

Comportamiento acústico de la Bulla Timpánica en el *Tursiops Truncatus*



R. Carbó

Adriana C. Molero* y Rafael Carbó**

* *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization Vienna International Centre.*
P.O. Box 1200A-1400 Vienna [e-mail:Adriana.Molero.Alonso@ctbto.org](mailto:Adriana.Molero.Alonso@ctbto.org)

** *Instituto de Acústica, CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid, Spain,*
[e-mail: iaccf31@ia.cetef.csic.es](mailto:iaccf31@ia.cetef.csic.es)

PACS: 43.80.Sh

Resumen

El oído de los mamíferos marinos tiene una constitución similar a la de los mamíferos terrestres. El sonido se transmite a la cóclea vía la membrana timpánica y el mecanismo óseo del oído medio. En los delfines el sonido entra en su cabeza a través de la mandíbula por su parte posterior mas delgada y se transmite por un canal graso a la bulla timpánica que es un hueso que encierra el oído medio y el oído interno. Se han realizado estudios experimentales, en tanque de agua, del nivel de retrodifusión (backscattering) de las ondas acústicas, así como del tiempo de llegada de la onda retrodifundida en función de la posición angular de la bulla timpánica, la respuesta en frecuencia y el nivel de blanco. La respuesta en frecuencia de la retrodifusión evidencia la geometría irregular de la bulla comparada con la de una esfera de las mismas dimensiones.

Abstract

The hear in the marine mammals is constructed on similar principles to that of the terrestrial mammals, with sound being transmitted to the cochlea via the tympanic membrane and the auditory ossicular mechanism. In dolphins the sound enters the head through the thinned posterior portion of the mandible and is transmitted via a fat-filled canal to the tympanic bulla a bone which contains the middle and inner he-

ars. Backscattering experiments in a water tank have been carried out to study the angular time arrival, the frequency response and the target strength of the tympanic bulla. Backscattering frequency response evidences the irregular geometry of the bulla comparing with a spherical scatter of the same size.

Introducción

Varios órganos están implicados como sensores del sonido en la vida acuática. La vejiga natatoria es especialmente importante en esta función para aquellos peces que poseen una. El movimiento de la pared de la vejiga natatoria en respuesta a la onda sonora se transmite a los otolitos cuya función ha sido descrita por Fay y Popper [1]. También hay pelillos acústicamente sensibles en la línea lateral y estructuras laberínticas que responden al campo acústico circundante relativo al cuerpo del pez. Por el contrario en los mamíferos marinos el oído está constituido de manera similar al de sus “parientes” terrestres, transmitiendo el sonido a la cóclea vía la membrana timpánica y el mecanismo óseo del oído medio.

La sensibilidad al sonido de los peces ha sido objeto de muchos trabajos experimentales. Repitiendo los experimentos con el mismo pez con impulsos de distintas frecuencias se puede construir un audiograma, que es una gráfica del umbral de audición para cada frecuencia. Mac

Lennan and Simmonds [2] muestran algunos ejemplos. Los mamíferos marinos son particularmente sensibles al sonido sobre un gran margen de frecuencias. El *Tursiops truncatus* tiene una sensibilidad máxima de 42 dB re. 1 μ Pa en una banda de frecuencias que va desde 15 a 110 kHz y el límite de audición en altas frecuencias llega a los 150 kHz (Au [3]). Mientras que la mayoría de los peces presentan en comparación una audición mucho más pobre (>60 dB re. 1 μ Pa) y la sensibilidad está limitada por debajo de los 5 kHz.

Una teoría bastante aceptada sobre como se produce el fenómeno de la audición en los delfines sugiere que el sonido entra a la cabeza del delfín a través de la delgada parte posterior de la mandíbula y se transmite por el canal lleno de una sustancia grasa a la bula timpánica, un hueso que contiene el oído medio y el oído interior (Norris [4]). Los especímenes de bula timpánica derecha e izquierda usados en este trabajo (fig. 1) fueron extraídos de un macho joven de *Tursiops truncatus*. Se ha medido las características acústicas del hueso que forma la bula timpánica: la velocidad media del sonido es de 4900 m/s y la densidad de 2420 kg/m³.

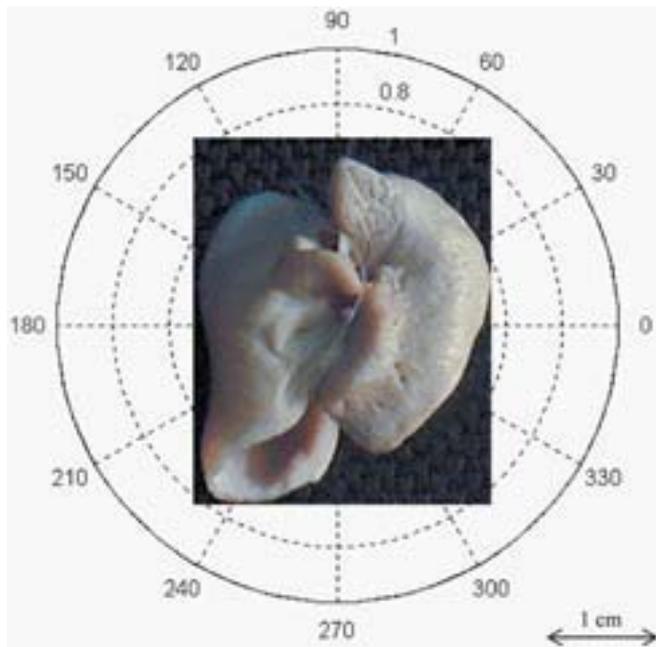


Fig. 1. Posición angular de la bula timpánica durante las experiencias.

Los experimentos de retrodifusión llevados a cabo en el tanque de agua para estudiar el comportamiento acústico de la bula timpánica evidencian la geometría irregular de su superficie por comparación de su respuesta en frecuencias con la de una esfera elástica hueca llena de agua de radio equivalente.

Dispositivo experimental

Las experiencias se han realizado en un tanque de agua (1.1 m de largo por 0.7 m de ancho y 0.9 m de profundo). En el eje principal del tanque se ha colocado la bula timpánica en el campo lejano del haz acústico radiado por un transductor. La bula está suspendida con un hilo de nailon muy fino y puede girar alrededor del eje del hilo. El campo acústico retrodifundido se mide con un hidrófono colocado junto al transductor.

Se ha tenido un cuidado especial con las siguientes consideraciones:

a) La distancia entre el transductor y la bula ($R=0.5$ m) es mayor que el campo próximo del transductor.

La frecuencia central del impulso radiado por el transductor es de 945 kHz (fig. 2b), la longitud de onda en agua es $\lambda=1.6$ mm y el tamaño de la superficie radiante del transductor es $d=24$ mm. Por tanto el campo próximo del transductor alcanza hasta $d^2/\lambda = 0.384$ m.

b) La bula está centrada en el eje principal de radiación del transductor, y el haz acústico que radia insonoriza completamente la sección transversal de la bula.

La dimensión mayor de la bula timpánica en un *Tursiops truncatus* es menor de 3 cm. El ángulo de apertura del haz radiado es de 5.3° para una caída de 6 dB, por tanto a la distancia $R=0.5$ m el diámetro del área insonorizada es de 9 cm, cubriendo toda la superficie de la bula timpánica.

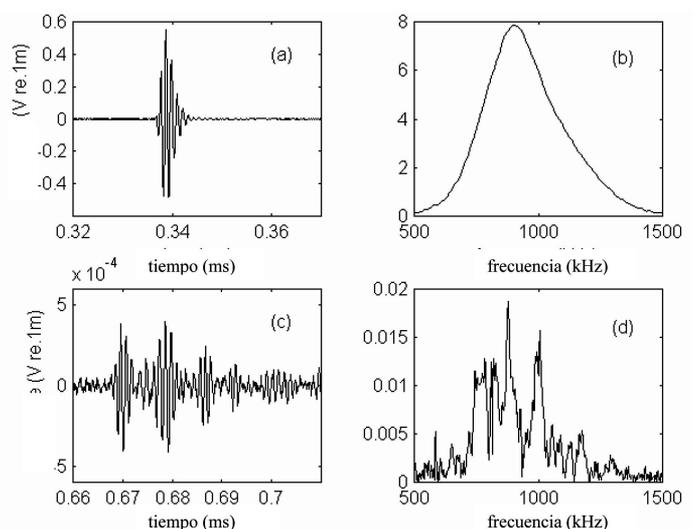


Fig. 2. a) Impulso transmitido, b) respuesta en frecuencias de los transductores, c) impulso retrodifundido por la bula timpánica, y d) su respuesta en frecuencias.

c) La bulla permanece dentro de la zona de Fresnel cuyo radio es $r = (\lambda R/2)^{1/2} \approx 0.02\text{m}$ mayor que la mitad de la máxima dimensión de la bulla.

d) La duración del impulso es lo mas corta posible para poder separar el eco de la bulla de otros ecos de las paredes del tanque, e incluso separar los ecos provenientes de las diferentes partes de la bulla. Se ha usado un impulso con duración de $5 \mu\text{s}$ (fig. 2.a), por lo tanto es posible discriminar fácilmente 3.8 mm .

Resultados

El eco de la bulla timpánica está formado por una sucesión de ecos simples con diferente amplitud y retardados en el tiempo (fig. 2c). La estructura del eco corresponde a un blanco con superficie rugosa y tamaño mayor que la longitud de onda, donde varias zonas de la superficie de la bulla mas o menos alejadas del transductor reflejan la onda incidente. El fenómeno de la resonancia es posible con ondas que viajan alrededor de la bulla (ondas superficiales), o con ondas transmitidas en el interior de la bulla. La figura 2.d. muestra varias resonancias en el espectro del eco.

Usando la transformada de Hilbert se han obtenido las envolventes de los ecos. La figura 3 muestra una representación tiempo-ángulo de la envolvente del eco para cada posición angular de la bulla respecto del eje del transductor.

Hay algunas posiciones de la bulla en las que el primer eco no es el eco de mayor amplitud (fig.4 , $\theta = 340^\circ$), porque en esa posición la mayor sección acústica trasversal no es la que presenta la zona de superficie de la bulla mas próxima al

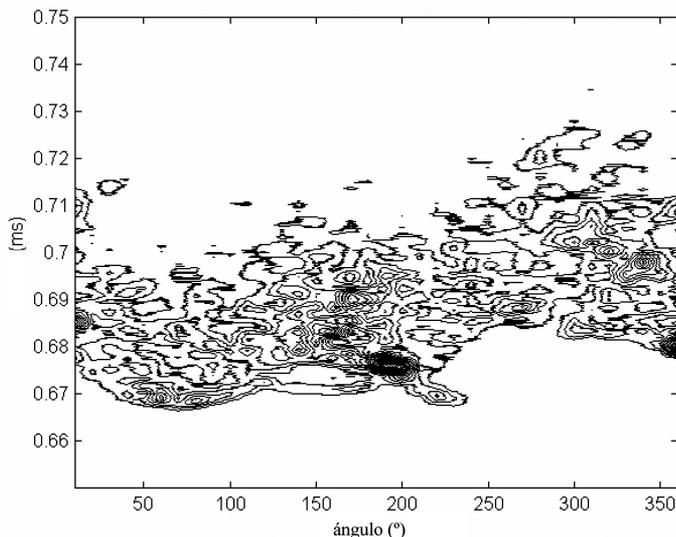


Fig. 3 Curvas de nivel de las envolventes de los ecos. Posición angular de 0° a 360° .

transductor. Por el contrario hay otras posiciones angulares en las que el primer eco es el de mayor amplitud (fig.4, $\theta = 180^\circ$) dando una retrodifusión similar a la de una esfera (Carbó y Molero, [5]). Es posible llevar a cabo una reconstrucción geométrica de la bulla usando el análisis de la dependencia con el ángulo del tiempo de llegada del eco retrodifundido cuando el impulso ultrasonoro es mucho mas corto que el tamaño de la bulla.

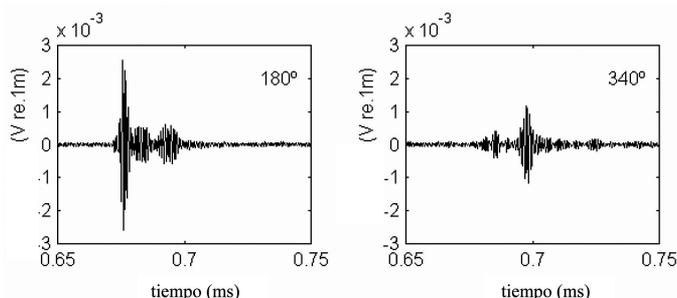


Fig. 4 Impulsos retrodifundidos por la bulla timpánica en dos posiciones angulares distintas.

El nivel de blanco es una medida en escala logarítmica de la porción de intensidad de la onda incidente que es retrodifundida por el blanco (Medwin and Clay [6]). Para entender la naturaleza del nivel de blanco, es mejor empezar con la sección acústica trasversal de retrodifusión σ_b , que se mide en unidades de área, y está definida en términos de las intensidades de las ondas incidente y retrodifundida

$$\sigma_b = R^2 I_b / I_i$$

donde I_i es la intensidad del impulso incidente sobre el blanco e I_b la intensidad del impulso retrodifundido. I_b dependerá de la distancia R del blanco a la que se mide la intensidad, R será suficientemente grande para estar fuera del campo próximo del blanco. Esto significa que R tiene que ser mucho mayor que el tamaño del blanco.

El nivel de blanco es la sección acústica trasversal de retrodifusión expresada en decibelios de acuerdo con la expresión:

$$TS = 10 \log(\sigma_b)$$

Esta ecuación de nivel de blanco es rigurosamente correcta solo para el caso de transmisión continua con amplitud constante. Cuando la transmisión es en impulsos de duración finita el nivel de blanco se puede calcular como:

$$TS = 10 \log \left[R^2 \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} S(t)^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} S_0(t)^2 dt} \right) \right]$$

donde la amplitud del impulso transmitido S_0 y la del eco S están referidas a la misma distancia (1 m), y t_2-t_1 son los tiempos que cubren toda la duración del eco difundido por la bulla.

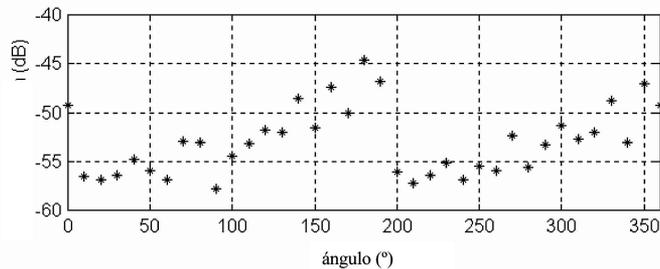


Fig. 5 Nivel de blanco de la bulla timpánica en función de la posición angular.

En la figura 5 se puede observar la gran variación encontrada del nivel de blanco con la posición angular. El nivel de blanco máximo es de -44.8 dB para 180° y el mínimo es de -57.5 dB para 90° . Dos posiciones angulares de la bulla, 180° y 350° , dan el mayor nivel de blanco -45 dB y -46.5 dB, como consecuencia de la mayor sección acústica trasversal en estas posiciones.

El ancho de banda del transductor permite medir la respuesta en frecuencias de un blanco con adecuada precisión desde 700 a 1300 kHz. Así se ha podido obtener la dependencia con la frecuencia de la onda retrodifundida para la posición de 180° (fig.6) por Transformada Rápida de Fourier (FFT), comparando el espectro del eco con el espectro del impulso transmitido según: $20 \log (\text{FFT}(S_0)/\text{FFT}(S))$, donde la amplitud del impulso transmitido y la del eco están referidas a la misma distancia de 1 m.

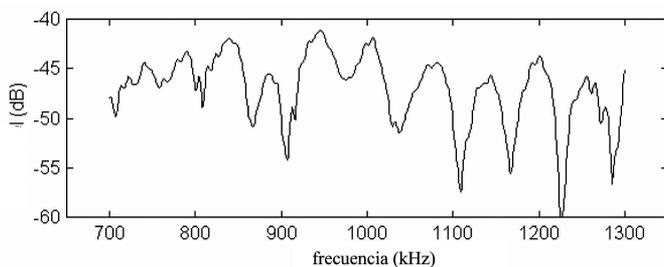


Fig. 6 Variación del nivel de blanco con la frecuencia para la posición angular de la bulla timpánica de 0° .

Varios mínimos aparecen en la respuesta en frecuencias. La separación aproximada entre dos mínimos consecutivos es de unos 60 kHz. Una respuesta en frecuencias equivalente es la que daría una esfera hueca llena de agua con 1.2 cm de diámetro y pared muy fina (Hickling [7]). Este resultado está de acuerdo con la geometría de la bulla timpánica en la posición angular de 180° : una concha ósea con superficie lisa y espesor de 1 mm cubriendo una

cavidad con agua de aproximadamente 1 a 1.2 cm de profundidad.

La figura 7 muestra cuanto cambia la respuesta en frecuencias de la bulla timpánica con la posición angular. Varias resonancias aparecen a las frecuencias de 810, 920 y 1000 kHz para bastantes ángulos, pero las frecuencias de otras resonancias varían con la posición angular. Las frecuencias de las resonancias son aproximadamente múltiplos de 100 kHz. Se puede relacionar este hecho con que la frecuencia central del espectro de los sonidos emitidos por los delfines es de 100 kHz (Au [3]) y que la máxima sensibilidad en la audición de los delfines *Tursiops truncatus* está también próxima a los 100 kHz (Jonstone [8]).

Se ha llevado a cabo el mismo procedimiento experimental con la bulla timpánica izquierda y derecha obteniéndose idénticos resultados en posiciones simétricas.

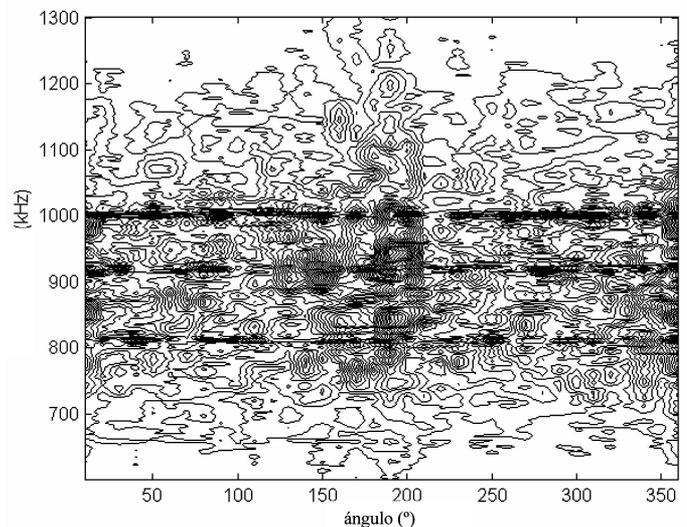


Fig. 7 Respuesta en retrodifusión con la frecuencia y con la posición angular de la bulla timpánica.

Conclusiones

La bulla timpánica es un hueso que contiene el oído medio e interno. Se han hecho medidas experimentales en tanque de agua para estudiar su respuesta en frecuencias. Transductores de banda ancha nos han permitido medir esta respuesta en frecuencias con precisión adecuada entre 700 y 1300 kHz. Se ha medido la dependencia con la frecuencia del nivel de blanco comparando frecuencia a frecuencia el espectro del impulso transmitido con el espectro del impulso retrodifundido. La respuesta en frecuencias de retrodifusión muestra varias resonancias y evidencia su geometría irregular en la variación de la respuesta angular comparada con la de una esfera. La variación angular del nivel de blanco que

produce la bulla timpánica va desde los -44.8 dB a los -57.5 dB ref. $1 \mu\text{Pa}$. La posición angular de 180° da una respuesta en frecuencias de la bulla que está en buen acuerdo con la de una esfera ósea hueca con igual espesor y similar un volumen de agua en su interior. Por último se ha obtenido una singular coincidencia entre la frecuencia de resonancia de la bulla, la frecuencia central del sonido emitido por el delfín *Tursiops truncatus* y el máximo de sensibilidad auditiva de este mamífero marino.

REFERENCIAS

- [1] Fay R.R. and Popper A.N. - 1980. Structure and function in teleost auditory systems. In: *Comparative studies of hearing in vertebrates*, pp.1-42 Springer Verlag, New York.
- [2] Mac Lennan D.N. and Simmonds E.J. - 1992. Fisheries Acoustics, pp.92-96 Chapman & Hall, London
- [3] Au W.W.L. - 1993. The Sonar of Dolphins, pp. 32-57. Springer-Verlag, New York.
- [4] Norris K.S. - 1968. The evolution of acoustic mechanisms in odontocete cetaceans. In: E.T. Drake (eds). *Evolution and environment*, pp. 297-324. New Haven, Yale University Press.
- [5] Carbó R. and Molero A.C. - 2000. Field scattering from a large sphere. Experimental study and geometrical approximation. *Proceedings of the fifth European Conference on Underwater Acoustics*. Vol.2, pp.923-929. Ed. M.E. Zakharia.
- [6] Medwin H. and Clay C.S. - 1998. Fundamentals of Acoustical Oceanography, pp. 237-240. Academic Press, New York.
- [7] Hickling R. - 1964. Analysis of echoes from a hollow metallic sphere in water. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol.39, pp. 276-279.
- [8] Johnstobe C.G. - 1967. Sound detection threshold in marine mammals. *Marine Bioacoustics* . Vol.2, pp. 247-260. Ed. W.N. Tavolga, Pergamon Press New York.

Acústica ambiental

- Sonómetros
- Analisadores de ruído e vibrações.
- Sistemas de medida de isolamento acústico.
- Sistemas multicanal para acústica avançada.
- Micrófones e transdutores.
- Software de simulação, predição e mapas de ruído.

01dB

G.R.A.S.

HEAD ACOUSTICS

RION



La línea más completa en software de



Predicción Acústica

Soluciones a sus necesidades en acústica ambiental, industrial y arquitectónica, acordes con la normativa vigente

Ponemos a su alcance las herramientas más avanzadas en el campo de la modelización acústica:

Predicción y control del ruido ambiental en pequeñas y grandes ciudades producido por:

- ◆ Tráfico
- ◆ Industria
- ◆ Ferrocarril
- ◆ Aeropuertos
- ◆ Mapas de población expuesta al ruido
- ◆ Optimización de medidas preventivas y/o correctoras

Acústica Industrial:

- ◆ Ruido transmitido por máquinas
- ◆ Evaluación de soluciones acústicas en fábricas

Aislamiento y acondicionamiento acústico de salas:

- ◆ Cálculo de predicción de aislamiento de materiales
- ◆ Cálculo de tiempos de reverberación, claridad, espaciosidad, etc.
- ◆ Diseño acústico de salas de concierto
- ◆ Auralización de eventos sonoros.

**Modelización avanzada:
Creación de paisajes sonoros 3D (sonido binaural).**



MADRID. Tel. 91 567 9700
BARCELONA. Tel. 93 459 4250
ZARAGOZA. Tel. 976 200 969
LISBOA. Tel. 21 421 7472

www.alava-ing.es
alava@alava-ing.es



E201612