



El ruido submarino en el Océano Glacial Antártico

Authors

Christine Erbe, Centre for Marine Science and Technology, Curtin University, Perth, WA 6102, Australia

Doug Nowacek, Duke University Marine Lab, Beaufort, NC 28516, USA

Rachel Przeslawski, Geoscience Australia, Canberra, ACT 2601, Australia

Daniel P. Costa, Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of California Santa Cruz, CA 95060, USA

Traducción técnicamente supervisada por el Dr. Luis Cardona (Universidad de Barcelona, España)

Resumen

El ruido submarino es una forma de contaminación que puede afectar a numerosas especies, desde el diminuto fitoplancton hasta las enormes ballenas. Es capaz de interferir con el sistema de comunicación y de orientación acústica de la fauna marina; de perturbar su comportamiento y provocar el desplazamiento a otras zonas; de desequilibrar la demanda y la adquisición de energía; en algunos casos extremos, de provocar daños y lesiones traumáticas y, en último término, de repercutir en la salud y la propia supervivencia. El Océano Glacial Antártico no es inmune al ruido submarino y sus efectos; no obstante, se han llevado a cabo muy pocos estudios sobre el impacto bioacústico en las especies de esta región. Este texto revisa las fuentes de ruido submarino existentes en el Océano Glacial Antártico, sus posibles efectos nocivos y las opciones de mitigación, así como las necesidades de gestión e investigación.

Panorama general

Fuentes de contaminación submarina en el Océano Glacial Antártico

En el océano no reina el silencio: en él se escuchan miles de sonidos no solo de origen endógeno, sino también que se originan por encima y por debajo del mismo e irradian hacia él. Entre las fuentes abióticas naturales de sonidos se cuentan el viento que sopla sobre las aguas abiertas y el hielo, la precipitación que cae sobre el mar y el hielo marino, las olas que rompen, los volcanes, seísmos y corrimientos de tierras submarinos y la ruptura del hielo. En cuanto a las fuentes bióticas, hay que mencionar los chasquidos de los camarones pistola (alféidos), los ronquidos de ciertos peces, los clics y silbidos de los odontocetos y los cantos de las focas y las ballenas.

Las fuentes y los niveles de sonidos submarinos son distintos según el lugar, el momento del día, la estación y la frecuencia acústica. El sonido submarino en torno a la Antártida presenta una gran variabilidad espaciotemporal, debido a los cambios estacionales del hielo. La cobertura de hielo puede atenuar el sonido entre pocos hercios y 500 Hz, pero también acumular sonido en dicha banda de frecuencia, en particular en el borde de la banquisa. El sonido del hielo puede ser tonal (fricción de los icebergs) y pulsante (ruptura del hielo). Al soplar sobre las aguas abiertas del océano o sobre una capa delgada de hielo, el viento genera un sonido subacuático continuo con una frecuencia que oscila entre unas decenas de hercios y los 20 kHz. La megafauna marina emite llamadas sencillas (que duran escasos segundos), sonidos dispuestos en forma de canto (que duran entre horas y días) y también coros (cuando hay tantas llamadas y/o cantos solapados que el rango de sonido ambiental se incrementa notablemente en dicho rango de frecuencia). Entre la megafauna que emite vocalizaciones se encuentran la ballena azul antártica (*Balaenoptera musculus intermedia*; 18-27 Hz), el rorcual común (*Balaenoptera physalus*; 15-30 Hz y 90-100 Hz), el rorcual austral (*Balaenoptera bonaerensis*; 100-300 Hz) y las focas de Weddell (*Leptonychotes weddelli*; 100 Hz – 15 kHz) y leopardo (*Hydrurga leptonyx*; 50 Hz – 6 kHz) [1,2]. Las ballenas están presentes tan sólo durante el verano austral, pero las focas durante todo el año.

En las últimas décadas, el Océano Glacial Antártico se ha visto sometido a un creciente volumen de ruido antropogénico procedente de cruceros turísticos, buques de investigación, pesqueros, sonares, cañones de aire sísmicos y, en ocasiones, la construcción esporádica de bases de investigación y muelles. No todas las regiones antárticas se han visto afectadas de igual manera; en realidad, la costa del Pacífico meridional antártico (entre el mar de Ross y la península Antártica) es la más visitada [3]. El tráfico marítimo ha venido aumentando de forma constante en los últimos años, aun cuando no existen rutas de transporte internacional que atraviesen el Océano Glacial Antártico. En los últimos años, la presencia de cruceros turísticos (medida en días/buque) representa más del doble de la de pesqueros, y el triple de la de buques de investigación. El número de viajes de cruceros turísticos se triplicó entre 1999 y 2019 y continúa aumentando (véanse resúmenes de los datos disponibles en nota [3]). La actividad de los buques de investigación también se ha ido incrementando, pero la de los pesqueros ha permanecido bastante estable. Los cruceros turísticos solo visitan la zona durante el verano austral, que también es la temporada alta para los buques de investigación y los de servicios (esto es, rompehielos que apoyan a las bases de investigación). Los pesqueros están presentes durante todo el año, aunque más allá de la banquisa y a una menor latitud durante el invierno.

El ruido de los buques procede de la cavitación de las hélices, así como del rumor de los motores y la maquinaria, que se transmiten al agua a través del casco. Dicho ruido tiene un espectro de frecuencias muy amplio (10 Hz-20 kHz) y continuo. Los rompehielos también generan ruido al romper el hielo. Los buques de investigación sísmica remolcan una serie de cañones que liberan repetidamente al agua aire de alta presión, creando así una serie de pulsaciones acústicas intensas (5 Hz – 20 kHz, cada 5-20 segundos). La investigación sísmica marina se utiliza para estudiar la corteza terrestre, su estructura y su geología. Todos los buques van equipados de ecosondas con fines de navegación que emiten un pulso acústico (>10 kHz) cada pocos segundos [3]. El nivel de recepción depende de una serie de factores, como la batimetría (somera, en declive o profunda), la geología del lecho marino, la temperatura y los perfiles de salinidad en la columna de agua, la profundidad a la que se sitúa el receptor y, naturalmente, la proximidad a la fuente [4]. En las condiciones propicias, el sonido de un

buque puede propagarse a cientos de kilómetros [5] y se han detectado prospecciones sísmicas a miles de kilómetros [6]. En el Océano Glacial Antártico, el sonido puede propagarse a largas distancias (de cientos a miles de kilómetros [7,8]), ya que la superficie de las aguas frías crea un canal superficial, mientras que la batimetría profunda impide la pérdida de energía acústica de baja frecuencia . Por consiguiente, el ruido marino antártico impacta en la fauna incluso a gran distancia de la fuente de sonido (figura 1).

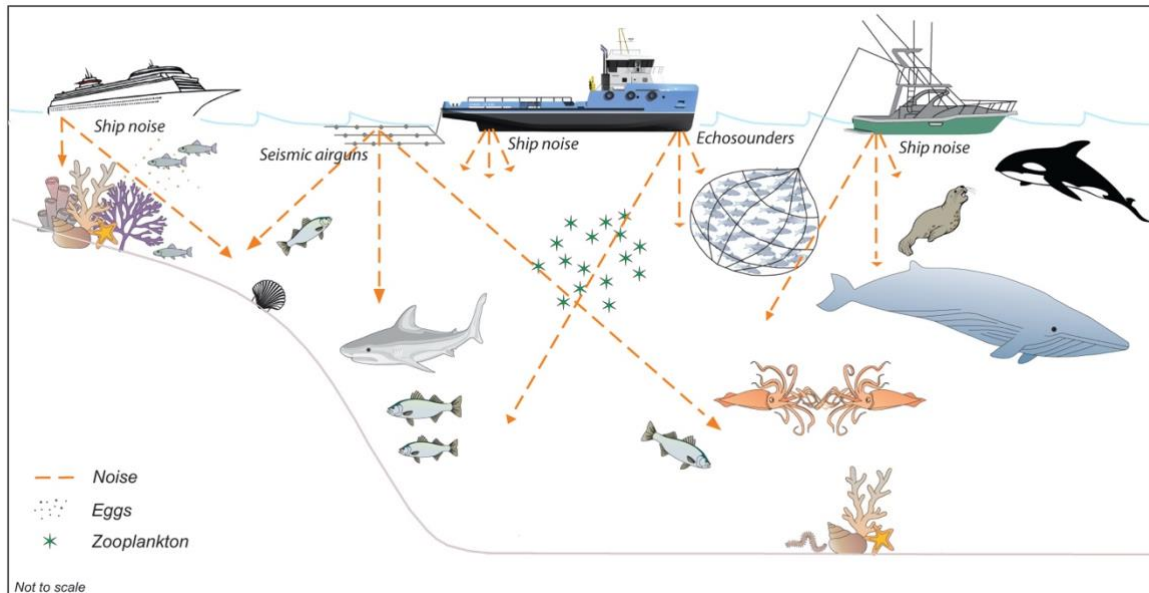


Fig. 1: Diagrama conceptual que muestra las fuentes comunes de ruido submarino antropogénico y parte de la fauna antártica a la que puede afectar. Las flechas de color naranja indican los vectores de onda que apuntan a las direcciones hacia las que se puede propagar el sonido. Se trata de un diagrama no exhaustivo; y tampoco incluye la magnitud o el tipo de efecto.

Impacto del ruido sobre la fauna marina

El ruido submarino puede afectar a la fauna marina de diversas formas, desde efectos agudos a crónicos sobre el comportamiento y la psicología de los animales. En casos extremos, las fuentes de sonido intenso, como las prospecciones sísmicas a gran escala o las explosiones submarinas, pueden causar daños inmediatos o incluso la muerte, especialmente de pequeños animales planctónicos [9]. Existen otros efectos agudos, desde la pérdida de audición y los cambios repentinos de comportamiento hasta el estrés, que pueden o no resultar graves para la salud animal.

La pérdida de audición inducida por el ruido puede ser temporal (esto es, cambios temporales del umbral de sensibilidad auditiva, TTS, por sus siglas en inglés) o permanente (PTS, por sus siglas en inglés). Dada la importancia del sonido para muchos animales marinos, la pérdida de audición puede afectar a sus mecanismos de comunicación acústica, así como a la navegación, alimentación, reproducción y otras funciones vitales. En cautividad, se ha documentado que una foca común (*Phoca vitulina*) llegó a padecer una PTS de 8-dB (no recuperada tras más de 10 años) tras la exposición a un ruido de 4-kHz a 181 dB re 1 μ Pa y 199 dB re 1 μ Pa²s, semejante a un sónar militar a corta distancia

[10]. La exposición a un ruido agudo puede causar TTS o PTS, en función del nivel de exposición. También puede sufrirse una PTS después de una exposición crónica a un ruido de baja intensidad.

Los efectos crónicos pueden ser incluso más importantes para la salud general de las poblaciones de animales. Así, el ruido crónico puede hacerles abandonar hábitats de gran importancia. Se suele restar importancia a este tipo de desplazamiento porque se supone que los animales se han limitado a trasladarse a una zona más tranquila, pero los animales eligen su hábitat por razones muy concretas y quizá no existan alternativas idóneas. Desde los peces a las ballenas, hay especies que regresan estacionalmente a ciertos hábitats críticos, por ejemplo su territorio de cría o de alimentación. Algunas ballenas migratorias consumen una parte significativa de su alimentación anual mientras se encuentran en la zona antártica [11], si bien el periodo para hacerlo es muy limitado (~3 meses). Se ha demostrado que las prospecciones sísmicas a gran escala, que duran desde semanas hasta meses, desplazan a los animales, como el rorcual común del Atlántico norte, aunque se advirtió que regresan una vez finalizada la prospección [12].

El ruido puede asimismo afectar al comportamiento acústico, esto es, la producción y utilización de sonidos. El incremento crónico del ruido de baja frecuencia procedente de los buques fue la causa más probable del aumento sostenido de las vocalizaciones de ballenas francas (*Eubalaena* sp.) [13]. Las ballenas de Groenlandia (*Balaena mysticetus*, una especie ártica) incrementaron tanto la frecuencia de vocalización como su volumen al aumentar el ruido procedente del viento y las prospecciones sísmicas [14]; sin embargo, se alcanzó un umbral a partir del cual comenzaron a fallar ambos métodos de compensación, lo que dio lugar a una disminución de la frecuencia de vocalización y de la eficacia de la comunicación.

Finalmente, se ha comprobado que el ruido puede provocar estrés en los erizos de mar (*Arbacia lixula* [15]), ciertos peces (por ejemplo, la tilapia del Nilo, *Oreochromis niloticus* [16]) y las ballenas. En las ballenas francas, los niveles de las hormonas glucocorticoides inductoras de estrés disminuyen al hacerlo el nivel del ruido procedente de las embarcaciones [17]. Si bien un incremento temporal de las hormonas inductoras de estrés no es perjudicial (pues inducen también la respuesta de lucha o huida para escapar de la amenaza), unos niveles prolongados de estrés pueden afectar negativamente a las funciones reproductivas y la respuesta inmunitaria

De momento se sabe poco sobre el papel del ruido en el contexto de otros estresores no acústicos (por ejemplo, la contaminación o la escasez de presas) y también se desconoce si el ruido puede contribuir a las interacciones sinérgicas (esto es, cuando el efecto de dos o más estresores es superior al de la suma de sus efectos por separado). Los animales son a veces más susceptibles al estrés acústico cuando existen otros estresores. La acción de varios estresores lleva a un punto de inflexión en el que comienzan a observarse los efectos producidos por el ruido, sobre todo en el caso del estrés térmico [18], al que pueden ser cada vez más propensas muchas especies antárticas [19].

Cuadro 1: Ejemplos de efectos del ruido sobre las especies marinas en el Océano Glacial Antártico (* o en especies similares, no antárticas). El cuadro no incluye los estudios que no muestran efecto alguno.

Grupo taxonómico	Especie	Fuente del ruido	Efecto	Ref.
Zooplankton	*copépodos y cladóceros	Cañones de aire sísmicos	Reducción de número; menor tasa de supervivencia	[9]
Vieiras	*Vieira australiana (<i>Pecten fumatus</i>)	Cañones de aire sísmicos	Respuestas fisiológicas y de comportamiento	[20]
Erizos de mar	*Erizo de mar negro (<i>Arbacia lixula</i>)	Simulación barrido ecosonda/sónar	Estrés	[15]
Crustáceos	*Langosta austral (<i>Jasus edwardsii</i>)	Cañones de aire sísmicos	Movimientos anormales, lesiones en los estatocistos	[21]
Calamar	*Calamar roquero austral (<i>Sepioteuthis australis</i>)	Cañones de aire sísmicos	Sobresaltos, huida	[22]
Peces	*Bacalao del Atlántico (<i>Gadus morhua</i>), carbonero (<i>Pollachius virens</i>)	Cañones de aire sísmicos	Modificación del ritmo cardíaco y el comportamiento	[23]
Aves marinas	*Pingüino de El Cabo (<i>Spheniscus demersus</i>)	Cañones de aire sísmicos	Desplazamiento de las zonas habituales de alimentación	[24]
Misticetos	Ballena azul antártica (<i>Balaenoptera musculus intermedia</i>)	Sónar naval	Interrupción de la zambullida para alimentación, huida, aumento de la frecuencia de llamada	[25]
Misticetos	Rorcual común (<i>Balaenoptera physalus</i>)	Buques Cañones de aire sísmicos	Modificación de las características de llamada (duración, ancho de banda, frecuencia de pico máximo)	[12]
Misticetos	Ballena jorobada (<i>Megaptera novaeangliae</i>)	Buques Cañones de aire sísmicos	Disminución de la interacción social	[26]
Odontocetos	Orca (<i>Orcinus orca</i>)	Buques Sónar naval	Comportamiento de huida	[27,28]
Odontocetos	Cachalote (<i>Physeter macrocephalus</i>)	Sónar naval	Perturbación de los hábitos de alimentación y descanso, huida	[29]
Fócidos	*Foca manchada (<i>Phoca largha</i>), *Foca anillada (<i>Pusa hispida</i>)	Cañones de aire sísmicos	Enmascaramiento auditivo	[30]
Fócidos	*Elefante marino antártico (<i>Mirounga angustirostris</i>)	Ruido de banda de octava	TTS	[31]
Fócidos	*Foca barbada (<i>Erignathus barbatus</i>)	Cañones de aire sísmicos	TTS	[32]

Fócidos	* Elefante marino septentrional (<i>Mirounga angustirostris</i>)	Señales de investigación acústica (ATOC)	Modificación de las pautas de zambullida	[33]
---------	--	--	--	------

Opciones para mitigar los efectos negativos

Para reducir la probabilidad y gravedad de estos efectos es preciso reducir a su vez la exposición al ruido. Ello puede lograrse empleando tecnología alternativa (por ejemplo, equipos de cañones sísmicos más pequeños, o alternativas a su uso, como vibradores sísmicos o buques más silenciosos), modificando las fuentes de sonido (por ejemplo, reduciendo la potencia, el rango de frecuencia y otras características de la señal), mediante modificaciones operativas (por ejemplo, reduciendo los ciclos de actividad o concentrándolos para así alertar a los animales) o mediante instalaciones de reducción de ruido (utilizando cortinas de burbujas para instalar pilotes en la construcción de muelles). La detección en tiempo real de la presencia de animales (por ejemplo, mediante observadores de mamíferos marinos (MMO) a bordo, drones con cámaras o dispositivos de rastreo y detección acústica pasiva (PAM)) permite advertir a los responsables in situ para que reduzcan la potencia o se interrumpan las actividades cuando haya animales cerca. En la planificación previa a las prospecciones se puede plantear la posibilidad de cierres temporales o geográficos para evitar temporadas y hábitats críticos, fig. 2).

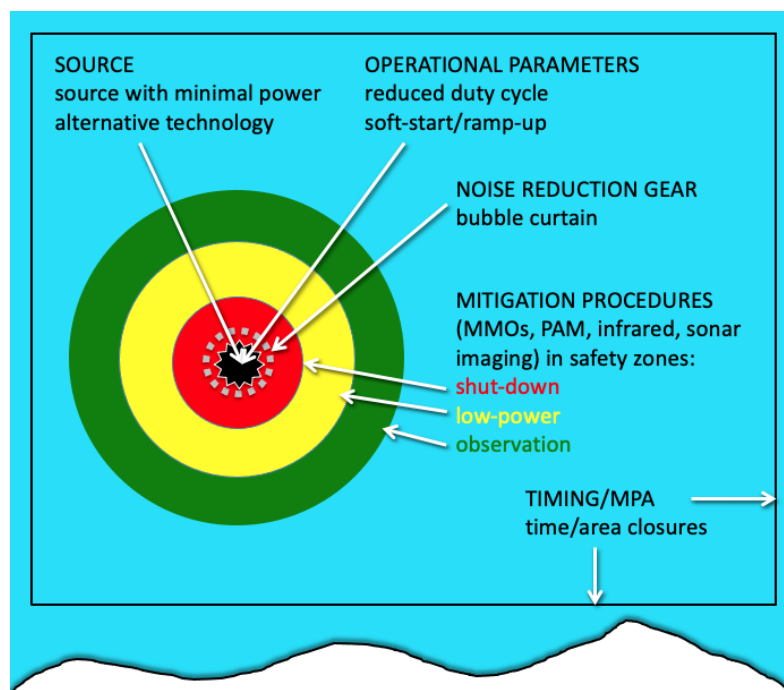


Fig. 2: Esquema de opciones para la mitigación del ruido. Vista horizontal del océano en las proximidades de la banquisa. Las opciones de mitigación se pueden realizar en la fuente (por ejemplo, modificación de la tecnología o de las operaciones), cerca de la fuente (esto es, instalación de equipos de reducción del ruido), dentro de las zonas de seguimiento (por ejemplo, recurso a observadores de mamíferos marinos (MMO), seguimiento acústico pasivo (PAM), cámaras infrarrojas o sistemas de imágenes por sónar) o en las zonas

completas (esto es, restricción de las operaciones durante determinadas temporadas o en las zonas de protección marina).

Todas las actividades en la Antártida están sujetas a una evaluación previa de impacto ambiental conforme a lo dispuesto en el Anexo I del Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente. Sin embargo, no existe un organismo regulador unificado: son los países signatarios del Tratado Antártico los que se ocupan de evaluar sus propias actividades de investigación. El turismo se organiza a través de las Reuniones Consultivas del Tratado Antártico y la Asociación Internacional de Operadores Turísticos Antárticos (IAATO, por sus siglas en inglés), y la pesca a través de la Convención para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA). Por lo tanto, los principios para evaluar y autorizar las actividades que generan ruido (por ejemplo, prospecciones sísmicas) pueden ser diferentes según la legislación nacional de cada Parte del Tratado.

Problemática

Necesidades en materia de investigación

Se cuenta con poca información sobre los efectos nocivos del ruido sobre las especies de las aguas antárticas (cuadro 1), de modo que deben extrapolarse conclusiones a partir de los efectos sobre especies similares o afines de otros lugares. Se desconoce la validez de estas extrapolaciones, dadas las diferencias existentes en materia de ruido ambiente, propagación del sonido y entorno ecológico. Un seminario celebrado recientemente sobre los efectos del ruido en los mamíferos marinos antárticos señaló la necesidad de obtener más datos sobre la abundancia y distribución de los animales y su capacidad auditiva, así como de valorar la eficacia de los métodos de mitigación [3]. Aunque en algunas zonas de la Antártida se ha examinado de forma exhaustiva el ruido ambiental, en otras faltan estudios de base [1]. De particular importancia sería conocer el paisaje acústico submarino en ausencia de actividades humanas, ya que el cambio climático está dando lugar a cambios considerables en la superficie del hielo marino, el deshielo de los glaciares y la fractura de los icebergs, factores todos ellos que afectan a dicho entorno. En cuanto al impacto del ruido, aunque están bien estudiados los efectos nocivos a corto plazo sobre individuos de diversas especies, no se sabe prácticamente nada sobre estresores múltiples y su acumulación y, en particular, sobre sus efectos en las poblaciones y los ecosistemas.

Necesidades de gestión

La gestión del ruido exige un planteamiento interdisciplinario que combine conocimientos de a) física e ingeniería (es decir, generación de ruido, opciones de modificación técnica, y métodos de medición y seguimiento del ruido); b) geociencia (es decir, parámetros medioambientales que afectan a la propagación del ruido, y diseño y supervisión de programas de mitigación); y c) biología y ecología (esto es, receptores animales y su distribución, comportamiento y vulnerabilidad a los efectos nocivos del ruido); fig. 3 [34]). Es preciso contar con estándares para medir y controlar el ruido y la reacción de los animales al mismo (p. ej., [35]).

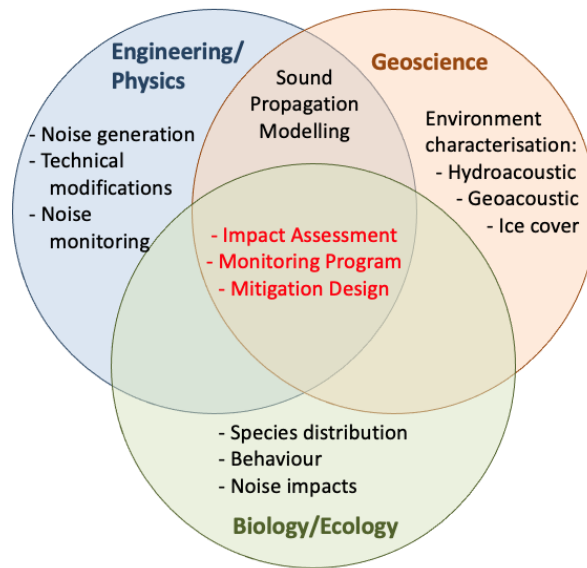


Fig. 3: Diagrama de necesidades de investigación y gestión, agrupadas por disciplinas, en material de evaluación, seguimiento y mitigación de los efectos negativos del ruido.

La gestión del ruido exige además un planteamiento internacional. Si bien los diversos territorios nacionales cuentan con sus propias directrices sobre el ruido (aunque a veces carecen por completo de ellas), hacen falta principios coherentes a escala internacional, sobre todo para las especies migratorias que atraviesan distintos territorios nacionales y para las regiones con presencia internacional, como el Océano Glacial Antártico.

Conclusiones

- Las actividades antropogénicas en el Océano Glacial Antártico generan ruido submarino: las actividades de investigación (incluidos los buques y las prospecciones sísmicas marinas), el turismo y la pesca.
- El tráfico marítimo se ha ido intensificando de año en año: especialmente, el número de buques turísticos está aumentando con rapidez.
- El ruido submarino puede afectar negativamente a la microfauna y megafauna antárticas, desde el zooplancton a las ballenas.
- El ruido puede modificar el comportamiento de los animales, enmascarar su comunicación, dificultar la apreciación sensorial del entorno, desplazarlos de hábitats importantes, provocar reacciones de estrés, interferir con sus funciones vitales (incluidas la alimentación y la reproducción), reducir la disponibilidad de presas (al repercutir sobre esas especies), causar lesiones directas (en casos extremos de exposición al ruido) y, en último término, afectar a su supervivencia.
- Se han realizado muy pocos estudios sobre los efectos del ruido en la Antártida y las especies antárticas, de modo que la gestión del mismo suele basarse en datos referentes a especies no antárticas presentes en otros océanos. Es preciso examinar hasta qué punto los resultados son extrapolables.

- Se desconocen los efectos de los estresores múltiples y su interacción. Por ejemplo: ¿está haciendo el cambio climático que los animales sean más vulnerables a los efectos nocivos del ruido?
- Los principios que se aplican para evaluar el ruido subacuático, mitigar sus posibles efectos y autorizar actividades antropogénicas son muy distintos según el país signatario del Tratado Antártico de que se trate: es preciso un planteamiento unitario.

References

1. Menze, S., Zitterbart, D.P., van Opzeeland, I., Boebel, O., The influence of sea ice, wind speed and marine mammals on Southern Ocean ambient sound. *Royal Society Open Science* **4**(1) (2017) doi:10.1098/rsos.160370.
2. Erbe, C., Dunlop, R., Jenner, K.C.S., Jenner, M.-N.M., McCauley, R.D., Parnum, I., Parsons, M., Rogers, T., Salgado-Kent, C., Review of underwater and in-air sounds emitted by Australian and Antarctic marine mammals. *Acoustics Australia* **45**, 179-241 (2017) doi:10.1007/s40857-017-0101-z.
3. Erbe, C., Dähne, M., Gordon, J., Herata, H., Houser, D.S., Koschinski, S., Leaper, R., McCauley, R., Miller, B., Müller, M., Murray, A., Oswald, J.N., Scholik-Schlomer, A.R., Schuster, M., van Opzeeland, I.C., Janik, V.M., Managing the effects of noise from ship traffic, seismic surveying and construction on marine mammals in Antarctica. *Frontiers in Marine Science* (2019) doi:10.3389/fmars.2019.00647.
4. Farcas, A., Thompson, P.M., Merchant, N.D., Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* **57**, 114-122 (2016) doi:10.1016/j.eiar.2015.11.012.
5. Erbe, C., Marley, S., Schoeman, R., Smith, J.N., Trigg, L., Embling, C.B., The effects of ship noise on marine mammals--A review. *Frontiers in Marine Science* **6**, 606 (2019) doi:10.3389/fmars.2019.00606.
6. Nieu Kirk, S., Mellinger, D., Moore, S., Klinck, K., Dziak, R., Goslin, J., Sounds from airguns and fin whales recorded in the mid-Atlantic Ocean, 1999–2009. *The Journal of the Acoustical Society of America* **131**(2), 1102-1112 (2012) doi:10.1121/1.3672648.
7. Gavrilov, A., Li, B.: Antarctica as one of the major sources of noise in the ocean. Paper presented at the Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, 2nd International Conference and Exhibition, Heraklion, Crete, 25-29 June 2007
8. Gavrilov, A., Propagation of underwater noise from an offshore seismic survey in Australia to Antarctica: measurements and modelling. *Acoustics Australia* **46**(1), 143-149 (2018) doi:10.1007/s40857-018-0131-1.
9. McCauley, R.D., Day, R.D., Swadlow, K.M., Fitzgibbon, Q.P., Watson, R.A., Semmens, J.M., Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature Ecology & Evolution* **1**, 0195 (2017) doi:10.1038/s41559-017-0195.
10. Reichmuth, C., Sills, J.M., Mulsow, J., Ghaul, A., Long-term evidence of noise-induced permanent threshold shift in a harbor seal (*Phoca vitulina*). *The Journal of the Acoustical Society of America* **146**(4), 2552-2561 (2019) doi:10.1121/1.5129379.
11. Lockyer, C.: Growth and energy budgets of large baleen whales from the Southern Hemisphere. In: Advisory Committee on Marine Resources Research (ed.) *Mammals in the Seas*, vol. 3 - General Papers and Large Cetaceans. pp. 379-487. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy (1981)
12. Castellote, M., Clark, C., Lammers, M., Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation* **147**(1), 115-122 (2012) doi:10.1016/j.biocon.2011.12.021.
13. Parks, S.E., Clark, C.W., Tyack, P.L., Short- and long-term changes in right whale calling behavior: The potential effects of noise on acoustic communication. *The Journal of the Acoustical Society of America* **122**(6), 3725-3731 (2007) doi:10.1121/1.2799904.
14. Thode, A.M., Blackwell, S.B., Conrad, A.S., Kim, K.H., Marques, T., Thomas, L., Oedekoven, C.S., Harris, D., Bröker, K., Roaring and repetition: How bowhead whales adjust their call density and source level (Lombard effect) in the presence of natural and seismic airgun survey noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* **147**(3), 2061-2080 (2020) doi:10.1121/10.0000935.

15. Vazzana, M., Mauro, M., Ceraulo, M., Dioguardi, M., Papale, E., Mazzola, S., Arizza, V., Beltrame, F., Inguglia, L., Buscaino, G., Underwater high frequency noise: Biological responses in sea urchin *Arbacia lixula* (Linnaeus, 1758). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* **242**, 110650 (2020) doi:10.1016/j.cbpa.2020.110650.
16. Kusku, H., Acoustic sound-induced stress response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to long-term underwater sound transmissions of urban and shipping noises. *Environmental Science and Pollution Research* (2020) doi:10.1007/s11356-020-09699-9.
17. Rolland, R.M., Parks, S.E., Hunt, K.E., Castellote, M., Corkeron, P.J., Nowacek, D.P., Wasser, S.K., Kraus, S.D., Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society of London: Series B Biological Sciences* **279**(1737), 2363-2368 (2012) doi:10.1098/rspb.2011.2429.
18. Przeslawski, R., Huang, Z., Anderson, J., Carroll, A.G., Edmunds, M., Hurt, L., Williams, S., Multiple field-based methods to assess the potential impacts of seismic surveys on scallops. *Marine Pollution Bulletin* **129**(2), 750-761 (2018) doi:10.1016/j.marpolbul.2017.10.066.
19. Peck, L.S., Webb, K.E., Bailey, D.M., Extreme sensitivity of biological function to temperature in Antarctic marine species. *Functional Ecology* **18**(5), 625-630 (2004) doi:10.1111/j.0269-8463.2004.00903.x.
20. Day, R.D., McCauley, R.D., Fitzgibbon, Q.P., Hartmann, K., Semmens, J.M., Exposure to seismic air gun signals causes physiological harm and alters behavior in the scallop *Pecten fumatus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **114**(40), E8537 (2017) doi:10.1073/pnas.1700564114.
21. Day, R.D., McCauley, R.D., Fitzgibbon, Q.P., Hartmann, K., Semmens, J.M., Seismic air guns damage rock lobster mechanosensory organs and impair righting reflex. *Proc Biol Sci* **286**(1907), 20191424 (2019) doi:10.1098/rspb.2019.1424.
22. Fewtrell, J.L., McCauley, R.D., Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Marine Pollution Bulletin* **64**(5), 984-993 (2012) doi:10.1016/j.marpolbul.2012.02.009.
23. Davidsen, J.G., Dong, H., Linné, M., Andersson, M.H., Piper, A., Prystay, T.S., Hvam, E.B., Thorstad, E.B., Whoriskey, F., Cooke, S.J., Sjørusen, A.D., Rønning, L., Netland, T.C., Hawkins, A.D., Effects of sound exposure from a seismic airgun on heart rate, acceleration and depth use in free-swimming Atlantic cod and saithe. *Conservation Physiology* **7**(1) (2019) doi:10.1093/conphys/coz020.
24. Pichegru, L., Nyengera, R., McInnes, A.M., Pistorius, P., Avoidance of seismic survey activities by penguins. *Scientific Reports* **7**(1), 16305 (2017) doi:10.1038/s41598-017-16569-x.
25. Goldbogen, J.A., Southall, B.L., DeRuiter, S.L., Calambokidis, J., Friedlaender, A.S., Hazen, E.L., Falcone, E.A., Schorr, G.S., Douglas, A., Moretti, D.J., Kyburg, C., McKenna, M.F., Tyack, P.L., Blue whales respond to simulated mid-frequency military sonar. *Proceedings of the Royal Society, B* **280**(1765), 20130657 (2013) doi:10.1098/rspb.2013.0657.
26. Dunlop, R.A., McCauley, R.D., Noad, M.J., Ships and air guns reduce social interactions in humpback whales at greater ranges than other behavioral impacts. *Marine Pollution Bulletin* **154**, 111072 (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111072.
27. Miller, P.J.O., Antunes, R.N., Wensveen, P.J., Samarra, F.I.P., Alves, A.C., Tyack, P.L., Kvadsheim, P.H., Kleivane, L., Lam, F.-P.A., Ainslie, M.A., Thomas, L., Dose-response relationships for the onset of avoidance of sonar by free-ranging killer whales. *The Journal of the Acoustical Society of America* **135**(1), 975 (2014) doi:10.1121/1.4861346.
28. Williams, R., Erbe, C., Ashe, E., Beerman, A., Smith, J., Severity of killer whale behavioural responses to ship noise: A dose-response study. *Marine Pollution Bulletin* **79**, 254-260 (2014) doi:10.1016/j.marpolbul.2013.12.004.
29. Curé, C., Isojunno, S., Visser, F., Wensveen, P.J., Sivle, L.D., Kvadsheim, P.H., Lam, F.P.A., Miller, P.J.O., Biological significance of sperm whale responses to sonar: comparison with anti-predator responses. *Endangered Species Research* **31**, 89-102 (2016) doi:10.3354/esr00748.

30. Sills, J.M., Southall, B.L., Reichmuth, C., The influence of temporally varying noise from seismic air guns on the detection of underwater sounds by seals. *The Journal of the Acoustical Society of America* **141**(2), 996-1008 (2017) doi:10.1121/1.4976079.
31. Kastak, D., Schusterman, R.J., Southall, B.L., Reichmuth, C.J., Underwater temporary threshold shift induced by octave-band noise in three species of pinniped. *Journal of the Acoustical Society of America* **106**(2), 1142-1148 (1999)
32. Sills, J.M., Ruscher, B., Nichols, R., Southall, B.L., Reichmuth, C., Evaluating temporary threshold shift onset levels for impulsive noise in seals. *The Journal of the Acoustical Society of America* **148**(5), 2973-2986 (2020) doi:10.1121/10.0002649.
33. Costa, D.P., Crocker, D.E., Gedamke, J., Webb, P.M., Houser, D.S., Blackwell, S.B., Waples, D., Hayes, S.A., Le Boeuf, B.J., The effect of a low-frequency sound source (acoustic thermometry of the ocean climate) on the diving behavior of juvenile northern elephant seals, *Mirounga angustirostris*. *The Journal of the Acoustical Society of America* **113**(2), 1155-1165 (2003) doi:10.1121/1.1538248.
34. Przeslawski, R., Brooke, B., Carroll, A.G., Fellows, M., An integrated approach to assessing marine seismic impacts: Lessons learnt from the Gippsland Marine Environmental Monitoring project. *Ocean & Coastal Management* **160**, 117-123 (2018) doi:10.1016/j.ocecoaman.2018.04.011.
35. Carroll, A.G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M., Bruce, B., A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & invertebrates. *Marine Pollution Bulletin* **114**(1), 9-24 (2017) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.11.038.

Resources

- Acoustic recordings of Antarctic marine mammals: <https://cmst.curtin.edu.au/research/marine-mammal-bioacoustics/>
- Discovery of Sound in the Sea (DOSITS): <https://dosits.org/>
- Listening to the Deep Ocean Environment (LIDO): <http://www.listentothedeep.com/>

Key words

Marine noise, ship noise, seismic airguns, bioacoustic impact, noise regulation