



ELABORACIÓN DE PAISAJES SONOROS PARA LA MONITORIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA

Francisco Javier Rodrigo Saura¹

Jaime Ramis Soriano²

Eduardo Ruiz Perez¹

Pedro Poveda Martínez²

Jesús Carbajo San Martín²

¹ Sociedad Anónima de Electrónica Submarina S., M., E. Crta. Algameca, s/n, 30205, Cartagena, Murcia, España

² Universidad de Alicante. Carretera San Vicente del Raspeig, s/n, 03080, San Vicente del Raspeig, España

RESUMEN

El ruido submarino antropogénico es una amenaza creciente para la vida marina debido al incremento de la actividad humana en el medio marino. En Europa se publicó la Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo con el objetivo de establecer un marco de actuación comunitaria en el ámbito de la política medioambiental marina. La directiva introduce la energía acústica submarina, tal y como se detalla en el Descriptor 11, como fuente contaminante, por lo que se hace necesario realizar la monitorización y seguimiento de los niveles acústicos en el entorno marítimo. Se establecen dos metodologías para determinar el nivel de contaminación acústica submarina; la monitorización mediante el despliegue de hidrófonos y la elaboración de paisajes o mapas sonoros. El primer método requiere un despliegue de larga duración lo que implica un alto coste por lo que la elaboración de mapas sonoros es una alternativa real para establecer los niveles acústicos en una demarcación marítima determinada. En el presente trabajo se presentan las necesidades y procesos necesarios para la elaboración de paisajes sonoros en el contexto del proyecto: *Filling the gap: Thresholds assessment and impact beyond acoustic pressure level linked to emerging blue-growth activities* (SONORA) referencia PCI2022-135081-2.

ABSTRACT

Anthropogenic noise is a growing threat to marine life due to the increment of human activity in the marine environment. In Europe, the Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council was published with the aim of establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy. The directive introduces underwater acoustic energy, as detailed in Descriptor 11, as a polluting source, which makes it necessary to monitor and follow the acoustic levels in the maritime environment. Two methodologies are established to determine the level of

underwater pollution; monitoring through the deployment of hydrophones and the elaboration of landscapes or sound maps. The first method requires a long-term deployment, which implies a high cost, so the elaboration of sound maps is a real alternative to establish the noise levels in a given maritime area. This paper presents the requirements and processes needed for the elaboration of soundscapes in the context of the Project: *Filling the gap: Thresholds assessment and impact beyond acoustic pressure level linked to emerging blue-growth activities* (SONORA) reference PCI2022-135081-2.

Palabras Clave—Mapas Sonoros, Ray Tracing, Contaminación Acústica Submarina.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico mundial está generando un nivel creciente de actividades humanas en el entorno submarino.

En Europa, se publicó la Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008 [1], bajo la denominación de Directiva Marco sobre la Estrategia Marina [Marine Strategy Framework Directive-MSFD], con el objetivo de establecer un marco de acción comunitaria en el ámbito de la política del medio marino. Esta directiva introdujo la contaminación acústica submarina, como se detalla en el Descriptor 11. La Decisión 2010/477/UE de la Comisión [2] sobre los criterios y normas metodológicas para el buen estado ambiental [Good Environmental Status-GES] de las aguas marinas propuso dos criterios: sonidos impulsivos fuertes, de baja y media frecuencia (C11.1.1) y sonidos continuos de baja frecuencia (C11.2.1). La implementación del Descriptor 11 de la MSFD fue seguida y apoyada por el Subgrupo Técnico de Ruido Submarino de la MSFD (TG Noise), que proporcionó definiciones y recomendaciones detalladas para monitorizar y medir su evolución [3]. Este grupo además definió que debido al coste económico y de recursos que supone realizar campañas de medidas en el mar, se pueden elaborar paisajes

sonoros o mapas de ruido submarino para realizar el seguimiento del nivel de contaminación acústica y establecer las medidas correctoras para reducir el impacto en la fauna y flora marina alcanzando el buen estado medioambiental (GES).

Al igual que cualquier sistema de comunicaciones, el paisaje sonoro submarino está determinado por la fuente, propagación en el medio de transmisión, agua de mar en este campo de aplicación, y características y propiedades del receptor, según la normativa aplicable o las características acústicas del impacto en fauna y flora dependiendo del caso de uso.

Para la elaboración de los paisajes sonoros hay que considerar las fuentes de ruido submarino, tanto de origen natural como antropogénico, la propagación acústica submarina y sus peculiaridades y los parámetros acústicos y ancho de banda de interés en función del objetivo del paisaje sonoro.

El objetivo de este trabajo es proporcionar información sobre los aspectos relevantes para la elaboración de paisajes sonoros o mapas acústicos submarinos mostrando casos prácticos elaborados mediante las aplicaciones desarrolladas por SAES.

El artículo se divide en un total de seis apartados; el primer apartado corresponde a la introducción, el segundo a la caracterización del ruido submarino, el tercero a la identificación de fuentes de ruido, el cuarto a la descripción de conceptos generales relativos a la propagación acústica y modelos de propagación, el quinto a la elaboración de los mapas de ruido y el sexto y último a las conclusiones.

2. CARACTERIZACIÓN DE FUENTES DE RUIDO SUBMARINO

Un mapa sonoro se puede definir como la representación espacial, normalmente en tres dimensiones, del nivel de un parámetro acústico determinado, comúnmente el nivel de presión sonora [Sound Pressure Level-SPL], para una frecuencia y ancho de banda determinado. Así, antes de elaborar el mapa sonoro para realizar el seguimiento de la contaminación submarina de una zona de estudio es necesario definir los parámetros acústicos característicos que definen las fuentes sonoras presentes en dicha zona de estudio.

Las fuentes sonoras se caracterizan por; Frecuencia (Hz) de emisión, Intensidad/ Nivel de fuente (dB ref 1 μ Pa @ 1 m), Duración (s ó ms), Ciclo de Trabajo (%), Ancho de Banda (Hz), Direccionalidad, Potencia de Salida (W) y Persistencia.

El ruido radiado por fuentes sonoras se clasifica en dos grupos principales:

- Ruido continuo. Ruido generado de manera continua en el tiempo que puede ser de dos tipos; ruido de banda ancha o ruido de espectro continuo y ruido de banda estrecha, correspondiente a un ruido discontinuo en frecuencia consistente en tonos o

componentes senoidales teniendo un espectro con componentes lineales o frecuencias discretas. El ruido radiado normalmente existe como un espectro continuo sobre el cual existen tonos superpuestos. Tanto las componentes continuas como las discretas decrecen al aumentar la frecuencia.

- Ruido impulsivo. Ruido de corta duración, que puede ser repetitivo o no en función de la fuente. Está caracterizado por señales de alto nivel de presión sonora, espectro discreto y corta duración.

En la Figura 1 se muestra el ruido típico de banda ancha y de banda estrecha generado por un buque y ruido impulsivo generado por mamíferos marinos.

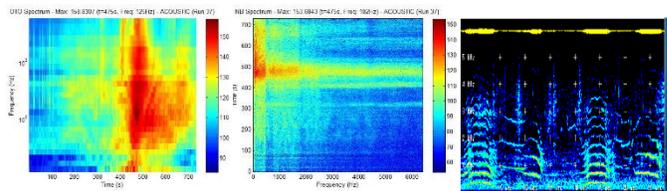


Figura 1. Ruido submarino de banda ancha (izquierda), ruido de banda estrecha (centro) y ruido impulsivo (derecha).

3. FUENTES DE RUIDO SUBMARINO

El ruido submarino es generado por la superposición del ruido generado por la actividad antropogénica en el entorno marítimo y el ruido ambiente existente en el área de estudio. En esta sección se realiza una descripción de las fuentes de ambos tipos de ruido.

3.1. Definición de ruido ambiente

La definición de ruido ambiente ha evolucionado a lo largo de los años, principalmente debido al desarrollo de nuevas aplicaciones y sistemas acústicos submarinos y la aparición de nuevas fuentes de ruido antropogénico. Inicialmente, la definición de ruido ambiente se centró en el análisis de la capacidad de detección de los sistemas de sonar. Urlick [4] definió el ruido ambiente como aquella parte del ruido de fondo total que se puede observar usando un hidrófono no direccional, pero que no se debe al hidrófono y su forma de despliegue (ruido propio o self-noise), o a alguna fuente localizada identificable de ruido.

El ruido ambiente se define como todo sonido, excepto el resultante del despliegue, funcionamiento o recuperación del equipo de grabación y su plataforma asociada, en el que se incluye tanto sonidos naturales como antropogénicos [6].

En el pasado, las fuentes de ruido ambiente se clasificaron como fuentes físicas, biológicas y artificiales [7]. Hoy en día, las fuentes de ruido pueden clasificarse como ruido natural y artificial a efectos del desarrollo de estudios sobre la evolución y el impacto de la contaminación acústica

en el medio marítimo. Las fuentes naturales de ruido incluyen sonidos de origen físico y biológico, y pueden denominarse geofonías o biofonías [5].

3.2. Fuentes de ruido antropogénicas

Las principales actividades antropogénicas generadoras de ruido submarino son; ruido generado en dragados y construcciones, ruido generado en perforaciones y producciones de gas y petróleo, ruido generado por el transporte, incluyendo tráfico marítimo y aéreo, ruido generado en investigaciones geodésicas, ruido generado por sistemas SONAR activos, ruido generado en explosiones submarinas y ruido generado en estudios oceanográficos científicos.

La principal fuente de contaminación acústica submarina es el tráfico marítimo [8-12]. El ruido generado por el tráfico marítimo es una combinación de sonidos tonales y ruido de banda ancha repartidos en el rango de frecuencia entre 2 Hz y 100 kHz, y se genera principalmente por la cavitación de la hélice, la maquinaria de a bordo y las turbulencias generadas alrededor del casco [10] y [11].

3.3. Posicionamiento de las fuentes de ruido antropogénicas

Para la elaboración de los paisajes sonoros es necesario localizar las fuentes de ruido antropogénico, considerando el ruido ambiente homogéneo en el área de estudio. De acuerdo con las fuentes de naturaleza antropogénica descritas anteriormente, a excepción del tráfico marítimo, se pueden considerar estáticas, con lo que su localización es conocida.

Para la localización de los buques usualmente se utiliza el sistema de identificación automática [Automatic Identification System-AIS]. El sistema AIS proporciona para cada buque el número de identificación del servicio móvil marítimo (MMSI), el tipo de buque, sus posiciones y su rumbo y velocidad. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de información AIS en la costa española, donde se puede observar el tipo de buque, de acuerdo al color del símbolo utilizado, y las líneas de densidad de tráfico marítimo obtenida de www.marinetraffic.com.



Figura 2. Ejemplo de la información AIS en la costa española obtenida en www.marinetraffic.com.

4. LA PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA

Para la elaboración de un paisaje sonoro submarino es imprescindible conocer los fenómenos básicos de propagación acústica en el medio y en concreto en el área de estudio. La propagación acústica es modelada mediante modelos de propagación de son introducidos en este apartado.

4.1. Descripción de conceptos generales

La propagación del ruido radiado por una fuente acústica submarina depende de factores como la temperatura y la salinidad del agua de mar (en función de la profundidad), profundidad del fondo, tipo de fondo y profundidad de calado de la fuente sonora.

La velocidad del sonido (c) en el mar suele estar comprendida entre 1450 y 1540 m/s. La velocidad del sonido puede medirse directamente, pero es habitual su cálculo mediante fórmulas empíricas en función de la temperatura T ($^{\circ}\text{C}$), la salinidad S (psu) y la presión, que es proporcional a la profundidad D (m). Existen diferentes expresiones para el cálculo de la velocidad del sonido como por ejemplo la publicada por Mackenzie [13], Medwin [14] y Leroy [15].

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 consecuencia, la estratificación de densidad no implica necesariamente una estratificación de salinidades y de temperaturas. No obstante, también estas variables suelen presentar gradientes horizontales muy pequeños, salvo en las desembocaduras de ríos y estuarios, en zonas afectadas por deshielos o por lluvias recientes o en los márgenes de las grandes corrientes oceánicas. Por lo tanto, en una primera aproximación puede suponerse que la velocidad del sonido es también una variable que presenta estratificación horizontal y que varía solo en sentido vertical.

La representación de la velocidad o la temperatura en función de la profundidad se denomina traza baticerimétrica [Sound Velocity Profile-SVP] y traza batitérmica, respectivamente. Una traza típica se puede dividir en cuatro zonas:

- Capa superficial. Abarca desde la superficie hasta los 50 m. Está afectada por el calentamiento de la radiación solar y los efectos meteorológicos.
- Termoclima estacional. Presenta un gradiente negativo cuya intensidad varía con la época del año. En verano y otoño suele ser muy pronunciada porque las aguas superficiales son muy cálidas, pero en primavera e invierno puede confundirse con la capa de mezcla.
- Termoclima permanente. Abarca desde el final de la termoclima estacional hasta los 1600 m

aproximadamente. Presenta un gradiente negativo suave y uniforme de temperatura. Se ve poco afectada por los cambios estacionales.

- Isoterma profunda. La temperatura permanece constante, de manera que la velocidad aumenta con la profundidad.

El nivel de presión sonora que llega a un punto del espacio RL (Received Level) viene determinado como el nivel de fuente radiado SL menos las pérdidas de transmisión TL (Transmission Loss). Las pérdidas por transmisión se refieren a la atenuación de la señal acústica debido a la pérdida de intensidad cuando la onda se desplaza por el medio. Depende fundamentalmente de la divergencia y la absorción, aunque también se producen pérdidas por transmisión por rebote en superficie y fondo.

4.2. Descripción de los modelos de propagación

Para la elaboración de paisajes sonoros submarinos se utilizan modelos de propagación para calcular las pérdidas por transmisión en cada punto del espacio.

Los modelos de propagación de acústica submarina suelen resolver la ecuación de ondas, o ecuación de Helmholtz generalmente para una frecuencia determinada y siendo necesario para modelar las señales de banda ancha un modelo en el dominio del tiempo. Alternativamente, se calcula una solución para cada frecuencia o banda de frecuencia en todo el rango de frecuencia requerido con el uso de una transformada inversa adecuada, dependiendo del parámetro acústico del que sea necesario elaborar el paisaje sonoro. No todos los modelos de propagación considerarán todos los factores ambientales que pueden influir en la onda que se propaga.

En general, las soluciones del modelo de propagación se pueden dividir en tres grandes clases según i) las características de frecuencia de la fuente; ii) la dependencia ambiental de la región de propagación; y iii) la profundidad del agua. Los modelos dentro de la clase ii) generalmente se clasifican como independientes o dependientes de la distancia fuente – receptor en función de si los parámetros ambientales como la profundidad del agua y velocidad del sonido, se mantienen fijos con la distancia o no. Los modelos dependientes de la distancia es la opción preferida cuando las condiciones de batimetría o columna de agua cambian a lo largo del camino de propagación.

Actualmente, los modelos de propagación se clasifican comúnmente según el método de cálculo utilizado en los siguientes grupos [16-17]:

- Trazado de rayos.
- Modo normal (Teoría de ondas).
- Ecuación parabólica.
- Integración del número de onda.
- Flujo de energía.
- Modelos de diferencias finitas y elementos finitos.

- El método de imagen [18].
- Modelos multi-trayecto [19].

Para la elaboración de paisajes sonoros submarinos, SAES utiliza los modelos de propagación integrados en la herramienta SEAPROOF, basada en el empleo del modelo de trazado de rayos. El modelo de propagación utilizado ha sido verificado por el Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE) de la OTAN situado en La Spezia, Italia, lo que asegura la precisión de las estimaciones realizadas. En la Figura 3 se muestra el trazado de rayos obtenido con el modelo de propagación de SAES para un perfil de velocidad (SVP) determinado.

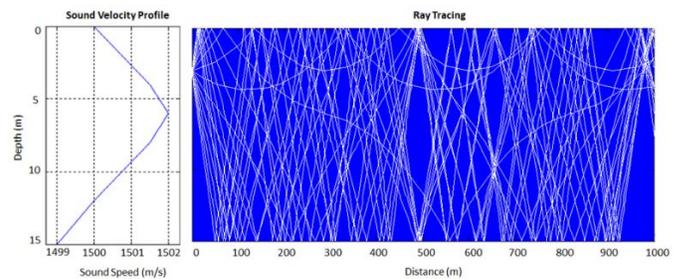


Figura 3. Trazado de rayos obtenido con el modelo de propagación de SAES para un perfil de velocidad (SVP) determinado.

Como se puede observar, el modelo obtiene el trazado de rayos en función del perfil de velocidad (SVP) incluyendo el camino directo, rebotes en superficie y fondo. A partir de los rayos sonoros, se calcula las pérdidas por transmisión en cada punto del espacio. El modelo de propagación desarrollado por SAES es un modelo dependiente de la distancia considerando además los efectos de reverberación.

5. ELABORACIÓN DE PAISAJES SONOROS O MAPAS DE RUIDO SUBMARINO

En la Figura 4 se muestra un diagrama de bloques de los pasos necesarios para la elaboración de paisajes sonoros.

Para la elaboración de paisajes sonoros, es imprescindible tener caracterizadas las fuentes de ruido que estarán presentes en la zona de estudio y su posición. La caracterización de las fuentes se puede realizar a partir de medidas acústicas en condición de operación normal mediante el despliegue de hidrófonos. Alternativamente, y de manera específica para la elaboración de paisajes sonoros que incluyen el tráfico marítimo se puede usar una base de datos de caracterización del ruido radiado por buques, en base a medidas realizadas previamente o modelos teóricos de fuente.

En cuanto a la localización de las fuentes, a excepción del tráfico marítimo, serán estáticas, por lo que su posición puede ser fácilmente conocida. Cuando se trata de tráfico

marítimo, los datos del tipo de buque y posición puede ser obtenida de aplicaciones web de datos AIS.

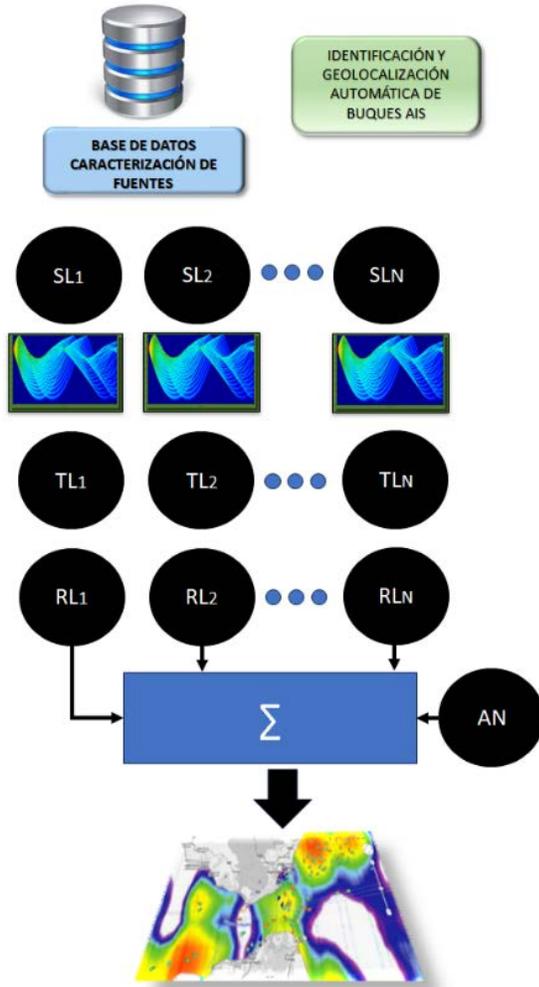


Figura 4. Diagrama de bloques para la elaboración de paisajes sonoros submarinos.

Una vez identificada, caracterizada y posicionada cada fuente, es necesario calcular las pérdidas por transmisión utilizando modelos de propagación. Los datos medioambientales, y en particular el perfil de velocidad puede ser medido, aunque es preferible debido a su variabilidad con el tiempo que se utilicen datos estadísticos de diferentes fuentes de uso público

Calculadas las pérdidas de propagación para cada punto del espacio y fuente, se realiza la suma incoherente de la aportación del nivel de ruido de cada una de las fuentes a cada punto espacial. Finalmente, al nivel de ruido obtenido RL en cada punto espacial se superpone el ruido ambiental AN en función del estado de la mar, viento y lluvia. El ruido ambiental AN se considera homogéneo en el área de estudio por lo que se aplican los mismos niveles a todos los puntos espaciales.

La representación de cada nivel acústico obtenido se puede realizar de manera gráfica sobre un mapa geográfico usando un diagrama de colores para representar los distintos niveles de ruido.

En la Figura 5 se muestra el paisaje sonoro elaborado para el Puerto de Cartagena. En este caso de estudio se elabora el paisaje sonoro para el seguimiento de la contaminación acústica generada por el tráfico marítimo de acuerdo con [1].

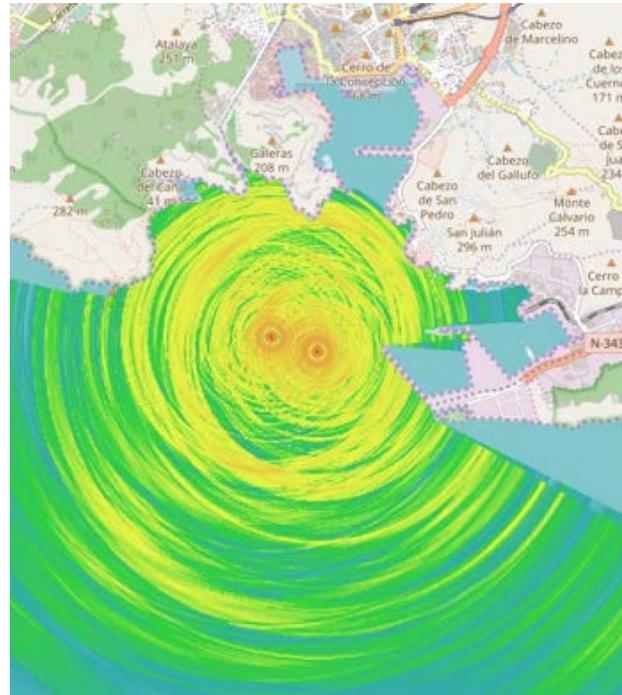


Figura 5. Paisaje sonoro realizado en el Puerto de Cartagena.

Para la elaboración de este paisaje sonoro hay que considerar:

- Se realiza el seguimiento del descriptor C11.2.1 promulgado en la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina [1].
- La caracterización acústica de los buques se ha realizado a partir del análisis de un conjunto de medidas realizada durante 3 años en las inmediaciones del Puerto de Cartagena,
- La detección y seguimiento de los buques se ha realizado utilizando un sistema AIS instalado en el área de estudio.
- El modelo de propagación utilizado es un modelo de trazado de rayos implementado en la aplicación SEAPROOF desarrollada por SAES.
- Los datos medioambientales para el cálculo del ruido ambiente AN fueron obtenidos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

6. CONCLUSIONES

El presente estudio presenta los fundamentos teóricos generales y el proceso necesario para la elaboración de paisajes sonoros submarinos con el objetivo de realizar el seguimiento de contaminación acústica submarina en un área de estudio.

Para la elaboración de paisajes sonoros es necesario integrar un conjunto de aplicaciones software que permitan obtener el nivel de ruido en cada punto espacial del área de estudio. Las herramientas software y en particular el modelo de propagación utilizado debe ser evaluado previamente con el objetivo de garantizar la precisión de los valores de ruido obtenidos.

En el contexto del proyecto SONORA, SAES y la Universidad de Alicante realizará paisajes sonoros en las inmediaciones principalmente de granjas de acuicultura con el objetivo de evaluar el impacto del ruido en el comportamiento de las especies.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado por SAES y la Universidad de Alicante en el contexto del proyecto: Filling the gap: Thresholds assessment and impact beyond acoustic pressure level linked to emerging blue-growth activities (SONORA) referencia PCI2022-135081-2.

REFERENCIAS

- [1]. European Parliament and Council. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Marine Environmental Policy (Marine Strategy Framework Directive); European Parliament and Council: Strasbourg, France, Off. J. European Union, (L. 164, 19-40, 2008.
- [2]. European Commission. Decision 2010/477/EU of the European Commission of 1 September 2010 on criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters. European Parliament and Council: Strasbourg, France, Off. J. Eur. Union, (L. 232, 14-24, 2010.
- [3]. Van der Graaf, A.J.; Ainslie, M.A.; André, M.; Brensing, K.; Dalen, J.; Dekeling, R.P.A.; Robinson, S.; Tasker, M.L.; Thomsen, F.; Werner, S. European Marine Strategy Framework Directive-Good Environmental Status (MSFD GES); Report of the Technical Subgroup on Underwater noise and other forms of energy; Miliu Ltd., Brussels, Belgium, 2012.
- [4]. Urick, R.J. Principles of Underwater Sound, 3rd ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1983.
- [5]. Dekeling, R.P.A.; Tasker, M.L.; Van der Graaf, A.J.; Ainslie, M.A.; Andersson, M.H.; André, M.; Borsani, J.F.; Brensing, K.; Castellote, M.; Cronin, D.; et al. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas; Part II: Monitoring Guidance Specifications, JRC Scientific and Policy Report EUR 26555 EN;

Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2014. <https://doi.org/10.2788/27158>.

- [6]. Mitson, R.B.; Knudsen, H.P. Causes and effects of underwater noise on fish abundance estimation. *Aquatic Living Resources*. 2003, 16, 255–263. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(03\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(03)00021-4).
- [7]. Farina, A. *Soundscape Ecology: Principles, Patterns, Methods and Applications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7374-5>.
- [8]. Ross, D. On ocean underwater ambient noise. *Inst. Acoust. Bull.* 1993, 18, 5–8.
- [9]. Ross, D. Ship sources of ambient noise. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2005, 30, 257–261. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850879>.
- [10]. Hildebrand, J.A. Sources of Anthropogenic Sound in the Marine Environment. International Policy Workshop on Sound and Marine Mammals, London, UK, 28–30 September. 2004. Available online: <https://www.mmc.gov/wp-content/uploads/hildebrand.pdf>.
- [11]. McDonald, M.A.; Hildebrand, J.A.; Wiggins, S.M.; Ross, D. A 50 years comparison of ambient noise in Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *J. Acoust. Soc. Am.* 2008, 124, 1985–1992. <https://doi.org/10.1121/1.2967889>.
- [12]. Merchant, N.D.; Witt, M.J.; Blondel, P.; Godley, B.J.; Smith, G.H. Assessing sound exposure from shipping in coastal waters using a single hydrophone and automatic identification system (AIS) data. *Marine Pollution Bulletin*. 2012, 64, 1320–1329. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.004>.
- [13]. Mackenzie, K.V. Nine-term equation for sound Speed in the Oceans. *J. Acoust. Soc. Am.* 1981, 70, 807–812. <https://doi.org/10.1121/1.386920>.
- [14]. Medwin, H. (1975). Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58, pp. 1318-19.
- [15]. Leroy, C. C.: Development of Simple Equations for Accurate and More Realistic Calculation of the Speed of Sound in Sea Water, *JASA*, 46:216 (1969).
- [16]. Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., and H. Schmidt, 2011, *Computational Ocean Acoustics*, 2nd edition., Springer.
- [17]. Etter, P. C., 2013, *Underwater Acoustic Modelling and Simulation*, 4th edition. CRC Press.
- [18]. Brekhovskikh, L. M., 1980, *Waves in Layered Media*, 2nd edition., Academic press.
- [19]. Weinberg, H., 1975, Application of ray theory to acoustic propagation in horizontally stratified oceans, *J. Acoust. Soc. Am.*, 58 (1), 97-109.