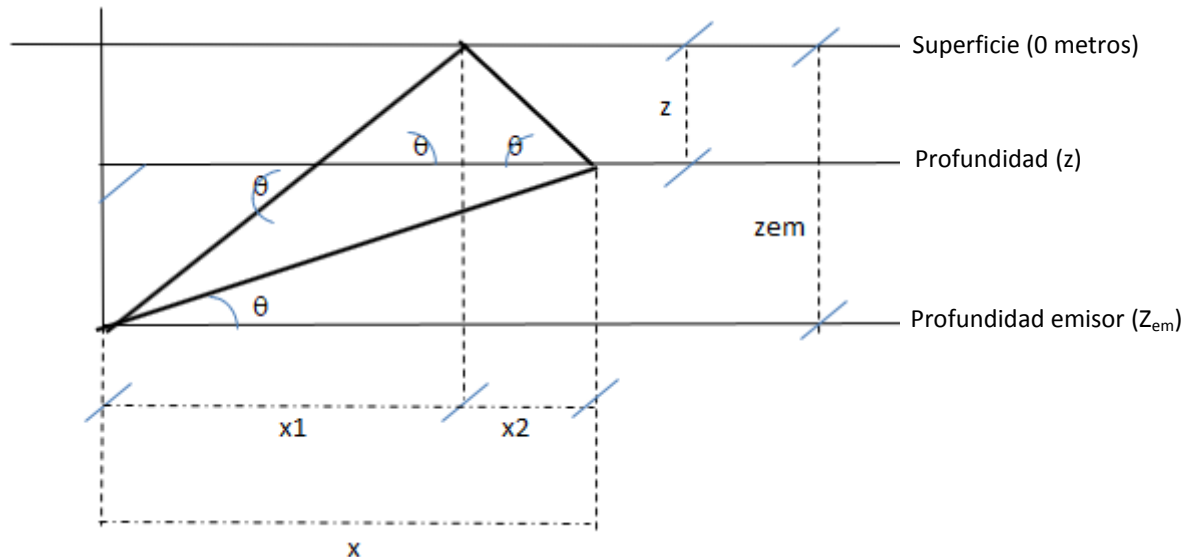
$$SPL_{1s} = 10 * \log_{10}(I) - 5 * \log_{10}\left(\frac{1}{2}\right)$$

En definitiva, se simplificaría: $SPL_{1s} = SPL_{pico} - 1,5 \text{ (dB)}$

Estimación del rayo reflejado.

Se considera una superficie totalmente plana.

Para determinar el punto de la reflexión:



Conocidos x , z y z_{em} , se calcula x_1 y x_2 .

Como $\frac{z_{em}}{x_1} = \tan \theta$ y $\frac{z}{x_2} = \tan \theta$, por tanto,

$$(1) \quad z * x_1 = z_{em} * x_2$$

$$(2) \quad Y \quad x_1 + x_2 = x$$

Con (21) y (22) se constituye un sistema de dos ecuaciones con 2 incógnitas, cuya solución es:

$$x_1 = \frac{x * z_{em}}{z + z_{em}}$$

$$Y \quad x_2 = x - x_1$$

Una vez obtenidos x_1 y x_2 , se calcula de forma similar, la distancia a la se refleja la onda en la superficie (alcanzar la superficie) y la distancia de superficie al punto considerado.

Atenuación.

$$TL_a = d * a$$

Siendo:

TL_a , pérdida de niveles sonoros (dB) debida a la atenuación del agua de mar.

d , distancia recorrida

a , Coeficiente de atenuación

El coeficiente de atenuación depende de la frecuencia. Siendo la frecuencia central de 1000 Hz la considerada en el análisis de banda ancha.

13.2.2 Construcción dique de abrigo

Se tiene en cuenta que las tareas se ejecutan, principalmente, con gánguil.

La fase de construcción será descrita por el nivel sonoro a 1 segundo (SPL_{1s}) y nivel sonoro promedio a un segundo durante la construcción (SPL_{1s_DIA}). Se sitúa un punto a una distancia d del foco emisor. Las consideraciones se han descrito en el Apartado 6.6 de este documento.

Igual que en el anterior apartado (“Estimación del rayo directo”), el nivel pico será:

$$SPL_{pico} = I_0 - 10 * \log_{10}(d * d_c) - d * a \quad \text{si } d_c \geq d$$

$$SPL_{pico} = I_0 - 20 * \log_{10}(d) - d * a$$

Siendo, I_0 la potencia sonora de la fuente.

d , distancia al foco

d_c , distancia a ala que se inicia la propagación horizontal

a , Coeficiente de atenuación

Y al igual que en apartado anterior:

$$SPL_{1s} = SPL_{pico} - 1,5 \text{ (dB)}$$

Estimar el nivel sonoro diario durante la fase de construcción (SPL_{1s_DIA})

Se calcula el nivel sonoro a un segundo promedio del día completo (SPL_{1s_DIA}) considerando las horas de actividad de actividad y de no actividad. El valor de 8 horas de actividad promediado a lo largo de todo un día quedaría:

$$SPL_{1s_DIA} = SPL_{pico} - 1,5 \text{ (dB)} - 4,8 \text{ (dB)}$$

Siendo 4,8 (dB) la caída de niveles sonoros debidos al promediar las horas de actividad (8 horas) con el resto de las horas sin actividad.