



SONIDOS EN EL MAR: el delfín y el camarón tronador

Carmen Bazúa Durán

La producción de ondas acústicas o sonidos en el medio marino ocurre del mismo modo que en cualquier otro medio con propiedades elásticas, como son los fluidos.

Las moléculas de agua se mueven por efecto de una perturbación mecánica que se ejerce sobre ellas, como la presión, y se forman zonas de compresión y expansión (o enrarecimiento, *rarefaction* en inglés) que se mueven a través del medio de un punto hacia sus alrededores en la misma dirección en la que se ejerce la perturbación y dan lugar a la onda acústica o sonido, de tipo longitudinal.

Una onda acústica se caracteriza por la variación de su intensidad o amplitud en el tiempo (composición temporal) y por la frecuencia (composición espectral; Figura 1). Las ondas acústicas se generan en el medio marino de manera continua o intermitente a partir de una gran cantidad de fuentes. Las fuentes biológicas son las de mayor diversidad y complejidad e incluyen a todos los organismos que generan ondas acústicas, tanto en el intervalo sónico (con frecuencias entre los 20 y los 20 mil hercios o ciclos por segundo), como en el infrasónico (frecuencia menor a 20 hercios) o el ultrasónico (frecuencia mayor a 20 mil hercios), como los delfines, las ballenas, los peces y los crustáceos, entre otros.

En el medio marino las ondas acústicas se propagan eficientemente, a una velocidad casi cuatro veces mayor que en aire; la luz no se propaga con igual facilidad, ya que se atenúa rápidamente en agua. Por ello,

muchos organismos marinos han evolucionado de forma que el sonido es su principal forma de comunicación e interacción con el ambiente.

Un grupo de estos organismos son los cetáceos: los misticetos (cetáceos con barbas o ballenas) y los odontocetos (cetáceos con dientes, grupo que incluye a los delfines, marsopas, cachalotes y zifios). Los sonidos que

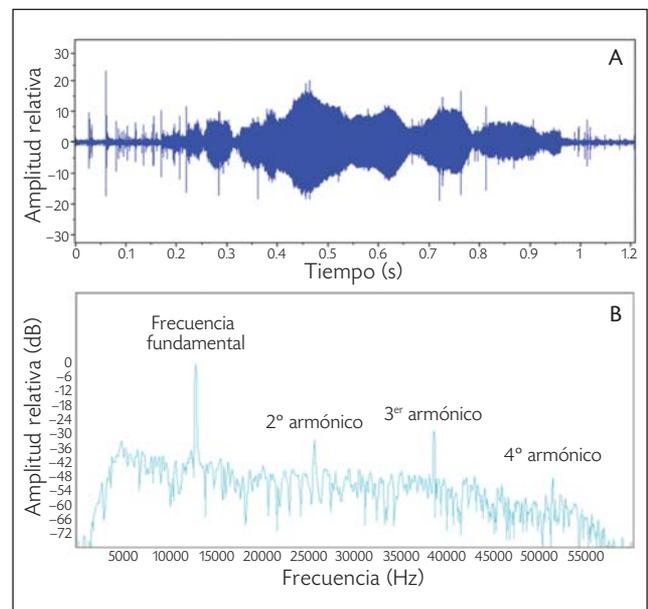
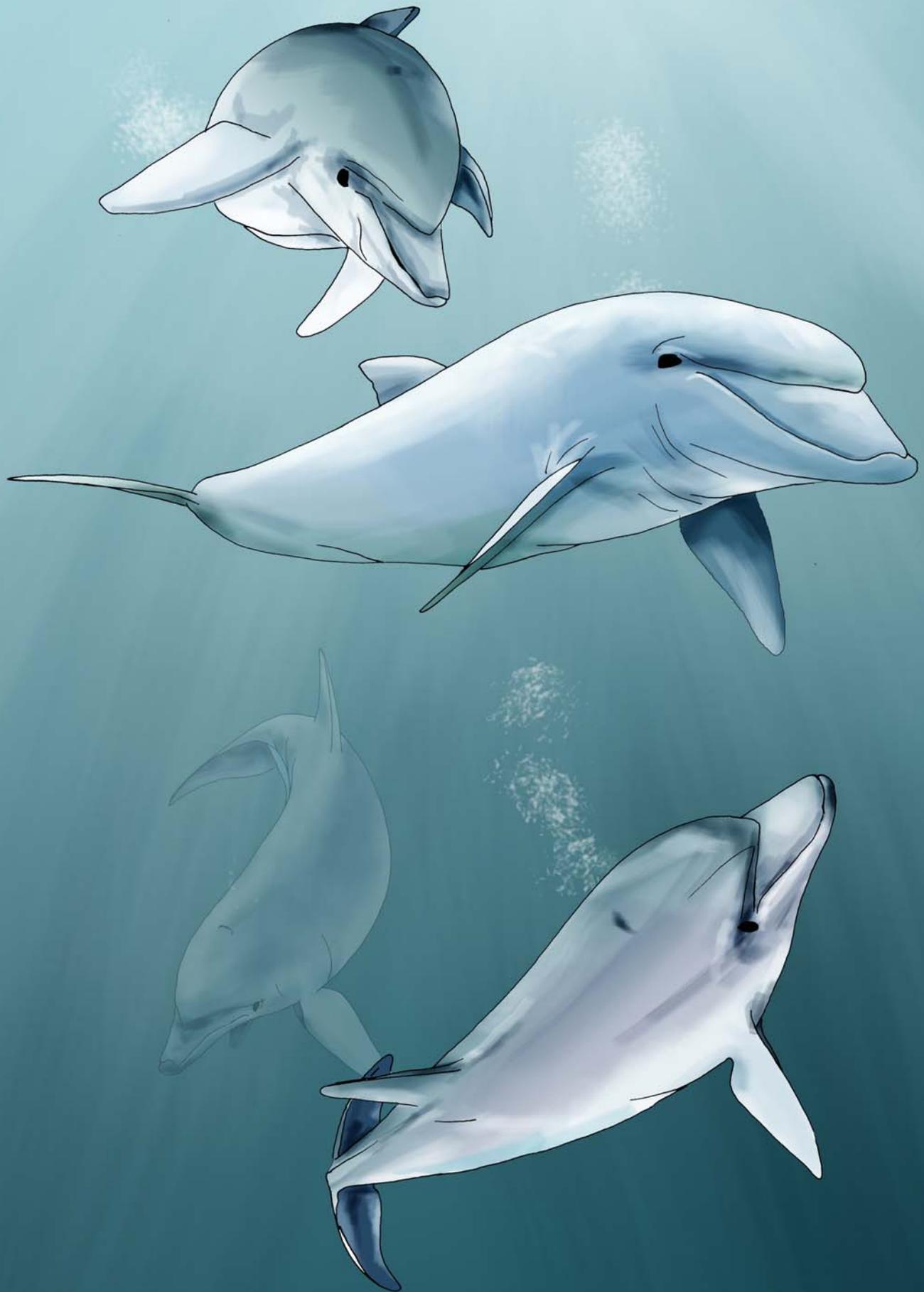


Figura 1. A) Oscilograma o forma de la onda del silbido de un delfín silvestre. B) Espectro promedio del mismo silbido, que muestra la amplitud relativa de la frecuencia fundamental y de tres armónicos. El oscilograma muestra la variación en la composición temporal de los sonidos y el espectro muestra la variación en su composición espectral.



emiten los cetáceos son una contribución importante al ruido ambiental del océano; van desde los 20 hercios (por ejemplo, las ballenas) hasta más de los 300 kilohercios (como los delfines y marsopas, aunque estos animales sólo los pueden escuchar hasta aproximadamente 150-200 kilohercios).

Las aproximadamente 80 especies de cetáceos conocidas son mamíferos que se readaptaron al medio acuático y se distribuyen desde los polos hasta el Ecuador, incluyendo ríos, lagos, estuarios y todos los océanos. Esto lo lograron por medio, entre otros, de la *telescopización* del cráneo (Figura 2A), adaptación en la que sus fosas nasales migraron hacia la parte superior de la cabeza para formar el respiráculo u orificio respiratorio. Particularmente se originaron nuevos órganos a nivel de la laringe en los odontocetos, como los delfines y las marsopas (Figura 2B) y como los cachalotes y los zifios, que les permitieron desarrollar el sentido acústico más especializado que se conoce. Los mysticetos carecen de cuerdas vocales y se desconoce cuál es su mecanismo de producción sonora.

Sonidos producidos por los delfines

Los delfines verdaderos pertenecen a la familia Delphinidae; los delfines de río, en cambio, pertenecen a las familias Platanistidae, Iniidae, Lipo-

tidae y Pontoporiidae. La familia Delphinidae incluye a los delfines más conocidos, como el tursiÓN o tonina (*Tursiops truncatus*) y la orca (*Orcinus orca*), así como a los delfines oceánicos, como los delfines comunes (*Delphinus* spp.) y las estenelas (*Stenella* spp.). Los delfines de río incluyen al boto (*Inia geoffrensis*) y al posiblemente extinto baiji (*Lipotes vexillifer*).

Los delfines producen dos tipos de sonidos o *fonaciones*: los silbidos y los chasquidos (Figura 3). Los silbidos son sonidos de frecuencia modulada (Figura 3A), casi omnidireccionales, con una duración entre 0.1 y 3.6 segundos, y con una frecuencia fundamental entre 1 y 35 kilohercios (Figuras 1 y 3A). Los silbidos contienen energía hasta los 80 kilohercios en sus armónicos (Figuras 1 y 3A) y tienen una intensidad en la fuente de 118 a 169 decibelios referidos a un micropascal –millonésimas de pascales– a un metro de la fuente. Parece ser que los silbidos solamente se utilizan en la comunicación entre individuos, para mantener contacto y coordinar sus movimientos, sugerencia que se fortalece debido a que algunas características de los silbidos se conservan cuando éstos viajan por el medio marino, lo cual sería útil si sirvieran como medio de comunicación.

Los chasquidos son señales direccionales (Figura 4A) que se emiten en “trenes”, uno después del otro, como una ametralladora (Figuras 3B y C). Se pueden

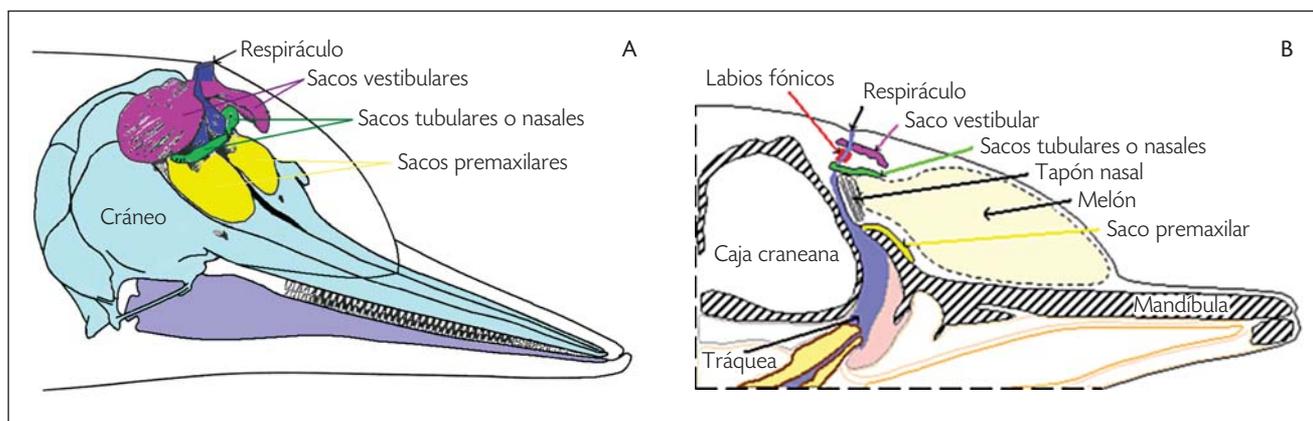


Figura 2. Dibujos esquemáticos de la cabeza de un delfín que muestran, en tres dimensiones: A) el sistema de sacos aéreos y el cráneo modificado por la telescopización (adaptado y reimpresso con autorización de Dormer, 1979 [*The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(1), 229-239]. Copyright 1979, American Institute of Physics); así como B) un corte lateral de la cabeza que muestra el espacio nasofaríngeo y señala la posición de los labios fónicos, que es con lo que producen sus fonaciones (adaptado de <http://members.cruzio.com/~jaroyan/Dolphin%20Model%204.htm>).

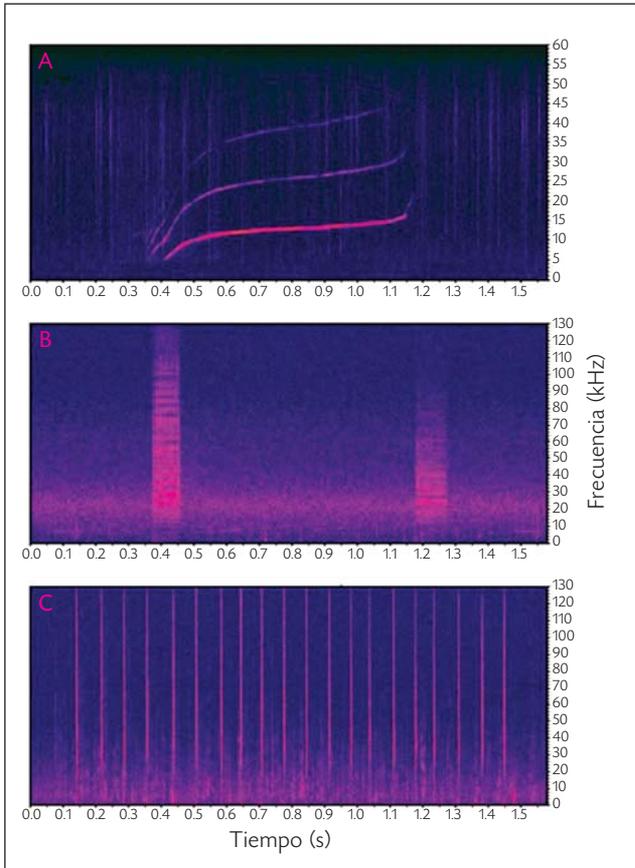


Figura 3. Espectrograma de las fonaciones de los delfines silvestres: A) un silbido consistente de su frecuencia fundamental y tres armónicos; B) dos chasquidos explosivos; y C) un tren de chasquidos de ecolocalización. El espectrograma muestra la variación tanto en la composición temporal como espectral de los sonidos. El silbido es el mismo que el mostrado en la Figura 1.

dividir en dos subcategorías, de acuerdo al intervalo entre chasquidos: chasquidos explosivos (con intervalos de 1.8 hasta 5.5 milisegundos –milésimas de segundo–; Figura 3B), y chasquidos de ecolocalización (con intervalos de 2.8 hasta 180 milisegundos; Figura 3C). Los chasquidos de ecolocalización son las fonaciones que más se han estudiado porque los delfines las utilizan como biosonar, para inspeccionar su ambiente. Son de muy corta duración (entre 9 y 70 microsegundos –millonésimas de segundo–; Figuras 3C y 4B), con frecuencias pico alrededor de los 106 y 250 kilohercios e intensidades desde 151 hasta 228 decibelios referidos a un micropascal a un metro de la fuente, y pueden ser uni o bimodales en su composición espectral (Figura 4C).

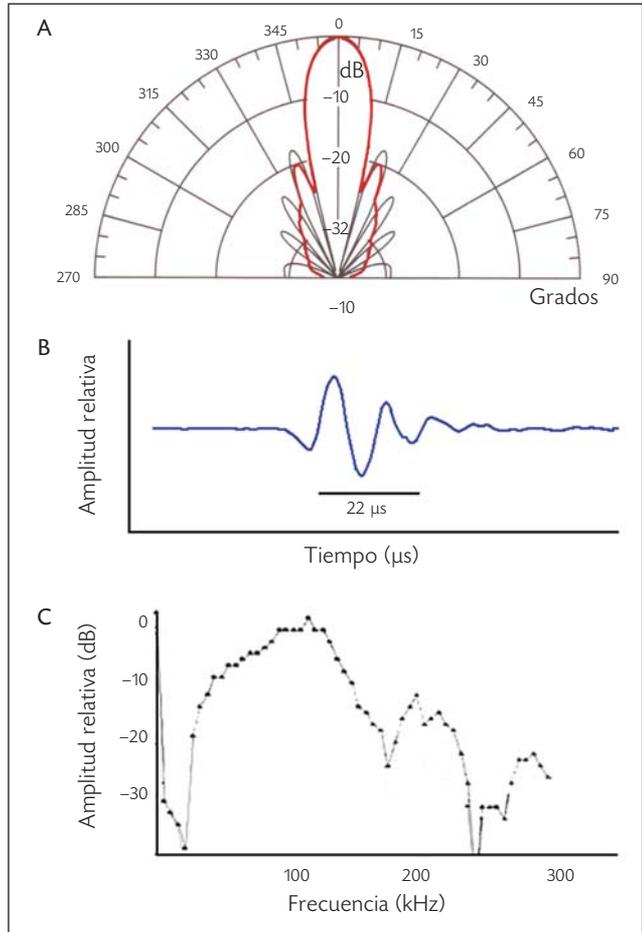


Figura 4. A) Patrón de radiación $H(q)$ de un disco circular con un radio de cuatro centímetros emitiendo una onda acarreadora (línea negra delgada) y un chasquido de ecolocalización simulado (línea roja gruesa) (de Au, 1993 [*The Sonar of Dolphins*, Nueva York, Springer, p. 111]. Reimpreso con autorización de la Springer Science Business Media. Copyright 1993, Springer-Verlag); B) oscilograma o forma de la onda; C) espectro de un chasquido de ecolocalización real bimodal (de Rasmussen y Miller, 2002 [*Aquatic Mammals*, 28(1), 78-89]).

Los chasquidos explosivos se diferencian de los de ecolocalización en que son menos intensos (214 decibelios referidos a un micropascal a un metro de la fuente) y tienen menor frecuencia pico (entre 20 y 58 kilohercios), menor ancho de banda (de 13 a 25 kilohercios) y un menor intervalo entre chasquidos (siempre menor a 6 milisegundos; Figura 3), por lo que el tiempo multiplicado por el ancho de banda (producto tiempo-ancho de banda) es distinto para cada tipo de chasquido.

Los chasquidos explosivos se producen durante comportamientos sociales, como las *interacciones ago-*

nísticas (peleas y acoso sexual, entre otros). Se pueden encontrar archivos de audio de los tres tipos de fonaciones producidas por los delfines en la página: www.everythingdolphins.com/SoundsPG.htm

¿Cómo producen los delfines sus fonaciones?

Desde 1979, utilizando estudios de cine-radiografía, confirmados en 1997 con videgrabación endoscópica de alta velocidad, se sabe que los delfines producen sus fonaciones mediante un mecanismo neumático en el espacio nasofaríngeo al vibrar los labios fónicos debido al paso de aire (Figura 2). Por eso es que los sonidos que producen se denominan “fonaciones”.

La producción de sonido también involucra el movimiento de las *bursas* (que incluyen los taponos nasales y el melón; Figura 2B) y el flujo de aire a través de los sacos aéreos (Figura 2), que sirven para controlar el flujo y recircular y almacenar el aire durante la producción de fonaciones. Este mecanismo podría ser aná-

logo al sonido que se produce cuando a un globo se le saca el aire tirando la apertura de los extremos.

Los delfines, como todos los mamíferos, tienen dos conductos nasales, por lo que también tienen dos complejos fónicos o conjuntos de estructuras anatómicas que producen sonidos (Figura 2); es decir, tienen dos pares de labios fónicos, dos sacos de cada tipo, dos taponos nasales, etcétera. Esto hace que los delfines puedan generar sonidos en sus dos complejos, simultánea o independientemente; los silbidos los producen sólo en el complejo izquierdo y los chasquidos en ambos complejos, aunque preferentemente en el derecho.

La presión en la cavidad nasal siempre aumenta inmediatamente antes de que ocurra una fonación, aunque no se mueven exactamente las mismas estructuras durante la producción de silbidos y chasquidos. La producción de silbidos requiere de un aumento en la presión dentro del espacio nasofaríngeo de al menos tres veces la presión necesaria para la producción de chasquidos de intensidad semejante.

Es probable que la producción de silbidos requiera una estructura del espacio nasofaríngeo particular por-



que no todas las especies de odontocetos producen silbidos (es el caso de las marsopas como la vaquita y los cachalotes). Tanto el cráneo como los complejos fónicos de la mayoría de las especies que producen silbidos son asimétricos: el complejo izquierdo es más grande que el derecho (hasta del doble del tamaño), mientras que en las especies que no silban los dos complejos fónicos son casi del mismo tamaño.

La uni o bimodalidad en la composición espectral de los chasquidos probablemente se deba a la asimetría en el espacio nasofaríngeo, ya que los chasquidos de un mismo organismo son muy semejantes entre sí. Las especies con complejos fónicos del mismo tamaño emiten chasquidos unimodales, mientras que las especies con complejos asimétricos emiten chasquidos bimodales (Figura 4C). Es posible que la producción de la secuencia de chasquidos explosivos y de algunos trenes de chasquidos de ecolocalización involucre el movimiento simultáneo de los dos complejos fónicos, ya que el intervalo entre chasquidos puede ser mucho menor que el intervalo entre disparos neuronales.

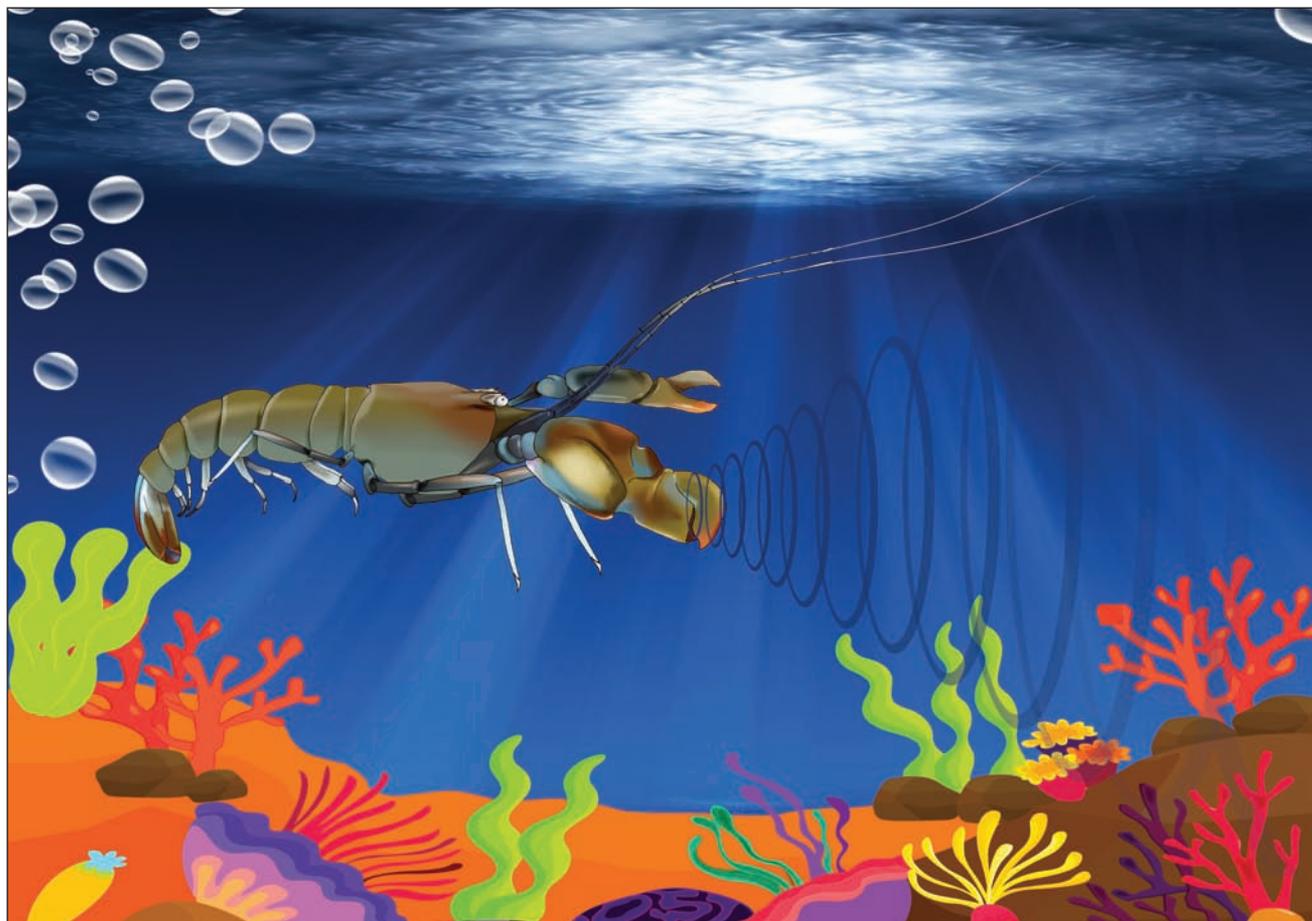
Se ha sugerido que el aire que pasa por los labios fónicos (Figura 2) produce un sonido omnidireccional que se transmite al agua a través de todos los tejidos de la cabeza (sonido de origen aéreo), mientras que la vibración del labio fónico debe acoplarse, mediante fenómenos de resonancia, a los tejidos adyacentes a él, como las bursas (Figura 2B), para producir un sonido direccional (sonido de origen tisular). El componente aéreo de la onda acústica tal vez representa el sonido de baja frecuencia generado y puede ser responsable principalmente de los silbidos, mientras que el componente tisular debe ser de alta frecuencia y puede ser el responsable de los chasquidos. El melón (Figura 2B) probablemente sea la estructura responsable de direccionar los chasquidos.

La clave para comprender cómo los odontocetos producen sus fonaciones e identificar la parte de la onda acústica que tiene origen aéreo y la que tiene origen tisular es estudiar la composición espectral de las fonaciones, así como el intervalo entre chasquidos y el producto tiempo-ancho de banda de los chasquidos, ya que el movimiento de las estructuras nasofaríngeas no es igual durante la producción de silbidos que durante la producción de chasquidos.

La clave para comprender cómo los odontocetos producen sus fonaciones e identificar la parte de la onda acústica que tiene origen aéreo y la que tiene origen tisular es estudiar la composición espectral de las fonaciones, así como el intervalo entre chasquidos y el producto tiempo-ancho de banda de los chasquidos



Los chasquidos de ecolocalización de los delfines se modelan como el sonido emitido por un disco circular de cuatro centímetros de diámetro (Figura 4A), modelo que también puede ser aplicado a los chasquidos de los cachalotes, los cuales tienen una anatomía del espacio nasofaríngeo muy diferente y emiten chasquidos con características muy distintas a las de los chasquidos de los delfines. Por ello, todos los odontocetos probablemente emitan sus fonaciones mediante un mecanismo similar, aunque tengan diferencias en su anatomía y sus fonaciones no sean exactamente iguales.



Sonidos producidos por el camarón tronador

Otros organismos marinos que generan una gran cantidad de sonido en aguas costeras son los crustáceos. Producen sonidos cuyas frecuencias van desde los 200 hercios (por ejemplo, los cangrejos) hasta más de 200 kilohercios (como el camarón tronador). El sonido generado por los camarones tronadores, o tronido, es de hecho el componente principal del ruido ambiental en aguas costeras tropicales y subtropicales: llega a tener una intensidad de hasta 80 decibelios referidos a un micropascal al cuadrado por hercio, ya que estos animales están presentes en grandes números, y por ende se producen tronidos constantemente. Estos sonidos se escuchan a más de un kilómetro de distancia, y en su conjunto asemejan el siseo que se escucha cuando se fríe comida en una sartén.

Los camarones tronadores habitan en aguas someras (con menos de 55 metros de profundidad) que

tienen corales, rocas o conglomerados de esponjas o bivalvos en el fondo donde los camarones pueden ocultarse. Son animales de unos pocos centímetros de largo y tienen una de las pinzas mucho más grande que la otra (ya sea la izquierda o la derecha; Figura 5A). Al cerrar rápidamente la parte móvil o *dactylus* de esta gran pinza (Figura 5B) es cuando se produce un tronido muy intenso.

De las 425 especies de camarones tronadores (familia Alpheidae), tres son las que producen los tronidos más intensos: *Alpheus heterochaelis* (la especie más grande; Figura 5), *Crangon californiensis* y *Synalpheus parneris*. Se cree que estos sonidos tienen una función relacionada con la defensa y para la depredación, así como para el apareamiento: se utilizan para paralizar y hasta para matar pequeñas presas que se ubican muy cerca del camarón tronador y también se producen durante las interacciones entre individuos. La actividad sonora de los camarones varía muy poco a lo largo

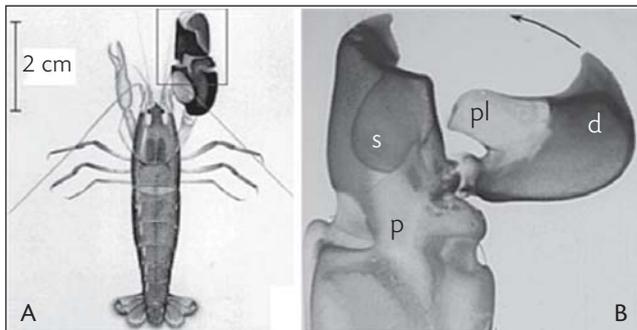


Figura 5. Fotografías de un camarón tronador *Alpheus heterochaelis* que muestran las dimensiones de la pinza o *chela* con la que producen los tronidos (A) y el detalle de la *chela* antes de cerrarse (B): émbolo protuberante (pl) en el dígito móvil o *dactylus* (d) y dígito fijo o *propodius* (p) en el cual se encaja el émbolo (s) (Versluis y col., 2000 [*Science*, 289(5487), 2114-2117]. Reimpreso con autorización de la AAAS).

del día (entre 3 y 9 decibelios de variación diaria); es máxima al amanecer y al anochecer, y más intensa durante la noche que durante el día.

¿Cómo produce el camarón tronador sus sonidos?

En un principio se pensaba que el tronido tan intenso se producía cuando los camarones cerraban su gran pinza y el dígito móvil o *dactylus* golpeaba la parte fija de la pinza, el *propodius* (Figura 5). Sin embargo, en 2000 un equipo de investigadores de la Universidad de Twente, Holanda, realizó la grabación del cierre de la pinza simultáneamente en audio y video con muy buen control temporal y se descubrió que era el violento colapso de una burbuja lo que producía el tronido.

Cuando el *dactylus* se cierra rápidamente en aproximadamente 0.6 milisegundos (con una velocidad angular inicial del orden de 100 radianes por segundo y una velocidad angular terminal de unos 3 mil 500 radianes por segundo), un chorro de agua fluye por la hendidura en el *propodius* a una velocidad muy grande, del orden de 25 metros por segundo, que la presión disminuye por debajo de la presión de vapor del agua (que es de dos mil pascales). Esto provoca que se forme una burbuja de cavitación de forma no esférica y alargada en la dirección del chorro de agua (Figura 6).

El agua de mar contiene microburbujas de aire llamadas núcleos (con un diámetro del orden de un micrómetro), las cuales probablemente se encuentren en la hendidura del *propodius* y puedan facilitar la formación de la burbuja al expandirse cuando disminuye súbitamente la presión en el chorro de agua. La burbuja de cavitación se expande en aproximadamente 0.375 milisegundos hasta un radio equivalente máximo de 3.5 milímetros y se colapsa violentamente en menos de 0.300 milisegundos a unos 3 milímetros de la pinza cuando la presión aumenta de nuevo, produciendo un sonido muy intenso y una nube de miniburbujas que terminan por disolverse (Figura 6).

Desde la apertura máxima del *dactylus* hasta el colapso de la burbuja transcurren entre 0.750 y 1.250 milisegundos. La onda de choque que se genera al colapsarse la burbuja es la que probablemente paraliza o mata a las presas que se encuentran a una distancia de menos de 3 milímetros de la pinza del camarón tronador, no el chorro de agua como se había descrito anteriormente. Como las interacciones intraespecíficas (entre camarones de la misma especie) se dan a

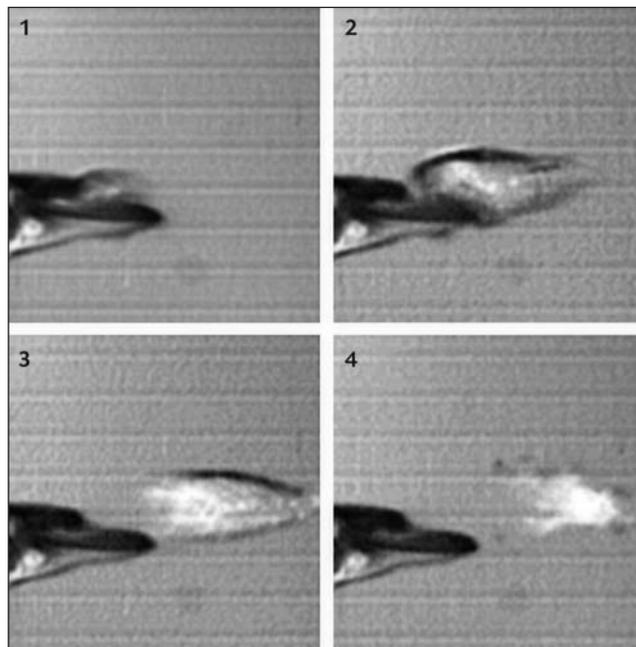


Figura 6. Secuencia de fotografías que muestran la formación de la burbuja cuando se cierra el *dactylus* (1) y el colapso de la burbuja que produce el tronido (4) (reimpreso con autorización de la Macmillan Publishers Ltd: *Nature* [Lohse y col., 2001, *Nature*, 413(6855), 477-478], copyright 2001).

una distancia promedio de 9 milímetros, no es probable que se dañe a los congéneres con la implosión.

El tronido producido es una onda acústica de muy corta duración, como un chasquido (Figura 7A). El chasquido principal o chasquido de mayor amplitud (Figura 7A, punto 3) ocurre cuando la burbuja se colapsa y dura entre 83 y 500 microsegundos. El chasquido precursor o chasquido de menor amplitud (Figura 7A, punto 2) se da cuando se cierra el *dactylus* y la burbuja sufre una expansión y una contracción.

Los tronidos contienen energía dentro de un ancho de banda grande, desde un kilohercio hasta más de 200 kilohercios (Figura 7B), con una frecuencia central entre los 32 y los 45 kilohercios. La intensidad máxima del tronido ocurre alrededor de 2 a 5 kilohercios (Figura 7B) y se asocia al chasquido precursor y a la porción descendente del chasquido principal. La energía contenida entre 80 y 200 kilohercios se asocia con las porciones ascendente y oscilatoria del chasquido principal. El chasquido principal tiene una intensidad en la fuente, que va desde 183 hasta 220 decibelios referidos a un micropascal a un metro de la fuente.

La duración, intensidad y energía de los tronidos, así como el tiempo entre el chasquido precursor y el principal dependen de la especie, probablemente por una diferencia en el tamaño del camarón y su pinza.

Sin embargo, los chasquidos producidos por un mismo individuo son muy semejantes entre sí y la variación en la intensidad de los tronidos de los organismos de una misma especie es de alrededor de 6 decibelios. Pueden encontrarse archivos de video y audio del mecanismo y el tronido producido por el camarón tronador en las páginas: www.sciencemag.org/feature/data/1052273.sh1 y pof.tnw.utwente.nl/3_research/files/3_gallery.html

Los tronidos de los camarones se modelan utilizando ecuaciones gaussianas para describir el cambio de la presión en el medio acuático y la dinámica de la burbuja formada (Figura 8A). Con estas ecuaciones se calcula la presión acústica de la onda generada (Figura 8B), la cual se asemeja a lo que se ha observado experimentalmente (Figura 7A).

La camaroluminiscencia

Cuando la burbuja se colapsa también se emite un destello luminoso intenso y muy corto (de menos de 10 nanosegundos –milmillonésimas de segundo–) (Figura 6), indicando que deben producirse grandes presiones y altas temperaturas dentro de la burbuja al momento del colapso. La emisión de luz durante la cavitación de una burbuja se ha asociado al hecho de que la burbuja que se colapsa no es esférica.

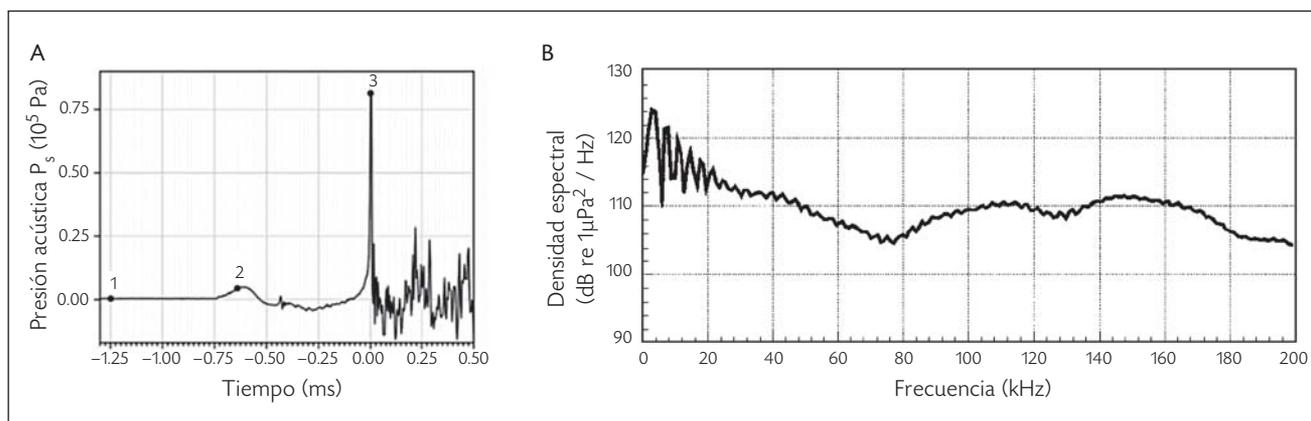


Figura 7. Representación gráfica del tronido producido por un camarón tronador: Oscilograma medido a una distancia de cuatro centímetros del camarón (A) (Versluis y col., 2000 [*Science*, 289(5487), 2114-2117]. Reimpreso con autorización de la AAAS) y espectro medido a una distancia de un metro del camarón (B) (reimpreso con autorización de Au y Banks, 1998 [*The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(1), 41-47]. Copyright 1998, American Institute of Physics). 1: *chela* completamente abierta; 2: *chela* completamente cerrada; 3: colapso de la burbuja.

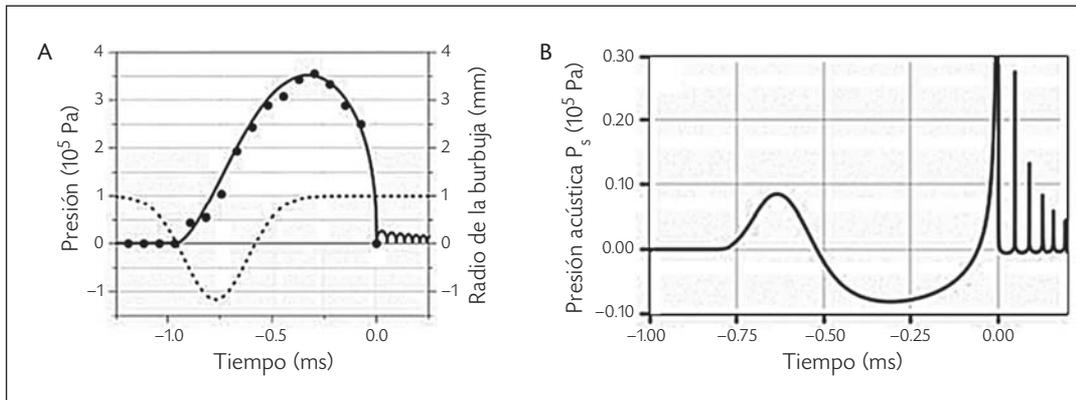


Figura 8. Cambio temporal estimado en el campo de presión en el medio acuático $P(t)$ (línea punteada) junto con el radio de la burbuja calculado como función del tiempo $R(t)$ (línea sólida) (A); y la presión acústica $P_s(r,t)$ calculada para $r = 4$ cm (B). El pico principal a $t = 0$ cuando $P_s = 2 \times 10^8$ Pa se trazó fuera de la escala para resaltar el pico precursor (Versluis y col., 2000 [*Science*, 289(5487), 2114-2117]. Reimpreso con autorización de la AAAS).

A este fenómeno se le denominó *camaroluminiscencia* (del inglés *shrimpoluminescence*) y se cree que es la primera observación de producción de luz por un organismo mediante este mecanismo. La camaroluminiscencia no puede detectarse a simple vista por el humano, por lo que probablemente no tenga ninguna relevancia biológica y sólo sea un subproducto del colapso de la burbuja. La producción de luz durante este evento es simplemente un indicador de lo violento del fenómeno.

Conclusiones: delfines vs. camarones

Con estos dos ejemplos de producción de sonido por fuentes biológicas puede apreciarse que los organismos marinos son capaces de producir ondas acústicas muy intensas con características acústicas muy uniformes.

La intensidad de los tronidos de los camarones es mayor que la de los chasquidos de los delfines y con un espectro mucho más amplio. Aunque un solo delfín es capaz de emitir cientos de chasquidos por segundo tanto para ecolocalizar como para comunicarse, varios camarones pueden emitir un número considerable de chasquidos por segundo. Los tronidos de los camarones probablemente son la onda acústica de origen biológico con mayor ancho espectral (variación menor a

20 decibelios para un intervalo de 200 kilohercios) (Figura 7B) y de mayor intensidad (desde 183 hasta 220 decibelios referidos a un micropascal a un metro de la fuente; al compararlos también con los sonidos producidos en aire por los murciélagos –sonidos con intensidades de hasta 120 decibelios referidos a 20 micropascales en aire, que son iguales a 182 decibelios referidos a un micropascal en agua).

Al hablar de los mecanismos de generación de ondas acústicas por los organismos marinos, también se señaló que son muy distintos. Los camarones emiten sonidos por medio de un fenómeno puramente físico (cavitación de una burbuja), mientras que los delfines emiten sonidos utilizando varios fenómenos físicos en sus distintas estructuras anatómicas. Por ende, los modelos matemáticos que se han hecho de los tronidos del camarón (Figura 8) son mucho más sencillos que los que se han hecho de las fonaciones de los delfines (Figura 4A): la complejidad del mecanismo de producción hace que los modelos matemáticos del fenómeno sonoro sean a su vez más complejos.

Es importante señalar que delfines y camarones cohabitan un mismo espacio marino en aguas costeras tropicales y subtropicales. Por su ancho de banda, intensidad y constancia, los tronidos de los camarones limitan el uso del sonar activo por los humanos y probablemente el del biosonar por los delfines, así como el estudio de los sonidos que producen otros organis-

mos marinos que habitan la misma región que los camarones tronadores.

Todo investigador que realice estudios en aguas costeras tropicales y subtropicales y quiera caracterizar el resto del ruido ambiental debe poder eliminar los tronidos de los camarones de sus grabaciones. El lograr esto es un verdadero reto, pero ¡los delfines lo realizan cotidianamente! Podría ser que los tronidos de los camarones puedan ser utilizados por los delfines para realizar lo que se ha denominado “visualización acústica” (en inglés *acoustic daylight imaging*): utilizar la dispersión de las ondas acústicas por los objetos que se encuentran en la columna de agua para generar una imagen visual de estos objetos (sonorización por el ruido ambiental).

Entonces, ¿cuál organismo hace mejor uso de la energía sonora en el ambiente marino? Para contestar esta pregunta es importante tomar en consideración que cuando se estudian las ondas acústicas presentes en un lugar y un momento dado no sólo debe caracterizarse la fuente y el fenómeno físico que las produce, como se mostró en esta síntesis, sino también es necesario considerar cómo se propaga entre la fuente y el lugar del océano donde se desee estudiarlos. Con ello se obtiene una visión global del uso del sonido por los organismos marinos, así como los posibles efectos que las acciones humanas que generan ondas acústicas, como el tráfico marítimo, el sonar y las explosiones, puedan tener sobre ellos.

Glosario

Armónico: Componente de una onda acústica periódica cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda.

Cetácea: Orden de los mamíferos marinos que incluye a los subórdenes Mysticeti (cetáceos con barbas o ballenas) y Odontoceti (cetáceos con dientes, que incluyen a los delfines, marsopas, cachalotes y zifios, entre otros).

Decibelio: Unidad adimensional de la intensidad de los sonidos, abreviado dB, y que equivale a la proporción entre la intensidad de dos sonidos de acuerdo a la relación $\text{dB} = 10 \log (I_1/I_0)$. En inglés, *decibel*. Por ser una relación, siempre debe darse el valor de referencia con el que fue calculado.

Ecocalizar: Determinar el lugar en el que se encuentra un objeto mediante el análisis de los ecos recibidos; es decir, localizar utilizando ecos.

Ecocalización: Acción y efecto de ecocalizar, de determinar el lugar en el que se encuentra un objeto mediante el análisis de los ecos recibidos.

Espectral: Aquello que está relacionado con la frecuencia de una onda.

Fonación: Sonido emitido por un organismo que involucra la vibración de alguna parte interna de su cuerpo, incluyendo las cuerdas vocales.

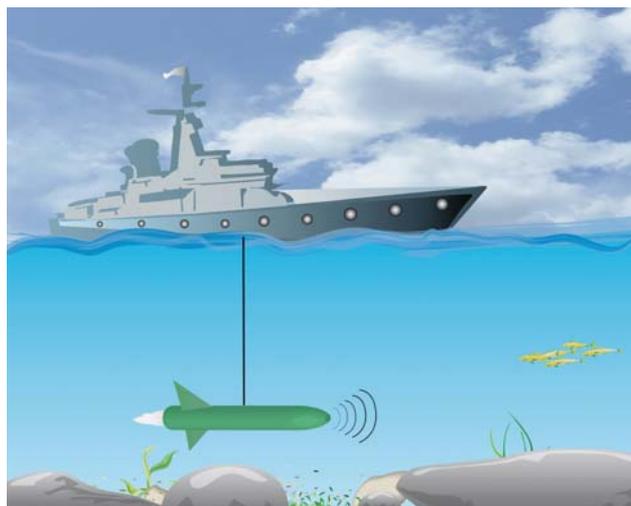
Hercio: Unidad de medida de la frecuencia de las ondas del Sistema Internacional, abreviado Hz. Es equivalente al número de ciclos por segundo que contiene la onda (s^{-1} o $1/\text{s}$). En inglés, *Hertz*.

Hidrófono: Un micrófono submarino que consiste en un transductor que detecta la presión en el agua y la convierte en energía eléctrica (medida como voltaje).

Omnidireccional: Aquello que tiene el mismo valor en cualquier dirección en la que se mida.

Radianes por segundo: Unidad de medida de la velocidad angular del Sistema Internacional que indica la velocidad de rotación de un cuerpo, abreviado rad/s (radián = $180 \text{ grados} / \pi$; 1 radián = 57.295 grados). Es equivalente a un s^{-1} (o $1/\text{s}$), ya que el radián es una unidad adimensional.

Sonar: Acrónimo del inglés *SOund NAvigation and Ranging*. Aparato o técnica que utiliza la ecocalización y la propagación del sonido en el agua para detectar, localizar y caracterizar objetos sumergidos. Existen dos tipos



de sonares: los activos (que emiten sonidos y reciben sus ecos) y los pasivos (que únicamente reciben los sonidos producidos por las fuentes).

Telescopización: Proceso mediante el cual se alargó el rostro de los cetáceos y las fosas nasales o narinas se desplazaron a la parte superior del cráneo: 1) Los huesos nasales migraron a la parte superior del cráneo; 2) los huesos premaxilares y maxilares se alargaron hacia la parte superior del cráneo para mantener su posición relativa a los huesos nasales y hacia el frente para formar la punta del rostro; 3) la mandíbula también se alargó para formar la punta del rostro; y 4) los huesos frontales, temporales, parietales y occipital se comprimieron y encimaron en la parte posterior del cráneo. Así, todo el rostro de los delfines es su “hocico”, ya que los huesos que conforman su cara son los huesos premaxilares, maxilares y la mandíbula.

Carmen Bazúa Durán es profesora asociada en el Laboratorio de Acústica del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y se encuentra formando el grupo de bioacústica y acústica marina en el mismo departamento. Es ingeniera química por la Facultad de Química de la UNAM, maestra en ciencias del mar por la misma Universidad y doctora en oceanografía por la Universidad de Hawai`i en Manoa, EE.UU. Sus líneas de investigación son la bioacústica en mamíferos, principalmente en delfines, y la acústica marina, principalmente la acústica en aguas costeras. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

bazua@unam.mx

Bibliografía

- Au, W. W. L. (1993), *The sonar of dolphins*, Nueva York, Springer, 277 pp.
- Au, W. W. L. y K. Banks (1998), “The acoustics of the snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in Kaneohe Bay”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(1), 41-47.
- Cranford, T. W. y M. E. Amundin (2008), “Biosonar pulse production in odontocetes: the state of our knowledge”, en Thomas, J. A., C. F. Moss y M. Vater (compiladores), *Echolocation in bats and dolphins*, Chicago, The University of Chicago Press, pp. 27-35.
- Lohse, D., B. Schmitz y M. Versluis (2001), “Snapping shrimp make flashing bubbles”, *Nature*, 413(6855), 477-478.
- Lurton, X. (2004), *An introduction to underwater acoustics. Principles and applications*, Heidelberg, Praxis, 347 pp.
- Rasmussen, M. H., M. Lammers, K. Beedholm y L. A. Miller (2006), “Source levels and harmonic content of whistles in white-beaked dolphins (*Lagenorhynchus albirostris*)”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(1), 510-517.
- Schmitz, B. (2002), “Sound production in Crustacea with special reference to the Alpheidae”, en K. Wiese (compilador), *The crustacean nervous system*, Berlin-Heidelberg, Springer, pp. 536-547.
- Versluis, M., B. Schmitz, A. von der Heydt y D. Lohse (2000), “How snapping shrimp snap: through cavitating bubbles”, *Science*, 289(5487), 2114-2117.

