

PAISAJE VIBROACÚSTICO DE UN ÁREA CON ALTA DENSIDAD DE TRÁFICO MARÍTIMO

PACS: 43.40.Rj

Pablo Cervantes, Fco. Javier Rodrigo Saura; Sociedad Anónima de Electrónica Submarina. Carretera Algameca, s/n, 30205, Cartagena, Murcia, España. p.cervantes@electronica-submarina.com, f.rodrigo@electronica-submarina.com

Palabras Clave: Contaminación acústica, vibroacústica, señales sísmicas, impacto medioambiental.

ABSTRACT

Waterborne sound has been the main phenomenon considered when sound impact on marine fauna have been addressed. However, few studies have considered seismic waves (acoustic waves that propagates through the seafloor and normally expressed as vibration levels) as a possible source of negative effects on marina fauna. Levels of seafloor vibrations are not well documented, neither how these vibrations can affect seafloor fauna (crustaceans, molluscs...etc.). In the present study, the ship-induced vibro-acoustic (substrate-vibration) soundscape of a high ship traffic density area is characterized and the correlation between ship induced waterborne and seismic sound in shallow waters is studied. For this purpose, long-term measurements performed with the Multi-Influence Range System (MIRS) are used. Additional results regarding environmental underwater acoustic and seismic levels are provided

RESUMEN

El sonido transmitido a través del agua es uno de los fenómenos principales a la hora de estudiar el impacto antropogénico en la fauna marina. Sin embargo, existen pocos estudios que consideren el sonido transmitido por el lecho submarino en forma de ondas sísmicas (ondas acústicas transmitidas por el fondo marino cuya amplitud es generalmente expresada en niveles de aceleración de partícula – vibración). Los niveles de vibración existentes en el lecho submarino tanto de forma natural como las de origen antropogénicas no están bien documentadas en la literatura científica. Así el posible efecto adverso que puede generar este fenómeno en la fauna marina, especialmente aquella cuyo hábitat se encuentra en el lecho marino (hábitats en la zona béntica). En el presente estudio, se mide y analiza el paisaje vibro-acústico inducido por buques en un área de alta intensidad de tráfico. Además, se estudia la correlación existente entre el sonido generado por un buque y transmitido el agua y la cantidad de éste absorbido y transmitido por el lecho submarino. Para esto, se han realizado mediciones de larga duración realizadas por el sistema de medición multi-influencia desarrollado por la empresa SAES llamado MIRS.

1 INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

Los estudios sobre el impacto del ruido generado por las actividades humanas en el entorno marítimo en mamíferos marinos constituyen la mayoría de los estudios realizados de impacto antropogénico en la fauna marina. Esto es debido a varios factores, entre los que destacan el carácter carismático de los mamíferos marinos debido a su proximidad evolutiva con los seres humanos, y por otro lado, a las estructuras fisiológicas encargadas de la adquisición y procesamiento del sonido usado como método de comunicación.

Debido a que el hábitat de los mamíferos marinos se encuentra en las partes superiores-medias de la columna de agua y a las características del órgano auditivo de los mamíferos marinos, la

caracterización de los campos acústicos en los que éstos se desenvuelven se ha basado principalmente en la descripción de variaciones de presión sonora y con mucho menos relevancia el desplazamiento/velocidad de partícula, [1].

A diferencia de los mamíferos marinos, que comparten gran parte del sistema sensorial auditivo con el ser humano), el sistema sensorial auditivo de peces y algunos invertebrados se basa en la sensibilidad a la movilidad de partícula más que a las variaciones de presión sonora. Algunas especies, como el bacalao común, son sensibles a ambos fenómenos acústicos [2])

Peces e invertebrados marinos utilizan el sonido de manera similar a la que lo hacen mamíferos marinos o vertebrados terrestres, esto incluye por ejemplo, fines comunicativos, la búsqueda de presas, la evasión de predadores, localizar hábitats apropiados para ciertos fines, etc [3]. Cabe destacar que siendo el número de especies de mamíferos marinos aproximadamente de unas 100, se estima que existen alrededor unas 32.000 especies de peces diferentes [4].

Por ello, para una correcta y completa evaluación del impacto sonoro de la fauna marina es muy importante conocer y poder describir los campos acústicos generador por las diferentes fuentes antropogénicas en forma de velocidad/desplazamiento de partícula o de vibración.

Sin embargo, de acuerdo con [5], muchos de los estudios sobre impacto sobre peces e invertebrados que se han realizado hasta el momento no pueden ser considerados como satisfactorios, ya que sólo consideraban las variaciones de presión sonora. Aparentemente, son varias razones por las que, hasta ahora, la tendencia en los estudios de impacto sonoro se ha ignorado la movilidad de partícula, entre las que destacan las siguientes:

1. Falta de estándares para la medición de movilidad de partícula.
2. Falta de instrumentación de uso y despliegue sencillo.
3. Falta de información sobre criterios de exposición.

2 VIBRACIONES EN EL SUBSTRATO MARINO Y SUS FUENTES ANTROPOGÉNICAS

Las vibraciones que se propagan por el substrato marino representan el movimiento de las partículas en un cuerpo fluido o elástico. Cabe destacar que dicha vibración es definida por el tipo de movimiento de partícula del medio en el que la vibración se propaga.

Las principales fuentes sonoras antropogénicas generadoras de ondas sísmicas son aquellas que, como es normal, se encuentran involucradas en actividades relacionadas con el lecho marino. Así las actividades más importantes desde el punto de vista de niveles acústicos alcanzados son entre otras: la industria del gas y petróleo, exploraciones geofísicas, dragados, explosiones marinas o la instalación de pilares de plataformas marinas.

La caracterización acústica de las distintas fuentes utilizadas en estas actividades, se ha basado tradicionalmente en la medida de los niveles de presión sonora generada por tales fuentes, es decir, no existe información sobre niveles de vibración en el substrato marino generado por tales fuentes, o si existen, son muy escasas.

Sin embargo, todas las fuentes susceptibles de generar una onda acústica en el agua con suficiente nivel de amplitud como para alcanzar el lecho marino podrán ser consideradas también como fuente de ondas sísmicas, ya que parte de la energía procedente de la onda acústica que se propaga en el agua será absorbida y transmitida por el lecho marino en forma de onda de interfaz.

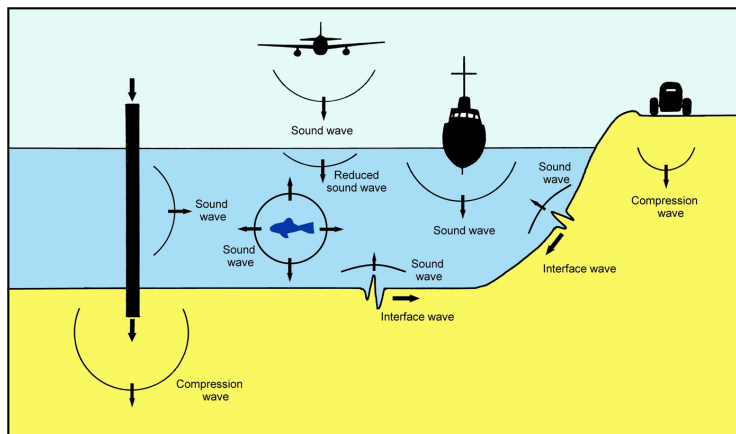


Figura 1. Posibles fuentes sonoras acústicas en el ambiente submarino. Todas ellas son susceptibles de generar ondas de interfaz que se propagan en la parte superficial del lecho submarino. Figura extraída de [5] copyright 2017 Anthony D. Hawkins.

La principal fuente de ruido continua antropogénica en el medio marino es el tráfico de buques [2]. Este tipo de fuente sonora genera principalmente energía acústica que se propaga a través en la columna de agua, sin embargo, parte de esta energía incide en el fondo marino, y se propaga a través de este en forma de ondas sísmicas con energía suficiente como para ser registradas.

Teniendo en cuenta que, aunque los valores de amplitud generados por este tipo de fuentes sean mucho menores que los generados por otras fuentes o actividades, como la instalación de pilares o el uso de airguns para exploraciones geofísicas, la distribución espacial y temporal de estas, es mucho mayor que el resto de las fuentes sonoras que suelen darse en situaciones más localizadas, tanto espacial como temporalmente.

Por ello, resulta necesario conocer la contribución al paisaje vibro-acústico por parte del tráfico de buques, y en especial en localizaciones con alta densidad de tráfico y poca profundidad, donde esta contribución es más significativa.

3 EL BUQUE COMO FUENTE SÍSMICA

Cuando un buque o submarino navega en aguas someras se genera una onda elástica en el substrato marino generalmente gobernada por el contenido espectral de baja frecuencia. Esta onda se conoce generalmente como la onda sísmica del buque y constituye su "firma sísmica". Las fuentes generadoras de la firma sísmica son las mismas responsables de la generación de la firma acústica, onda que se propaga en el medio acuático, por lo tanto, considerando que la interfaz entre el medio acuático y el medio sólido o semi-sólido que constituye el substrato marino se comporta como un sistema lineal, la firma sísmica contendrá la misma información espectral que la onda acústica con diferencias en los niveles de amplitud y de fase debidos al cambio de medio.

4 CARACTERÍSTICAS DE LA FIRMA SÍSMICA

La onda acústica generada por un buque se propaga a través de la columna de agua hasta alcanzar el fondo marino, donde tiene lugar un fenómeno de transferencia energética entre ambos medios y se producen nuevas ondas acústicas por absorción, reflexión y transmisión.

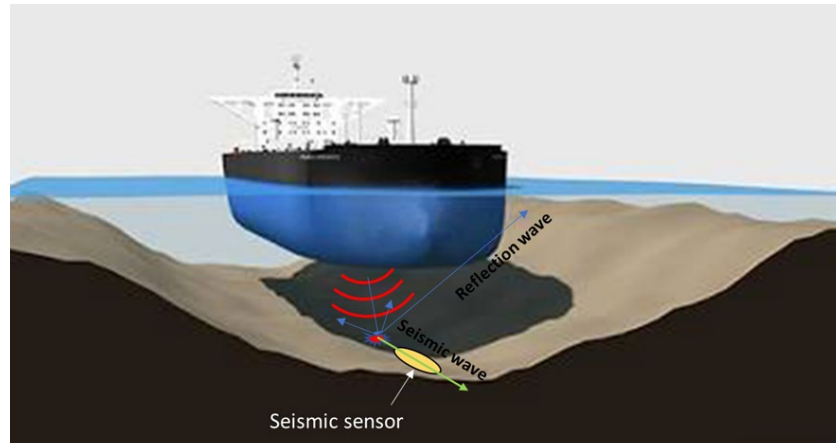


Figura 2. Transmisión del sonido en la interfaz- agua-substrato. Parte de la onda acústica transmitida por el agua es reflejada otra vez al medio acuático, y otra parte es absorbida y transmitida por la superficie del substrato marino.

El grado de absorción de energía acústica contenida en el agua por parte del lecho marino viene determinado principalmente por dos parámetros:

1. La relación entre las velocidades de propagación del sonido en el agua y en las diferentes capas del lecho marino.
2. El ángulo de incidencia de la onda acústica agua - lecho marino.

El primer parámetro depende principalmente de las propiedades acústicas del lecho submarino que a su vez vienen determinadas por el tipo de materiales que lo componen.

El segundo parámetro depende de las características de la fuente y su localización respecto al lecho submarino.

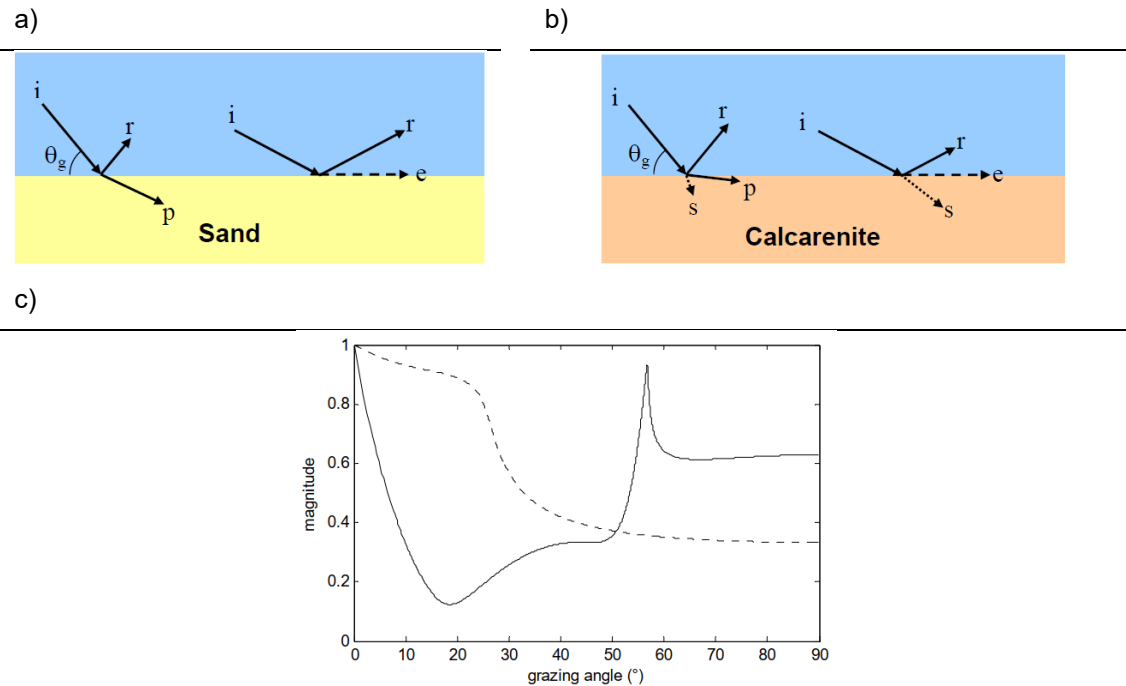


Figura 3. a) y b) muestran las diferentes ondas sísmicas generadas en la interfaz agua-fondo dependiendo del grado de incidencia y el tipo de material del que se compone el fondo marino (arenoso y calcarenitas); c) grado de reflexión para una onda acústica plana incidente dependiendo de ángulo de incidencia y tipo de fondo marino (arenoso – línea discontinua y calcarenitas línea continua). Imágenes extraídas de [6].

5 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo principal del presente estudio es proporcionar conocimiento a la comunidad científica sobre los niveles de movilidad de partícula alcanzados por el paso de buques en una zona altamente transitada y con poca profundidad (~20 m).

Debido a la poca información científica respecto a la cuantificación de los niveles de movilidad de partícula en el substrato marino y a la mayor cantidad de información disponible sobre niveles de presión sonora generados por fuentes sonoras antropogénicas, es especialmente interesante estudiar la posible correlación entre los niveles de presión sonora generados en la columna de agua por un buque y los valores de vibración en el fondo marino generados por tal fuente sonora. Así, el segundo objetivo del presente estudio es estudiar el grado de correlación entre estos dos parámetros asociados a la misma fuente sonora.

6. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS

Las medidas analizadas en el presente estudio pertenecen a una campaña de medidas realizada por la empresa Sociedad Anónima de Electrónica Submarina (SAES) entre los años 2013 y 2014 en el puerto de Cartagena, donde la empresa tiene su sede principal.



Figura 4. Localización del área bajo estudio y descripción de los distintos usos del puerto de Cartagena.

Las medidas fueron realizadas utilizando el sistema MIRS (Multi Influence Ranging System) manufacturado por SAES. Este sistema tiene capacidad de adquisición de influencias acústica, magnética, eléctrica, presión y sísmica presentes en el medio marino de manera simultánea.

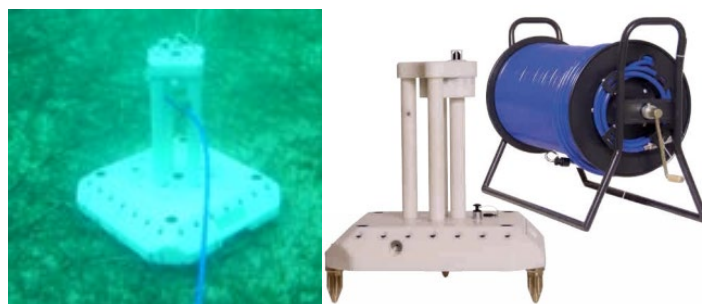


Figura 5. Estación de medida MIRS fabricada por SAES.

El rango frecuencial útil de este sistema es de 0.1 Hz – 20 kHz en el caso del sensor acústico, y 0.1 Hz – 128 Hz en el sensor sísmico. Cabe destacar que las mediciones de movilidad de partícula en el sensor sísmico se realizan en los tres ejes espaciales (X, Y, Z), es decir se trata de un sensor triaxial.

Las medidas se realizaron desde diciembre de 2013 hasta julio del 2014, midiendo de forma automática en conjunción con la recepción de datos AIS utilizados para la clasificación de los tipos de buques que navegaban relativamente cerca del sistema. Después de cada medida (5 minutos después) asociada al paso de un buque, el sistema automáticamente realizaba una medición de ruido de fondo (ausencia de fuente sonora principal). Así, el dataset conseguido es una composición de medidas con el registro de las ondas acústicas y sísmicas de diferentes tipos de buques así como el ruido de fondo en las mismas condiciones ambientales (temperatura, salinidad, ruido biológico...etc) asociadas al paso de cada buque.

En el presente estudio, se han seleccionado un total de 3294 registros de pasos de buque. Para el análisis se han descartado todas aquellas mediciones que presentaban un error en la adquisición de datos en el registro de paso de buques, o en la medición de ruido de fondo asociada a dicho paso de buque. También se han descartado aquellos registros correspondientes a buques de vela analizando un total de 2176 mediciones para el presente estudio.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 se muestran varios ejemplos de espectrogramas en el dominio acústico y sísmico (tri-axial [X-Y-Z]) de dos pasos de buques diferentes (a y b). Además, en la Figura 6 - c se muestra el espectrograma de la medida de ruido de fondo asociada a la medida de paso de buque mostrada en la Figura 6 – a. Los niveles mostrados corresponden al parámetro Sound Pressure Level (SPL) (1) para el dominio acústico y al parámetro L_a para el dominio sísmico (2).

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (1)$$

$$L_a = 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_{ref}} \right) \quad (2)$$

dónde p y p_{ref} son la presión eficaz y la presión de referencia ($1 \mu\text{Pa}$) y a y a_{ref} son la aceleración eficaz y la aceleración de referencia ($1 \mu\text{g}$).

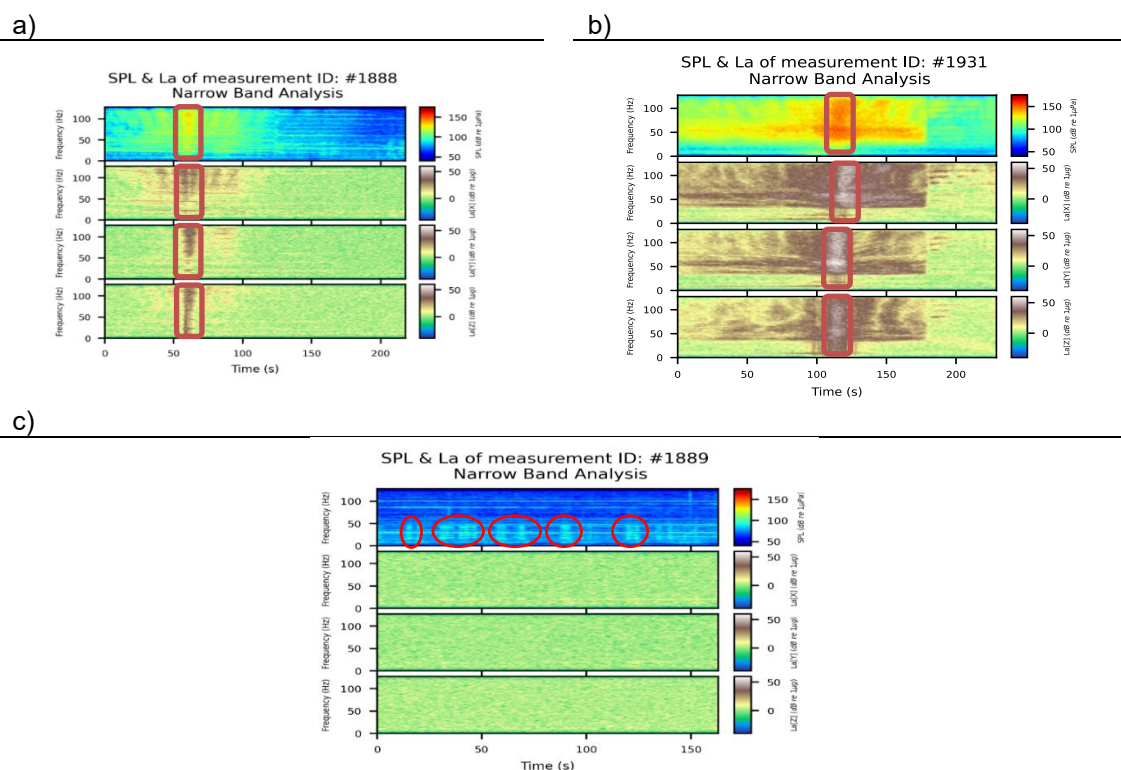


Figura 6. Ejemplos de espectrogramas de registros de pasos de buque y de ruido de fondo en la campaña de medida realizada. La parte superior de cada espectrograma corresponde al dominio acústico, mostrando por debajo los registros en cada eje espacial del dominio sísmico. En a) y b) El punto más cercano entre el buque y la estación de medida (CPA) se ha indicado mediante un rectángulo rojo. En c) sonidos de procedencia desconocida se han marcado en rojo.

Del análisis de los espectrogramas mostrados en la Figura 6, se puede concluir que:

1. De forma general, los registros acústicos y sísmicos parecen tener una alta correlación temporal, en donde los niveles más altos encontrados en la onda acústica recogida en la columna de agua ocurren al mismo tiempo que en los registros de movimiento de partícula (aceleración). Estos niveles se relacionan con el CPA que es el punto más cercano entre el buque y el sensor submarino. Sin embargo, para el eje sísmico

horizontal X en la Figura 6-b el CPA parece estar ligeramente desplazada respecto a CPA extraído del espectrograma de la señal acústica.

2. En la Figura 6 – b dónde prevalecen niveles altos durante más tiempo, se puede distinguir ligeramente como en el registro del eje horizontal X sísmico los valores de SNR parecen ser mayores que aquellos dados para la onda acústica en las zonas más alejadas del CPA. Esto permitiría una detección automática temprana del paso del buque mediante el análisis de la señal sísmica.
3. En la Figura 6 a y b, se puede observar una mayor transmisión de energía en baja frecuencia (por debajo de 50 Hz) para el eje vertical (Z) que en los ejes horizontales.
4. En la Figura 6 c, en el dominio acústico, se pueden observar sonidos de muy baja frecuencia de procedencia incierta. Además, se puede distinguir cierto patrón frecuencial formado por una frecuencia fundamental y varios armónicos. Estas estructuras son inapreciables en el dominio sísmico al menos de forma visual.

Debido al volumen de medidas analizadas, y dado que la zona de medida posee una alta densidad de tráfico, es recomendable analizar la variabilidad temporal de los niveles de presión sonora junto con los valores de movilidad de partícula en el substrato marino. En la Figura 7 se muestra el diagrama de procesado de señal implementado para la obtención de la evolución diaria de los niveles SPL y L_a .

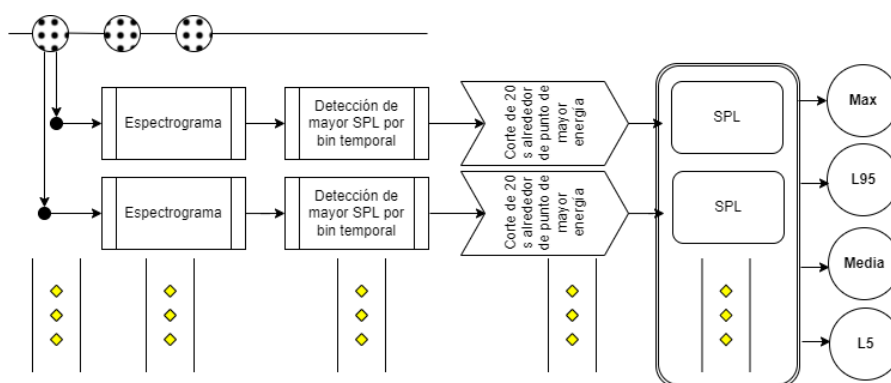


Figura 7. Diagrama de bloques de procesado de señal para la obtención de los valores de evolución diaria de niveles de presión sonora (SPL) y de aceleración (L_a) generados durante el paso de buques sobre el sensor.

En la Figura 8 se muestran los niveles de presión sonora y de movilidad de partícula en el substrato marino durante la campaña de medida debido al paso de buques. Como se puede observar, debido al procesado de señal aplicado (ver Figura 7), el máximo y los percentiles correspondientes al 95 y al 50% son bastante similares y oscilan entre 168 dB y 118 dB re $1\mu\text{Pa}$ (máximo y mínimo registrado durante toda la campaña) en el caso de la presión sonora y entre 80 y 25 dB re $1\mu\text{g}$ en el caso de nivel de aceleración en las componentes horizontales sísmicas, y entre 101 y 25 dB re $1\mu\text{g}$ en el caso de la componente vertical sísmica.

El percentil 5%, relacionado con el nivel de ruido de fondo, se puede observar alrededor de los 110 dB re $1\mu\text{Pa}$ en el dominio acústico, mientras que en el dominio sísmico se sitúa en las tres componentes entorno a 23 dB re $1\mu\text{g}$.



Figura 8. Evolución diaria de los niveles de presión sonora (SPL) y niveles sísmicos (La) medidos en la campaña de medidas

Con el objetivo de estudiar la relación entre el dominio acústico y el dominio sísmico de las ondas generadas por un buque, se analiza la correlación de Pearson's entre los niveles de cada tercio de octava para cada medida individual.

En la Figura 9 se muestra el diagrama de bloques del procesado de señal implementado para el estudio de la evolución de los niveles SPL y La en el dominio frecuencial en tercios de octava.

En la Figura 13, se muestra gráficamente los coeficientes de correlación entre los niveles de presión sonora y los niveles de aceleración obtenidos durante el paso de un buque cerca del sensor submarino para cada tercio de octava entre 10 Hz y 125 Hz.

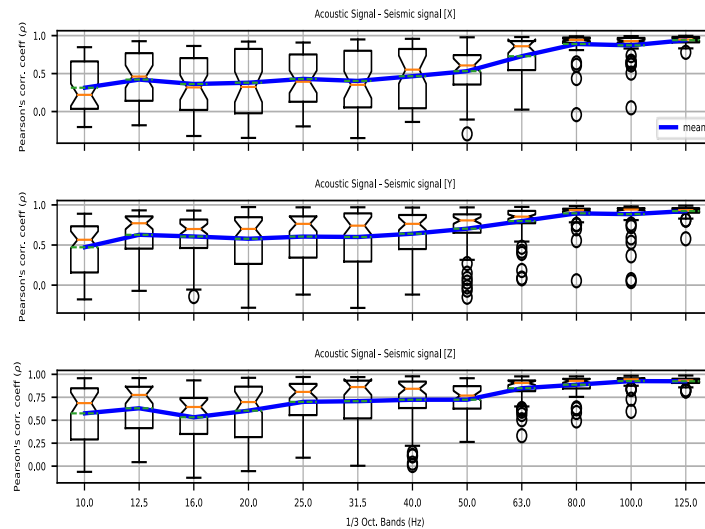


Figura 9. Coeficientes de correlación entre la evolución de la contribución acústica la contribución sísmica (3 ejes [X,Y,Z]) en las medidas realizadas de paso de buques.

Cómo se puede observar en la Figura 10, suponiendo un nivel significativo de correlación de 0.8, los coeficientes de correlación entre el dominio acústico y las componentes sísmicas horizontales (X e Y) y la vertical (Z) empiezan a ser significativos a partir de los 80, 63 y 63 Hz respectivamente.

Cabe destacar que, la correlación entre los niveles acústicos sonoros y los niveles sísmicos son ligeramente superiores para la componente vertical del campo sísmico que para las componentes horizontales.

8. CONCLUSIONES

En la actualidad existe una creciente preocupación por el impacto mediambiental generado por el ruido acústico en el entorno marítimo, principalmente debido al aumento de la actividad antropogénica en dicho entorno. Esta preocupación ha impulsado estudios de impacto especialmente en mamíferos marinos.

Usualmente, las fuentes de ruido submarino, generan también ruido de naturaleza sísmica que se propaga a través del lecho marino, siendo la principal fuente de ambos tipos de ruido el tráfico marítimo. El ruido sísmico genera contaminación en especies cuyo hábitat es el lecho marino, por lo que debe ser considerado en estudios de impacto. El problema reside en que este tipo de contaminación no ha sido ampliamente estudiada, ni en términos de cuantificación de energía sísmica antropogénica ni en sus posibles efectos adversos sobre la fauna marina béntica.

Con el objetivo de verificar la naturaleza del ruido sísmico, se ha presentado un análisis de correlación entre las señales acústicas y sísmicas, concluyendo la alta correlación existente entre ellas (principalmente por encima de los 50 – 63 Hz) y con ello verificando que el ruido sísmico es generado principalmente por el ruido acústico que se propaga por el lecho marino.

Los valores presentados en el presente trabajo tienen como finalidad proporcionar a la comunidad valores de referencia para la ejecución de futuros trabajos de medida, análisis e impacto medioambiental generado por señales de naturaleza sísmica en especies marinas cuyo sistema auditivo se basa en la movilidad de partícula.

REFERENCIAS

- [1] A. D. Hawkins, R. A. Hazelwood, A. N. Popper y P. C. Macey, «Substrate vibrations and their potential effects upon fishes and», *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 2782, 2021.
- [2] Thomsen, F., Mendes, S., Bertucci, F., Breitzke, M., Ciappi, E., Cresci, A. Debusschere, E., Ducatel, C., Folegot, F., Juretzek, C., Lam, F-P., O'Brien, J., d. Santos y M. E., «Addressing underwater noise in Europe: Current state of knowledge,» Future Science Brief 7 of the European Marine Board, Ostend, 2021.
- [3] A. D. Hawkins y A. N. Popper, «A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates,» *ICES Journal of Marine Science*, vol. 74, nº 3, pp. 635-651, 2017.
- [4] «www.fishbase.org,» [En línea].
- [5] A. N. Popper and A. D. Hawkins, "The importance of particle motion to fishes and invertebrates," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 143, pp. 470-488, 2018.
- [6] A. J. Duncan, A. Gavrilov and L. Fan, "Acoustic Propagation over limestone seabeds," in *Acoustics*, Adelaide, 2009.
- [7] D. Wartzok y D. Ketten, «Marine Mammal Sensory Systems,» de *Biology of marine Mammals*, Smithsonian Institution Press, 1999, pp. 117-175.
- [8] D. R. Ketten, «Cetacean Ears,» de *Hearing by Whales and Dolphins*, Springer, 2000.
- [9] S. K. Chandra, R. D. McCauley, A. Duncan, C. Erbe, A. Gavrilov, K. Lucke y I. Parnum, «Underwater Sound and Vibration from Offshore Petroleum Activities and their Potential Effects on Marine Fauna: An Australian Perspective,» Centre for Marine Science and Technology (CMST), Curtin, 2016.
- [10] J. L. X. W. Fei Peng, «Modelling and Calculation of Seismic Wave Field Caused by Moving Ship,» *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1748 022017, 2021.