



## La Contaminación Acústica Submarina: Fuentes e Impacto Biológico

Francisco Javier Rodrigo Saura  
Sociedad Anónima de Electrónica Submarina (SAES)  
Carretera de la Algameca s/n, 30205, Cartagena.

**Resumen.** El ser humano percibe con limitaciones el ruido submarino, lo que le ha llevado a hacer un uso abusivo de sistemas perturbadores del entorno submarino. Las principales actividades humanas que generan contaminación acústica submarina (UNP – Underwater Acoustic Pollution) son: dragados y construcciones, perforaciones y producciones de gas y petróleo, transporte marítimo, investigaciones geofísicas, sonares activos, explosiones submarinas e investigaciones oceanográficas. Para que la contaminación acústica afecte a los seres vivos no es preciso que se produzca un trauma acústico, basta con que impida el desarrollo de su comportamiento habitual. Los niveles de contaminación de un sonido particular y su impacto morfológico y fisiológico dependen del tiempo de exposición y de la intensidad de la señal recibida, así como de la especie.

### 1 Introducción

El mar nunca ha sido un entorno silencioso. El hecho de constituir un medio elástico permite el movimiento de las partículas y por tanto la transmisión de ondas acústicas. Siempre ha existido ruido en el mar (Fig. 1): natural, como el de las olas, del viento y de la lluvia o biológico, como el que producen los seres vivos.

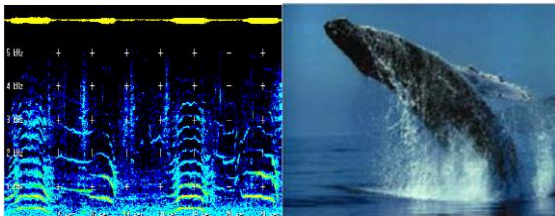


Fig 1. Ruido Biológico.

El ser humano, que no está adaptado al medio acuático, percibe con limitaciones el ruido ambiente submarino, resultándole silencioso y relajante. Esta limitada percepción le ha llevado a hacer un uso abusivo de sistemas perturbadores del entorno submarino sin prever las repercusiones que podría ocasionar.

Se podría considerar la contaminación acústica subacuática (Underwater Acoustic Pollution - UNP) como el exceso de ruido (entendido como sonido excesivo y molesto) provocado por el ser humano que altera las condiciones normales del medio ambiente en una determinada zona y produce efectos negativos sobre la salud auditiva y física de los seres vivos que en ella habitan. Aunque aparentemente el ruido no se acumula, la exposición continua puede deteriorar la

calidad de vida de los seres vivos (hostigamiento, evasión, dificultad en la comunicación, interrupción en la alimentación y el apareamiento, etc), e incluso producir daños a pesar de ser provocados por emisiones recurrentes de muy corta duración.

### 2 Caracterización de fuentes sonoras submarinas

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

El ruido radiado por fuentes sonoras es de dos tipos:

- **Ruido de Banda Ancha (BroadBand):** Es un ruido de espectro amplio, esto es, el nivel de energía acústica es una función continua de la frecuencia. La energía acústica se esparce a un rango amplio de frecuencias. Ruidos típicos de banda ancha son los producidos por ejes y hélices de buques o el ruido hidrodinámico producido por el paso del agua a través del casco de un buque.
- **Ruido de Banda Estrecha (NarrowBand):** Es un ruido que tiene un espectro de banda pequeña centrado en una frecuencia particular (frecuencia discreta o tono).

Ruidos típicos de banda estrecha son los generados por maquinaria como los motores diesel de buques o los producidos por maquinaria auxiliar como bombas, o generadores.

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.

### 3 Ruido submarino generado por actividades industriales

#### 3.1 Ruido generado en dragados y construcciones

Los dragados marinos, construcción de túneles y varias actividades de construcción en y cerca del mar crean ruido submarino. Los dragados se utilizan para hacer más profundos canales y puertos, para crear plataformas terrestres o sumergidas y para minería submarina. El ruido generado puede exceder los niveles ambiente a largas distancias.

Malme y Krumhansl midieron ruido generado a 50 metros de una maquinaria de Robbins utilizada para construir un túnel de 8 metros. Los sonidos predominantes eran de banda ancha, estando los más fuertes por debajo de los 10 Hz, disminuyendo la energía al incrementar la frecuencia hasta 500 Hz. A mayor distancia, aparecieron fuertes componentes entre 30 Hz y 100 Hz debidos a efectos de resonancia relacionados con la profundidad del agua.

#### 3.2 Ruido generado en perforaciones y producciones de gas y petróleo

Las perforaciones se pueden realizar desde islas naturales o artificiales, plataformas o buques. Las perforaciones realizadas desde islas naturales o hielo generan un ruido muy bajo. La distancia audible suele estar en los 2 km trabajando a frecuencias de 200 Hz. En aguas árticas poco profundas, durante el invierno, se generan frecuencias por debajo de 350 Hz, atenuándose de 125 dB a una distancia de 130 m a 85 dB a una distancia de 2 km.

Las perforaciones desde islas artificiales producen un ruido notable pero sigue siendo bajo. Los tonos pueden llegar a ser detectados a 0,5 km sin perforación y 3,7 km perforando. Existe ruido asociado con el ensamblaje de elementos de las propias instalaciones, por ejemplo tuberías conductoras, en las que se suele utilizar martillos industriales.

El ruido generado por plataformas de perforación no está muy estudiado. Se han realizado algunas medidas en las que se concluye que el ruido no es detectable con niveles del estado de mar > 3.

Las perforaciones se pueden realizar en dos tipos de buques, semisumergibles o buques de perforación. El ruido generado por buques de perforación es más alto. Depende del tipo de maquinaria que se utiliza y de la antigüedad de la misma.

El ruido en la producción de gas y petróleo es muy bajo debido a que estas instalaciones tienen poca superficie en contacto con el agua.

En la Tabla I se muestran frecuencias y niveles de ruido generado en perforaciones y producciones de gas y petróleo.

Actividad	Frecuencia (Hz)	Nivel dB ref. 1 µPa	Dist.
Perforaciones (Islas artificiales)	20 - 100 20 y 40 predominantes	8 - 10 dB por encima ruido fondo	5 km
Instalaciones en plantas	30 - 40 y 100	131 - 135 100 - 106 Banda ancha	1 km
Plataformas perforación	5 (1,2 kHz más alta)	119 - 127	
Semisumergibles	29 y 70	125 y 154	13 - 15 m
Producción gas y petróleo	30 y 120	89 - 94	34 m

Tabla I. Ruido submarino generado en perforaciones.

#### 3.3 Ruido generado por el transporte

##### Plataformas aéreas.

La transmisión del sonido aire - agua modifica las características del sonido recibido bajo la superficie del mar. El nivel de sonido submarino generado por aviones (Tabla II) depende de factores como: frecuencia, profundidad del receptor, profundidad del agua, altitud del avión, aspecto del avión y el nivel de fuente del avión. Normalmente un pico de nivel recibido por un receptor disminuye cuando aumenta la altitud del avión o aumenta la profundidad del receptor. La dependencia con el aspecto del avión es tal que si el ángulo entre la línea del avión y el receptor es mayor de 13° la mayoría de rayos son reflejados y no penetran en el agua para bajo niveles de estado del mar, fondos profundos o aguas con fondos no reflectantes. Por otro lado, si la longitud de onda de las ondas acústicas emitidas es más grande que la longitud de onda de las olas de la superficie del mar, éste se comporta como una superficie completamente reflectante.

La profundidad y las características del fondo influyen en la propagación y en los niveles del ruido submarino. La propagación lateral es mejor en aguas poco profundas, especialmente cuando el fondo es reflectivo. Como resultado, el límite de 13° no es siempre el mismo, incluso el tiempo de pasada del avión medido en un receptor submarino se ve aumentado en aguas poco profundas por reflexiones en el fondo.



Los aviones utilizan máquinas de pistón o turbinas. Cada tipo de motor puede ser manejado con hélices o rotores (helicópteros) y turbinas turbojets o turbofans. Los sonidos de las maquinarias de pistón están dominados por la frecuencia de encendido del pistón, el cual causa una familia de tonos en el espectro (armónicos). Los motores de turbina están caracterizados por el silbido de las palas dentro de las diferentes fases del motor. Los tonos se producen desde pocos hertzios hasta frecuencias superiores a 1 kHz. Las fuentes primarias del ruido generado por aviones con turbinas turbojet o turbofan son las hélices y los rotores. El giro de las palas produce tonos con frecuencia fundamental que depende de la velocidad de giro y el número de palas. Los espectros del ruido generado por aviones y helicópteros generalmente están por debajo de los 500 Hz.

La duración de los sonidos recibidos por un receptor submarino es inferior a la del recibido por un receptor no submarino, así por ejemplo, el helicóptero BELL 214ST es recibido en el aire 4 minutos antes de que pase sobre el receptor, mientras que en el agua es detectable 38 s @ 3 m y 11 s @ 18 m antes de que pase sobre el receptor. La duración aumenta al aumentar la altitud del avión, tendiendo a ser más tiempo audible en aguas profundas que en aguas poco profundas.

### Plataformas marítimas.

El ruido generado por los buques es el que más contribuye a la contaminación acústica submarina (Fig. 2). Los niveles y frecuencias de los sonidos generados dependen del tamaño y velocidad del buque, generándose ruido de banda ancha y de banda estrecha. Las fuentes típicas del ruido de banda ancha son las hélices / ejes (inferior a 100 Hz), ruido hidrodinámico y algunos sistemas de propulsión. Las fuentes típicas del ruido de banda estrecha son las bombas, motores, equipos de alimentación eléctrica y sistemas de propulsión.

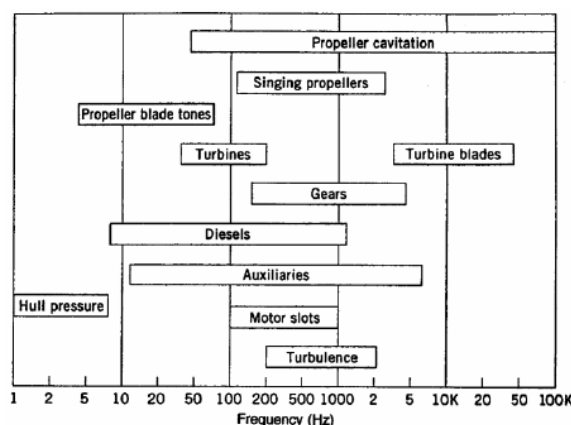


Fig 2. Rango de frecuencias radiadas por buques.

Aeronave (Frecuencia)	Altitud (m)	Nivel recibido (dB ref a 1 $\mu$ Pa)	Nivel estimado de la fuente (dB ref @ 1 $\mu$ Pa - m)	Nivel densidad espectral estimado de la fuente dB ref 1(1 $\mu$ Pa - m) <sup>2</sup> /Hz			
				1000 m	2000 m	3000 m	4000 m
Helicóptero BELL 212 (22 Hz)	152	109	149				
	305	107	151	111	107	101	93
	610	101	151				
B-N Islander (70 Hz)	152	101	142	102	97	91	75
Twin Otter (82 Hz)	457	107	147				
	610	100	150	105	98		
P-3 Orion (56-80 Hz)	76	124	162				
	152	121	162				
	305	114	160				
P-3 Orion (890-1120 Hz)	76	112	150				
	152	107	148	124			

Tabla II. Niveles de los sonidos de aviones.

### 3.4 Ruido generado en investigaciones geofísicas

Las investigaciones geofísicas utilizan fuentes de sonido para generar ondas sísmicas (Tabla III). Este tipo de fuentes se caracterizan por generar un ruido de muy alta energía, baja frecuencia y corta duración. Este tipo de sonido es detectable a cientos de kilómetros de la fuente. Las fuentes más utilizadas son: cañones de aire (Air - Guns), Sleeve Exploders y cañones de gas (Gas - Guns) y Vibroseis.

Los sistemas Air – Guns son los más utilizados actualmente. Generan pulsos cada 10 – 15 s. En algunas áreas, la energía de baja frecuencia puede viajar a largas distancias a través de los sedimentos del fondo, volviendo a la fuente a través del agua. La velocidad del sonido es mayor en el sedimento del fondo que en el agua, de hecho, un receptor situado a una distancia, recibirá un pulso transmitido a través del fondo seguido del pulso transmitido a través del agua.

Los Sleeve Exploders y Gas – Guns se cargan con una mezcla de oxígeno y propano para generar el pulso sonoro. La señal resultante tiene características similares a las generadas por un cañón de aire pequeño. Al igual que ocurre con los Air – Guns, al aumentar la distancia no sólo disminuye el nivel sino que además aumenta la duración del pulso, de manera que altas frecuencias (200 Hz) en el generador, llegan al receptor como bajas frecuencias (70 Hz).

Vibroseis es un método utilizado en el hielo basado en un array de dispositivos hidráulicos que lo golpean. La frecuencia de las señales utilizadas es de 10 – 70 Hz, aunque los armónicos pueden extenderse hasta 1,5 kHz. Las señales generadas son transitorios de 5 – 20 s pudiéndose generar señales con niveles de 187 dB ref 1  $\mu$ Pa @ 1 m a 50 Hz durante un barrido de 10 a 65 Hz. El factor de atenuación es de 22,5 dB/km a 10 Hz y de 31,5 dB/km a 60 Hz.

### 3.5 Ruido generado en sonares activos

Los sonares activos se basan en la emisión de un pulso y la medida del eco que se produce cuando el pulso rebota en una superficie. Se pueden clasificar atendiendo al tipo en: sonares de profundidad variable, comerciales para pesca, para medir corrientes e investigación marítima, y militares para la detección de buques, para la detección de objetos y utilizados en armas como torpedos.

Las frecuencias de los sonares van desde los pocos cientos de Hz para sonares de búsqueda de largo alcance hasta varios cientos de kHz para sonares utilizados en la búsqueda de minas, cartografía marina y en general sistemas que requieren discriminar pequeños objetos.

Tipo de Fuente	Profundidad (m)	Nivel dB ref 1 $\mu$ Pa @ 1 m
<b>Array Air - Gun</b>		
GSC 7900		259
ARCO 4000	10	255
GECO Array 3100	7,6	252
GSI Array Jonsson 200	6,1	249
SSL Array 1460	7,6	242
GECO 594 Subarray	8,2	235
<b>Air- Gun Simple</b>		
Pequeño	9,1	216
Mediano	9,1	225
Grande	9,1	232
<b>Sleever Exploder</b>		148 – 153 @ 8 km 115 – 117 @ 25 km
<b>Gas - Gun</b>		123 @ 0,9 km 117 @ 14,8 km

Tabla III. Ruido producido por generadores sísmicos.

Los pulsos de los sonares (Tabla IV) pueden tener un nivel alto. Por ejemplo, los sonares utilizados para cartografiar el fondo marino generan un pulso de 210 – 230 dB ref 1  $\mu$ Pa @ 1 m. La duración del pulso puede ser de entre unos pocos  $\mu$ s a algún segundo.

Tipo de SONAR	Frec (kHz)	Duración (ms)	Nivel (dB)
Profundidad Variable	12+	10-1000	180
Perfil del Fondo	0,4-30	0,1-160	200-230
Barrido Lateral	50-500	0,01-0,1	220-230
Navegación	7-60	3-40	180-200
Búsqueda y Vigilancia	2-57	4-1000	230+
Minas y detección de obstáculos	25-500	1-30	220+
Armas	25-200		200
Teléfono Submarino	5-11	Continuo	180-200

Tabla IV. Ruido generado por SONARES activos.



### 3.6 Ruido generado en explosiones

Las explosiones submarinas producidas por el hombre son las más potentes a excepción de las erupciones volcánicas submarinas o terremotos submarinos. Los pulsos de presión producidos generan un ruido capaz de provocar daños físicos o la muerte de mamíferos marinos. Incluso pequeñas detonaciones pueden ser detectables a cientos de km cuando se propagan en el canal sonoro. Cargas de profundidad (100 kg) detonadas en el canal sonoro profundo en Australia han sido detectadas en las Islas Bermudas.

### 3.7 Ruido generado en estudios oceanográficos científicos

Algunos estudios científicos utilizan la energía acústica para analizar las características del fondo y el agua, siendo aquellos utilizados para analizar el fondo los que emplean mayor energía. También se utiliza la energía acústica para estudiar las pérdidas por transmisión del sonido y las propiedades de las masas oceanográficas.

Desde la WWII se han utilizado cargas de 0,9 kg para estudiar la propagación del sonido y las características del fondo. Esta carga situada a 18 m o 244 metros de profundidad genera un pico de presión a una distancia de 1 km de 208 dB ref 1  $\mu$ Pa, los pulsos de burbujas tienen una frecuencia de 8 Hz y 50 Hz y el impulso estimado a 1 km es de 7,1 Pa. En acústica tomográfica se utilizan proyectores que generan niveles de presión de 165 dB ref 1  $\mu$ Pa @ 1 m para dispositivos de corto alcance y 190 – 220 dB ref 1  $\mu$ Pa @ 1 m para dispositivos de largo alcance. Las frecuencias de trabajo se encuentran entre los 50 Hz y los 200 Hz.

La acústica termométrica está especializada en estudios de largo alcance obteniendo la temperatura de los océanos basándose en la medida de la variación de la velocidad del sonido. En 1991 se realizó el The Heard Island Feasibility Test. Se generaron tres tipos de señales centradas en 57 Hz proyectadas en el canal sonoro a una profundidad de 175 m, cada media hora durante 7 días. Se utilizó un array de transductores que generaba niveles de 220 dB ref 1  $\mu$ Pa @ 1 m. Con esos niveles, se detectaron 160 dB a 1 km, 137 dB a 72 km a profundidad 80 m y 120 dB a distancias de 100 – 1000 km, dependiendo de la profundidad de los receptores. Las señales fueron detectadas hasta una distancia de 17.000 km.

## 4 Impacto del ruido submarino en los animales marinos

Para que la contaminación acústica afecte a los seres vivos no es preciso que se produzca un trauma acústico, basta con que impida el desarrollo de su comportamiento habitual. Esta contaminación les ahuyenta (disminución de capturas) y les hace cambiar sus rutas migratorias y su conducta, además de dificultarles su capacidad de percepción afectando a la comunicación, localización de presas, orientación, etc.

De entre todos los ruidos producidos por el ser humano, los que provocan daños temporales o permanentes no letales e incluso letales a la mayoría de mamíferos marinos son los de media frecuencia (1 – 10 kHz) y evidentemente los de mayor intensidad.

Se considera que un nivel mayor de 160 – 165 dB provoca daños físicos en animales marinos. En las tablas V y VI se muestran, a una serie discreta de distancias, las intensidades previstas según un valor estimado de distintas fuentes y para distintos tipos de propagación.

Fuente	Nivel dB ref 1 $\mu$ Pa @ 1 m	1 km	2 km	20 km	200 km
<b>Propagación Cilíndrica</b>					
Fuera Borda	162	132	129	119	109
SONAR MF media potencia  (1 a 10 kHz)	220	190	187	177	167
SONAR LF (0,1 a 1 Khz)	230	200	197	187	177
SONAR MF  (1 a 10 kHz)	235	205	202	192	182
Sondas Multi – haz y Paramétricas (HF > 10 kHz)	235	205	202	192	182
Explosiones	250	220	217	207	197
Cañones de aire	270	240	237	227	217

**Tabla V. Nivel de ruido submarino, propagación cilíndrica.**

Fuente	Nivel	1 km	2 km	20 km	200 km
	dB ref 1 $\mu$ Pa @ 1 m				
<b>Propagación Esférica</b>					
Fuera Borda	162	103	97	77	57
SONAR MF media potencia (1 a 10 kHz)	220	161	155	135	115
SONAR LF (0,1 a 1 Khz)	230	171	165	145	125
SONAR MF, Paramétricas (1 a 10 kHz)	235	176	170	150	130
Explosiones	250	191	185	165	145
Cañones de aire	270	211	205	185	165

**Tabla VI. Nivel de ruido submarino, propagación esférica.**

Los niveles de contaminación de un sonido particular y su impacto morfológico y fisiológico dependen del tiempo de exposición y de la intensidad de la señal recibida, así como de la especie. Los niveles y frecuencia utilizados para cada una de estas actividades es diferente para cada una de las especies.

Por lo tanto una de las cuestiones prioritarias será conocer la intensidad y el tiempo mínimo de exposición a una emisión para que se produzca una disminución de la sensibilidad auditiva a esas frecuencias, tanto de forma temporal como de forma permanente.

Además de los daños causados en el sistema auditivo, otros efectos físicos aún más nocivos son aquellos que provocan: hemorragias cerebrales, pulmonares, traumas en tejidos, varamientos, etc. Por lo tanto, otra cuestión importante es conocer la distancia mínima a una fuente sonora para estar a salvo de cualquier de estos efectos, lo cual es una función del tipo de fuente, intensidad y posición, así como de las características de propagación.

Para mitigar estos efectos, alguna propuesta contempla una serie de buenas prácticas, como son las de: observar si existe presencia de mamíferos marinos al menos media hora antes de comenzar a transmitir, comenzar con emisiones de bajo nivel de potencia para progresivamente aumentarlo (soft starts) e interrumpir las emisiones si se confirma la presencia de cetáceos u otros mamíferos marinos dentro de la zona de influencia.

## 5 Conclusiones

El limitado conocimiento actual sobre la capacidad auditiva de las especies marinas y sobre su dependencia de esta percepción sensorial es la mayor traba para poder definir un modo de actuación coherente con el medio que permita armonizar las actividades humanas con el respeto al medio ambiente.

En este sentido quizás los cetáceos, por su relación de dependencia vital y casi exclusiva con la información acústica, representen el mejor bioindicador de los efectos de la contaminación acústica marina.

Determinadas acciones se están teniendo en cuenta para mitigar en la medida de lo posible el impacto que este tipo de contaminación pueda representar.

## Referencias

- [1] W. John Richardson. *Marine Mammals and Noise*. Academic Press (1995).
- [2] Whitlow W.L. Au, Mardi C. Hastings. *Principles of Marine Bioacoustics*. Springer (2008).
- [3] Robert J. Urick. *Principles of Underwater Sound*. Mc Graw-Hill. Third Edition. (1983).